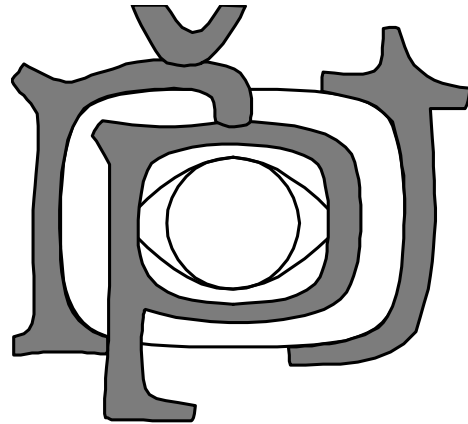
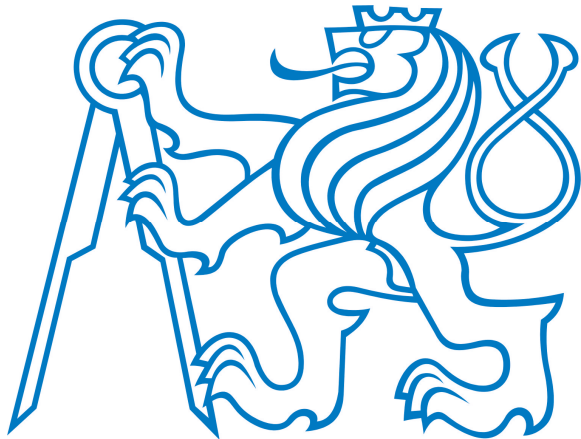


**ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ A ŘÍDICÍ TECHNIKY
ČESKÉHO VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO
V PRAZE**



Sborník příspěvků ze setkání

SEKEL 2007

a

***PRINCIPIA
CYBERNETICA 2007***

**3. – 5. ZÁŘÍ 2007
FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE, ČESKÁ REPUBLIKA**

Obsah

Příspěvky PRINCIPIA CYBERNETICA 2007

BALARA, M.: THE ROBOT'S SERVO ROBUSTIFICATION	6
BALARA, M.: THE ROTARY ACTUATORS WITH PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLES	14
BALARA, M.: LOŽISKOVÝ REDUKTOR A JEHO MATEMATICKÝ MODEL	26
BALARA, M.: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY LOŽISKOVÉHO REDUKTORA	32
BALARA, M.: THE LINEAR AND NONLINEAR MATHEMATICAL MODEL OF THE HARMONIC TRANSMISION	36
BLAŽEK, J.: ÚLOHA ŘÍZENÍ TOČIVÉHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	42
JANČÍKOVÁ, Z., ŠVEC, P., ŠPIČKA, I., HEGER, M.: VYUŽITÍ PRVKŮ UMĚLÉ INTELIGENCE PRO PREDIKCI VAD KOVÁRENSKÝCH INGOTU	46
KOLAJA, J.: ŘÍZENÍ DVOJICE LINEÁRNÍCH HYDROMOTORŮ V TANDEMU – PŘEHLED PROVEDENÝCH PRACÍ	51
LÍŠKA, O., MIHALÍKOVÁ, J.: PROGRAM COSIMIR® PROFESSIONAL URČENÝ PRE VÝUČBU AUTOMATIZÁCIE	57
MOUČKA, M.: MODEL TERMODYNAMICKÝCH PROCESU	64
PITEL', J.: SIMULÁCIA PRINCÍPU ČINNOSTI AKTUÁTORA NA BÁZE PNEUMATICKÝCH UMELÝCH SVALOV	67
ŠEMINSKÝ, J.: VIRTUÁLNE PROJEKTOVANIE AUTOMATIZOVANÝCH VÝROBNÝCH SYSTÉMOV	72

Příspěvky SEKEL 2007

DUDEK, J.: ZKUŠENOSTI ZE ZAVÁDĚNÍ ELEKTRONICKÝCH TESTU VE VÝUCE DENNÍ A KOMBINOVÉ FORMY STUDIA V PŘEDMĚTECH ELEKTROTECHNIKA I. A ELEKTROTECHNIKA II	75
DVORÁKOVÁ, I.: ŠUMOVÁ ANALÝZA OPERAČNÍHO ZESILOVAČE	79
GOŇA, S.: INOVACE VÝUKY PŘEDMĚTU SPECIÁLNÍ BEZPEČNOSTNÍ TECHNOLOGIE	87
HAMMER, M.: MODERNIZACE VÝUKY ELEKTROTECHNIKY NA FAKULTĚ STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNE	93
HRUBÝ, D., GÉCI, T.: NÁVRH MODULÁRNEHO DATALOGERA NA DLHODOBÉ TERÉNNE MERANIA NEELEKTRICKÝCH VELICÍN	99
HRUBÝ, D., BYSTRIANSKY, P., PALKOVÁ, Z.: APLIKÁCIA FOTOVOLTAICKÉHO SOLÁRNEHO SYSTÉMU V ZÁVLAHOVOM ZARIADENÍ	104
CHYSKÝ, J.: MODEL PASTERAČNÍ LINKY	109
KAŇUCH, J.: HISTORICKÝ VÝVOJ A SÚČASNOST JEDNOSMERNÉHO MOTORA	115
KOCMAN, S.: ELIMINACE HARMONICKÝCH VÍCEPULZNÍMI ZAPOJENÍMI USMERNOVACU	126
KOLÁŘ, V., BRÁZDA, R.: VYHODNOCOVÁNÍ KOEFICIENTU VNITŘNÍHO A VNĚJŠÍHO TŘENÍ SYPKÝCH HMOT POMOCÍ PC	130
KOSTELNÝ, M.: INTERAKTÍVNE NÁSTROJE E - LEARNINGOVÉHO MODULU ELEKTRICKÉ STROJE	133
KÜNZEL, G.: MODEL Y VIBRAČÍ ELEKTRICKÝCH STROJU	141
KÜNZEL, G.: METODA VAZEBNÍCH GRAFU V ELEKTROMECHANICKÝCH OBVODECH	149

LUKÁČ, O., OLEJÁR, M., HRUBÝ, D. :	157
VOLBA PERIÓDY VZORKOVANIA A METÓD APROXIMÁCIE INTEGRÁLU A DERIVÁCIE V ZÁVISLOSTI NA KVALITE RIADENIA PSD REGULÁTORA	
MAKOVÍNÝ, I.:	163
DREVO Z ASPEKTU ELEKTROTECHNICKÝCH MATERIÁLOV	
MLČÁK, T., MINAŘÍK, D.:	166
DODÁVKA ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKU	
NAVRÁTIL, M., KŘESÍLEK, V.:	168
MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VÍCEVRSTVÝCH SYSTÉMU ZAMĚŘENÉ NA REFLEKTANCI POVRCHU V MIKROVLNNÉ OBLASTI SPEKTRA PRO VOJENSKOU TECHNIKU	
NOVÁK, L.:	173
LOKÁLNÍ ZASTAVOVÁNÍ KONTINUÁLNĚ SE POHYBUJÍCÍHO DOPRAVNÍKU	
ONDERA, J.:	176
POUŽITIE JEDNODUCHÝCH ZAPOJENÍ MENICOV PRE MALÉ SOLÁRNE NABÍJACKY	
ONDERA, J.:	184
POUŽITIE AKUMULÁTOROV PRE NAPÁJANIE MALÝCH PRENOSNÝCH SPOTREBICOV	
PITEL', J.:	191
NIEKTORÉ SKÚSENOSTI Z VÝUCBY ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY NA FVT TUKE	
SERAFÍN, Č., KROPÁČ, J.:	194
INOVACE ELEKTROTECHNICKÉ LABORATOŘE	
SINGULE, V., BARTOŠ, S.:	199
HUMAN REHABILITATION WITH ROBOTIC HELP	
SKOČÍK, P., HRUŠKA, F.:	201
SENZORY V LABORATOŘÍCH TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ AUTOMATIZACE NA FAI	
STÝSKALA, V.:	210
PERSPEKTIVA VÝUKY ELEKTROTECHNICKÝCH PŘEDMĚTU NA TECHNICKÝCH FAKULTÁCH VŠB-TUO	
ZÁSKALICKÁ, M., ZÁSKALICKÝ, P.:	213
VÝPOČET PRIEBEHU PRÚDU ASYNCHRÓNNEHO MOTORA PŘI ROZBEHU CEZ STRIEDAVÝ MENIC	

Příspěvky posterové sekce

BLAŽEK, J.: ÚLOHA ŘÍZENÍ TOČIVÉHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	218
KOCMAN, S.: ELIMINACE HARMONICKÝCH VÍCEPULZNÍMI ZAPOJENÍMI USMERNOVACU	219
OCHODEK, V., STÝSKALA, V.: Ověření použití Barkhausenova šumu k hodnocení homogenity magnetických vlastností	220

PŘÍSPĚVKY

PRINCIPIA
CYBERNETICA
2007

The Robot's Servo robustification

Milan Balara

University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Bayerova 1.
080 01 Prešov, Department of the Mathematics, Informatics and Cybernetics, Slovak republic,
balara.milan@ fvt.sk

Abstract: This paper deals with the problematics of acceleration loop speed servos with a subordinate acceleration controller. The using an acceleration loop in speed (and position) control circuit we are able to achieve better qualities of such circuit. This solution has properties of robust system. The solution is suitable to meet the requirements for a wide range of rpm regulation, run uniformity as well as the devices featuring either non-stationary or extremely high load inertia moment. This paper deals also the results of application of acceleration loop in the servosystem of industrial robot APR – 20. The results are similar to the previous theoretical and experimental results.

Key words: speed servo, the robust servo, the parametric invariant system, the speed control, the industrial robot

1. Introduction

Every industrial robot is a system with some position servosystems. Position servosystem contains a speed servos. The speed servos, in which a speed-voltage generator is used as an angular velocity sensor, either have a subordinate current-loop or in case a current-limited supply unit servodrive is used, such a loop is absent. Such a circuit together with an appropriate controller (usually of PI type) and converter comprise a set with satisfactory qualities in terms of the speed control and the load-moment invariance.

2. Theory

The speed servos is system of automatic control of angular velocity of the (electrical) servomotor. We can see a simplified example of the structure of mentioned circuit in Fig.1, where the dc servodrive speed control with the PI controller is depicted. Symbols : w – servodrive shaft angular velocity, w_0 – desired speed, e_w – speed error, M_m – servodrive torque, K_1 – controller (and converter) proportional amplification, K_2 – controller (and converter) integration amplification, R – servodrive armature circuit resistance, C – servodrive torque coefficient, J – servodrive (and load) inertia moment, M_z – load moment, U_m – term voltage of electric servomotor, I – current of servomotor, e_c – acceleration error, e – servodrive shaft angular velocity, K_3 – accelerator controller and actuator (converter) amplification, s – Laplace operator. The electromagnetic time constant and the effects of friction and saturation are all neglected.

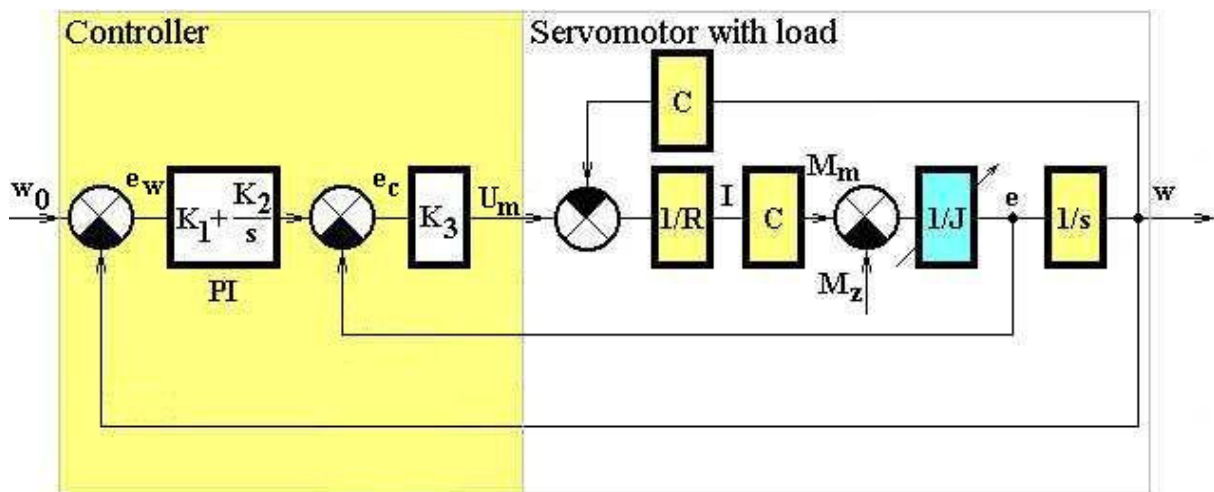


Fig. 1: Acceleration loop speed control circuit

It follows from the aforementioned formulas that the control transfer functions and invariance with respect to the load moment are both mainly dependant of the amplification magnitude of K_2 controller integration part, where the value of this amplification is finite and its magnitude in respect of the stability is limited. Thus the possibilities for further improvement of mentioned qualities are depleted. When considering an improvement of the function of speed controller we may conclude that it is possible to further improve the qualities of the system in Fig.1 on the condition that the angular velocity control loop (i.e. acceleration loop) is integrated into the circuit.

In our first approach let's assume that reliable analog angular velocity sensor is at our disposal and under these circumstances we may examine the qualities of the speed controller with subordinate acceleration loop. Assume the PI speed controller and the proportional acceleration controller. The control transfer function for this structure of the control circuit is :

$${}^2F_w(s) = \frac{w(s)}{w_0(s)} = \frac{\frac{K_1}{K_2} s + 1}{\left(\frac{RJ}{K_2 K_3 C} + \frac{1}{K_2}\right) s^2 + \left(\frac{C}{K_2 K_3} + \frac{K_1}{K_2}\right) s + 1} \quad (1)$$

and the error transfer function of the system with acceleration loop :

$${}^2F_U(s) = \frac{w(s)}{M_z(s)} = \frac{\frac{R}{K_2 K_3 C} s}{\left(\frac{RJ}{K_2 K_3 C} + \frac{1}{K_2}\right) s^2 + \left(\frac{C}{K_2 K_3} + \frac{K_1}{K_2}\right) s + 1} \quad (2)$$

If those two formulas are compared, one can see that we are dealing with the systems with the same type of transfer function. Having compared the corresponding terms in numerator and denominator we may conclude the following implications of the use of acceleration loop :

- a) if we assume the same pair of amplifications (K_1, K_2) and the following applies to K_3 :

$$K_3 > 1 \quad (3)$$

then there is no change in zeros of the numerator of control transfer function. It follows from the error transfer functions that by applying the acceleration loop, the invariance with respect to the error moment rises, because :

$$\frac{R}{K_2 K_3 C} < \frac{R}{K_2 C} \quad (4)$$

- b) complying with the assumptions of a) article, it can be inferred using the denominator quadratic terms coefficients comparison that there is very little change (or increase) in system damping

$$\frac{C}{K_2 K_3} + \frac{K_1}{K_2} \geq \frac{K_1}{K_2} \quad (5)$$

for $K_2 K_3$ is substantially large and C constant is small.

The coefficient corresponding with the time constant square in case of the system in Fig.2.

$$\frac{RJ}{K_2 K_3 C} + \frac{1}{K_2} \approx \frac{1}{K_2} \quad (6)$$

We are considering a large inertia moment applied to the servodrive shaft, as this corresponds with the servodrive operating mode in robots and also other devices where :

$$J = J_m + (10 \div 30) J_m \quad (7)$$

where J_m is the servodrive inertia moment. We assume a large value of K_2K_3 at the same time. In such case, changes of inertia moment have virtually no effect on the magnitude of time constant. On the account of the fact that the inertia moment is not found in formulas 3 and 4, we may consider this circuit to be invariant with respect to the changes of inertia moment, i.e. parametrically invariant, thus a robust system.

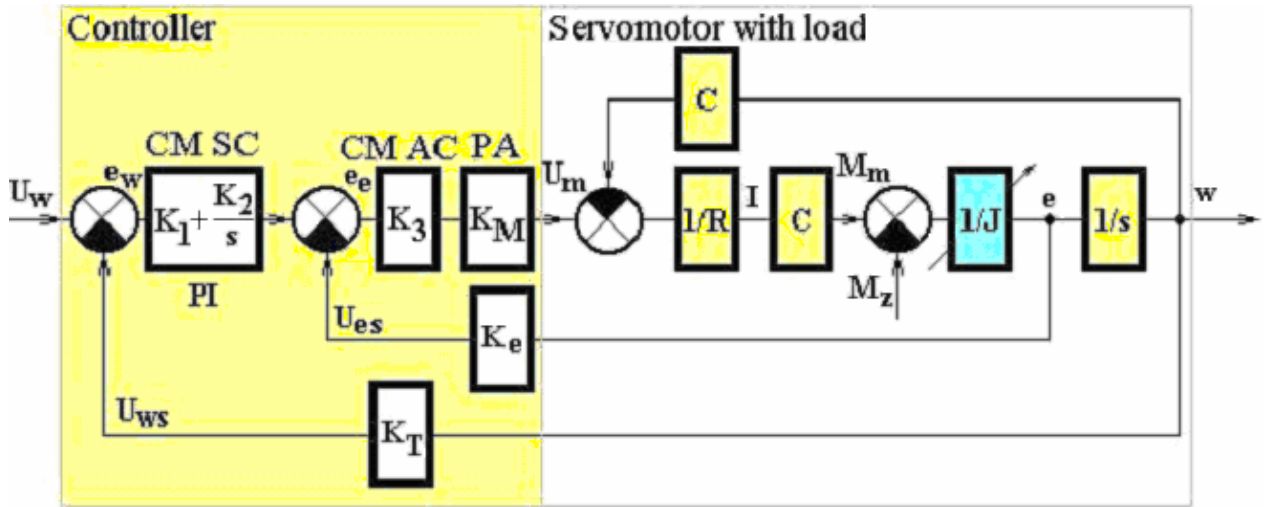


Fig. 2: Structure of acceleration loop speed control circuit

The key feature of the robust servosystem solution is a tendency to control such a quantity, that is closest to the source of parametric errors as well as the input of error quantities in the block diagram of the system. Under the closeness we mean such a position of the signal of controlled quantity where the number of astatic elements between this quantity and an error input is minimal. In case of angular velocity control it is astaticism of first order. Thus the implementation of angular acceleration control circuit is an optimal solution. In such case, there is no astatic element between the source of parametric error (total inertia moment) and other errors (friction moment) (Fig.1 and 2).

3. Implementation of Acceleration Loop Control Circuit

The proportional signal of the angular acceleration is made by the differentiation of the sampled signal of the angular speed. If a sampling period is chosen appropriately, we may consider a staircase analog signal equal to a continuous signal with regard to the practical use. In such case, the acceleration loop speed control circuit (ROR-A) is feasible. The block diagram is in Fig.2. It is the electric servomotor type HSM60 servodrive speed control circuit with the K4A5 tachogenerator ($K_w = 0,0184$ Vs/rad). The acceleration sensor is considered a proportional unit with amplification of $K_e = 0,876$ Vs²/rad and converter amplification of $K_M = 0,7$. The controllers were set to the following values : $K_1 = 7,02$; $K_2 = 452,7$; $K_3 = 14,7$.

Simultaneously, the same control circuit without the acceleration loop (i.e. without the acceleration sensor ($K_e = 0$) and acceleration controller ($K_3 = 1$)) had been implemented. The remaining values of amplification were the same. The following formulas stand for the control transfer function and error transfer function of the circuit in Fig.2 respectively :

$${}^3F_w(s) = \frac{w_s(s)}{U_w(s)} = \frac{\frac{1}{K_T} \left(\frac{K_1}{K_2} s + 1 \right)}{\frac{1}{K_T} \left(\frac{RJ}{K_2 K_3 K_M C} + \frac{K_e}{K_2} \right) s^2 + \left(\frac{C}{K_2 K_3 K_M K_T} + \frac{K_1}{K_2} \right) s + 1} \quad (8)$$

$${}^3F_U(s) = \frac{w_s(s)}{M_z(s)} = \frac{\frac{R}{K_2 K_3 K_M K_T C} s}{\frac{1}{K_T} \left(\frac{RJ}{K_2 K_3 K_M C} + \frac{K_e}{K_2} \right) s^2 + \left(\frac{C}{K_2 K_3 K_M K_T} + \frac{K_1}{K_2} \right) s + 1} \quad (9)$$

4. Experimental Part

Both control circuits were tested at the indicated amplification values and given parameters of used devices. The transient responses were measured with varying magnitude of dynamic load, i.e. using flies 10 to 75 times the inertia moment of the servodrive. The transient responses of the speed control circuit with PI controller (ROR) are shown in Fig.3. Fig.4 shows the transient responses of the speed control circuit with acceleration loop

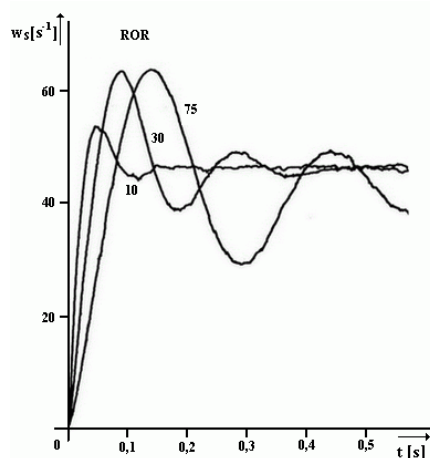


Fig. 3: Transient responses of the speed control circuit

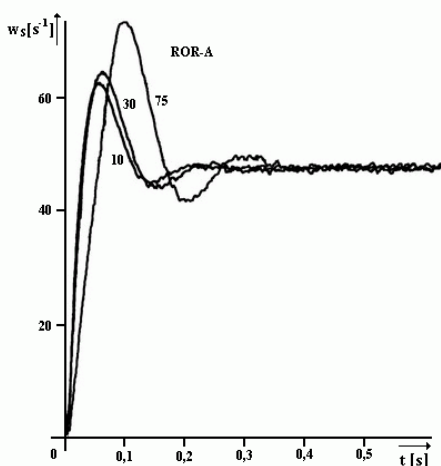


Fig. 4: Transient responses of the speed control circuit with the acceleration loop

(ROR-A). As is obvious from the responses, those at the load 10 to 30 times the servodrive inertia moment are close to each other and compared to Fig.3 we see that, the circuit is virtually robust in this range. When overloaded (that is at the load 75 times the inertia moment), the acceleration loop is capable of providing a regulation process in a reasonable time and at incomparably higher quality compared to a common control circuit.

One of the distinct advantages of acceleration loop speed control circuit is its steady-state run uniformity. The responses of servodrive run found out experimentally when the effects of friction are most evident are shown in Fig.5. These responses were recorded as a tachogenerator voltage. One can see that the introduction of acceleration loop helps to reduce the run non-uniformity to one-fourth its original value. The acceleration loop circuit also allows for an increase of speed regulation, in our case from 1:5000 to 1:30000.

The solution of robust speed servo was implemented in the industrial robot APR 20. An end-effector of industrial robot APR-20 was found to be unstable when running at critical speed, particularly in horizontal direction motion, being observable both visually and sensually. Even though it was possible to suppress this unevenness by increasing both the proportional and the integration gain of speed controller, doing so would impose an adverse effect on the stability of system and this solution could not be applied.

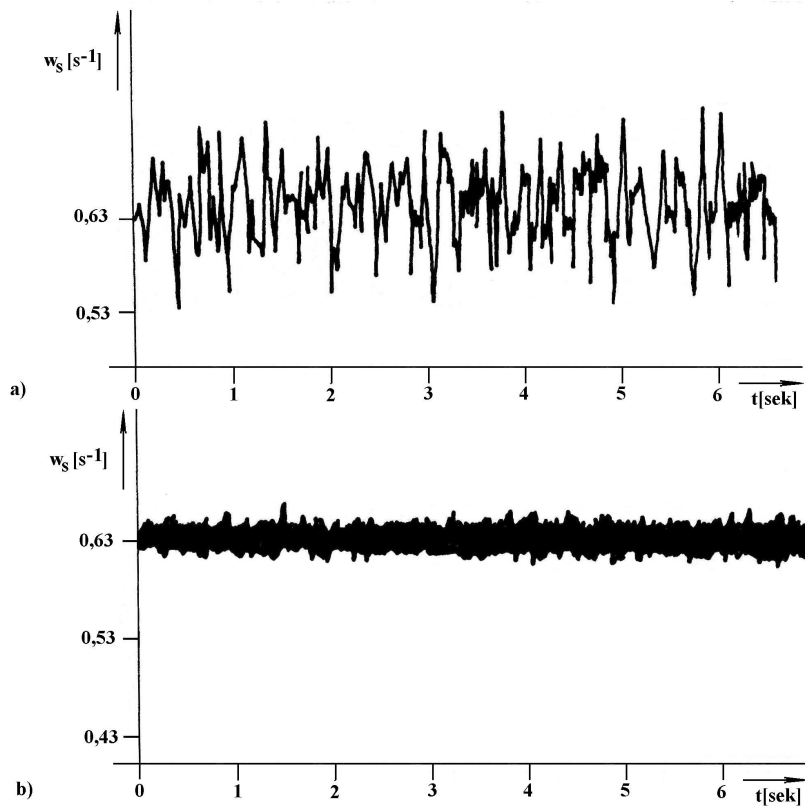


Fig. 5: Evenness of turning of a common servosystem (a) and an acceleration loop servosystem (b)

In case the circuit of acceleration control and sensing is integrated into the system, one could increase the gain to 10 times its original value, consequently affecting the performance of servosystem.

The circuit of acceleration control and sensing was connected to the robot horizontal motion servosystem (axis No.1 – large rotation). Modification was carried out on the robot with b.n. 01-202.

The stability of robot horizontal motion was measured in the form of tachogenerator voltage first with the angular acceleration control loop enabled and then after disconnecting this loop from the system. Three positions were utilized in the process of measurement : basic, robot arm folded and robot arm extended. Simultaneously, the measurements of end-effector horizontal motion (acceleration loop enabled) and vertical motion (acceleration loop disabled) in basic position were carried out.

In this measurement, a motion in both directions (right, left) was recorded and the largest mismatch between the actual and desired trajectory was evaluated. The results are shown in following figures and table :

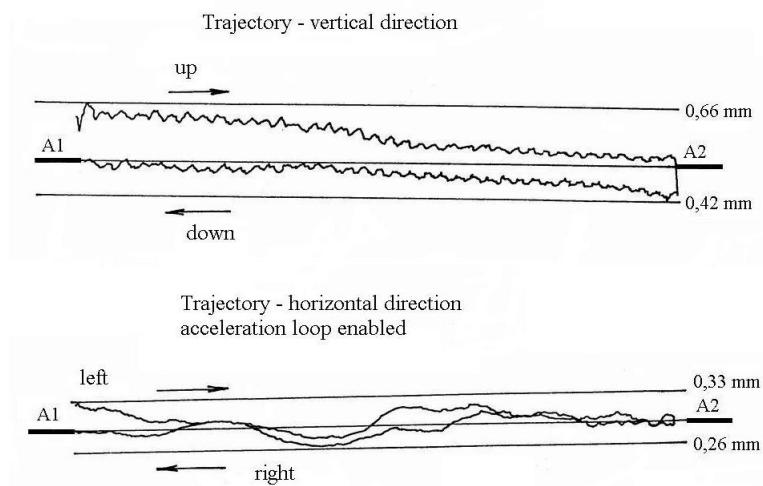


Fig. 6: The trajectory running evenness of the robot's arm with common servosystem (up) and an acceleration loop servosystem (bellow)



Fig. 7: Industrial robot APR –20

		1st measurement	2nd measurement	3rd measurement	largest deviations (mm)
Horizontal direction	R	0,35	0,33	0,33	0,35
	L	0,24	0,26	0,26	0,26
Vertical direction	R	0,66	0,66	0,64	0,66
	L	0,39	0,42	0,40	0,42

Tab. 1: The trajectory running measurement results and values of deviations

It follows from the table that the deviations from desired trajectory after application of acceleration loop decreased to 53% (left) and 62% (right), effectively decreasing the motion inaccuracy to 47% and 38% respectively.

After brief inspection of trajectories in Fig.6 it can be inferred that also the oscillatory component occurring only in the part of recorded trajectory at horizontal movement, was substantially suppressed.

Despite the fact that the effect of mechanical parts (harmonic transmission, arms), which are not affected by the impact of acceleration loop application is taken into account in the measurement of end-effector trajectory, the results are encouraging. We may conclude that by applying the acceleration loop both the accuracy and the evenness of motion is increased. This statement is also confirmed by the angular speed – time characteristics of the start-up of robot horizontal servosystem with disabled (Fig.8) and enabled (Fig.9) acceleration loop.

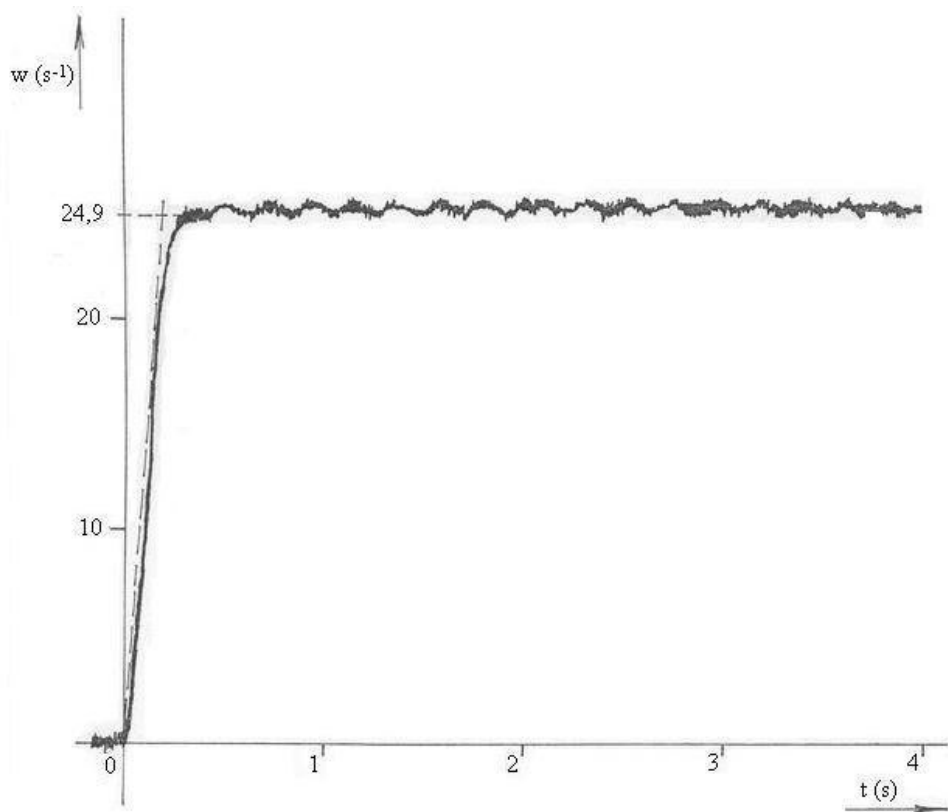


Fig. 8: The the angular speed – time characteristics of the start-up of robot horizontal servosystem with disabled acceleration loop.

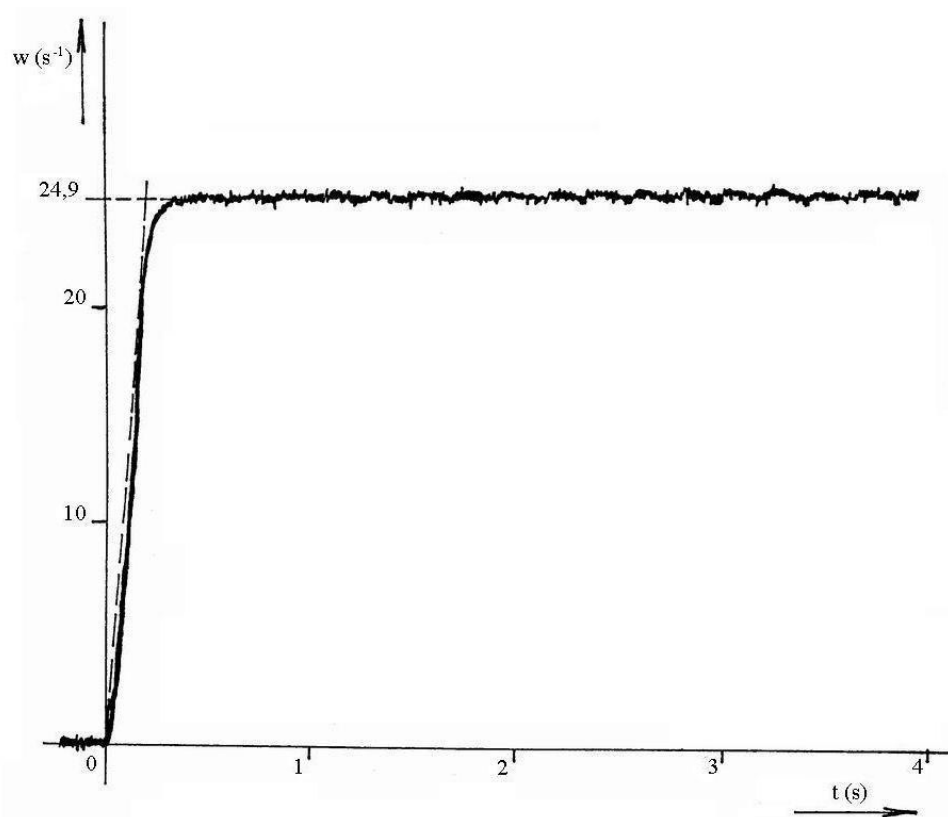


Fig. 9: The the angular speed – time characteristics of the start-up of robot horizontal servosystem with enabled acceleration loop.

5. Conclusion

The key feature of the robust servosystem solution is a tendency to control such a quantity, that is closest to the source of parametric errors as well as the input of error quantities in the block diagram of the system. Under the closeness we mean such a position of the signal of controlled quantity where the number of astatic elements between this quantity and an error input is minimal. In case of angular velocity control it is astaticism of first order. Thus the implementation of angular acceleration control circuit is an optimal solution. To conclude, by using an acceleration loop in speed control circuit we are able to achieve better qualities of such circuit while keeping the complexity and cost of necessary technical equipment reasonably low. This solution is suitable to meet the requirements for a wide range of rpm regulation, run uniformity as well as the devices featuring either non-stationary or extremely high load inertia moment. It is possible to apply said method of system robustification to other types of control system as well (for example hydraulic servodrives, pneumatic artificial muscles etc.)

The application of acceleration loop in the servosystem of industrial robot give the similar experimental results to the previous theoretical and experimental results. The main results of this experiments are the higher accuracy and the increased evenness of motion.

Acknowledgement

This work was supported by the Science grant agency of Ministry of Education of Slovak Republic, VEGA, grant No. 1/2212/05 and the Institutional task no. !/20007 of the University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Slovak republic.

References

- [1] Alexandrov, A.G.: Sintez reguljatorov mnogomernych sistem. Moskva. Mašinstrojenije, 1986, str.4-43, 81-127.
- [2] Balara, M.: Tachogenerator angular acceleration measurement set [CS. Pat. No. 269 600]
- [3] Balara, M.: Robustný servosystém laserového kaliaceho zariadenia. Kandidátska dizertačná práca, VŠT Košice, Strojnícka fakulta, 1989.
- [4] Balara, M.: Rýchlostný servosystém s akceleračnou slučkou. Elektrotechnický časopis ČSAV a SAV, 1989, 40, č.5, str.390-397
- [5] Beneš, J.: Statistical dynamics of control circuits. Prague. SNTL 1965
- [6] Chan, S.M. – Athans, M.: Applications of Robustness Theory to Power System Models, IEEE, Transactions of Automatic Control, Vol. AC – 29, No. 1 January 1984, pp. 2 - 8
- [7] Hsia, S.: A New Technique for Robust Control of a Servo Systems. IEEE, Transactions on Industr. Electronics, Vol.36, Num.1, February 1989, str 1-7.
- [8] Hany, S. – Girgis, G.: Microprocessor – Based Digital Accelerometer and its Application in an Instrument for Motor Torque – Speed Characteristic Display During The Transient Interval. IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol.IE – 33, No.1, February 1986, str.44-48.
- [9] Kalaš, V. – kol.: Nelineárne a číslicové servosystémy, Bratislava, Alfa, 1986.
- [10] Lehtomaki, N.A. – a kol.: Robustness and Modeling Error Characterization IEEE, Transact. on Automatic Control, Vol. AC – 29, Num.3, March 1984, str. 212-220
- [11] Matyaš V.: Measurement, analysis and formation of random phenomenons. Prague. SNTL 1976

The Rotary Actuators with Pneumatic Artificial Muscles

Milan Balara

University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Bayerova 1.
080 01 Prešov, Department of the Mathematics, Informatics and Cybernetics, Slovak republic,
balara.milan@ fvt.sk

Abstract: The article concerns the actuator with one pneumatic artificial muscle and spring which is acting against the direction of pull force of the pneumatic artificial muscle. This solution needs only one inlet and one outlet of the electromechanical pneumatic valve. The article concerns also the actuator with two McKibben's type pneumatic artificial muscles in the antagonistic configuration. They are acting against the force of the other artificial muscle. The actuator is realized by using of two artificial muscles of Shadow Air Muscle type. This solution needs two inlets and two outlets of the electromechanical proportional or on – off pneumatic valves. At last cause it is suitable for the solving of low cost bioservosystems. The paper contents the mathematic descriptions, static characteristics of the parts of actuator and characteristics of the all mechanism.

Key words: Pneumatic artificial muscle, pneumatic actuator, antagonistic system, McKibben's artificial muscle, Shadow Air Muscle

1. Introduction

Pneumatic position servosystems of various devices are sometimes solved with the use of pneumatic artificial muscles. If requirements of precision, stiffness and dynamic of the system are lower, it is possible to use antagonistic servosystem with one pneumatic artificial muscle and spring, which acts against the tensile force of artificial muscle. Such solution requires only one inlet and one outlet valve, what significantly contributes to decreasing the costs of such device.

Configuration with two artificial muscles is antagonistic system. Pneumatic artificial muscles (PM) act each against other by their forces and resulting position is determined by balance of tensile forces in various air pressures in individual muscles. Tensile forces of PM are transmitted through tackle fall of roller. It is necessary to use two electropneumatic valves for controlling each one of two pneumatic artificial muscles. Each artificial muscle requires one inlet and one outlet valve, either proportional or on-off, eventually combination of them.

2. Static load characteristics of pneumatic artificial muscle

2.1 Characteristic of PM in constant pressure

Length (contraction) of pneumatic artificial muscle in constant air pressure depends on force, which acts to muscle and which is equal to its tensile force. Length is increased and the value of contraction decreased with increasing force. Consequently the contraction of artificial muscle decreases with increasing force of active load. It is property corresponding to the properties of human muscle. Tensile force of artificial muscle in constant pressure is a function of artificial muscle length (contraction). This characteristic is nonlinear. It is shown in Figure 1.

Operating point O marked on static characteristic of PM AM2 is shown in Figure 1, in which the length of PM is $l_0 = l_{min} + \Delta l_{max} / 2$, where $\Delta l_{max} / 2 = l_{dmax}$, in constant air pressure p_m . PM acts by force F_0 with contraction k_0 in this operating point. Value l_d is displacement against position l_0 of PM. Tensile force F_m of pneumatic artificial muscle in constant pressure p of filling medium has nonlinear characteristic:

$$F_m = g_N(l) \quad (2.1)$$

$$F_m = g_{NK}(k) \quad (2.2)$$

where g_N is nonlinear function of PM force in dependency on its length in constant filling air pressure and g_{NK} is nonlinear function of PM force in dependency on its contraction in constant filling air pressure.

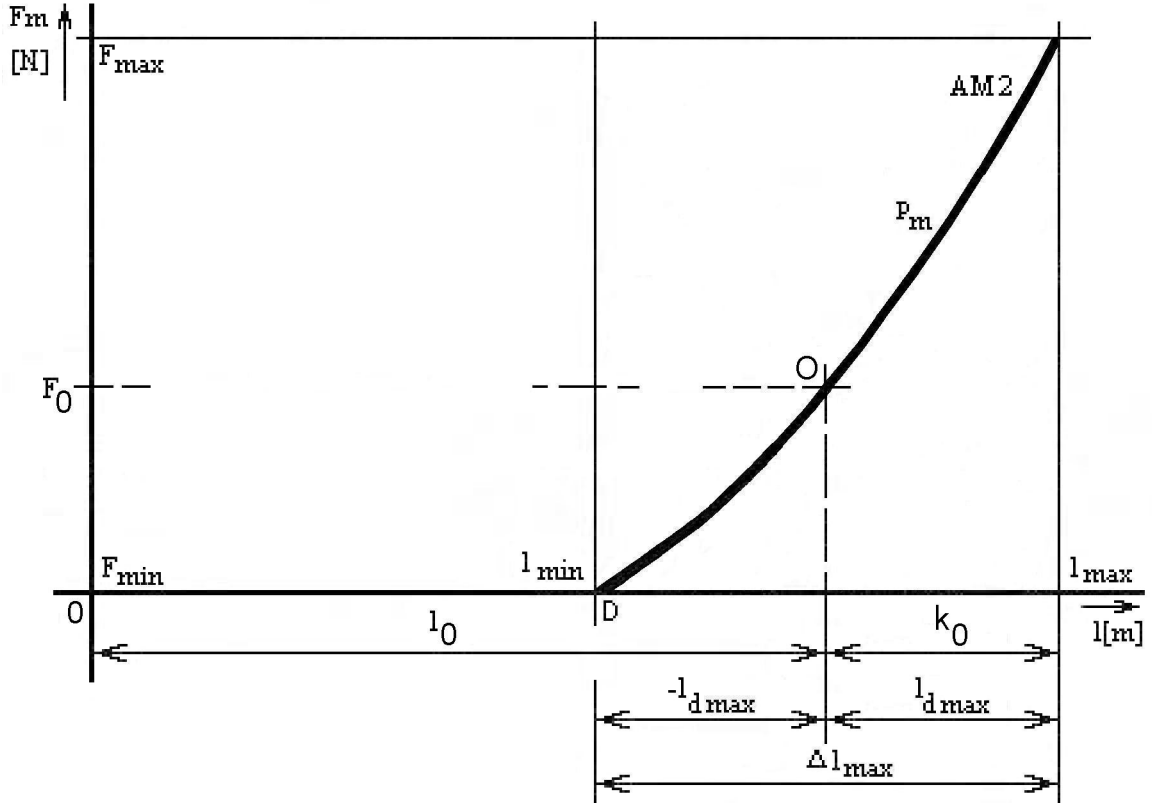


Figure 1.: Static characteristic of pneumatic artificial muscle in constant filling pressure

2. 2 Characteristics of PM in nonconstant pressure

Length (contraction) of pneumatic artificial muscle in nonconstant air pressure depends on force, which acts to muscle and moreover on the value of air pressure. Tensile force of artificial muscle is in nonconstant pressure a function of artificial muscle length (contraction) and moreover of air pressure. This characteristics is similarly to previous case nonlinear, various values of air pressure are reason for description of properties of pneumatic artificial muscle by meshed characteristics.

Figure 2 depicts nonlinear characteristics of PM AM2, where length of muscle l (contraction of PM k) is dependent on filling air pressure p . Characteristics of PM create the mesh of characteristics dependent on load force F , and on length of PM l , in various values of pressure p in range from 0 to maximal pressure $p_{max}=p_m$. This figure shows characteristics for individual pressures, where: $p_m > p_4 > \dots > p_2 > p_1$. Figure shows positions of points O and 1, to which correspond relevant lengths of PM and forces accordingly to characteristics, in various pressures.

Relation between the length of pneumatic muscle l and its contraction are dependencies 3.9 and 3.10, where l varies in range (l_{min}, l_{max}) . Tensile force F_m of pneumatic artificial muscle in nonconstant (variable) pressure p of filling medium has nonlinear characteristics:

$$F_m = g_M(l, p) \quad (2.3)$$

$$F_m = g_{MK}(k, p) \quad (2.4)$$

where g_M is nonlinear function of two variables, length of PM l and air pressure in PM p and g_{MK} is nonlinear function of contraction of PM k and air pressure in PM p . Figure 2 shows point of characteristics O in state, when PM with tensile force F_0 and filling pressure p_m has length l_0 . Analogical is point 1, when PM AM2 has lower air filling pressure p_3 . Point D is point of PM maximal contraction (l_{min}, k_{max}) , its tensile force is minimal (zero).

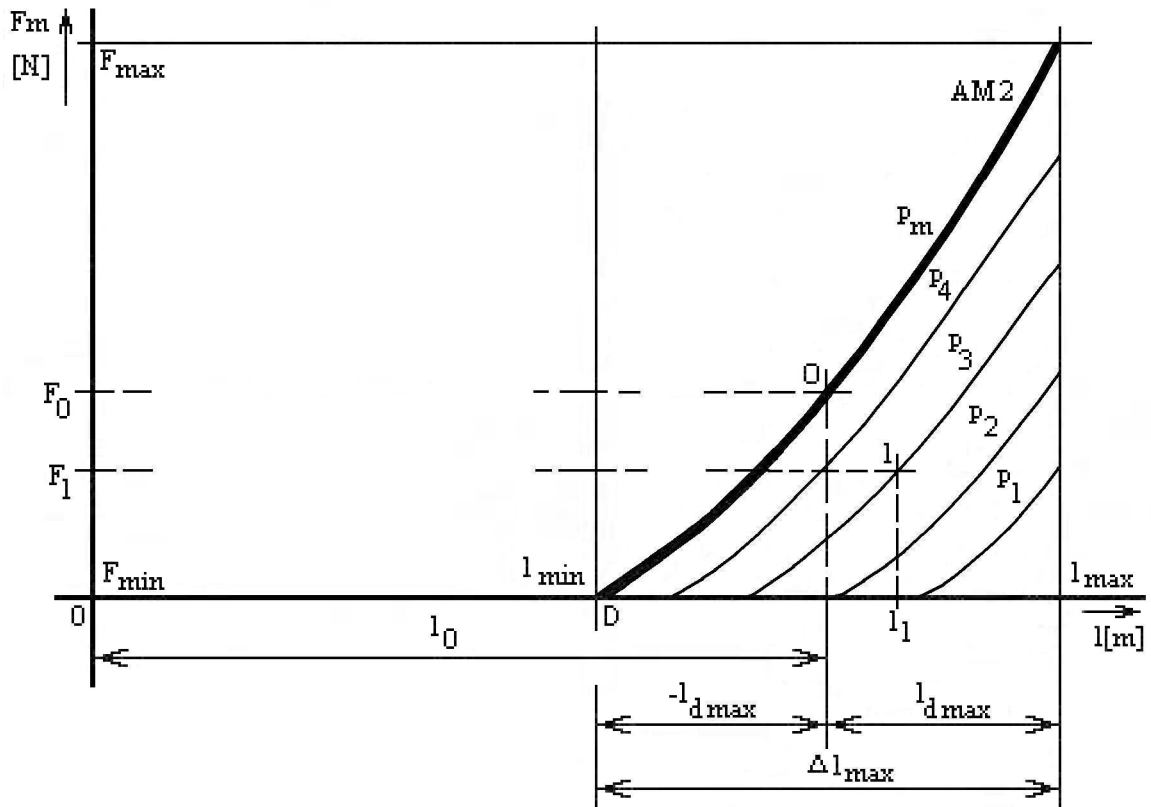


Figure 2.: Characteristics of pneumatic artificial muscle in variable filling pressure

3. Pneumatic actuator with artificial muscle and return spring

Servomotor with corresponding load is a regulated system in proportional position servosystems. In case of pneumatic bioservosystems with artificial muscles, it is own artificial muscle (PM) with corresponding mass load m . Actuating variable that inputs into PM is compressed air, which comes from proportional electropneumatic valve, which is actuating unit. In case of use only one PM, the function of second PM is performed by return spring. This configuration is shown in Figure 3.

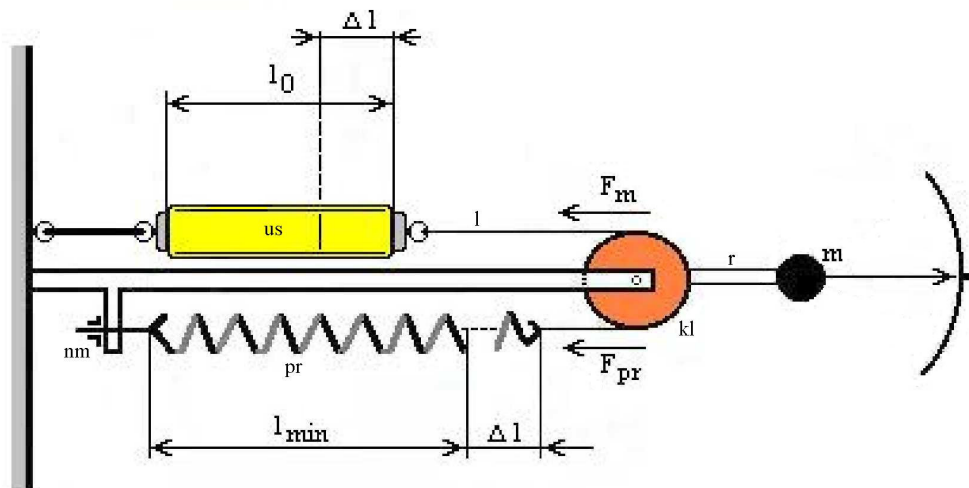


Figure 3: Spring actuator with pneumatic artificial muscle

Figure shows pneumatic artificial muscle PM of maximal length $l = l_0$, which is shortened about length Δl after its filling by compressed air. Tensile force of artificial muscle F_m is transmitted by tackle fall ln through roller kl to spring pr . Spring, which has length l_{min} in prestrained state is extended about Δl during muscle contraction k and acts against the artificial muscle by force F_{pr} . This force is dependent from value of contraction

and its initial value F_l is set by tension gear nm . The change of air pressure in muscle causes also the change of its contraction what results in performing rotary motion of load mass m on arm r mounted to axis of roller. Gravity force of mass load m is perpendicular to plane of Figure 2 and thus does not have the influence to force situation between spring and muscle. Object of next research are not dynamic states of actuator, only steady static states will be described. Therefore, forces dependent from derivations of length l or angular position β are not considered. Friction moments of roller kl bearings are also not considered. We will consider translational values as final output in following sections due to the fact, that producers of springs and artificial muscles provide all characteristics in form of translational motion. Angular position β of arm r depends on radius of roller kl in same length changes of muscle and spring. Following characteristics valid between these values also characterizes limits of the value, since contraction of artificial muscle and thus also Δl has limited value:

$$\beta = \Delta l / r \quad (3.1)$$

$$\beta_0 = l_0 / r \quad (3.2)$$

$$\beta_{max} = (l_0 - l_5) / r \quad (3.3)$$

where β_0 is initial angular position (revolution) of roller shaft of actuator and β_{max} is its maximal value. Consequence of other values is evident from Figure 3.

3.1 Return spring and its characteristics

The task of return spring is acting by force F_{pr} against the force of artificial muscle F_m . Muscle contraction increases until F_{pr} is less than artificial muscle F_m . This increase is stopped in position when forces are balanced. Spring force is changed in dependency on their length l . Assuming that this relation of spring is linear, its characteristics will be linear. It is shown in Figure 4. Horizontal axis is length l of spring, vertical axis is spring force F_{pr} . Initial length of unloaded spring is l_b and its length is increasing with increasing tensile force. Its practical exploitation is assumed in length range from l_{min} to l_{max} . It corresponds to the range of tensile force from F_l to F_2 . Thus, it will be used section of characteristics limited by segment BA. Spring is set to initial point B by extending to length l_{min} [3].

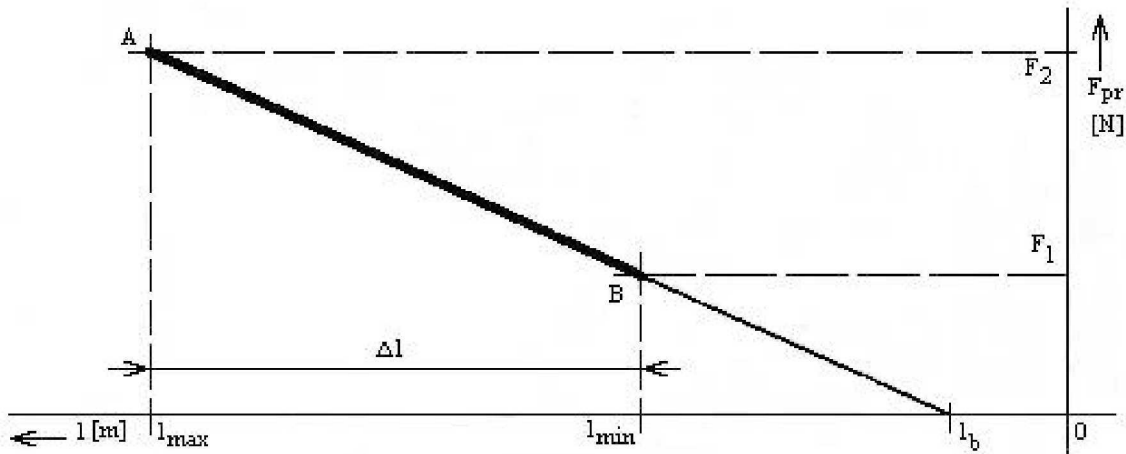


Figure 4.: Linear characteristics of spring

Linear characteristics of spring has tendency given by its force conditions in relation to the length of extension:

$$K_{pr} = (F_2 - F_1) / \Delta l \quad (3.4)$$

where

$$\Delta l = l_{max} - l_{min} \quad (3.5)$$

where l is changing in range (l_b, l_{max}) and work range of spring length l is (l_{min}, l_{max}) . For course of characteristics, it can be stated:

$$F_{pr} = K_{pr}(l - l_b) \quad (3.6)$$

Preload of spring: $F_1 = K_{pr}(l_{min} - l_b) \quad (3.7)$

and maximal tension of spring: $F_2 = K_{pr}(l_{max} - l_b) \quad (3.8)$

3. 2 System with PM and return spring

Pneumatic muscle filled by compressed air shortens its length and acts by tensile force F_m . Relation between tensile force, air pressure p and length l (value of contraction k) of PM is shown by characteristics, which are shown in Figure 5 together with the characteristics of return spring. Concrete values of parameters and characteristics of PM depend on selected type of PM and are available in documentation of individual producers. Also, the way of characteristics creation with results is a subject of individual publications (for example [1], [2], [6]).

Figure 5 shows nonlinear characteristics of PM in various values of air pressure from p_1 to p_5 [4], [5]. Tensile forces of PM and spring are shown on vertical axis; their lengths are shown on horizontal axis. Intersections of characteristics of PM and spring are points from 1 to 5. The balance between tensile forces of PM and spring is reached in these points. Each such point is point of balance in defined range, where PM filled by air of some pressure shortens to some length under corresponding tensile force of spring. It is obvious, that infinite number of values of air pressure in PM gives infinite number of positions in range from l_1 to l_5 . Tensile forces of PM and spring will vary in range from F_B to F_F , which determines also the range of force and stiffness oscillation of mechanism (actuator). Position l of end point of artificial muscle is in range $(l_0, l_0 - \Delta l)$. Contraction k of PM is difference between actual position of PM and its initial position. Then:

$$k = l_0 - l \quad (3.9)$$

Maximal value of contraction is:

$$k_{max} = \Delta l \quad (3.10)$$

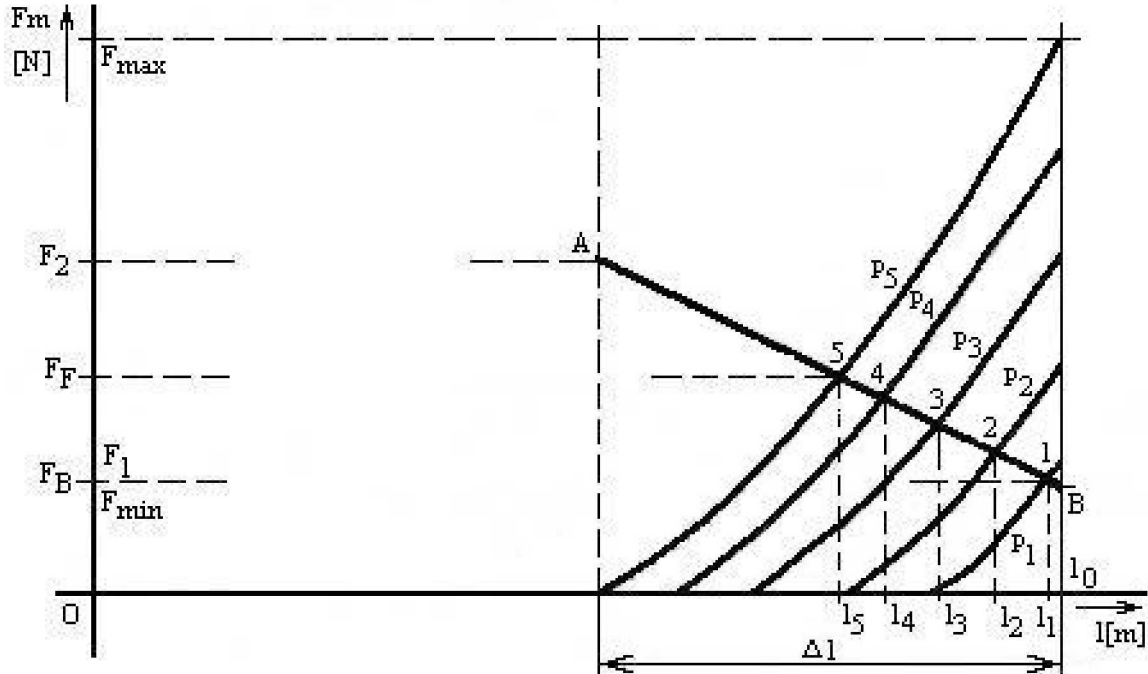


Figure 5.: Static characteristics of pneumatic artificial muscle in antagonistic configuration with return spring

Characteristic of tensile force of pneumatic artificial muscle is nonlinear and its course depends on muscle length l (or contraction k) and filling air pressure p :

$$F_m = g_N(p, l) \quad (3.11)$$

Since, balance of forces $F_m = F_{pr}$ is valid for every position of considered kinematics configuration, resulting position l is given by their equilibrium. It means that relations (3.11) and (3.6) are equal:

$$F_m = g_N(p, l) = F_{pr} = K_{pr}(l - l_b) = K_{pr}l - C_1 \quad (3.12)$$

Relation (3.12) gives constant $C_1 = K_{pr} l_b$.

$$g_N(p, l) = K_{pr}l - C_1 \quad (3.13)$$

If all members dependent on value l of this equation are united and l is formulated as searched parameter, resulting nonlinear function yielding the relation between length (contraction) of artificial muscle and its filling pressure is obtained:

$$l = C_1 f_N(p) \quad (3.14)$$

$$k = l_0 - l = l_0 - C_1 f_N(p) \quad (3.15)$$

Relating to the fact that tensile force of spring F_{pr} is, in this case, dependent only on position l , final position l of whole system will be dependent only from one parameter, filling air pressure p of pneumatic artificial muscle [5]. Pressure is actuating variable input into the actuator and determines resulting position in form of muscle contraction k , or slew of arm r .

3.3 Static characteristics of spring actuator with artificial muscle

System described in sections 3 and 3.2 creates power unit of servosystem – actuator. Together with load, it creates regulated system, which output is position (or velocity, acceleration),

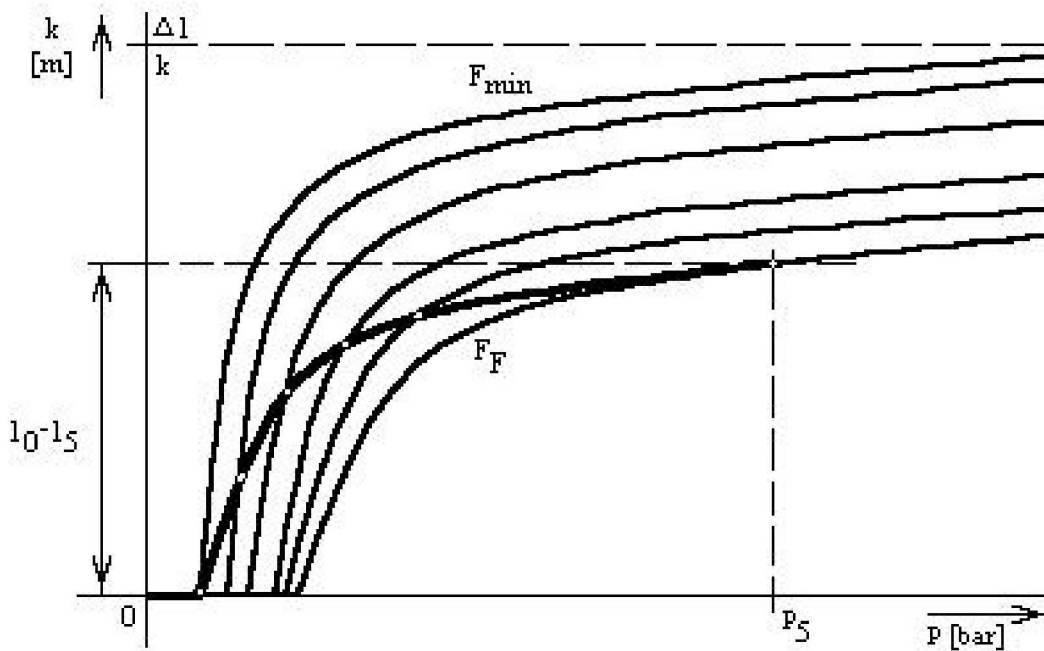


Figure 6.: Static characteristics of spring actuator with pneumatic artificial muscle

and which can be expressed as muscle contraction k , or angle of arm slew r . Air pressure is input to actuator, entering into PM. Figure 6 shows nonlinear characteristics of PM, where value of muscle contraction k is dependent on filling air pressure p . Characteristics of PM create net dependent on load force F , which is constant for given characteristics.

Static characteristics of system PM – spring is curve, which every point is defined by filling pressure p on muscle characteristics for load force developed by return spring under defined contraction. Points 1–5 on Figure 5 are intersections of resulting characteristics of system with muscle characteristics. Point 5 on Figure 5 is intersection of pressure p_5 on Figure 6 and similarly. Static characteristic of actuator is combined nonlinearity including continuous nonlinear curve of saturation type and dead band. Each point of this nonlinearity is result of mutual action of actuator components, from which PM is also nonlinear unit.

4. Pneumatic artificial muscles in antagonistic configuration

Regulated system of proportional position servosystems is servomotor with applied load. In case of pneumatic bioservosystems with artificial muscles, these are individual artificial muscles (PM) with applied mass load m . Actuating variable entering to each PM is pressure p of compressed air, which flows from electro-pneumatic valve that plays role of actuating unit. In case of use of two PM acting each against other, resulting position is determined by balance of forces of individual PM in nonequal filling pressures and contractions. Actuator in such configuration is shown in Figure 7. Artificial muscles have nonequal filling pressures. Muscle AM1 has maximal filling pressure p_{max} , muscle AM2 is without pressure. Muscle AM1 reaches maximal contraction k , its length l reached minimum l_{min} . Muscle AM2 has minimal (zero) contraction,

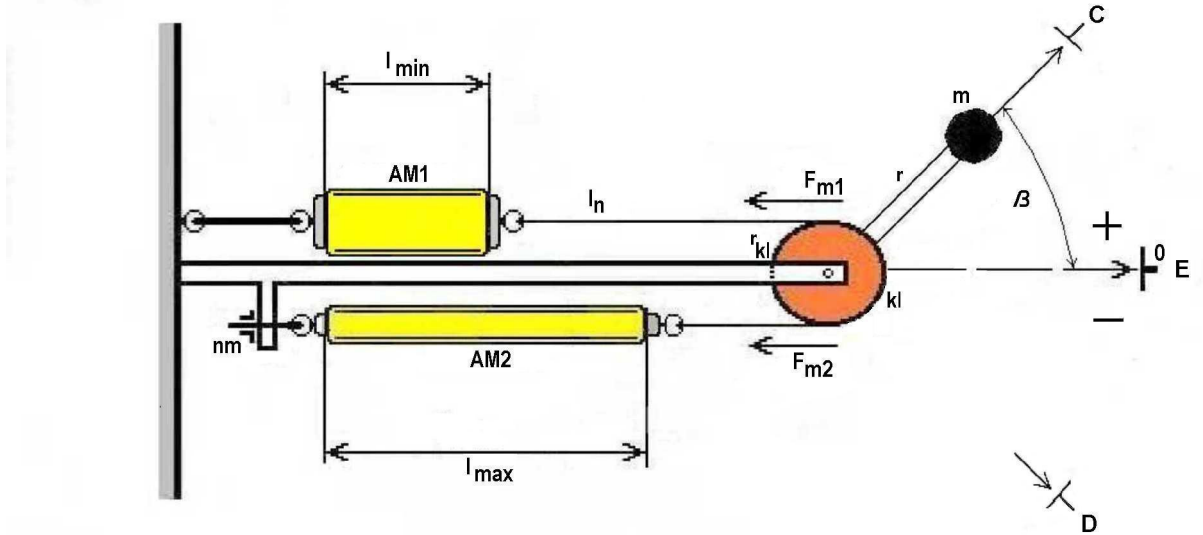


Figure 7.: Actuator with pneumatic artificial muscles in antagonistic configuration. Pneumatic muscles have nonequal filling pressures. Muscle AM1 has maximal filling pressure, muscle AM2 is without pressure. Actuator arm is in limit position.

its length l reached maximum l_{max} . Arm of actuator r is in limit position (point C). Total displacement of cable Δl_{max} through perimeter of roller kl (with radius r_{kl}) is defined by difference of lengths l of individual PM in shown position:

$$\Delta l = l - l_{min} \quad (4.1)$$

$$\Delta l_{max} = l_{max} - l_{min} \quad (4.2)$$

where Δl is displacement of cable (change of PM length) in any position, and l is changing in range from l_{min} to l_{max} . Total displacement Δl_{max} (total change of PM length) determines limits of arm r in positive and negative sense of rotation with zero (referential) position in the middle. As next, these points will be marked as follows: point C – position of positive maximum, point D – position of negative maximum, point E – zero position (referential point). Contraction of PM k in relation to its actual length l is:

$$k = l_{max} - l \quad (4.3)$$

$$k_{max} = l_{max} - l_{min} = \Delta l_{max} \quad (4.4)$$

where k is changing in range from $k_{min} = 0$ to $k_{max} = \Delta l_{max}$.

With respect to the fact that producers of muscles provide all their characteristics in translational values, we will use these values as output values. Angular position β of arm r depends on radius r_{kl} of roller kl under the

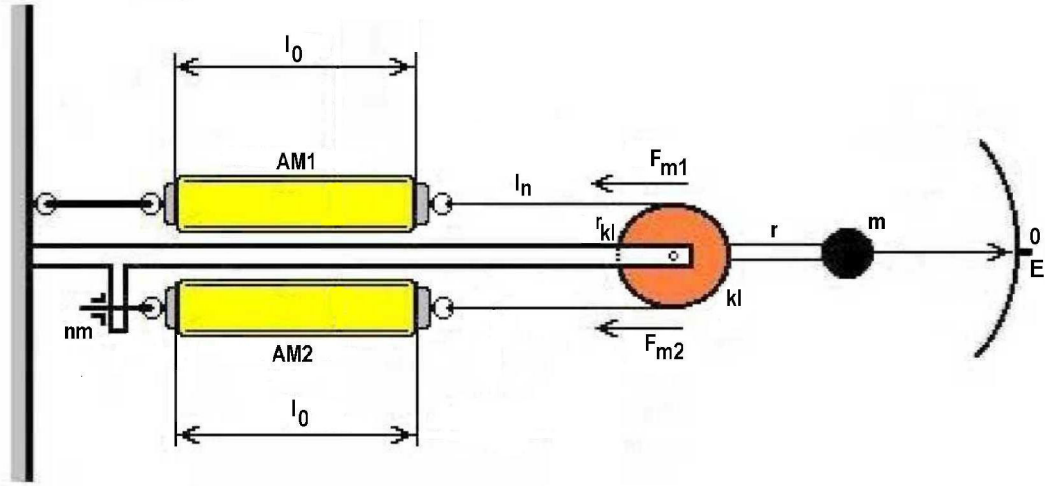


Figure 8.: Actuator with pneumatic artificial muscles in antagonistic configuration. The function model (above) and schema (below). Artificial muscles have equal filling pressures and resulting position of arm is in initial point E.

same changes of muscle length. The relation valid between these values characterizes also its limits, since contraction k of PM and thus also Δl has finite value:

$$\beta = \Delta l / r_{kl} \quad (4.5)$$

$$\beta_{max} = \Delta l_{max} / r_{kl} \quad (4.6)$$

where β is position (angular position) of arm r or slew of actuator roller shaft and β_{max} is its maximal value. Others values are clear from Figure 7.

Figure 8 shows two same pneumatic artificial muscles AM1 and AM2 of lengths l_{max} , which are shortened to lengths $l_0 = l_{max} - \Delta l_{max} / 2$ after filling by compressed air. Tensile force F_{m1} of AM1 is transmitted by cable ln through roller kl to muscle AM2, which acts by its force F_{m2} . If there are nonequal filling air pressures, arm of actuator is stabilized in position corresponding to balance of both PM forces. If there are equal filling pressures in both muscles, tensile forces of PMs are equal under the same values of their contractions. System is stabilized in steady position, which is considered as initial state of actuator. Precise initial position is additionally set by tension gear nm . Gravity force of mass load m is perpendicular to planes of Figures 7 and 8 and thus does not have the influence to force relations between PMs. Object of research are not dynamic states of actuator, we will describe only static steady states. Also, forces dependent on length l or angle β derivations are not taken into account as same as friction moments in roller kl bearings are not considered.

Actuator shown in Figure 8 has pneumatic artificial muscles with same filling pressures and resulting position of arm is in initial point 0 (referential point E). Change (decrease) of air pressure in, for example, AM1 changes (decreases) also its contraction k (active PM). It consequences in performing rotational movement of load mass m on arm r , mounted to the axis of roller. This sense

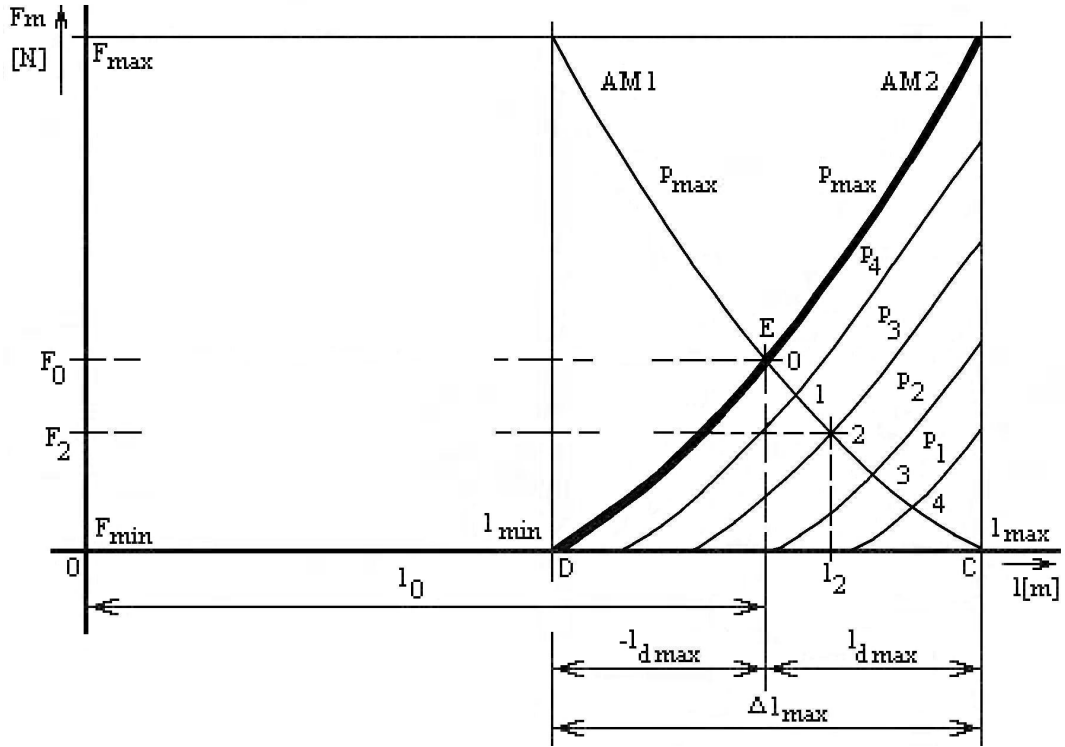


Figure 9.: Characteristics of pneumatic artificial muscles (in variable filling pressure) of actuator with antagonistic configuration of pneumatic artificial muscles

of motion in considered as negative (-) in relation to the initial point. Filling pressure in artificial muscle AM2 is not changed, only its length is changing with respect to changing tensile force F_{m1} of AM1. AM2 acts as a pneumatic spring with nonlinear characteristics (passive PM). Same action can be done with changed activity of individual muscles. Sense of load mass motion will be then reversed (+), roles of active and passive PMs are inverted to previous case. Active PM is always PM with variable air pressure, passive PM plays role of nonlinear spring under constant air pressure.

4. 1 Antagonistic system with pneumatic artificial muscle

AM2 expands its length during outlet of compressed air and acts by tensile force F_{m2} , which value is gradually decreased. Relation between tensile force F_m , air pressure p and length l (contraction k) of this artificial muscle is expressed by characteristics shown in Figure 9, which are sketched together with characteristics of AM1. Air pressure is not changed in this artificial muscle, and therefore it is shown only one its characteristics, corresponding to initial filling pressure p_m . Characteristics is sketched in order to represent antagonistic force action of AM1 against AM2. AM1 plays role of nonlinear pneumatic spring. It ensures balance of forces for each position of positive value. Also, it ensures stiffness of actuator mechanism. Points of intersections of characteristics in segment EC correspond to increasing trend of contraction of passive PM AM1 during gradual decrease of pressure in active PM AM2. Thus, it is possible to reach any positive value of l_d (till l_{dmax}).

Actuator reaches negative position values by the same way as described in the above paragraph. Only the actions of muscles are interchanged. AM1 has variable air pressure, AM2 works as nonlinear pneumatic spring.

If configuration of antagonistic actuator is as shown in Figure 8 (position in referential point E), nonlinear functions g_N and also tensile forces will be identical if identical PMs are used:

$$F_{m1} = g_N(l_1) = F_{m2} = g_N(l_2) = F_0 \quad (4.7)$$

where, it is valid: $l_1 = l_2 = l_0$ a $p_1 = p_2 = p_m$.

If configuration of antagonistic actuator is as shown in Figure 7, nets of nonlinear functions g_N and also tensile forces will be identical if identical PMs are used:

$$F_{m1} = g_M(l_1, p_1) = F_{m2} = g_M(l_2, p_2) \quad (4.8)$$

where, it is valid: $l_1 \ll l_2$ a $p_1 \gg p_2$ a $k_{AM1} + k_{AM2} = k_{max} = \Delta l_{max}$.

If nonlinear function $g_M(l, p)$, ([1], [2], [3]) in relation (4.8) is known, then the relation between actuator output (length l , or l_d) and input (air pressure p) can be written as a nonlinear function f_N :

$$abs(l_d) = f_N(p) \quad (4.9)$$

$$abs(\beta) = l_d / r_{kl} = \{f_N(p) / r_{kl}\} \quad (4.10)$$

It is obvious from relations (4.9), (4.10) and Figures 7 and 9 that values of corresponding parameters β and l_d will be reached with positive and also with negative polarities. Therefore, also their input parameter – pressure p have to be considered with both polarities, despite to a fact that its value in individual muscles is always positive ($p_{AM1} > 0$ a $p_{AM2} > 0$). This procedure is performed according to sign of required motion of PM l_{dD} , or required angular motion β_D , as follows:

$$\begin{aligned} \text{if } sign \beta_D = +, \quad \text{then} \quad p &= p_{AM2} \cdot sign \beta_D > 0 \quad \text{where } sign \beta = + \quad \text{and} \quad p_{AM1} = konst. > 0 \\ \text{if } sign \beta_D = -, \quad \text{then} \quad p &= p_{AM1} \cdot sign \beta_D < 0 \quad \text{where } sign \beta = - \quad \text{and} \quad p_{AM2} = konst. > 0 \end{aligned}$$

Shown conditions of angular displacement β are valid also for displacement of PM l_d , but $sign \beta_D$ is substituted by $sign l_{dD}$ in conditions:

$$\begin{aligned} \text{if } sign l_{dD} = +, \quad \text{then} \quad p &= p_{AM2} \cdot sign l_{dD} > 0 \quad \text{where } sign l_d = + \quad \text{and} \quad p_{AM1} = konst. > 0 \\ \text{if } sign l_{dD} = -, \quad \text{then} \quad p &= p_{AM1} \cdot sign l_{dD} < 0 \quad \text{where } sign l_d = - \quad \text{and} \quad p_{AM2} = konst. > 0 \end{aligned}$$

Total angular displacement of actuator roller is:

$$\beta = l_d / r_{kl} = \{abs(l_d) \cdot sign(l_d)\} / r_{kl} \quad (4.11)$$

$$\beta = abs(\beta) \cdot sign(\beta) \quad (4.12)$$

where displacement and total length of PM actuator are:

$$l_d = abs(l_d) \cdot sign(l_d) \quad (4.13)$$

$$l = l_0 + l_d = l_0 + abs(l_d) \cdot sign(l_d) \quad (4.14)$$

also value of PM contraction is:

$$k = l_{max} - l = l_{max} - l_0 - abs(l_d) \cdot sign(l_d) \quad (4.15)$$

Displacement l_d against referential point E will correspond to intersection points of PMs characteristics, for example points 1 – 4 in Figure 9. Figure represents such situation in which AM1 is under constant air pressure and pressure in AM2 is changing from maximum to zero values. Then, position of actuator arm is in point C, it means maximal positive deviation from referential point E. The same procedure is possible for reversed air pressures in PMs. Then, position of actuator arm is in point D, it means maximal negative deviation. Work point of actuator position will move from initial referential point E to points C or D over corresponding characteristics with pressure p_m during changes of pressure in individual muscles.

4. 2 Static characteristics of antagonistic actuator

System described in sections 4 and 4.1 creates power unit of servosystem – actuator. It creates regulated system together with load, which output is position (or velocity, acceleration), and which can be expressed as change of length l_d of PM against referential point E (or change of muscle contraction k), or as slew angle β of arm r . Air pressure p entering corresponding PM is input of actuator.

Static nonlinear characteristic of actuator is shown in Figure 10. It is result of measurements of functional sample of actuator. It was realized by application of two McKibben PMs of type Shadows Air Muscle SAM 30x290x6, made by British company The Shadow Robot Company, London, UK. Internal area of PM cross-section was 30 mm, length 290 mm, under contraction max. 25%. Internal area of air supply pipe cross-section was 6 mm. Diameter of roller kl was $d_{kl} = 2r_{kl} = 60$ mm. Working pressure of compressed air was 3,62 bar (maximal allowed pressure is 6 bar). Mass load m was created by actuator arm ($m = 0, 4$ kg).

Figure 10 shows trends of nonlinear characteristics of actuator with PMs according to Figures 7 and 8, where value of displacement (change of muscle length) l_d against initial position l_0 depends on filling air pressure p (right scale). This figure shows resulting position of arm expressed also in form of angular displacement β (left scale). It is obvious that $abs(l_{dmax}) = 30$ mm and $abs(\beta_{max}) = 60$ deg as shown in Figure 10.

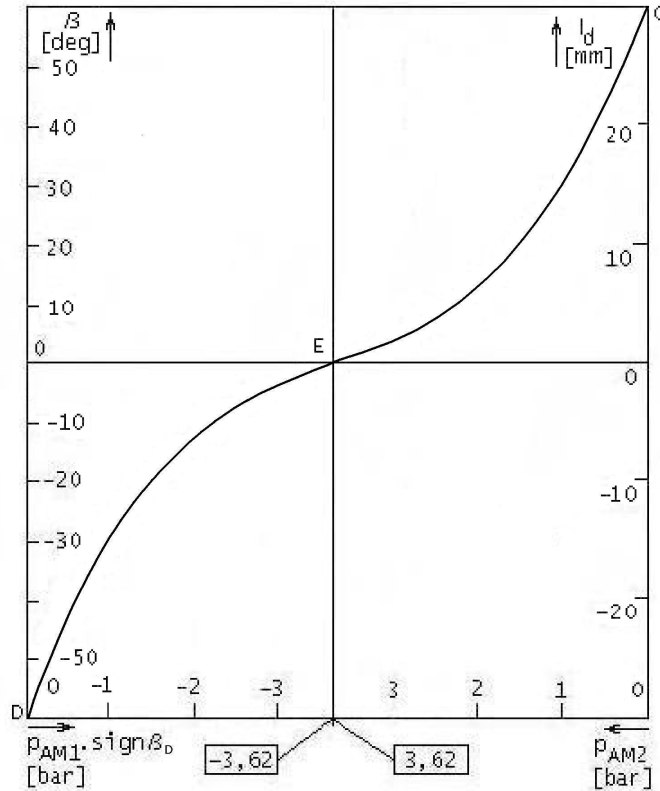


Figure 10.: Static characteristics of actuator with antagonistic configuration of pneumatic artificial muscles SAM 30 x 290

Horizontal axis contains scale of compressed air pressure p , where pressure sign in individual PMs is determined by polarity of desired value of position β_D , which system reaches after activation of corresponding PM. Real pressures in both muscles are positive, change of pressure in PM AM1 causes changes of positions with negative sign. Scales of pressures are also oriented descending, it means from maximal value to zero. If values of air pressures in both muscles are maximal, actuator is in referential point E, what means position in intersection point in the middle of Figure 10.

Decreasing pressure in one of PMs changes position of actuator arm according to measured curve, to the left or right. Pressure in second PM is kept at maximal value. Limits of arm are shown in Figure 10 as points C and D and correspond with their position in Figure 7, or Figure 9.

Besides parameters of used PMs and after measurements characteristics of actuator (Figure 10), the functional relation of angular displacement of actuator shaft β on filling air pressure p was set:

$$abs(\beta) = A (p_{max} - p)^3 + B (p_{max} - p) \quad (4.16)$$

where $A = 0,9669$, $B = 3,3029$, $p_{max} = 3,62$ bar for used types of PMs. Besides pressure p (bar) is value β in angular degrees (deg). Sign β depends on pressure of active PM in sense (4.12). Match of calculated function (4.16) with measured values has index of correlation $IK = 0,999349$.

5. Conclusions

Actuator consisting from pneumatic artificial muscle and return spring is nonlinear system, which limit position is nonlinear function of filling air pressure of PM. It enables realization of relatively simple position bioservosystem with seemly lower requirements to control and costs. Characteristics of limit position of actuator are nonlinear function of filling air pressure in artificial muscle and their trends are various under various values of actuator load. It is consequent from nonlinear characteristics of artificial muscle and nonconstant directive force of return spring. Also, it is necessary to take into account nonconstant tensile force (respectively torsion moment) of actuator, which magnitude is changing with the value of artificial muscle contraction. This property causes also nonconstant stiffness of mechanism under various values of position.

Artificial muscle has to overcome also variable directive force of return spring besides forces (moments) from load, therefore requirements to its nominal parameters (tensile force) are essentially higher as it can be

derived only from load magnitude (acting of allowed external force or moment – outage). Load can be also gravity of mass m during change of actuator position against predicted initial value. It is assumed that forces of artificial muscles and spring have to be several times higher than is maximal loading force (moment) due to reach the adequate stiffness of mechanism. Ratio depends on used PM, allowed inaccuracy of position, allowed deviation under influence of outage, etc. Ideal case of absolute stiffness assumes that acting forces of PM and spring are approximating to infinity under zero value of outage.

Actuator with one pneumatic artificial muscle and spring, which acts against tensile force of artificial muscle, is appropriate solution in some cases. It needs only one inlet and outlet valve, what is useful in synthesis of „low cost“ bioservosystems. Then, main indicator is minimizing costs and simplicity of control under not too high requirements onto parameters of bioservosystem.

Pressure of actuator consisting of two pneumatic artificial muscles in antagonistic configuration is controlled only in one artificial muscle in each half of angular displacement of shaft of roller. Pressure of second artificial muscle is constant and acts as nonlinear pneumatic spring. Such actuator is nonlinear system, which limit position is nonlinear function of air filling pressure in PMs, symmetric by center. Angular displacement of roller shaft increases with raising trend while decreasing the pressure in active PM. Trend of static characteristics of such system shows that actuator gain depends on position of its arm, which depends on pressure and force relations in individual artificial muscles. Configuration of actuator together with simple control system enables construction of relatively simple position bioservosystem with adequate costs and requirements to control system. Characteristics of limit position of actuator are nonlinear function of filling air pressure in artificial muscle and their trends are various under various load of actuator. It is obvious from nonlinear characteristics of artificial muscles. Also, it is required to respect nonconstant tensile force (or torsion moment) of actuator, which value is changing with value of angular displacement of roller shaft of actuator (contraction of artificial muscle, displacement of artificial muscle). Simultaneously, this property also causes nonconstant stiffness of mechanism under various values of position, where maximal and symmetrical stiffness is reached in referential point.

Active artificial muscle has to overcome also variable directive force of passive artificial muscle besides load forces. Therefore, the requirements onto nominal parameters (tensile force) of artificial muscles are higher as it can be derived from load magnitude. Relating to the necessity of appropriate stiffness of mechanism, it is assumed that forces of artificial muscles of actuator are higher than maximal loading force.

Acknowledgement

This work was supported by the Science grant agency of Ministry of Education of Slovak Republic, VEGA, grant No. 1/2212/05 and the Institutional task no. !/20007 of the University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Slovak republic.

References

- [1] Tondu, B., Lopez, P.: Modelling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators, IEEE Control systems Magazine, April 2000, pp. 15- 38
- [2] Novák - Marcinčin J.: Biomechanizmy, Elfa Košice, ISBN 80-7099-218-2, 1993, str. 34 – 47.
- [3] Klute, GK. Hannaford, B.: Modeling pneumatic McKibben artificial muscle actuators: approaches and experimental results. Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control. November 1998
- [4] Chou, C. P., Hannaford, B.: Measurement and modeling of artificial muscles, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, Vol. 12, pp. 90-102
- [5] Petík, A., Balara, M.: Pneumatiký umelý sval Shadow Air Muscle a jeho model. Mezinárodní vědecká konference, Ostrava 5. – 7. 9. 2000, VŠB Ostrava, Fakulta strojní, Sekce 5, Production systems with industrial robots, ISBN 80 – 7078 – 799 – 6, pp. 44.1 – 44.8
- [6] Balara, M., Petík, A.: Experimentálne meranie statickej charakteristiky umelého svalu MB0124. New Trends in the Operation of Production Technology. 4 – th international scientific conference. 21. – 22. 11. 2001, Prešov, Slovakia. ISBN 80 – 7099 – 723 – 0. pp. 97 – 100
- [7] Balara, M. Petík, A.: Nelineárny model pneumatického umelého svalu. Strojárstvo v hospodárstve a priemysle, 11/2000, ročník IV. Žilina, ISSN 1335 – 2938, pp. 54 – 55

LOŽISKOVÝ REDUKTOR A JEHO MATEMATICKÝ MODEL

Milan Balara

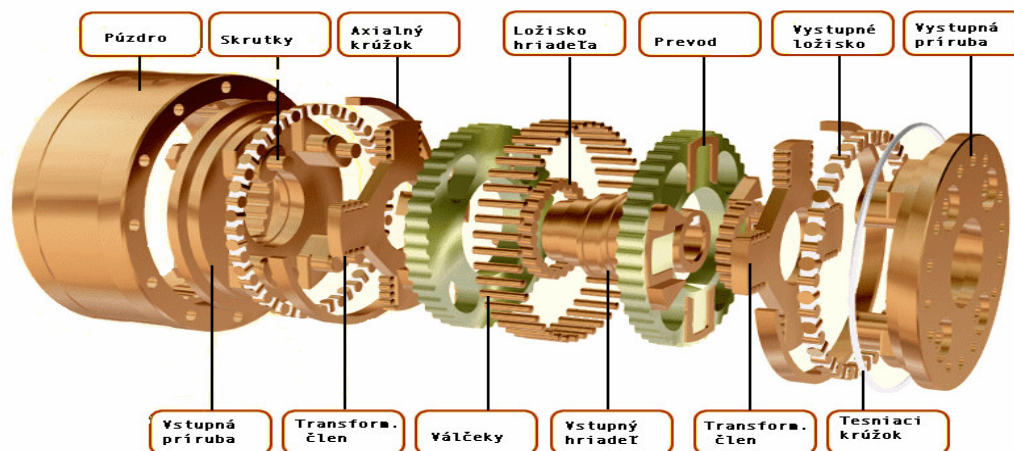
Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Bayerova ul. č 1,
Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky. 080 01 Prešov, Slovenska republika
balara.milan@ fvt.sk

Abstrakt: Článok obsahuje matematický model ložiskového reduktora typu SPINEA TWINSPIN vo forme lineárnych diferenciálnych rovníc, kde systém reduktora je opísaný ako trojmotová sústava so vzájomnými pružnými väzbami. Článok obsahuje taktiež kinematickú a blokovú schému ložiskového reduktora, včítane výsledkov simulácie, responzií prevodovky na vstupný krútiaci moment. Opisovaná prevodovka SPINEA TWINSPIN sa prejavuje tlmenými kmitmi výstupného krútiaceho momentu a veľmi silne tlmenými kmitmi uhlovej rýchlosti výstupného hriadeľa.

Kľúčové slová: Prevodovka, ložiskový reduktor, trojmotový systém, prevodovka SPINEA TWINSPIN

1. Úvod

Prevodovky typu SPINEA TWINSPIN predstavujú novú generáciu prevodových systémov. Vyrábajú sa s označením SDA (SPINEA Drive A series). Sú založené na unikátnom redukčnom mechanizme predstavujúcom novú generáciu vysokopresných prevodoviek. Integrujú v sebe dve funkcie: funkciu redukcie otáčok a funkciu ložiska [2].

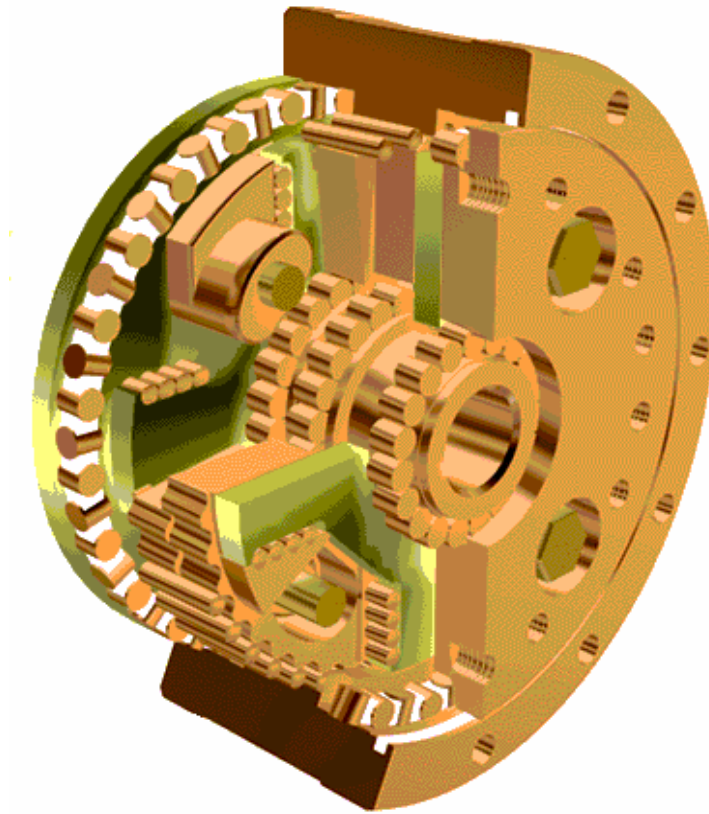


Obr. 1: Prevodovka SPINEA TWINSPIN a jej základné časti

Komponenty SDA prevodovky sú montované v predopnutom stave za účelom linearizácie torznej charakteristiky prevodovky a eliminácie jej vôle. Toto predpätie len nepatrne prispieva k zvýšeniu frikčného (trečieho) momentu prevodovky indikovaného na vstupnom hriadeľi prevodovky. Valčekové uloženie vstupného hriadeľa spôsobuje veľmi nízky trečí moment na vstupnom hriadeľi. V dôsledku použitia valivých kinematických dvojíc v redukčnom mechanizme je prenos výkonu prevodovkou realizovaný s maximálnou možnou účinnosťou. Dôsledkom nízkeho vnútorného trenia v prevodovke je, že sa ozubené kolesá takmer neopotrebovávajú. To

znamená podstatne vyššiu životnosť a spoľahlivosť oproti iným dostupným systémom. Pre nízke vnútorné trenie môžu takéto reduktory pracovať aj pri vysokých menovitých otáčkach.

Vlastnosti takéhoto druhu prevodoviek určujú aj oblasti jej použitia, ktorými sú hlavne: obrábacie stroje a obrábacie centra, roboty a montážne systémy, manipulačné a transportné systémy, indexovacie zariadenia, výrobné stroje, výrobky leteckého a zbrojného priemyslu, aktory (aktuatory, výkonové členy) pohonov a servosystémov, navigačné systémy a meracie zariadenia. Integrácia funkcie reduktora a ložiska umožňuje použiť takéto prevodovky priamo napríklad ako kľb robota, ako otočný stôl obrábacieho stroja, alebo ako zväracie polohovadlo. V takýchto prípadoch sú externé sily a momenty prenášané radiálne – axiálnym ložiskom inštalovaným vo vnútri prevodovky.



Obr. 2: Prevodovka (ložiskový reduktor) SPINEA - TWINSPIN

2. Princíp prevodovky

Základné časti prevodovky typu SPINEA sú znázornené na obr. 1 [2]. Vstupný hriadeľ prevodovky je tvarovaný tak, že na jeho telese sa nachádzajú dva proti sebe orientované excentre. Tieto, skrz válčkové vedenie prenášajú svoj pohyb na kolesá SD s válčkovým ozubením. Uvedené kolesá sú potom odvaľované excentrami tak, že sa svojím válčkovým ozubením opierajú o válčkové ozubenie nosného telesa prevodovky. Následkom toho, že válčkové ozubenie nosného telesa prevodovky má väčší počet zubov ako kolesá SD, tieto sa okrem odvaľovania aj otáčajú uhlovou rýchlosťou danou pomerom rozdielu válčkových zubov a celkového počtu zubov válčkového ozubenía nosného telesa prevodovky. Výsledné redukované otáčky kolies SD sú na výstupnú prírubu prevodovky prenášané cez transformačné členy, opierajúce sa ku kolesám SD a na výstupnú prírubu prevodovky cez redukčné valčeky. Prevodovka (ložiskový reduktor) SPINEA – TWINSPIN je znázornená na obr. 2.

3. Lineárny matematický model prevodovky

Komponenty prevodovky SPINEA sú montované predopnutom stave za účelom linearizácie torznej charakteristiky prevodovky a eliminácie jej vôle. Preto pri zostavovaní matematického modelu prevodovky

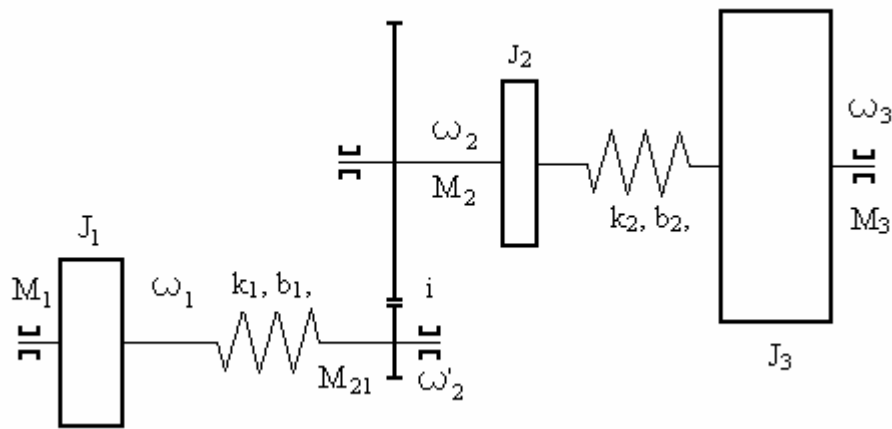
predpokládame, že ide o sústavu lineárnu a bez zubovej vôle [1]. Prevodovka SPINEA sa bude javiť ako lineárny trojhmotový systém s elastickými väzbami [3] (Obr. 3).

Lineárne diferenciálne rovnice popisujúce sústavu podľa obr. 3 a schémy na obr. 4 majú nasledujúci tvar:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{t1} - M_2 / i \quad (1.1)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_{t2} - M_3 \quad (1.2)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{t3} \quad (1.3)$$



Obr. 3: Kinematická schéma prevodovky Spinea - TWINSPIN

potom

$$M_2 = M_{21} \cdot i \quad (1.4)$$

$$M_{21} = k_1 (\phi_1 - \phi_2') + b_1 (\omega_1 - \omega_2') \quad (1.5)$$

$$M_3 = k_2 (\phi_2 - \phi_3) + b_2 (\omega_2 - \omega_3) \quad (1.6)$$

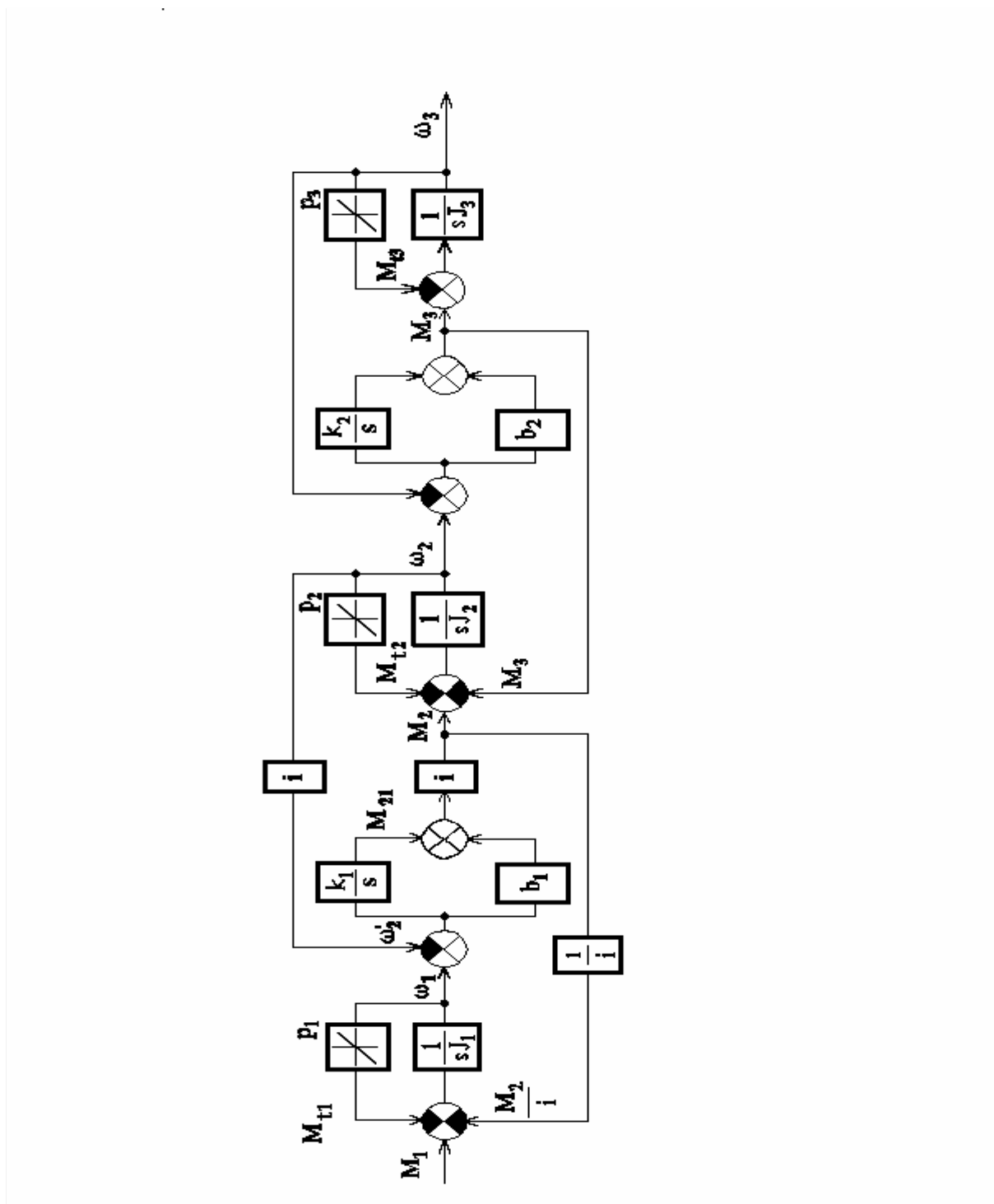
$$M_{33} = M_3 - M_{t3} \quad (1.7)$$

$$\omega_2' = \omega_2 \cdot i \quad (1.8)$$

$$\phi_2' = \phi_2 \cdot i \quad (1.9)$$

kde:

- M_1 - krútiaci moment servomotora, (vstupný moment),
- M_{21} - krútiaci moment pružného spojenia medzi hmotou ,
- M_2 - krútiaci moment pružného spojenia medzi hmotou 1 a 2 (J_1 a J_2),
- M_{33} - krútiaci moment pružného spojenia medzi hmotou,
- M_3 - krútiaci moment pružného spojenia medzi hmotou 2 a 3 (J_2 a J_3),



Obr. 4: Bloková schéma prevodovky SPINEA

- M_{t1} - krútiaci moment viskózneho trenia kotvy servomotora a vstupného hriadeľa prevodovky,
- M_{t2} - krútiaci moment viskózneho trenia mechanizmu vo vnútri prevodovky,
- M_{t3} - krútiaci moment viskózneho trenia výstupnej príruby prevodovky,
- i - prevodový pomer prevodovky,
- J_m - moment zotrvačnosti kotvy servomotora,
- J_{INP} - moment zotrvačnosti vstupnej časti prevodovky,
- J_1 - moment zotrvačnosti tvorený inerciou kotvy servomotora a inerciou a vstupnej časti prevodovky,
- J_2 - moment zotrvačnosti (inercia) kolies SD s valčekovým ozubením,
- J_3 - moment zotrvačnosti výstupnej časti prevodovky a záťaže pripojenej na výstupnú prírubu prevodovky,

- ϕ_1 - uhlová poloha vstupného hriadeľa,
- ϕ_2 - uhlová poloha kolies SD s valčekovým ozubením ,
- ϕ'_2 - uhlová poloha kolies SD s valčekovým ozubením prepočítaná na vstup prevodovky,
- ϕ_3 - uhlová poloha výstupného hriadeľa (prírubby),
- ω_1 - uhlová rýchlosť kotvy servomotora a vstupnej časti prevodovky,
- ω_2 - uhlová rýchlosť kolies SD s valčekovým ozubením,
- ω'_2 - uhlová rýchlosť kolies SD s valčekovým ozubením prepočítaná na vstup prevodovky,
- ω_3 - uhlová rýchlosť výstupnej príruby prevodovky,
- k_1 - koeficient torznej tuhosti vstupnej časti prevodovky,
- k_2 - koeficient torznej tuhosti medzi kolesami SD a výstupnou prírubou prevodovky,
- b_1 - koeficient disipatívneho tlmenia na vstupe prevodovky,
- b_2 - koeficient disipatívneho tlmenia na výstupe prevodovky,
- p_1 - koeficient viskózneho trenia na vstupe prevodovky,
- p_2 - koeficient viskózneho trenia vo vnútri prevodovky,
- p_3 - koeficient viskózneho trenia na výstupe prevodovky,
- s - Laplaceov operátor.

4. Bloková schéma prevodovky

Bloková schéma lineárneho modelu prevodovky SPINEA je na obr. 4. Táto schéma predstavuje systém obsahujúci tri rotujúce hmoty, dve pružné spojenia a tri charakteristiky trenia. Usporiadanie týchto vlastností zodpovedá kinematickej schéme na obr. 3.

Pružné spojenia sa v prípade prevodovky SPINEA vyznačujú vysokými hodnotami koeficientov torznej tuhosti a koeficientov disipatívneho tlmenia. Charakteristiky trenia sú lineárne a hodnoty koeficientov viskózneho trenia sú u tohto druhu prevodovky pomerne nízke.

5. Simulácia vlastností prevodovky

Parametre simulovanej prevodovky SPINEA SD 170 sú nasledujúce:

$J_{INP} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$	$J_1 = 0,711 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$
$J_2 = 0,894 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$	$J_3 = 0,13454 \text{ kgm}^2$
$i = 31, (97)$	$k_1 = 250\,000 \text{ Nm/rad}$
$k_2 = 321\,314 \text{ Nm/rad}$	$b_1 = 20 \text{ Nms/rad}$
$b_2 = 45 \text{ Nms/rad}$	$p_1 = 0,001 \text{ Nms/rad}$
$p_2 = p_3 = 0,05 \text{ Nms/rad}$	

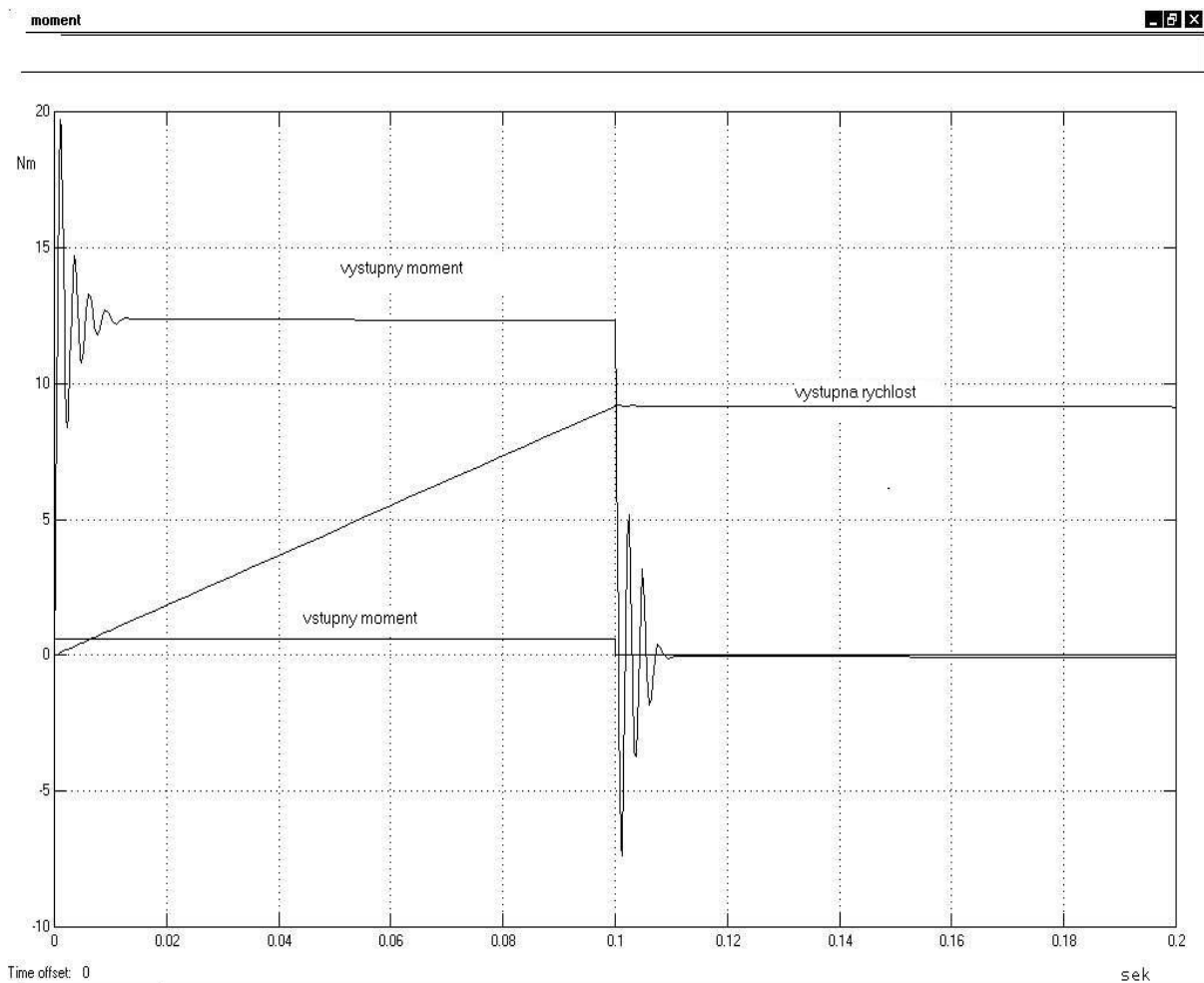
Vlastnosti takto popísanej prevodovky sú východiskom pri riešení systémov automatického riadenia s aplikovanou prevodovkou SPINEA. Simulované časové responzie výstupnej uhlovej rýchlosti a výstupného krútiaceho momentu prevodovky SPINEA (typ SD 170) pri skokovej a časovo obmedzenej hodnote vstupného momentu sú zobrazené na obr. 5.

Simulácia bola vykonaná ako vyšetrenie odozvy modelu prevodovky na vstupný moment hodnoty 0.6 Nm počas trvania 0.1 sek. Na obr. 5 čiara „výstupný moment“ je odozva, alebo presnejšie reakcia výstupnej príruby prevodovky SPINEA na definovaný vstupný moment. Ustálenie po utlmení je v časovej oblasti kratšie ako 0.01 sekundy. Krivka „výstupná rýchlosť“ zobrazuje priebeh uhlovej rýchlosti výstupného hriadeľa prevodovky.

Simulácia bola vykonaná pomocou programovacieho nástroja MATLAB a s jeho nadstavbou SIMULINK. Modelovaná prevodovka SPINEA má z hľadiska priebehu momentových responzií vlastnosti kmitavého systému s veľmi vysokou tuhosťou a tlmením. To v konečnom dôsledku vedie ku zatlmeným priebehom prechodových charakteristík (responzií) uhlovej rýchlosti, blížiacich sa charakteristikám proporcionálnej sústavy.

6. Záver

Opísaná a modelovaná prevodovka SPINEA má z hľadiska priebehu momentových responzií vlastnosti kmitavého systému s veľmi vysokou tuhosťou a tlmením. To v konečnom dôsledku vedie ku zatlmeným priebehom prechodových charakteristík (responzií) uhlovej rýchlosti, blížiacich sa charakteristikám proporcionálnej sústavy. V porovnaní s harmonickou prevodovkou sa javí prevodovka SPINEA ako sústava s vyššou tuhosťou, taktiež ako sústava viac tlmená. Okrem funkcie presného reduktora otáčok plní aj úlohu ložiska čo je jej významnou prednosťou.



Obr. 5: Odozvy (responzie) prevodovky SPINEA SD 170 na zmenu vstupného momentu, v tvare časovo ohraničeného impulzu.

Poznámka

Tento príspevok bol vytvorený v rámci riešenia inštitucionálnej úlohy Technickej univerzity v Košiciach, Fakulty výrobných technológií so sídlom v Prešove, č. 1/2007, „Výskum dynamických systémov a možností zdokonaľovania ich syntézy“.

Literatúra

- [1] Balara, M., Balara, D., Balara, A., Gots, I., 1998: The Three Mass Model of Harmonic Transmission. International Journal Automation Austria, Heft 1,2, Jg.6, (1998), Vienna, Austria, pp. 27 - 36.
- [2] SPINEA DRIVE SDA SERIES, 1998, New High Precison Reduction Gear, Obchodno technický buletin firmy SPINEA Ltd., Košice.
- [3] Balara, M.: , 2002, Matematický model dynamických vlastností ložiskového reduktora Twinspin. Automa, roč. 8, č. 5 – 2002, ISSN 1210 – 9592. FCC Public s. r. o. Praha, Česká republika. Str. 49 – 51

FREKVENČNÉ CHARAKTERISTIKY LOŽISKOVÉHO REDUKTORA

Milan Balara

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Bayerova ul. č 1,
Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky. 080 01 Prešov, Slovenska republika
balara.milan@ fvt.sk

Abstrakt: Článok pojednáva o vlastnostiach prevodoviek – ložiskových reduktorov typu SPINEA TWINSPIIN, ktoré predstavujú lineárny trojmotový systém so vzájomným pružným prepajením hmôt. V článku sú uvedené výsledky simulácie vo forme prechodovej charakteristiky a frekvenčných charakteristík vybranej prevodovky typu SD 170. Taktiež sú uvedené obrazové prenoso tejto prevodovky, ktoré boli stanovené z priebehov frekvenčných charakteristík. Z hľadiska priebehu momentových frekvenčných charakteristík a príslušných prenosov, sa prevodovky SPINEA TWINSPIIN javia ako proporcionálno derivačná sústava štvrtého radu. Vzhľadom na veľkosť časových konštánt môžeme okrem najväčšej z nich ostatné zanedbať. V tomto prípade bude momentový obrazový prenos prevodovky mať charakter lineárneho kmitavého člena.

KLúčové slová: Prevodovka, ložiskový reduktor, frekvenčné charakteristiky

1. Úvod

Prevodovky typu SPINEA TWINSPIIN predstavujú novú generáciu prevodových systémov. Vyrábajú sa s označením SDA (SPINEA Drive A series). Sú založené na unikátnom redukčnom mechanizme predstavujúcom novú generáciu vysokopresných prevodoviek. Integrujú v sebe dve funkcie: funkciu redukcie otáčok a funkciu ložiska. [2]. Matematický model týchto prevodoviek je známy, tvorí ho sústava lineárnych diferenciálnych rovníc s konštantnými koeficientmi [3]. Na báze týchto rovníc a príslušnej blokovej schémy je možné pri aplikácii simulačného programu vypočítať a znázorniť prechodové a frekvenčné charakteristiky vybraného typu prevodovky.

2. Výpočet charakteristík a stanovenie prenosov

Parametre simulovanej prevodovky SPINEA SD 170 sú nasledujúce:

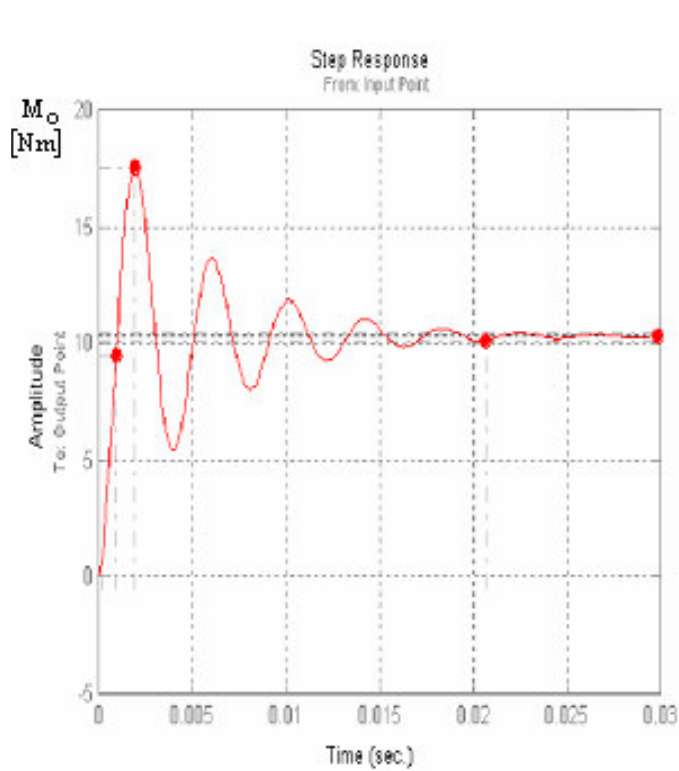
$$\begin{array}{ll} J_{INP} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 & J_1 = 0,711 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \\ J_2 = 0,894 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 & J_3 = 0,13454 \text{ kgm}^2 \\ i = 97 & k_1 = 250\,000 \text{ Nm/rad} \\ k_2 = 321\,314 \text{ Nm/rad} & b_1 = 20 \text{ Nms/rad} \\ b_2 = 45 \text{ Nms/rad} & p_1 = 0,001 \text{ Nms/rad} \\ p_2 = p_3 = 0,05 \text{ Nms/rad} & \end{array}$$

Simulácia bola vykonaná pomocou programovacieho nástroja MATLAB a s jeho nadstavbou SIMULINK. Výsledkom simulácie bolo získanie a vyšetrenie odozvy (responzie) modelu prevodovky na vstupnú skokovú zmenu krútiaceho momentu M_i ($M_i = M_1$) o veľkosti 0.11 Nm. Na obr. 1 je znázornený priebeh prechodovej charakteristiky výstupného krútiaceho momentu.

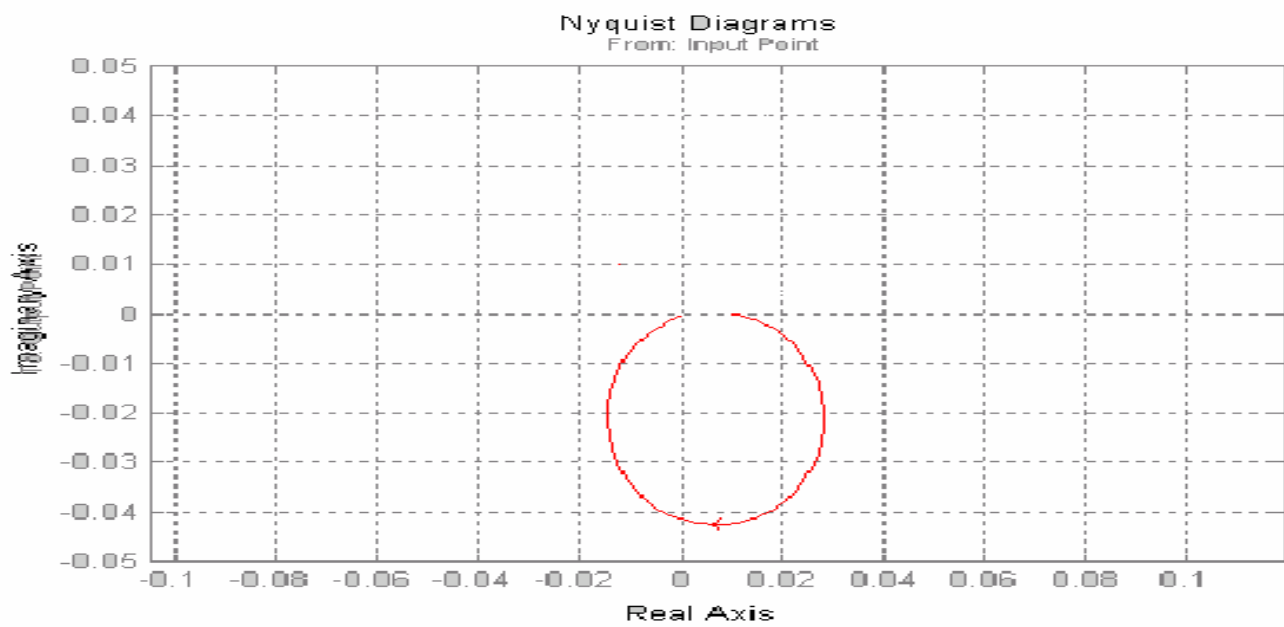
Podľa uvedených parametrov prevodovky a diferenciálnych rovníc v kap. 3 boli vypočítané priebehy frekvenčných charakteristík a taktiež nasledujúce parametre prevodovky:

$$\begin{array}{l} \text{-zosilnenie prenosu prevodovky } K_T = 1/i = 1/97 = 0.01031 \\ \quad [K_T]_{dB} = -39,735 \text{ dB} \\ \text{-tlmenie (podľa lit. [4]) } a = 0,123 \end{array}$$

Na obr. 2 a 3 sú hodnoty vypočítaných zosilnení potvrdené. Na obr. 2 a 3 sú znázornené frekvenčné charakteristiky prevodovky SPINEA SD 170 získané simuláciou pomocou programovacieho nástroja MATLAB a s jeho nadstavbou SIMULINK. Z obr. 3 boli odčítané nasledujúce hodnoty časových konštánt obrazového prenosu $F_T(s)$ prevodovky SPINEA SD 170:

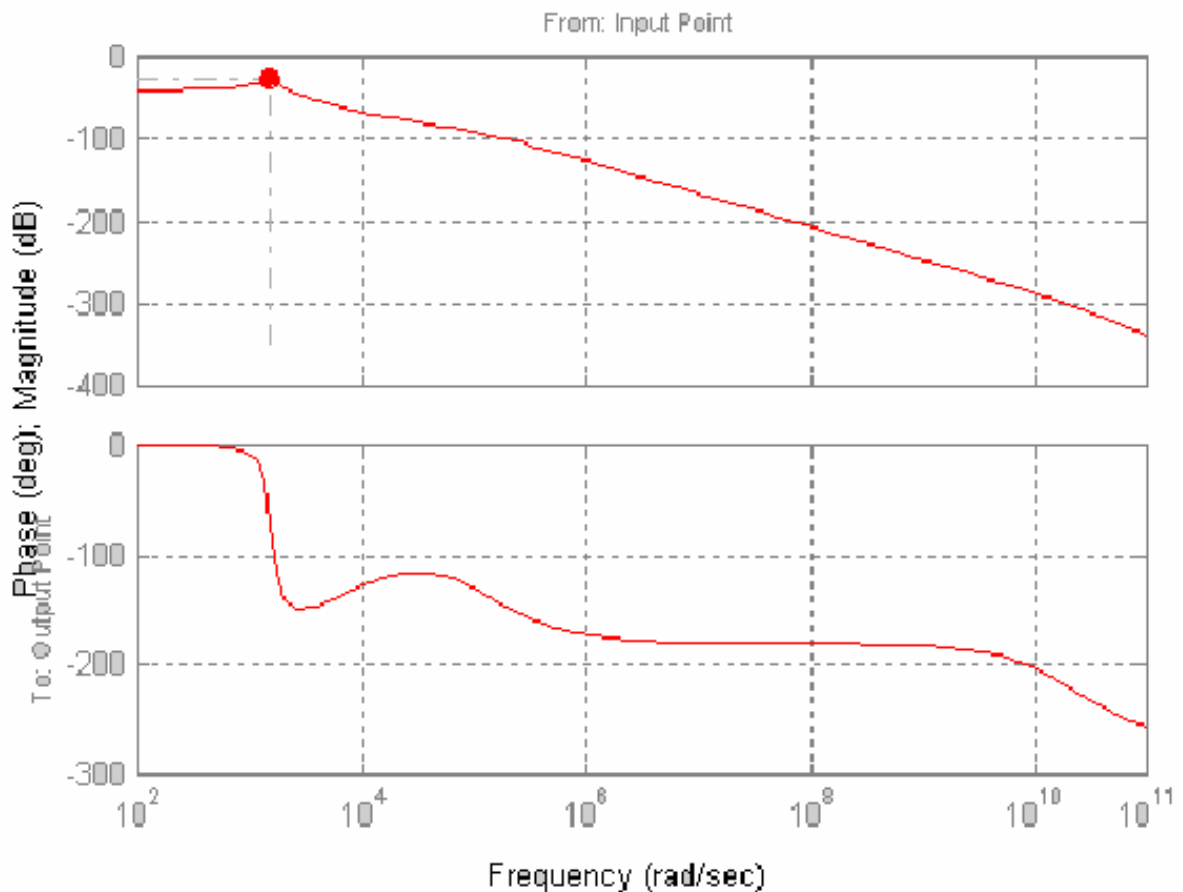


Obr. 1: Momentová rezponzia prevodovky SPINEA SD 170 na impulz vstupného momentu.



Obr. 2: Frekvenčná (Nyquistova) charakteristika v komplexných súradniciach prevodovky SPINEA SD 170

Bode Diagrams



Obr. 3: Frekvenčné (Bodeove) charakteristiky v logaritmických súradniciach prevodovky SPINEA SD 170

$$T_0 = 7,69 \cdot 10^{-4} \text{ s}, \quad T_1 = 10^{-4} \text{ s}, \quad T_2 = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ s}, \quad T_3 = 3,636 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

Podľa sklonov charakteristík na obr. 3 a ich zmien bolo možné stanoviť obrazový prenos skúmanej prevodovky, ktorý má nasledujúci tvar:

$$F_T(s) = \frac{M_o(s)}{M_i(s)} = \frac{K_T(T_1s + 1)}{(T_0^2s^2 + 2\alpha T_0s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad (1)$$

Tento všeobecný tvar má v prípade skúmanej prevodovky SPINEA SD 170, po dosadení konkrétnych hodnôt časových konštánt a ostatných parametrov nasledujúci tvar:

$$F_T(s) = \frac{M_o(s)}{M_i(s)} = \frac{0,01031 \cdot (0,0001s + 1)}{(5,91 \cdot 10^{-7} s^2 + 1,958 \cdot 10^{-4} s + 1)(3,33 \cdot 10^{-6} s + 1)(3,636 \cdot 10^{-11} s + 1)} \quad (2)$$

Vlastnosti takto popísanej prevodovky sú východiskom pri riešení systémov automatického riadenia s aplikovanou prevodovkou SPINEA. Z hľadiska priebehu momentových frekvenčných charakteristík a príslušných prenosov, sa takáto prevodovka javí ako proporcionálno derivačná sústava štvrtého radu. Vzhľadom na veľkosti časových konštánt môžeme okrem najväčšej z nich ostatné zanedbať. V tomto prípade bude momentový obrazový prenos prevodovky mať charakter kmitavého člena, s prenosom:

$$F_{T(s)} = \frac{M_o(s)}{M_i(s)} = \frac{K_T}{(T_0^2 s^2 + 2aT_0 s + 1)} \quad (3)$$

Tento zjednodušený model potvrdzujú aj výsledky simulácie. Modelovaná prevodovka SPINEA má z hľadiska priebehu momentovej responzie (Obr. 1) a priebehu frekvenčnej charakteristiky v komplexných súradniciach (Obr. 2) vlastnosti kmitavého systému s veľmi vysokou tuhosťou a pomerne nízkym tlmením. Vplyvy ďalších, menších časových konštánt nie sú badateľné.

3. Záver

Prevodovka SPINEA TWINSPIN má z hľadiska priebehu momentových rezonzií vlastnosti kmitavého systému s vysokou tuhosťou a nízkym tlmením. Z hľadiska priebehu momentových frekvenčných charakteristík a príslušných prenosov, sa takáto prevodovka javí ako proporcionálna derivačná sústava štvrtého radu. Vzhľadom na veľkosti časových konštánt môžeme okrem najväčšej z nich ostatné zanedbať. V tomto prípade bude momentový obrazový prenos prevodovky mať charakter kmitavého člena. Pri simulácii priebehov rezonzií nie sú vplyvy menších časových konštánt badateľné. Charakter kmitavého a tlmeného priebehu momentovej responzie vedie tlmeným priebehom prechodových charakteristík (rezonzií) uhlovej rýchlosti, blížiacich sa charakteristikám proporcionálnej sústavy. V porovnaní s harmonickou prevodovkou sa javí prevodovka SPINEA TWINSPIN ako sústava s vyššou tuhosťou, taktiež ako sústava viac tlmená. Okrem funkcie presného reduktora otáčok plní aj úlohu ložiska čo je jej významnou prednosťou.

Poznámka

Tento príspevok bol vytvorený v rámci riešenia inštitucionálnej úlohy Technickej univerzity v Košiciach, Fakulty výrobných technológií so sídlom v Prešove, č. 1/2007, „Výskum dynamických systémov a možností zdokonaľovania ich syntézy“.

Literatúra

- [1] Balara, D.: Matematický model harmonického prevodu, (Mathematical Model of Harmonic Transmission), Strojírenství, Praha, No. 2, 1982, pp. 85 - 86
- [2] Balara, M., Balara, D., Balara, A., Gots, I.: The Three Mass Model of Harmonic Transmission. International Journal Automation Austria, Heft 1,2, Jg.6, (1998), Wien, Österreich, pp. 27 - 36.
- [3] Balara, M.: Matematický model dynamických vlastností ložiskového reduktora Twinspin. Automa, roč. 8, č. 5 – 2002, ISSN 1210 – 9592. FCC Public s. r. o. Praha, Česká republika. Str. 49 – 51
- [4] Dorf, C.R.: Modern Control Systems. Addison-Wesley Publ. Company. Menlo Park, Ca., 1980, ISBN 0-201-01258-8, pp. 109 – 145
- [5] Hori, Y., Iseki, H., Sugiura, K.: Basic Consideration of Vibration Suppression and Disturbance Rejection Control of Multi-inertia System using SFLAC (State Feedback and Load Acceleration Control), IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 30, NO. 4, July/August 1994, pp. 889 to 896
- [6] SPINEA DRIVE SDA SERIES, 1998, New High Precison Reduction Gear, Obchodno technický buletin firmy SPINEA Ltd., Košice.

The Linear and Nonlinear Mathematical Model of the Harmonic Transmission

Milan Balara

University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Bayerova 1.
080 01 Prešov, Department of the Mathematics, Informatics and Cybernetics, Slovak republic,
balara.milan@ fvt.sk

Abstract: The paper describes the dynamic properties of the harmonic transmission as a linear and non-linear three mass system. The paper contains the equations, block schema and describes the simulated time responses of torque and speed on the output shaft of harmonic transmission. Described harmonic transmission has damped oscillations of output torque and output speed.

Key words: Harmonic transmission, non-linear three mass systém, damped oscillations

1 Introduction

The harmonic transmission is used very often in the servosystems of robots, manipulators, special devices etc. Solution and function of harmonic transmission is described sometimes (for example [2]). Harmonic transmission employs three concentric components to produce high mechanical advantage and speed reduction. Basic components of harmonic transmission are pictured in Fig. 1.

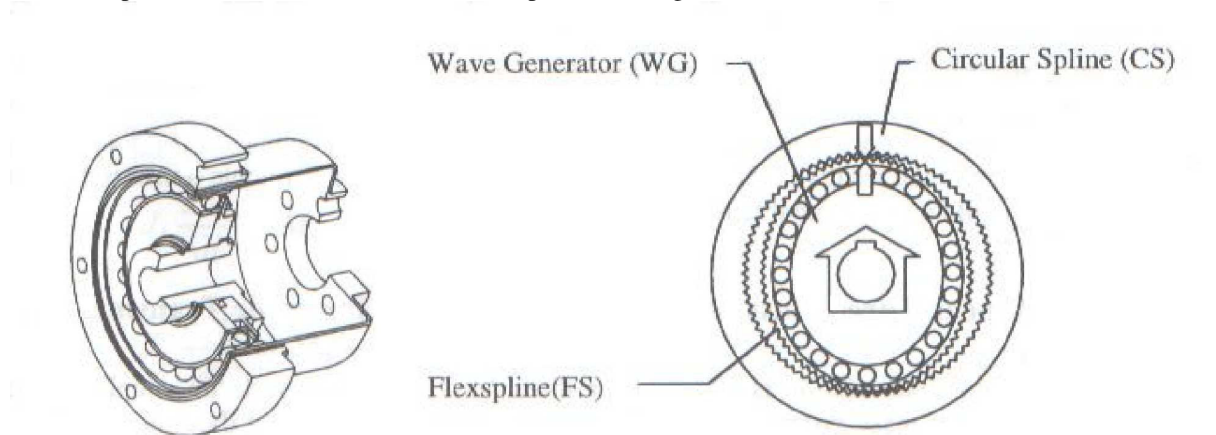


Fig. 1.: Basic components of harmonic transmission

The Circular Spline (CS) is a rigid ring with internal teeth, engaging the teeth of the Flexspline across the major axis of the Wave Generator. The Flexspline (FS) is nonrigid, thin cylindrical cup with external teeth on a slightly smaller pitch diameter than the Circular Spline, resulting in having two fewer teeth on its outer circumference. It fits over and is held in an elliptical shape by the Wave Generator (WG). The Wave Generator is a thin raced ball bearing fitted onto an elliptical plug serving as a high efficiency torque converter.

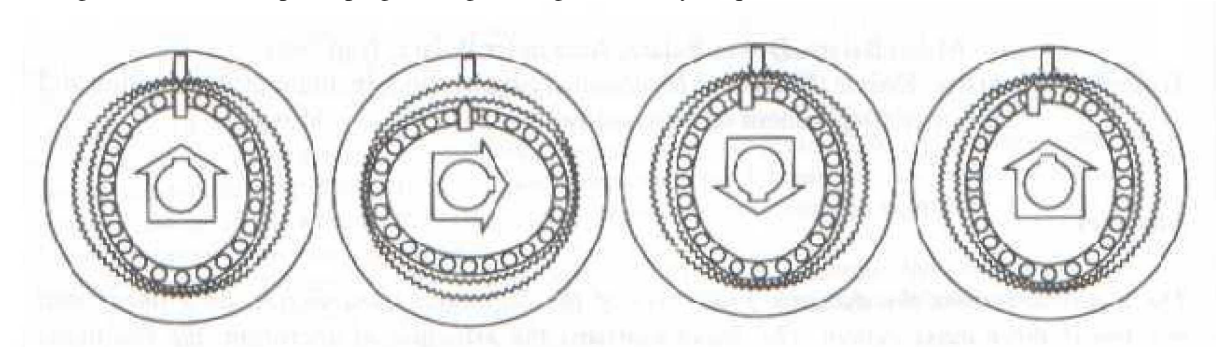


Fig. 2.: The principle of operation of harmonic transmission

As soon as the Wave Generator starts to rotate clockwise, the zone of tooth engagement travels with the major elliptical axis. When the Wave Generator has turned through 180 degrees clockwise the Flexspline has regressed by one tooth relative to the Circular Spline (see Fig. 2). Each full turn of the Wave Generator thus causes relative motion between the Flexspline and Circular Spline equal to two teeth (Harmonic Drive Application Handbook, 1992).

The dynamic properties of this type of reducer are not very simple. The elastic element of reducer with the masses of its some parts is the resource of unusual properties of harmonic transmission. The linear two mass mathematical model of harmonic transmission is noted from 1982 [1] together with computer simulations. The paper describes the dynamic properties of the harmonic transmission as a linear and non-linear three mass system.

2. The Linear Mathematical Model of Harmonic Transmission

The harmonic transmission is a non-linear three mass system with elastic coupling. The description of n-mass system with elastic coupling is possible by using dynamic equations. The linear mathematical model of harmonic transmission is derived upon next suppositions:

- we consider that the first mass J_1 is summation of inertia of servomotor's anchor, shaft and inertia of some input parts of the harmonic transmission. Those parts are connected by short shaft and we may consider them as a one mass, i. e.:

$$J_1 = J_m + J_{INP} \quad (1.1)$$

- we consider that the second mass J_2 is wave generator which is connected by elastic coupling and backlash with first mass (wave generator is connected with input part of harmonic transmission by connection which features backlash),
- we consider that the third mass J_3 is inertia of load (working mechanism) behind the harmonic transmission. It is elastically connected to the J_2 mass by the flexspline, with backlash feature (see fig. 1).

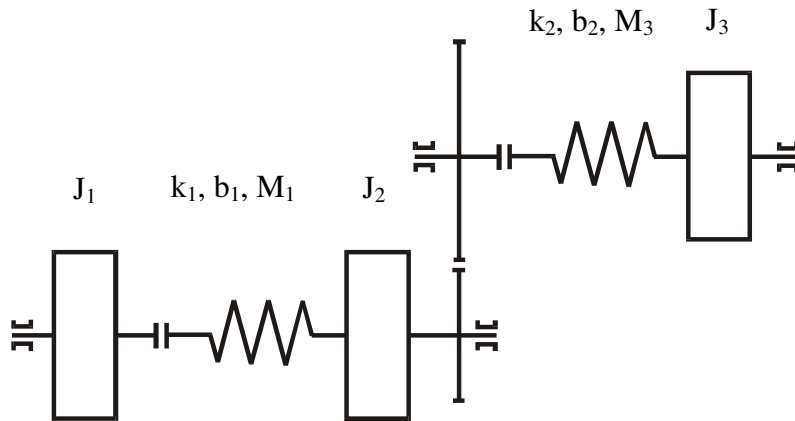


Fig. 3.: Kinematic schema of harmonic transmission

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{t1} - M_2 \quad (1.2)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_{t2} - \frac{M_3}{i} \quad (1.3)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{t3} \quad (1.4)$$

where

$$M_2 = k_1(\phi_1 - \phi_2) + b_1(\omega_1 - \omega_2) \quad (1.5)$$

$$M_3 = k_2(\phi'_2 - \phi_3) + b_2(\omega'_2 - \omega_3) \quad (1.6)$$

$$M_{i1} = p_1 \cdot \omega_1 \quad (1.7)$$

$$M_{i2} = p_2 \cdot \omega_2 \quad (1.8)$$

$$M_{i3} = p_3 \cdot \omega_3 \quad (1.9)$$

$$\omega'_2 = \frac{\omega_2}{i} \quad (1.10)$$

$$\phi'_2 = \frac{\phi_2}{i} \quad (1.11)$$

where:

- M_1 - torque of servomotor, (input torque)
- M_2 - torque of elastic connection between mass 1 and 2 (J_1 and J_2)
- M_3 - torque of elastic connection between mass 2 and 3 (J_2 and J_3)
- M_{i1} - friction torque of servomotor's anchor and input shaft of harmonic transmission
- M_{i2} - friction torque of mechanisms inside the transmission
- M_{i3} - friction torque of mechanisms in output part of the harmonic transmission
- i - gear ratio
- J_m - inertia on the servomotor's shaft
- J_{INP} - inertia of the input part of harmonic transmission
- J_1 - inertia which is summation of inertia of servomotor's anchor and inertia of input part of the harmonic transmission
- J_2 - inertia of the wave generator
- J_3 - inertia on the output part of harmonic transmission
- ϕ_1 - angle of rotation of input shaft
- ϕ_2 - angle of rotation of wave generator
- ϕ'_2 - angle of rotation of wave generator reduced by gear ratio i
- ϕ_3 - angle of rotation of output shaft
- ω_1 - angle speed servomotor's anchor and input shaft
- ω_2 - angle speed of wave generator
- ω'_2 - angle speed of wave generator reduced by gear ratio i
- ω_3 - angle speed of output shaft of harmonic transmission
- k_1 - torsion stiffness coefficient of input shaft of harmonic transmission
- k_2 - torsion stiffness coefficient of elastic cog-wheel
- b_1 - dissipative damping coefficient on the input
- b_2 - dissipative damping coefficient on the output
- a_1 - friction coefficient on the input, (Coulomb friction)
- a_2 - friction coefficient inside harmonic transmission's mechanism, (Coulomb friction)
- a_3 - friction coefficient on the output, (Coulomb friction)
- p_1 - viscous sliding friction coefficient on the input of harmonic transmission
- p_2 - viscous sliding friction coefficient inside harmonic transmission
- p_3 - viscous sliding friction coefficient on the output of harmonic transmission
- α_1 - backlash on the input of harmonic transmission
- α_2 - backlash on the output of harmonic transmission

3. The Non-linear Mathematical Model of Harmonic Transmission

Non-linear model of harmonic transmission is created by using of two types of nonlinearities, which are represented by backlash and friction. The backlash in the kinematic connections is created by non-linear dependence of torque in elastic connections (see fig. 4). Area of backlash is marked as an α_n . If $|\phi_1 - \phi_2| \leq \alpha_1/2$,

and $|\phi'_2 - \phi_3| \leq \alpha_2/2$, then the shaft torques of elastic couples are equal to zero. Connections between mechanisms disappear. Damping coefficient and stiffness coefficient are equal to zero. Movement equations are:

For $|\phi_1 - \phi_2| \leq \alpha_1/2$ and $|\phi'_2 - \phi_3| \leq \alpha_2/2$ is $M_2 = M_3 = 0$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{t1} \quad (2.1)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = -M_{t2} \quad (2.2)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = -M_{t3} \quad (2.3)$$

For $|\phi_1 - \phi_2| > \alpha_1/2$ and $|\phi'_2 - \phi_3| \leq \alpha_2/2$ is $M_3 = 0$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{t1} - M_2 \quad (2.4)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_{t2} \quad (2.5)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = -M_{t3} \quad (2.6)$$

For $|\phi_1 - \phi_2| \leq \alpha_1/2$ and $|\phi'_2 - \phi_3| > \alpha_2/2$ is $M_2 = 0$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{t1} \quad (2.7)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = -M_{t2} - \frac{M_3}{i} \quad (2.8)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{t3} \quad (2.9)$$

For $|\phi_1 - \phi_2| > \alpha_1/2$ and $|\phi'_2 - \phi_3| > \alpha_2/2$ are valid equations for linear model (1.2) - (1.6), (1.10) and (1.11).

The terms for friction torques are as follows:

$$M_{t1} = p_1 \cdot \omega_1 + a_1 \cdot \text{sign} \omega_1 \quad (2.10)$$

$$M_{t2} = p_2 \cdot \omega_2 + a_2 \cdot \text{sign} \omega_2 \quad (2.11)$$

$$M_{t3} = p_3 \cdot \omega_3 + a_3 \cdot \text{sign} \omega_3 \quad (2.12)$$

4. Block Schema and Responses of The Harmonic Transmission

Block schema of non-linear model of the harmonic transmission is in fig. 4. This schema is created as a system, which contains three masses, two elastic couples, two backlashes and a friction. These assumptions are the base for solving the automatic control systems, featuring harmonic transmission. Simulated time responses of

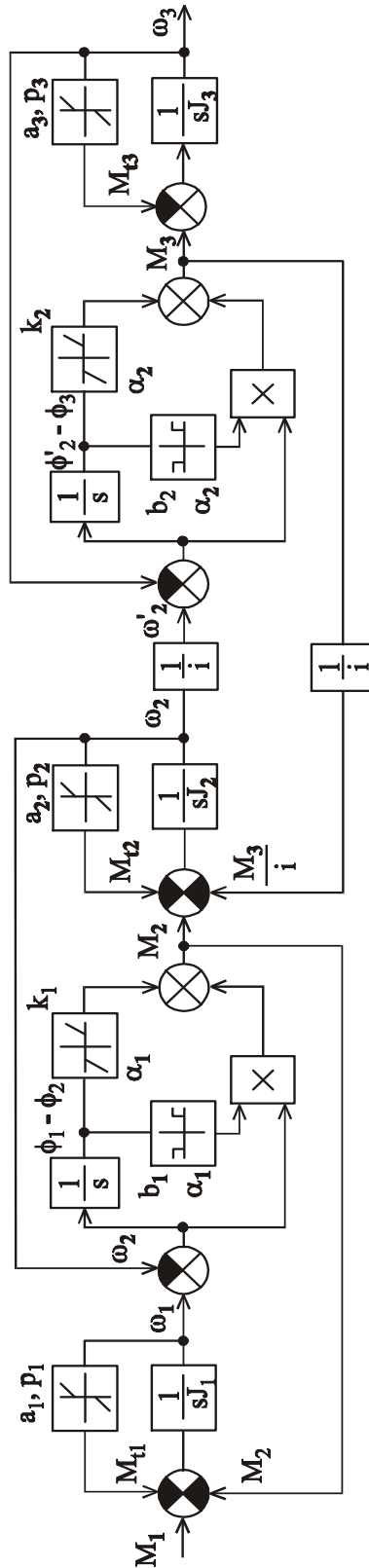


Fig. 4.: Block schema of the harmonic transmission

output angle speed and output torque of harmonic transmission (HP 60, ZTS Zvolen, Slovakia) are in fig. 5. Responses are results of torque impulse M_1 on the input shaft of the harmonic transmission. The parameters of the simulated harmonic transmission are as follows:

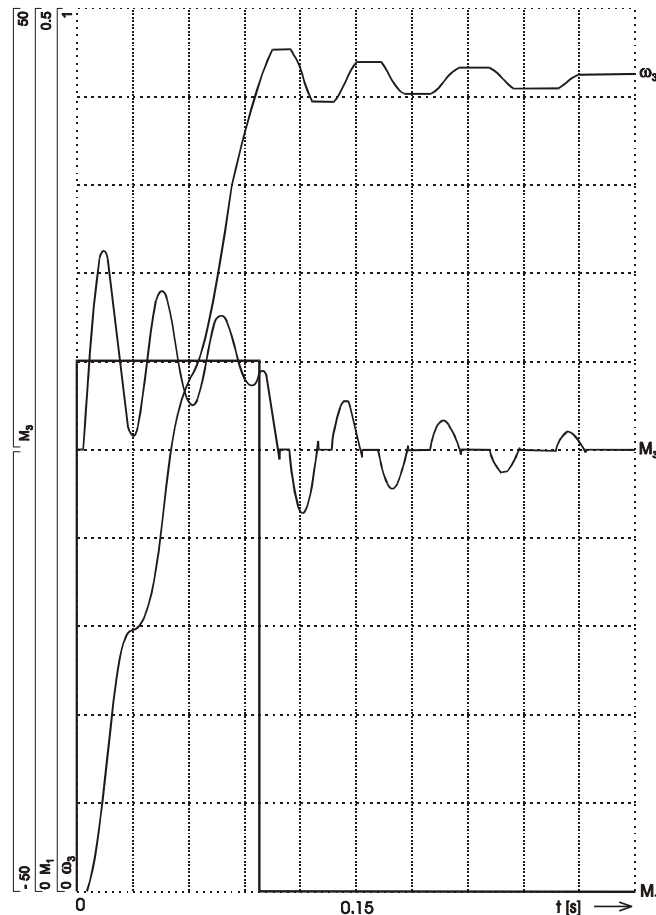


Fig. 5.: Transient responses of output speed ω_3 [rad/s], output torque of harmonic transmission M_3 [Nm] to impulse torque excitation M_1 [Nm]

$J_{INP} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$, $J_1 = 4,78 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$, $J_2 = 1,3894 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$, $J_3 = 20 \cdot J_m \cdot i^2 = 1,1684 \text{ kgm}^2$, $i = 124$, $k_1 = 250\,000 \text{ Nm/rad}$, $k_2 = 33\,000 \text{ Nm/rad}$, $\alpha_1 = 23,58 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$, $\alpha_2 = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$, $p_1 = 0,01 \text{ Nms/rad}$, $p_2 = p_3 = 0,01 \text{ Nms/rad}$, $a_1 = a_2 = a_3 = 0,00001 \text{ Nm/rad}$, $b_1 = 16 \text{ Nms/rad}$, $b_2 = 25 \text{ Nms/rad}$

5. Conclusion

Described harmonic transmission has damped oscillations of output torque and output speed. It is the result of flexibility, backlash and friction within the harmonic transmission. This structure has not been excited by inputs with torrential time changes.

The running of the input torque has to be fluent. The designer of the servosystems should take into consideration special properties of this transmission and should to create the convenient control systems. Application of harmonic transmissions in servosystems requires the knowledge of dynamic properties of harmonic transmission and its behaviour, which are introduced in this paper.

Acknowledgement

This work was supported by the Institutional task no. !/20007 of the University of Technology in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies with seat in Prešov, Slovak republic.

References

- [1] Balara, D., 1982, Matematický model harmonického prevodu, (Mathematical Model of Harmonic Transmission), Strojrenství, Praha, No. 2, pp. 85 - 86
- [2] Hudoba, M., 1989, Harmonické prevodovky pre servopohony, (Harmonic Transmissions for Servodrives), Automatizace, Praha, No. 2, pp. 44 - 47

ÚLOHA ŘÍZENÍ TOČIVÉHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jan Blažek

Katedra aplikované kybernetiky, FS TUL, Hálkova 6, 461 17 Liberec, ČR, e-mail : jan.blazek@tul.cz

Abstrakt: Článek pojednává o úloze řízení točivého zdroje elektrické energie, derivačního dynama, která je zpracovávána na Katedře aplikované kybernetiky FS na Technické univerzitě v Liberci. Cílem řízení je udržet na výstupu dynama konstantní napětí při měnící se zátěži a konstantním buzení. Změna napětí na svorkách dynama je kompenzována změnou jeho otáček. Řídící algoritmy pro řízení dynama v napěťové smyčce jsou v prvním případě zpracovány v prostředí Matlabu – Real Time Toolbox, v druhém případě pak v PLC automatu S7-300 fy. Siemens.

Klíčová slova: derivační dynamo, PLC, RT Toolbox

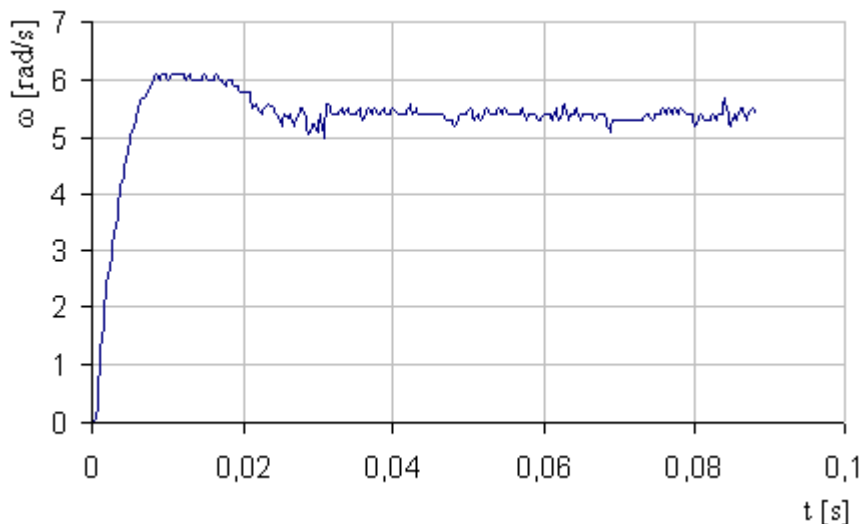
1. Úvod

Studenti FS na TU v Liberci jsou s prací v prostředí Matlab seznamováni již v průběhu svého základního studia v předmětu Základy aplikované kybernetiky. Úloha řízení točivého zdroje elektrické energie jim umožní prakticky si ověřit získané znalosti z oblasti regulace a řízení v prostředí Matlab Simulink a RT Toolbox. Studentům oborového studia dále nabídne i možnost nahradit řízení pomocí Matlabu algoritmem v PLC automatu, a tak se seznámit se základy programování PLC automatů fy. Siemens a jejich využitím při řízení procesů.

2. Cíl řízení

Cíl řízení točivého zdroje energie je v obou případech řízení stejný - udržet na svorkách dynama konstantní napětí - 12V. Toho lze při konstantním buzení a měnící se zátěži dosáhnout vhodnou změnou otáček dynama. Aktuální napětí na svorkách dynama je vstupem napěťové regulační smyčky. Vypočtená regulační odchylka napětí je pak regulátorem převedena na požadovaný přírůstek / úbytek otáček.

Dynamo je poháněno synchronním motorem 1FT5 od fy. Siemens, který je řízen analogovým frekvenčním měničem SIMODRIVE 611A. Součástí tohoto frekvenčního měniče jsou regulační karty pro regulaci servomotoru v proudové a rychlostní smyčce. Naladění rychlostní smyčky ukazuje obr. č. 1 jako odezvu na skok rychlosti 320 ot/min. Žádaná hodnota rychlosti (otáček) dynama je regulačnímu modulu frekvenčního měniče zadávána formou napětí (0 ÷ 10 V).

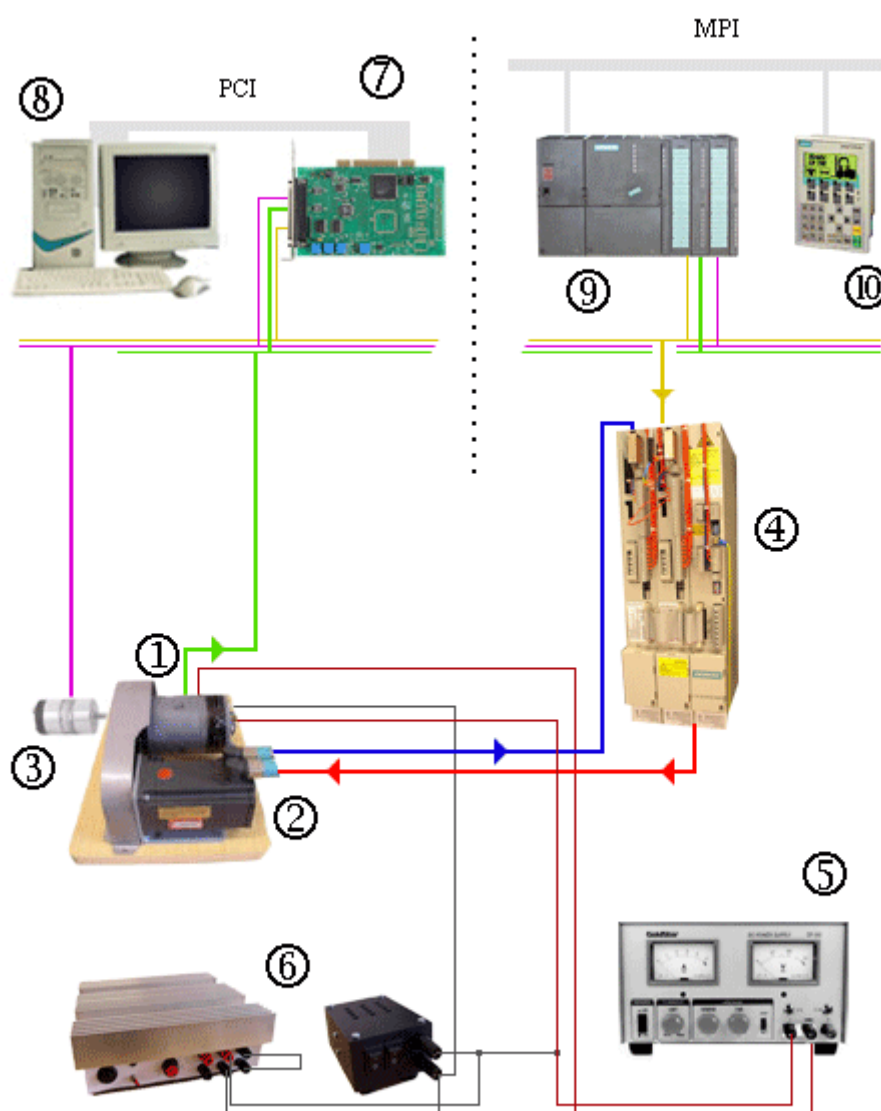


Obr.1: Odezva na skok rychlosti

3. Schéma zapojení

Zapojení úlohy je zobrazeno na obrázku č. 2. Na pozici č. 1 je derivační dynamo – točivý zdroj elektrické energie. Na pozici č.2 je synchronní motor 1FT5. Pro měření aktuálních otáček dynama je použito tachodynamo - pozice č.3. Frekvenční měnič SIMODRIVE 661A je společně s regulačními kartami na pozici č.4. Pro konstantní buzení dynama je použit zdroj EZ Digital GP503 – pozice č.5. Proměnlivá zátěž je pak na pozici č. 6. Jedná se o proměnnou tranzistorovou zátěž o velikosti maximálního odporu $R_{zp} = 6\Omega$ a o skokovou zátěž, kterou nám realizují dvě halogenové žárovky. Výkon jedné 12V žárovky je 55W. Celkový odpor skokové zátěže je tedy $R_{zsc} = 2 R_{zs} = 24,58 = 9,16\Omega$.

V případě řízení pomocí Matlabu bude pak použito měřící karty AD622 – pozice č.7 a osobního počítače – pozice č.8. Bude-li jako řídicí jednotka PLC automatu, bude použit Simatic S7-300 314 IFM – pozice č.9. Komunikaci mezi uživatelem a programem v PLC pak bude zajišťovat textový panel OP7 – pozice č.10.



Obr.2: Zapojení úlohy

4. Řídicí algoritmy

Jelikož se jedná o úlohu, která bude použita ve výuce, je třeba, aby navržené řídicí algoritmy umožňovaly snadnou uživatelskou obsluhu, byly dostatečně robustní a přehledně zobrazovaly důležité informace o stavu regulace a jednotlivých řídicích veličinách. Vlastní funkce algoritmu bude zahrnovat tyto části:

- rozběh dynamy
- vlastní regulace a práce s úlohou
- zastavení dynamy

Řídicí algoritmus bude muset zajistit plynulý rozběh dynamy (postupné zvyšování žádané hodnoty rychlosti) až do okamžiku, kdy bude na jeho svorkách napětí 12V. V tomto okamžiku dojde k ukončení rozběhové fáze a úloha se beznárazově přepne do režimu regulace. V okamžiku přepnutí je regulační odchylka napětí rovna 0, tedy i výstup z regulátoru bude roven 0.

Při změně zátěže dynamy dojde ke změně napětí na jeho svorkách. Tato změna způsobí změnu regulační odchylky napětí a ta se projeví na výstupu regulátoru ve formě žádané změny rychlosti. Hodnota této žádané změny rychlosti bude přičítána k aktuální hodnotě rychlosti dynamy.

Pokud se rozhodne obsluha práci s úlohou ukončit, algoritmus zajistí beznárazové vypnutí regulace a postupné zastavení dynamy.

4.1 Řízení pomocí algoritmu v Matlabu

Řídicí algoritmus pro regulaci napětí bude realizován v Matlab Simulink a RT Toolbox. Regulátor bude použit typu PI, jehož parametry a strukturu bude moci obsluha úlohy snadno měnit. Vstupy a výstupy vytvořeného schéma v Simulinku budou pomocí RT Toolboxu přenášeny na vstupy a výstupy analogově/digitální karty AD622. Měřené hodnoty napětí budou on-line přepočítávány na skutečné údaje (aktuální otáčky dynamy, aktuální napětí na svorkách dynamy) a takto ukládány pro pozdější využití a zpracování

Výstupem napěťové regulační smyčky bude žádaná hodnota rychlosti z analogového výstupu měřicí karty.

4.2 Řízení pomocí PLC automatu

Řídicí algoritmus bude vytvořen v prostředí STEP7. Programovací software STEP 7 je určen pro řadu SIMATIC S7-300 a 400. Slouží ke konfiguraci, parametrizaci a programování řídicího systému. Jako regulačního algoritmu je použito předprogramované funkce PID (blok CONT_C) regulátoru z knihovny STEP7. Program pro OP7 je vytvořen v programovém pro-středí PROTOOL. PROTOOL je program pro konfiguraci a programování operátorských panelů (OP).

Algoritmus pro řízení dynamy pomocí PLC je již částečně vytvořen a odzkoušen. Cyklicky vykonávaný organizační blok OB1 obsahuje volání hlavních částí programu. Funkce „Zapnout napájení“ zajistí sepnutí potřebných relé pro napájení frekvenčního měniče a to po zvolení hodnoty „Zapnout -> ano“ pomocí operátorského panelu. Následuje volání funkce SCALE, která zajistí zpracování aktuální hodnoty regulované veličiny po průchodu odporovým děličem – napětí na výstupu dynamy – z analogového vstupu, a její přepočítání na skutečnou hodnotu regulované veličiny dle zadaného poměru.

Program dále kontroluje zda-li přišel od obsluhy požadavek na přerušení běhu regulace. V případě že ne, zkontroluje dále, je-li již aktivní regulace pomocí PI regulátoru. Pokud PI regulátor není zapnutý, program zvyšuje pomocí numerické integrace hodnoty max. žádaného zrychlení otáčky motoru, až do dosažení 12V na regulované veličině. V okamžiku, kdy je 12V dosaženo, je nastaven příznak pro volání PI regulátoru a tím zabezpečen beznárazový přechod do regulace. Před koncem cyklu dále program zapíše na analogový výstup žádanou hodnotu rychlosti – otáček motoru.

Pokud je od obsluhy modelu nastaven požadavek na zastavení a jsou zadány cílové otáčky, program opět beznárazově vypne regulaci a numerickou integrací max. žádaného zpomalení generuje patřičný rampový průběh rychlosti pro dosažení žádaných otáček.

5. Interakce se studenty

Úloha bude sloužit jako pomůcka pro názornou výuku studentů 3. ročníku Fakulty strojní zapsaných v magisterském studijním programu M2301, N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ v rámci předmětu Základy aplikované kybernetiky a studentů bakalářského studijního programu B2341 STROJÍRENSTVÍ v předmětu Servosystémy a regulace. Dále by měl najít využití u studentů oborového studia zapsaných v magisterském studijním programu M2301, N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ, obor Automatizované systémy řízení ve strojírenství, v rámci předmětů Servomechanismy a Prostředky automatického řízení.

Prostřednictvím této laboratorní úlohy bude student základního studia seznámen s prostředím Matlab Simulink a RT Toolbox a použitím A/D měřicích karet. Během práce s úlohou bude získána odezva otáček dynama na skok zátěže při konstantním buzení. Student během měření získá takovýto průběhů několik, v závislosti na nastavení a struktuře použitého regulátoru, které si bude moci v prostředí Simulinku sám snadno měnit. Tyto charakteristiky bude dále možné využít v rámci semestrálních prací jednotlivých předmětů.

V případě oborových studentů a při použití PLC jako řídicí jednotky bude student seznámen s programovým prostředím STEP7, použitými styly programování v řídicích algoritmech, základní strukturou projektu v programu STEP7 a nezbytnými informacemi o použitém hardwaru.

V krátkosti bude také vysvětlena problematika kaskádové regulace servomechanizmů – v našem případě v kaskádě proudové, rychlostní a napěťové regulační smyčky – stejně tak jako princip vlastního derivačního dynama a dalších použitých prvků regulačního obvodu.

6. Závěr

Tento článek naznačuje, jakým způsobem bude úloha řízení točivého zdroje elektrické energie využita při výuce a studiu na KKY na FS TU v Liberci. Úlohu bude možné v budoucnosti dále rozvíjet, např. vytvořením vhodné elektronické zátěže řízené analogovým vstupem tak, aby bylo možné skutečné zatížení dynama měnit pomocí analogového výstupu karty z prostředí Matlab Simulink.

7. Dedikace

Tato práce je realizována za podpory grantové agentury FRVŠ – projekt 1340 / 2007.

Literatura

- [1] Blažek J., Kolaja J.: Controlling of a Rotary Source of Electric Power in Matlab, 16th International Conference on Process Control 07 June 11-14 2007, Slovak University of Technology in Bratislava
- [2] Štěpánek, P. (2006). Laboratorní model řízení točivého zdroje elektrického proudu. Diplomová práce.

VYUŽITÍ PRVKŮ UMĚLÉ INTELIGENCE PRO PREDIKCI VAD KOVÁRENSKÝCH INGOTŮ

Zora JANČÍKOVÁ¹⁾, Pavel ŠVEC²⁾, Ivo ŠPIČKA³⁾, Milan HEGER⁴⁾

Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství,

VŠB - Technická universita Ostrava, Česká republika

zora.jancikova@vsb.cz¹⁾, pavel.svec@vsb.cz²⁾, ivo.spicka@vsb.cz³⁾, milan.heger@vsb.cz⁴⁾

Abstrakt: Výroba ingotů větších rozměrů, které jsou určeny především pro kovárny, představuje v metalurgickém průmyslu nezanedbatelnou část výroby. U některých typů ingotů se projevují technologické odchylky vadami, které se projeví až v procesu kování. Statisticky bylo zjištěno, že vady nejsou způsobeny překročením žádného měřeného parametru ve výrobě. Jsou však způsobeny nevhodnou kombinací více parametrů. Pro predikci vadných ingotů byly úspěšně aplikovány umělé neuronové sítě. V některých případech docházelo až ke 100% shodě predikovaných a skutečných hodnot.

Klíčová slova: neuronové sítě, predikce, modelování, tvařitelnost, ingoty.

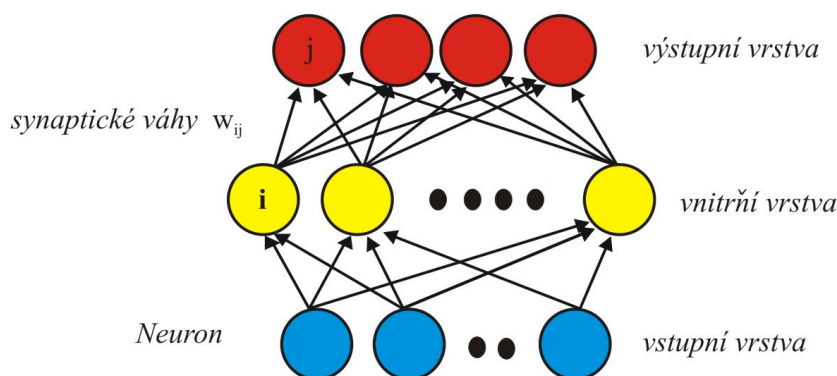
1. Úvod

Výroba ingotů větších rozměrů, které jsou určeny především pro kovárny, představuje nezanedbatelnou část metalurgické výroby. Právě značná hmotnost ingotů vede ke snaze zvýšit podíl kvalitní produkce. U některých typů ingotů se projevují technologické odchylky vadami, které mají za následek vznik prasklin hned na začátku prvních kovárenských operací. Včasná predikce vzniku takovýchto vad by umožnila s předstihem zasáhnout do právě probíhajícího procesu s cílem snížit náklady na nápravu vad. Na základě statistického zpracování provozních dat bylo zjištěno, že vady nejsou způsobeny překročením pouze jednoho měřeného výrobního parametru, jsou však zřejmě způsobeny nevhodnou kombinací více parametrů. K návrhu opatření pro zlepšení kvality produkce ocelárny mohou být v takovém případě úspěšně aplikovány neuronové sítě, jelikož jsou zvláště vhodné pro aproximaci vztahů mezi různými procesními daty, zejména pak mezi daty nestrukturovanými s vysokým stupněm nelinearity a velkou mírou nejistoty.

2. Návrh a optimalizace neuronové sítě

Neuronové sítě využívají distribuované paralelní zpracování informace při provádění výpočtů, tzn., že ukládání, zpracování a předávání informace probíhá prostřednictvím celé neuronové sítě. Znalosti jsou ukládány především prostřednictvím síly vazeb mezi neurony. Učení je základní a podstatná vlastnost neuronových sítí. Při opakovaném předkládání příkladů (vzorů) popisujících daný problém jsou v procesu učení vazby mezi neurony vedoucí ke „správné odpovědi“ posilovány a naopak vazby vedoucí ke „špatné odpovědi“ oslabovány. Souhrn všech předložených vzorů tvoří tzv. trénovací množinu.

Velkou výhodou neuronových sítí je schopnost učit se na příkladech a schopnost dobře vystihnout i nelineární závislosti. Nevýhodou je, že zpravidla nelze předem odhadnout velikost chyby, která je silně závislá na parametrech sítě a na kvalitě dat v trénovací množině. Návrh struktury a parametrů neuronové sítě vyžaduje určitou zkušenost. Rovněž při optimalizaci navržené sítě hrají důležitou roli zkušenost, intuice a experimentování. Pro všechny typy predikcí se v podstatě hodí neuronové sítě, které jsou univerzálními aproximátory funkcí, tedy zejména sítě, využívající pro své učení algoritmus zpětného šíření (Back-propagation). Tento algoritmus je vhodný pro učení vícevrstvých sítí s dopředným (feedforward) šířením, které jsou tvořeny minimálně třemi vrstvami neuronů: vstupní, výstupní a alespoň jednou skrytou vrstvou (obr. 1). Mezi dvěma sousedními vrstvami se pak nachází tzv. úplné propojení neuronů, kdy každý neuron nižší vrstvy je spojen se všemi neurony vyšší vrstvy. Učení se v neuronové síti realizuje nastavováním vah synapsí w_{ij} mezi neurony. U sítě s algoritmem Back-propagation probíhá učení metodou „učení s učitelem“, kdy se neuronová síť učí srovnáním aktuální hodnoty výstupu neuronové sítě s žádanou hodnotou. Postupným nastavováním vah synapsí se algoritmus snaží dosáhnout minimálního rozdílu mezi žádanou hodnotou a hodnotou na výstupu neuronové sítě.



Obr.1: Topologie vícevrstvé neuronové sítě s dopředným šířením

Míru nepřesnosti mezi predikovanou hodnotou výstupu neuronové sítě a skutečnou hodnotou výstupu objektu vyjadřuje predikční chyba. V technických aplikacích se chyba převážně vyjadřuje následujícími vztahy [1]:

vztah pro výpočet chyby RMS (Root Mean Squared) - nekompzuje použité jednotky:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n-1} (y_i - o_i)^2}{n-1}} \quad (1)$$

vztah pro výpočet relativní chyby REL_RMS - kompenzuje použité jednotky:

$$REL_RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n-1} (y_i - o_i)^2}{\sum_{i=0}^{i=n-1} (y_i)^2}} \quad (2)$$

kde:

n je počet vzorů trénovací nebo testovací množiny
 y_i jsou predikované hodnoty výstupu neuronové sítě
 o_i jsou skutečné hodnoty výstupu objektu.

3. Predikce vad kovárenských ingotů

K návrhu modelu umělé neuronové sítě pro predikci vad kovárenských ingotů byla použita technologická data, která byla získána ze záznamů pořízených na pecních agregátech a zařízeních sekundární metalurgie. Tato databáze dat zahrnuje také informace o další manipulaci s již odlitými ingoty až po fázi odeslání do provozu kovárny. Do databáze byly zařazeny údaje o obsahu některých prvků při natavení vsázky, které ovlivňují dobu tavby, projevují se ve zvýšeném oxidačním potenciálu, podávají informace o některých doprovodných prvcích ze vsázkových surovin apod. Databáze dále obsahuje údaje o stripování, odeslání ingotů do kovárny, jsou zde také uvedeni pracovníci na směnách a agregátech, kteří jednotlivé tavby prováděli. Tato data mohou mít podle provozních zkušeností vliv na studovaný jakostní problém. Příklad použitých technologických dat pro vybrané ingoty a tavby je uveden v tabulce 1.

Celá databáze obsahovala celkem 242 taveb, z toho 32 taveb vykazovalo jakostní neshody. Databáze byla statisticky předzpracována a upravena tak, že byla tvořena 18 základními typy ingotů, přičemž 4 typy vykazovaly zvýšený počet vad.

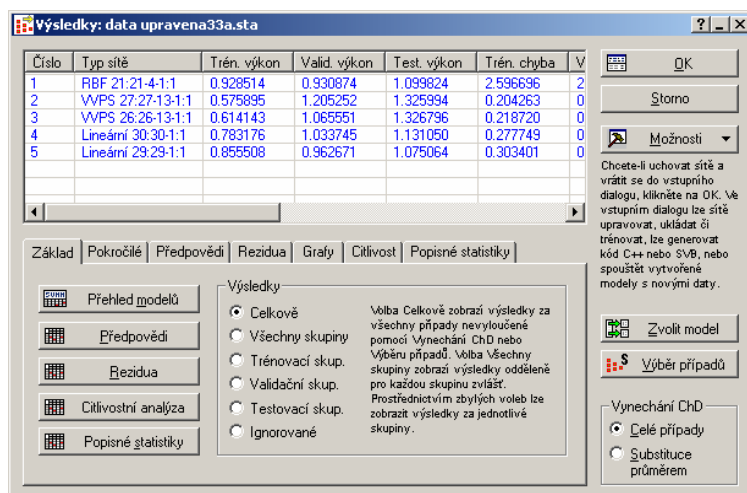
Na základě analýzy získaných dat bylo postupně navrženo a ověřeno 12 umělých neuronových sítí. Neuronové sítě byly vytvořeny v programovém prostředí STATISTICA – Neural Networks. Tento systém umožňuje mimo jiné vytvoření skupiny rozdílných neuronových sítí, výběr nevhodnější sítě s nejlepším výkonem, obsahuje výkonné vyšetřovací a analytické techniky umožňující volbu vhodných vstupních proměnných pro analýzu vyšetřovaných dat (algoritmy pro výběr vlastností vstupů). Dále umožňuje získat souhrnné popisné statistiky, provádět citlivostní analýzu a vytvářet odezvové grafy. Okno s parametry vytvořených neuronových sítí v systému STATISTICA - Neural Networks je znázorněno na obr. 2.

č.tavby	55819	55822	55822	55822	55866	55892	55913
ty	I1	I2	I3	I3	I1	I1	I4
čas liti	10,5	7,2	5,8	5,3	16	12,7	7,2
rych liti	20,66667	24,23611	24,48276	26,79245	13,5625	17,08661	25,83333
MISTR	Mistr 1	Mistr 2	Mistr 2	Mistr 2	Mistr 2	Mistr 1	Mistr 1
TAVIC	Tavič 1	Tavič 2	Tavič 2	Tavič 2	Tavič 2	Tavič 1	Tavič 1
TAVIC LF	Tavič LF1	Tavič LF2	Tavič LF2	Tavič LF2	Tavič LF2	Tavič LF1	Tavič LF1
T po LF	1651	1658	1658	1658	1660	1648	1649
T před VD	1647	1650	1650	1650	1641	1635	1638
T po VD	1590	1580	1580	1580	1572	1577	1580
T likv	1516,7	1516,3	1516,3	1516,3	1515,2	1514,6	1514
T stripov	780	780	760	760	750	700	720
T odeslani	740	740	710	710	710	660	680
CaO-St	61,3	55,5	55,5	55,5	57,25	61,96	58,94
SiO ₂ -St	8,45	7,38	7,38	7,38	6,52	7,46	9,07
Al ₂ O ₃ -St	23,75	30,84	30,84	30,84	29,28	25,37	26,54
Sumox	1,11	0,89	0,89	0,89	0,78	0,91	0,79
S-St	0,44	0,627	0,627	0,627	0,64	0,385	0,466
Si	8	23	23	23	18	26	26
P	7	7	7	7	6	8	8
S	5	3	3	3	2	3	3
Cu+Sn	80,84	73,08	73,08	73,08	73,08	80,84	78,84
Al	12	25	25	25	25	29	26
N ₂	7	7	7	7	6	7	8
H ₂	0,5	0,8	0,8	0,8	1	1,1	0,9
a(o)	7	3,5	3,5	3,5	1,3	2,3	3
Al-pokles	9	31	31	31	28	17	15
optic. bazici	0,7992	0,7771	0,7771	0,7771	0,7873	0,8008	0,785
mannesman	0,3055	0,2438	0,2438	0,2438	0,2999	0,3274	0,2449
(s)/[s]	88	209	209	209	320	128,333	155,333
sulfid. ka.	0,0243	0,0103	0,0103	0,0103	0,0129	0,0213	0,0133
CaO/Al ₂ O ₃	2,5811	1,7996	1,7996	1,7996	1,9553	2,4423	2,2208
kvalita	N	ANO	ANO	ANO	N	N	ANO

Tab.1: Příklad použitých technologických dat pro vybrané ingoty a tavby [2]

kde:

T po LF – teplota po zpracování v pánvové peci, Tavič LF – tavič pánvové pece, T likv – teplota likvidu, T stripov – teplota stripování, T odeslání – teplota odeslání, Optic. Bazici – optická bazicita, Sulfid. ka. – sulfidická kapacita, Mannesman – Mannesmanův koeficient, CaO – oxid vápenatý ve strusce, Al₂O₃ – st – oxid hlinitý ve strusce, SiO₂ – st – oxid křemičitý ve strusce, S-st – síra ve strusce, P – fosfor, S – síra, H₂ – vodík, N₂ – dusík, Cu + Sn – měď + cín, Al – hliník, a(o) – aktivita kyslíku, Si – křemík, (s)/[s] – rozdělovací koeficient síry, CaO/Al₂O₃ – oxid vápenatý / oxid hlinitý

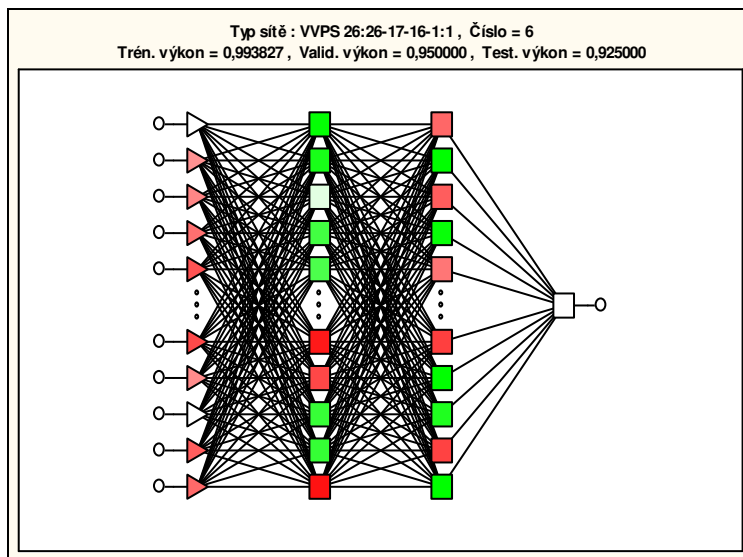


Obr 2: Okno s parametry vytvořených neuronových sítí

První neuronové sítě (NS1 – NS4) byly vytvořeny pro čtyři typy ingotů, které vykazovaly nejvíce vad, a to pro každý typ ingotu zvlášť. Pátá neuronová síť s označením NS5 byla sestavena pro soubor všech těchto čtyř typů ingotů dohromady. Šestá neuronová síť s označením NS6 měla za úkol zpracovat soubor všech 18 typů ingotů současně. Vstupy posledních dvou neuronových sítí (NS5 – NS6) byly redukovány tak, že neobsahovaly vstupy „rychlost lití“ a „čas lití“. Při vytváření těchto sítí byla použita funkce programu STATISTICA - Neural Networks, která umožnila vybrat podskupinu nezávisle proměnných vstupních dat a tím redukovat jejich počet. Dalších šest neuronových sítí (NS7 – NS12) bylo vytvořeno ze stejných databází jako předešlé sítě s tím rozdílem, že zde nebyla použita funkce pro výběr podskupiny nezávisle proměnných vstupů a taktéž byly vyloučeny proměnné, které obsahovaly lidský faktor jako je mistr, tavič, tavič pánvové pece. Vyloučení lidského faktoru bylo inicializováno jednak tím, že statistický rozbor vlivu jednotlivých lidských činitelů nevykazoval statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými případy, ale také tím, že lidský faktor by se měl odrazit v jiných měřených technologických veličinách. Taktéž u posledních dvou sítí s označením NS11 a NS12 byly vyloučeny vstupní proměnné „rychlost lití“ a „čas lití“.

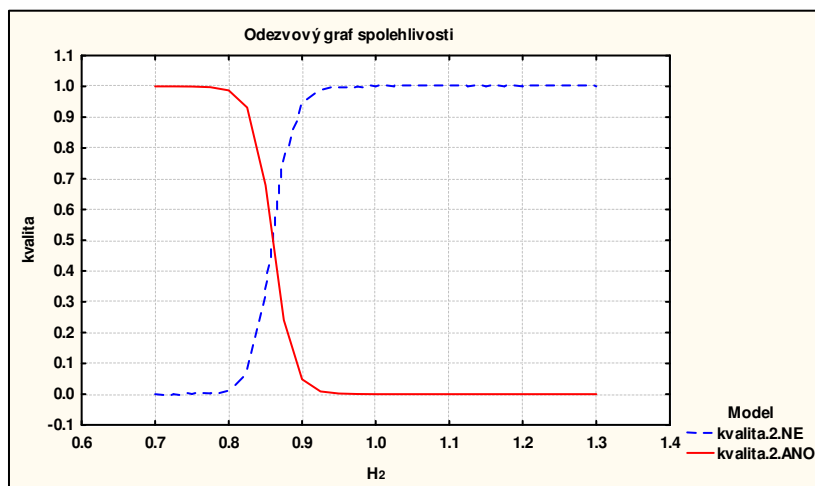
Pro každou vytvořenou síť byla provedena tzv. citlivostní analýza, která ukazuje, do jaké míry jednotlivé vstupní veličiny ovlivňují veličinu výstupní (výskyt vady ingotu). Pro každou síť byla vytvořena tabulka vyjadřující pořadí důležitosti jednotlivých vstupních proměnných, a to od parametrů, které mají největší vliv na daný systém až po ty méně významné. Provedením citlivostní analýzy bylo zjištěno, že mezi parametry, které mají největší vliv na vznik vady ingotu, patří: cín s mědí, vodík, hliník, síra, fosfor, aktivita kyslíku a rozdělovací koeficient síry.

Pro praktickou aplikaci se ukázaly jako nejvhodnější neuronové sítě s označením NS11 a NS12 (obr. 3). Tyto sítě vykazovaly velmi dobré výsledky naučení, kdy se předpověď vady pohybovala nad 95 procent při využití 50 procent vstupních dat k testování správnosti u sítě NS11 a 30 procent u sítě NS12. U těchto sítí byly vytvořeny tzv. odezvové grafy. Tyto grafy vyjadřují vliv vybraného parametru na daný systém.



Obr.3: Struktura umělé neuronové sítě NS12 s topologií 26-17-16-1

Na obr. 4 je znázorněn příklad odezvového grafu neuronové sítě NS11, který vyjadřuje vliv vodíku na vznik vady ingotu. Z grafu vyplývá, že se vzrůstajícím množstvím vodíku vzrůstá pravděpodobnost vzniku vady ingotu. Vzhledem k tomu, že se mohou jednotlivé vstupní parametry navzájem ovlivňovat a výsledek je závislý na kombinaci více vstupních parametrů, bylo by vhodnější pro zjištění závislosti výstupu na jednotlivých vstupech použít například přístupy metody shlukové analýzy nebo genetických algoritmů, které by umožnily vybrat určité kombinace vstupů a sledovat závislost výstupní hodnoty na kombinaci těchto vstupů.



Obr.4: Odezvový graf neuronové sítě NS11 pro H₂

4. Závěr

Byly vytvořeny funkční modely neuronových sítí pro predikci vad kovárenských ingotů v ocelárně. K návrhu neuronových sítí byla použita technologická data, která byla získána ze záznamů pořízených na několika pecních agregátech a zařízeních sekundární metalurgie v ocelárně. Bylo navrženo 12 modelů umělých neuronových sítí. Pro každou vytvořenou síť byla provedena citlivostní analýza, která vyjadřuje, do jaké míry jednotlivé vstupní veličiny ovlivňují daný systém. Pro praktickou aplikaci byly vybrány dvě neuronové sítě, které vykazovaly velmi dobré výsledky naučení. V některých případech došlo při ověřování schopnosti generalizace sítě na testovací množině dat až ke stoprocentní shodě skutečných a předikovaných výsledků. V rámci této práce bylo ověřeno, že užití umělých neuronových sítí pro predikci vad ingotů je velmi perspektivní. Daná problematika spolu s dalšími technickými aplikacemi umělé inteligence byla řešena v rámci grantového projektu GAČR 106/05/2596.

Literatura

- [1] MYLLYKOSKI, P., LARKIOLA, J., NYLANDER, J.: Development of Prediction for Mechanical Properties of Batch Annealed Thin Steel Strip by Using Artificial Neural Network Modeling. Journal of Materials Processing Technology, No. 1-4, Vol. 60, 1996, s. 399
- [2] KRAYZEL, M.: Uspořádání a parametry technologického zařízení. Interní materiály společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY, a.s., 2006

ŘÍZENÍ DVOJICE LINEÁRNÍCH HYDROMOTORŮ V TANDEMU – PŘEHLED PROVEDENÝCH PRACÍ

Jan KOLAJA

TU Liberec – Katedra aplikované kybernetiky, Hálkova 6, Liberec 1, 461 17, jan.kolaja@tul.cz

Abstrakt: Tento článek shrnuje dosavadní činnost v problematice řízení dvou lineárních hydromotorů v tandemu. Hlavním cílem je synchronizovat 2 lineární hydromotory, které jsou umístěny v jedné ose, pístnicemi proti sobě tak, aby jeden hydromotor vypomáhal druhému při dynamickém působení na soustavu umístěnou mezi pístnicemi motorů.

Klíčová slova: tekutinové mechanismy, řízení, hydraulika.

1. Úvod

Tento článek popisuje řešení problému, který se vyskytl v hydrodynamické laboratoři Technické univerzity v Liberci. Laboratoř je umístěna v areálu kolejí Vesec – budova I a byla vystavěna za podpory MŠMT v roce 1997. Zkušebna je vybavena 9ti lineárními hydraulickými motory se zatěžovacími rámy umožňujícími statické i dynamické zatěžování strojních součástí s libovolným budícím signálem.

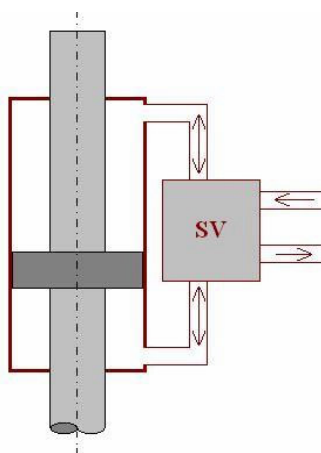
Jeden z projektů vyšetřující chování hydraulického tlumiče narazil na problém, že samostatný píst není schopen působit na soustavu požadovanou silou v požadované trajektorii. Z tohoto důvodu byla zvážena výkonová spolupráce druhého hydromotoru. Obě spolupracující jednotky jsou umístěny v jedné ose, pístnicemi proti sobě a působí na soustavu umístěnou mezi nimi.

Hlavním cílem je synchronizovat 2 lineární hydromotory, které jsou umístěny v jedné ose, pístnicemi proti sobě tak, aby jeden hydromotor vypomáhal druhému při dynamickém působení na soustavu s tlumičem umístěnou mezi motory. Jeden samostatný hydromotor neposkytuje dostatečný výkon pro experimenty a proto je ke spolupráci potřeba pomoc hydromotoru druhého.

Zřejmým problémem této synchronizace jsou diametrálně odlišné vlastnosti obou hydropulzních zařízení. Další problémy se objevují ve fázi seznamování s řídicím systémem od firmy INOVA a během identifikace.

2. Lineární hydromotor a jeho řídicí systém

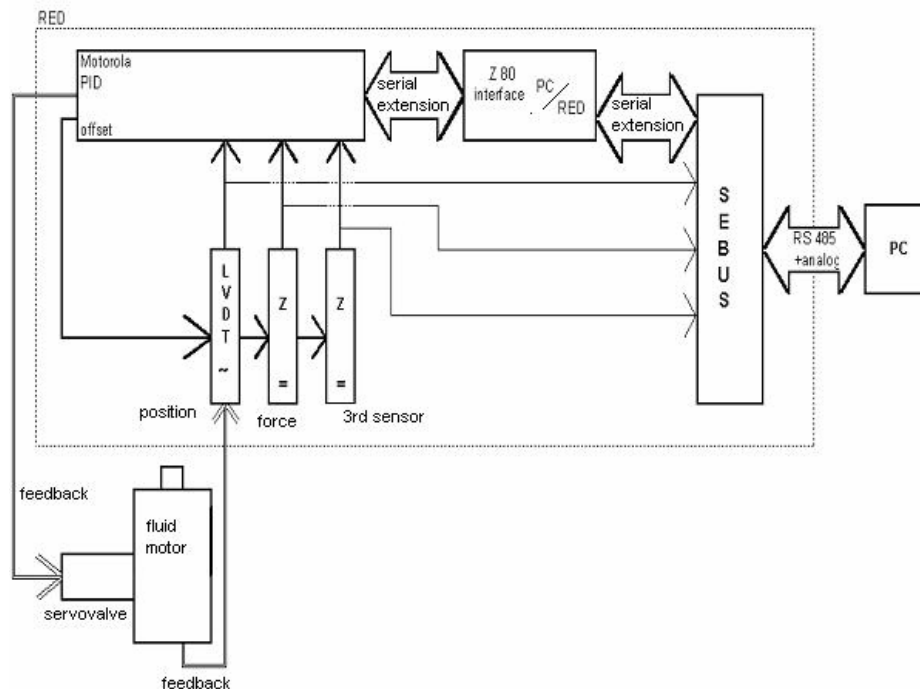
Z hlediska uspořádání představuje lineární hydraulický motor nejjednodušší způsob jak transformovat tlakovou energii média na pohyb.



Obr.1: Základní schéma hydromotoru

Obrázek 1 ukazuje základní schéma lineárního hydromotoru. Princip pohybu je velmi jednoduchý – servoventil otevírá cestu tlakové kapalině pod píst, nebo nad píst a zároveň otevírá cestu odpadní kapalině

z protější strany (záleží na směru požadovaného pohybu). Tuhost systému je ovlivněna tuhostí kapaliny (vlivem příměsí vzduchu není možné dosáhnout vlastností ideální kapaliny).



Obr.2: Řídicí systém RED

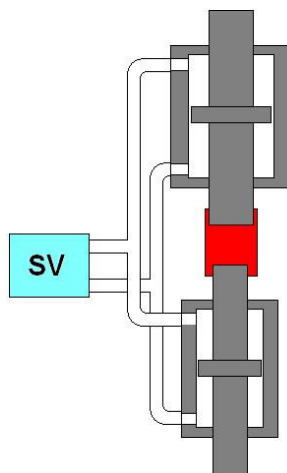
Obrázek 2 ukazuje schéma řídicího systému RED od firmy INOVA, tak jak je zapojen u každého hydromotoru v laboratoři Technické univerzity v Liberci. Schéma zobrazuje také propojení tohoto systému s řídicím počítačem a s hydromotorem. Systém RED umožňuje zapojení tří různých zpětných vazeb. Každá z těchto vazeb má svůj PID regulátor.

3. Kde je problém

Základním problémem tandemové synchronizace jsou diametrálně odlišné vlastnosti obou hydropulzních zařízení. Stejně tak jsou rozdílné servoventily. Další problémy (jako posunutí signálu servoventilu) se objevují ve fázi seznamování s řídicím systémem od firmy INOVA a během identifikace.

4. Zapojení systému

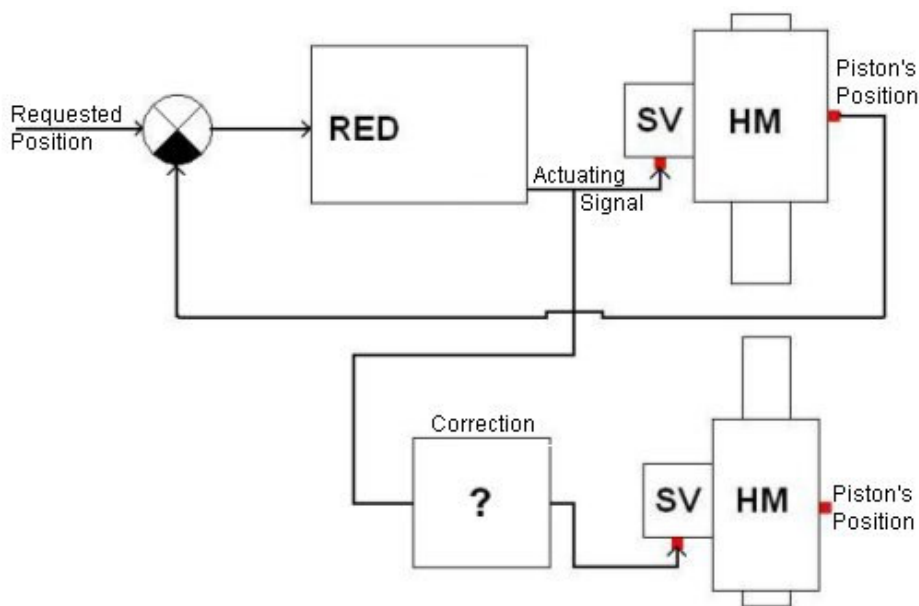
Jistě existuje mnoho možností, jak řídit dva lineární hydromotory v jedné ose tak, aby spolupracovaly při působení na soustavu mezi nimi. Pravděpodobně nejefektivnější způsob je zobrazen na obrázku 3.



Obr.3: Společný servoventil

Společný servoventil zajišťuje stejné tlaky na odpovídajících stranách obou pístů. Jsou li oba válce pevně spojeny, šíří se kapalina potrubím cestou nejmenšího odporu a soustava se chová jako jediný lineární hydromotor s plochou pístu rovnou součtu ploch obou válců. Problémem tohoto uspořádání je nutnost delšího vedení mezi servoventilem a válci. V tomto konkrétním případě je nutná také variabilitnost soustavy – nemohou být použity pevné kovové trubky místo hadic, čímž se velmi omezí tuhost soustavy. I v případě použití kovových trubek by tuhost byla omezena vlivem stlačitelnosti kapaliny. Ideální kapalina je sice nestlačitelná, ale v reálných podmínkách jsou tyto vlastnosti nedosažitelné (vzduchové bubliny v oleji). Tato obtížná realizace je důvodem k přistoupení k jinému způsobu řízení – společnému řízení servoventilů.

V tomto případě je první lineární hydromotor řízen klasicky v polohové zpětné vazbě. Akční zásah první smyčky (konkrétně řídicí napětí prvního servoventilu) se stává řídicím signálem pro servoventil druhého lineárního hydromotoru. Poloha šoupátka servoventilu druhého hydromotoru je tak přímo úměrná poloze šoupátka servoventilu hydromotoru řídicího. Rozborem situace je nutné nalézt vhodný vztah mezi akčním zásahem a řídicím signálem – korekci.



Obr.4: Společné řízení servoventilů

Schéma na obrázku 4 velmi zjednodušeně zobrazuje daný problém. Reálné zapojení je závislé na možnostech řídicího systému RED s využitím třetího zesilovače pro zapojení zpětné vazby. Základní nastavení smyčky je provedeno v pomoci programu SAF 306 od firmy INOVA (tento program je instalován na řídicím počítači a je nedílnou součástí řídicího systému). Soustava je ovládána pomocí softwaru vytvořeného v programovacím prostředí LabView z měřicího počítače. Pojem měřicí počítač je zde a v další práci použit pro počítač, který přímo nekomunikuje s řídicím systémem, ale na jeho měřicí kartu jsou přivedeny potřebné signály (z REDu i z jiných zdrojů). Řídicí počítač umožňuje přivedení výstupních signálů z měřicího počítače do řídicího systému RED.

Pro správnou funkci soustavy je zapotřebí zjistit vzájemnou závislost řídicích signálů obou servoventilů (ve schématu označeno otazníkem). Tato závislost vyjadřuje velikost zesílení řídicího signálu prvního servoventilu před tím, než se stane řídicím signálem servoventilu druhého, aby bylo docíleno toho, že se oba válce pohybují stejnou rychlostí i směrem respektive směrem opačným. (Opačným směrem proto, že souřadné systémy obou válců jsou proti sobě otočeny – aby válce konaly požadovan společný pohyb musí se jeden zasouvat a druhý vysouvat.)

5. Úpravy řídicího systému

Vzhledem k tomu, že úloha tandemového řízení dvou hydromotorů neodpovídá běžnému provoznímu využití, bylo nutné přikročit během experimentování k úpravě řídicího systému RED. Jeden z problémů se týká zesílení třetího snímače. V řídicím programu SAF306 (v sekci nastavení) je možné zadat P složku regulátoru pro 3. snímač (extenzi) s přesností na 3 desetinná místa. Měření pomocí odporového měřidla a zapojení v silové vazbě však odhalilo, že výsledné zesílení neodpovídá hodnotě P. Upravením řídicího systému (přidáním potenciometru do série k příslušnému operačnímu zesilovači) je možné tuto hodnotu měnit dle potřeby.

Další nutnou úpravou je posun řídicího signálu servoventilu. Technicky je velmi složité vyvážit servoventil tak, aby nulový řídicí signál odpovídal nulovému průtoku. Řídicí systém umožňuje buď nulování snímače

(softwarově), nebo lehké doladění offsetu (otočným potenciometrem). Aby byl vliv potenciometru zvýšen, je připojen v sérii další odpor. To umožňuje nastavit výstup ze servoventilu podle potřeby.

6. Úpravy rozvodu hydrauliky

Pro zamezení problémům při startu hydrauliky byl přidán pomocný ventil, který umožňuje izolovat horní válec od společného přívodu hydrauliky. Nenapájený hydromotor je poddajnější a umožňuje po startu hydrauliky nastavení do výchozí polohy pro experimenty. Tento ventil také zamezuje nepředvídatelnému pohybu horního válce při spínání hydrauliky.

7. Mechanická zpětná vazba

Po úspěšném seřízení tak, aby se polohy obou motorů co nejméně odchylovaly (zavazbení a nastavení regulátorů), následuje přidání pevné zpětné vazby. Pevnou zpětnou vazbou se rozumí pevné spojení pístnic obou hydromotorů – průsaky hydrauliky umožňují vzájemné dorovnání pístnic. Schopnost dorovnání je přímo úměrná tuhosti (v krajních mezích i pevnosti) použité pevné zpětné vazby. Není jistě rozumné použít hned co nejpevnější zpětnou vazbu, neboť potom není možné odhalit případné chyby seřízení a soustava je vystavena zbytečně velkému namáhání.

Proto je pevná zpětná vazba pro tuto úlohu navržena ve třech úrovních, které jsou postupně zaměňovány – tři úrovně umožňují bezpečné a ekonomické seřízení soustavy. V první úrovni je pevná zpětná vazba realizována ocelovou tyčí o průměru 10mm (Tyč je na koncích opatřena závitem, který přes redukce umožňuje připojení k pístnicím hydromotorů.). Tato tyč je relativně pružná a její velmi nízká pevnost (v porovnání s možnostmi hydromotoru) umožňuje další odstranění nedostatků (Při přetížení praskne, nebo se ohne.) a v průběhu práce byla nezbytnou pomůckou pro sestavení postupu pro spínání hydrauliky v režimu tandemového řízení.



Obr.5: Mechanická zpětná vazba

Další úroveň pevné zpětné vazby je pevnější tyč (průměr 30mm) s tenzometry. Tenzometry umožňují sledovat namáhání soustavy (tím nepřesnost řízení) a také případné přidání další zpětné vazby, která je součástí jednoho z programů.

Poslední a finální úroveň pevné zpětné vazby je samotná soustava, pro kterou je úloha řešena. Jedna z jejích součástí je opatřena citlivými polovodičovými tenzometry. Informace o tenzi v materiálu je použita pro bezpečnostní funkce programu (total stop).

Mechanická zpětná vazba také zamezuje problémům při startu tandemového řízení. (Na druhou stranu ale způsobuje nemalé problémy při startu hydrauliky) Vlivem nesouměrného elektronického ovládní servoventilu je při přechodu do tandemového řízení pomalu vysouvána pístnice druhého hydromotoru – i kdyby byl servoventl vycentrován, rozdílnost podmínek při každém spouštění by stejně způsobovala obdobný posuv a to pokaždé jiným směrem. Jelikož se jedná o velmi malou výchylku šoupátka servoventilu, pevné ukotvení ve stanovené poloze není pro mechanickou zpětnou vazbu žádný problém. V případě pružné zpětnovazební tyče je možné pouhým okem sledovat natahování tyče, v případě pevné zpětnovazební tyče je možné sledovat lehké zvýšení napětí v materiálu, měřené tenzometry.



Obr.6: Mechanická zpětná vazba druhé úrovně s přidaným tlumičem (simulace reálné soustavy)

Shrnutí výhod mechanické zpětné vazby:

- a) nezbytná zpětná vazba pro správné řízení
- b) zajištění nulové polohy druhého hydromotoru při startu systému
- c) postradatelná (zničitelná) náhrada reálné soustavy, která má být umístěna mezi pístnicemi
- d) informace o nepřesnosti řízení (deformace, nebo měření tenzometry)

Podrobnější informace o mechanické zpětné vazbě pro tento případ jsou v článku [3].

8. Shrnutí

Tento článek nepopisuje detailně technické podrobnosti řešeného problému, ale chce jen představit jeden z projektů, kterým se zabývá Katedra aplikované kybernetiky na Technické univerzitě v Liberci. V současné době je systém ve fázi finálního dokončování. Programová část je již vyřešena, mechanická zpětná vazba čeká na osazení a zapojení.

Dedikace

Článek (příspěvek ve sborníku konference) vznikl s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501.

Literatura

- [1] Souček, P.: Elektrohydraulické servomechanismy. ČVUT, Praha, 1992.
- [2] Olehla, M.: Identifikace technologických soustav. Technická univerzita v Liberci, Liberec, 1995.

- [3] Kojaja J.: Power Cooperation of Two Different Linear Fluid Units – Real System Subtitution, 16th International Conference on Process Control 07 June 11-14 2007, Slovak University of Technology in Bratislava, ISBN 978-80-227-2677-1.

PROGRAM COSIMIR® PROFESSIONAL URČENÝ PRE VÝUČBU AUTOMATIZÁCIE

Ondrej Líška, Jana Mihalíková

Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta, Katedra automatizácie a riadenia, Park komenského 9, 040 01
Košice, Slovensko, ondrej.liska@tuke.sk, jana.mihalikova@tuke.sk

Abstrakt: Simulačných programov určených pre simuláciu výrobného systému existuje v dnešnej dobe už mnoho. Školy sa snažia začleniť tieto programy do výučby nielen automatizácie, ale aj iných podobných predmetov. My ponúkame priestor pre simulačné programy od firmy Festo-Didactic, sú to programy z rady COSIMIR® a to COSIMIR® PLC a COSIMIR® Professional. Tento článok popisuje program COSIMIR® Professional, ako výhodný nástroj pre výučbu automatizácie, pretože spája modelovanie, programovanie a simuláciu. Ponúka študentom možnosť zdokonalenia sa v navrhovaní a modelovaní výrobného systému, v programovaní rôznych druhov robotov a PLC, odstraňovaní chýb a nepresností, a ponúka množstvo ďalších výhod.

Kľúčová slova: COSIMIR® Professional, simulácia, modelovanie

1. Úvod

Simulácia je výhodným nástrojom pre účinné vylepšenie systému. Na trhu je ponúkaných množstvo rozličných programov ako DELMIA, Arena, Simple ++, COSIMIR® a veľa ďalších programov určených pre simuláciu výrobného systému. My používame nielen na výuku programy z rady COSIMIR® od firmy Festo-Didactic. Je veľa programov od tejto firmy, ktoré sú používané pre simuláciu, projektovanie, programovanie a pre virtuálnu realitu. Na katedre pracujeme s programami COSIMIR® PLC a COSIMIR® Professional.

COSIMIR® Professional je priemyselne spoľahlivý a odskúšaný, mimoriadne vysoko výkonný software pre tvorbu 3D simulácie systému pre automatizačnú technológiu. Program zlučuje tri vlastnosti v jednom a to spojením 3D simulácie, 3D modelovania a programovania robotov [1].

2. COSIMIR® Professional

COSIMIR® Profesional je "korunovačný klenot" pre súčasnú robotickú technológiu, s profesionálnym 3D programom pre modelovanie, simuláciu a programovanie rozličných priemyselných a robotických systémov. Obsahuje nové "adaptívne prostredie" vyvinuté z rady programov COSIMIR® Educational.



Obr.1: Program COSIMIR® Professional

Grafický Open-GL štandard je schopný tvoriť jednoduchý obrys, alebo šrafované zobrazenie objektov vrátane funkčných klávesov [3].

Modelovanie je možné prostredníctvom základných CAD funkcií, alebo importovaním mnohých CAD formátov. Taktiež je možné modelovať pomocou geometrickej parametrizácie, kinematiky, voľbou materiálu a zmenou fyzických vlastností.

V knižnici sa nachádzajú priemyselné robotické systémy, množstvo automatizačných súčiastok a vysokovýkonné automatizačné zariadenia. Všetky 3D objekty sú riadené pomocou integrovaného virtuálneho PLC cez mechanické alebo elektrické prepojenie. Preto je možné experimentovať v reálnom čase a následne je možnosť reálnej analýzy.

Program má výkonné zariadenie pre flexibilný presun objektov manipulácie. Kolízia je zisťovaná cez farebné zmeny alebo upozornením v okne poznámok. Preto je jednoduchý výber objektov posúdení pomocou kolízie.

Takmer všetky snímače, od indukčného snímača až po kameru, sú simulované s ich fyzickými vlastnosťami. To umožní realistickú analýzu vzájomného pôsobenia s perifériou. Plocha finálnych procesov, takých ako maľovanie alebo zváranie, je názorne a detailne reprezentovaná. Táto možnosť programu umožňuje používateľovi výkonne optimalizovať už pri modelovaní.

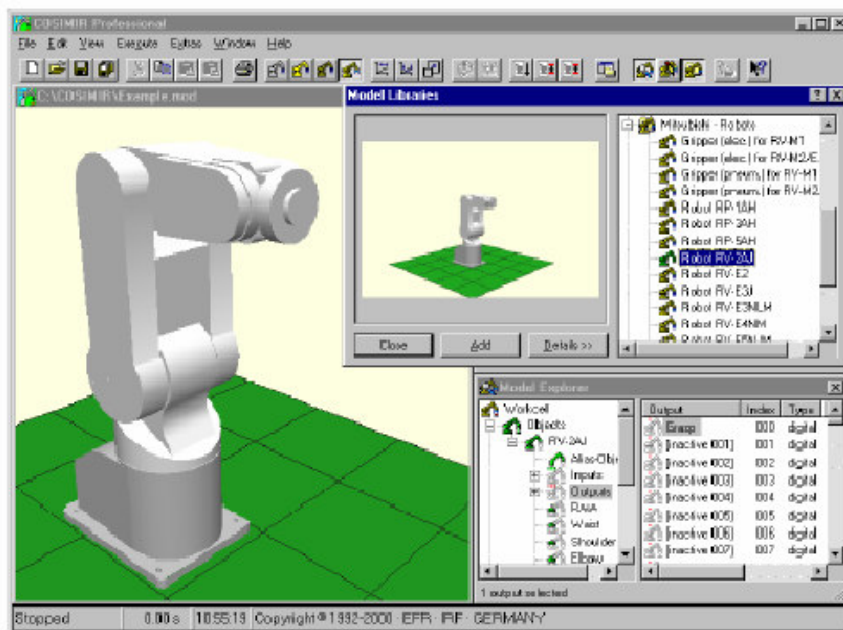
Činnosť modelov môže byť riadená paralelne pre niekoľko robot s použitým PLC, alebo bez PLC riadenia (pomocou programu STEP 5 alebo STEP 7). Program umožňuje tvorbu užívateľského rozhrania pre konfigurovateľné chyby a pre vyhľadávanie poruchy. V konfiguračnom menu je možnosť pre komunikáciu s OPC severmi.

Použitie programu COSIMIR® k plánovaniu rozloženia robotov v pracovnom okne je výhodné pre kontrolu dosahu zo všetkých pozícií, až k vývoju programu pre roboty a snímače, a k optimalizovanému usporiadaniu. Všetky činnosti aj obsluha prevádzky môže byť simulovaná kvôli zníženiu kolízií a k optimalizovaniu časových cyklov. Kompletne podporované je priame načítanie skúšaných programov a pozícia robotov.

Výkonné modely s komponentmi sú poskytnuté v knižnici, ktorá obsahuje mechanizmy, roboty, nástroje, dopravné pásy, detaily napájačov, atď. Taktiež je možné importovať 3D objekty z CAD systémov (ako sú AutoCAD™, Inventor, Solid Edge a mnoho ďalších). COSIMIR® podporuje definované používateľské knižnice a projektovú dokumentáciu [2].

3. Modelovanie

Pre reálne modelovanie je požadovaný špeciálny trojrozmerný editor pracovného okna. Trojrozmerné pracovné okno v 3D-editore je však plánované na dvojrozmerné výstupné zariadenie, t.j. na obrazovku. S týmto druhom zobrazenia niektoré objekty, alebo oblasti súčiastok môžu byť skryté za inými objektmi.

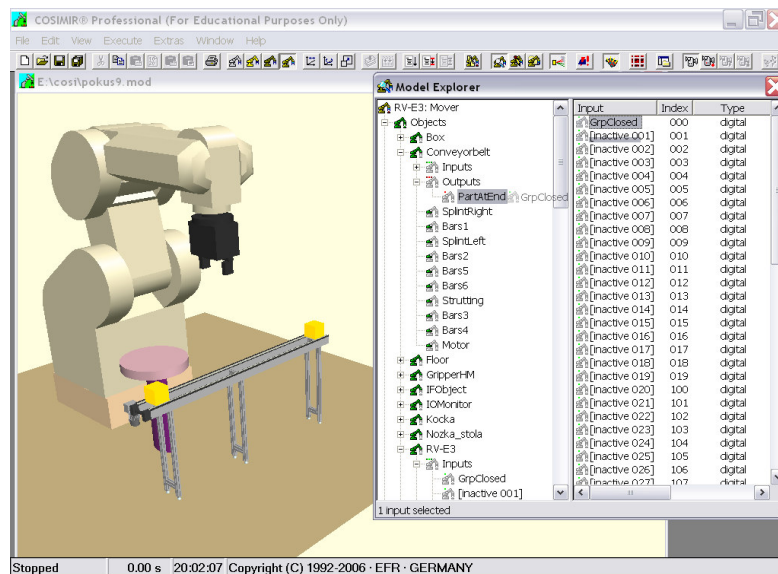


Obr.2: Model knižnice v programe COSIMIR® Professional

Pre editáciu týchto neviditeľných predmetov a k ľahšiemu umiestneniu objektov na iné miesto sú požadované najmenej dve rozdielne zorné polia. Za účelom zabránenia komplexnej vzájomnej závislosti medzi týmito zornými poliami je doporučené zvoliť si zvislé zobrazenia. COSIMIR® podporuje chránenie simulačného modelu, tým že je uložený do simulačného systému na zabránenie nepovolenej zmeny modelu [2].

Zmena mierky je používaná na nastavenie veľkosti a rozmerov častí. Veľkosť a pomer všetkých závislých častí modelu je tiež zmenšená alebo zväčšená v príslušnej mierke.

Aby bolo možné pripojiť periférne zariadenie, prípadne pripojiť objekty k robotu je nutné urobiť tabuľku vstupov a výstupov. Predtým než sa priradia vstupy k výstupom, musia byť rozdielne vstupy a výstupy pomenované. Je vhodné použiť rovnaké mená pre vstupy a výstupy.



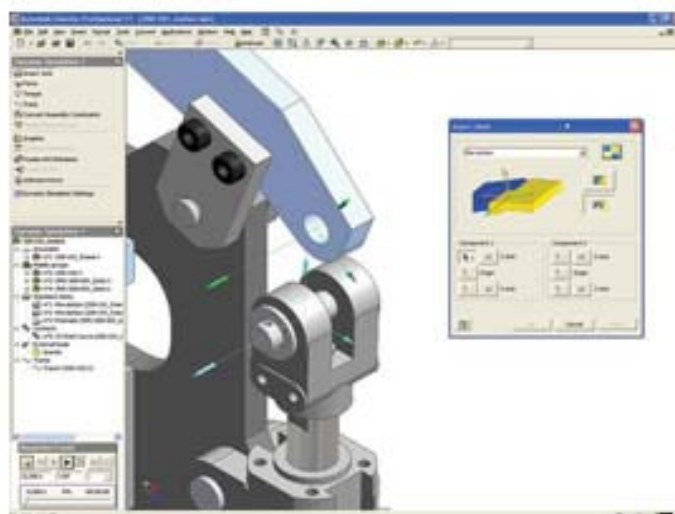
Obr.3: Prepojenie vstupov s výstupmi

Pre vzájomné pôsobenie medzi objektmi v pracovnom okne, musí byť medzi nimi výmena informácií. Objekty komunikujú cez vstupy a výstupy, teda je nutné pripojiť vstupy k príslušným výstupom. Výstupná veličina je aktuálna, ak výstup je pripojený k vstupu. V tomto pripojení hrá operátor robota mimoriadnu úlohu, pretože robot je programovateľný objekt. Tak všetky procesy sú riadené, alebo synchronizované z tohto špeciálneho riadiaceho obvodu [2].

Simulácia v programe nazývaná báza mechanizmov, je výkonné zariadenie pre simuláciu pracovných objektov. Mechanizmy sú pridelené k objektu zvolením typu objektu. Je daná závislosť na štruktúre objektu (vzhľadom na I/O, množstvo a konfiguráciu sekcií a spojov). Ak existuje daná štruktúra objektu tak mechanizmus je simulovaný bezchybne.

Pre tvorbu modelu zariadenia sa používa model z knižnice. Pridaním objektu so zariadením do pracovného okna sa zabezpečí, že štruktúra objektu je správna. Potom modifikáciou formy, ako aj dynamiky, I/O, názvom objektu je možné urobiť vlastný model zariadenia.

Do programu COSIMIR® Professional sme importovali samostatnú súčiastku zo zostavy pohyblivého zariadenia z programu Inventor 11. Prvým krokom bola inštalácia programu pre tvorbu prípony súboru .VRL do programu Inventor 11. V tomto programe nie je zahrnutý prekladač pre príponu .VRL. Museli sme kúpiť WRLM prekladač a nainštalovať ho.



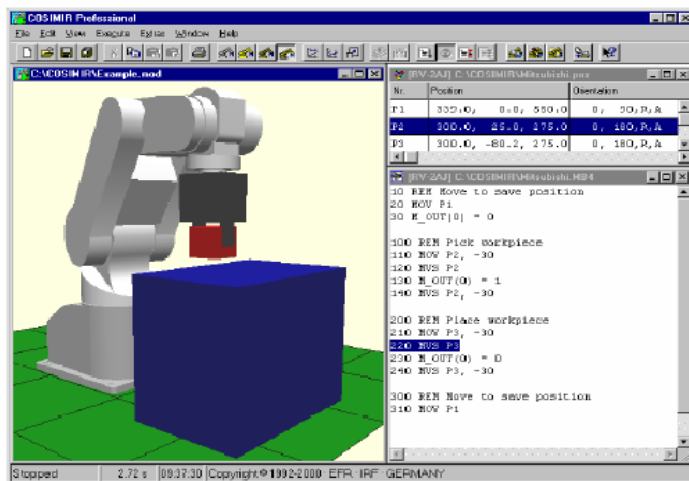
Obr.4: Program Inventor 11

4. Programovanie

Programovanie robotov typu Mitsubishi, KUKA, ABB, Adept, Stäubli, Fanuc, Manutec, Reis a Diverse sa môže napísať v COSIMIR® Professional v pôvodnom programovacom jazyku:

- Movemaster Command alebo Melfa Basic IV,
- KRL,
- RAPID a
- Vplus.

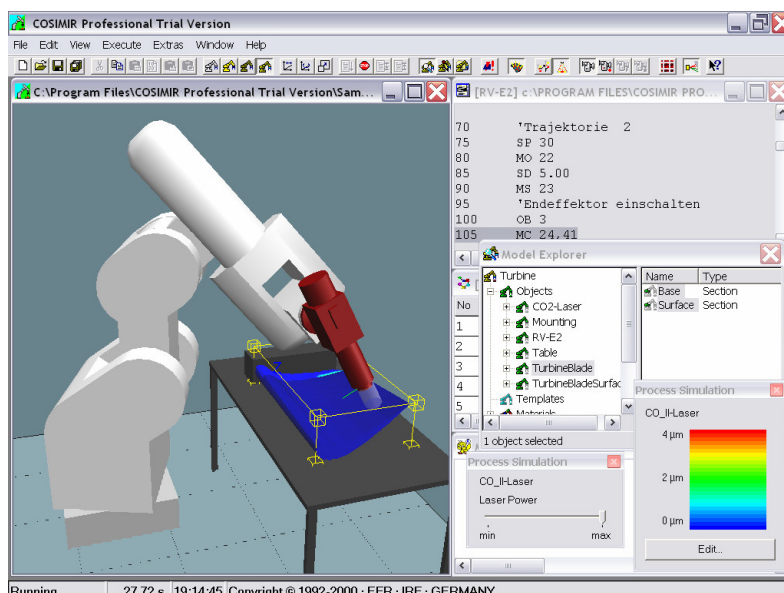
Optimálne je použitie univerzálneho programovacieho jazyka IRL (Industrial Robot Language). Program obsahuje IRDATA, čo je štandardizovaná nízka úroveň kódu nutná k načítaniu programu robota vytvoreného v rozdielnych programovacích jazykoch.



Obr.5: Programovací jazyk

Pre rozdielne vysokú úroveň programovacích jazykoch je vytvorený kompilátor pre COSIMIR® procesy v IRDATA kóde. IRDATA vytvárajú súbory, ktoré môžu byť používané len v programe COSIMIR®. Pre riadiace obvody robota nie sú vhodné súbory IRDATA.

Programovanie dráhy priemyselného robota je charakterizované rozmanitosťou pozícií a ich súvislosti. Každá pozícia je definovaná do troch karteziánskych súradníc s príslušnou orientáciou. Daná skupina pozícií a ich príslušného poradia sa volá trajektória.



Obr.6: Návrh trajektorie

Robot používa na presun nástroj, ktorý má už preddefinovanú trajektóriu. Každý prostriedok je nutné centrovat' na jeden spoločný bod. Každý povel pre mechanizmus je opačný k TPC. Ku každému procesu je nutná špeciálna pomôcka, napríklad upínacia hlava, výrobná pomôcka, pulzný laser alebo pomôcka na maľovanie.

Zobrazenie objektu manipulácie na ploche berie do úvahy jeho jednoduchý základný geometrický tvar. Generovanie trajektórie pre špeciálny problém závisí na vlastnom rozmere objektu.

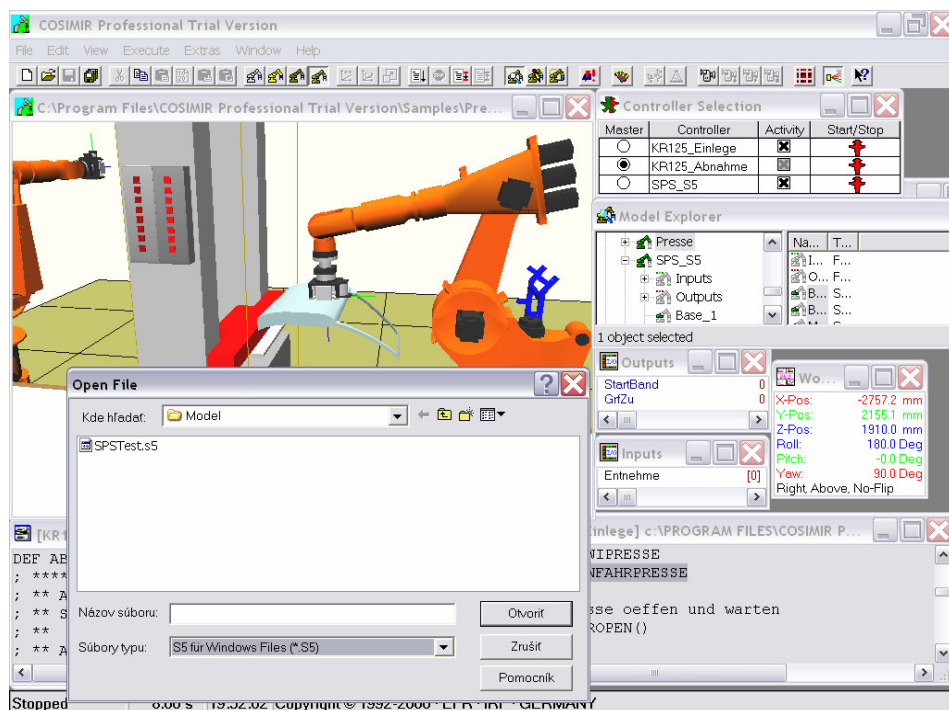
Každá vykalkulovaná interpolácia bodov zobrazí svoju pozíciu relatívne k základni robota. Body svojou pozíciou a orientáciou TCP získavajú optimálny výsledok. Zistenie interpolácie bodov je nezávislé na pracovnom spôsobe. Ak robot presunie nástroj, nie je potrebné ďalej prispôbovať. Ak robot presunie objekt manipulácie na poslednú pozíciu musí byť reštartovaný [4].

5. Simulácia

Rozdielnosť simulačného času graficky aktualizuje medzi pracovným oknom a programom Windows simulačný cyklus. Tento cyklus je čas používaný na aktualizovanie hodnôt vnútri systému, takých ako interpolácia krokov robota, I/O alebo obnovenie cyklus s PLC. Spomenutá simulácia cyklu je vždy mnohonásobne kontrolovaná.

Výberom "Model Update" sa obnovuje modelový výpočet takých objektov ako pásový dopravník alebo proces simulácia z veľmi malého kontrolovaného cyklu k simulačnému cyklu. Umiestnenie kontrolóra cyklu vedie k zníženiu výkonu pre niektoré modely, naproti tomu simulácia cyklu môže viesť k pár nepresnostiam.

S voľbou "Realtime" pre štart simulácie s dynamickým simulačným cyklom sa dosiahne synchronizácia medzi simulačným časom a realitou.



Obr.7: Importovanie STEP 5 pre PLC

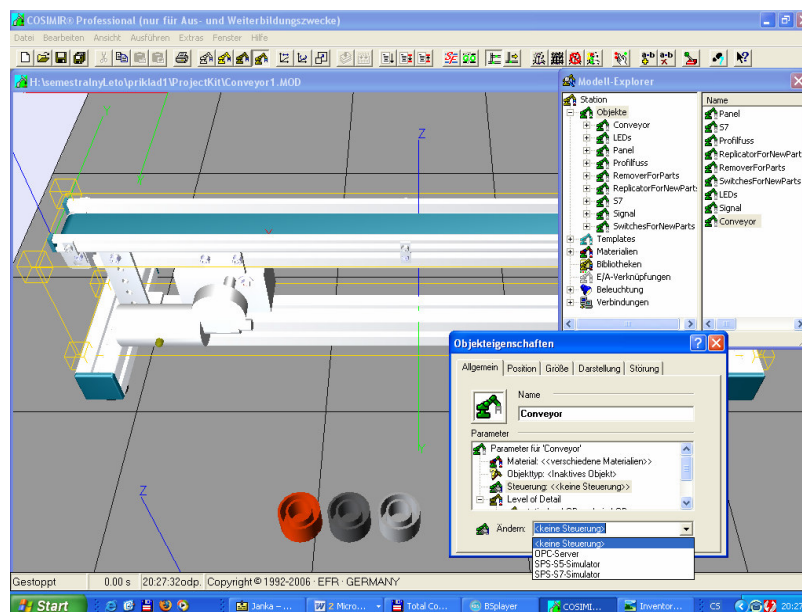
Senzor simulácie má predĺžiteľnú kapacitu, čo umožňuje v programe COSIMIR® simulovať kompletne pracovné zostavy. Mnoho snímačov používaných v automatizovanej výrobe môže byť parametrizovaných a realisticky simulovaných. Okrem toho pomoc vizualizáciou meracieho rozsahu zabraňuje chybám v stupni navrhovania. Toto nie je možné v realite urobiť.

OPC spojenie s programom COSIMIR® odblokuje a spojí externú kontrolu so simuláciou. Kontrolér uskutočňuje základné logické a aritmetické výpočty, alebo kontroluje jeden alebo viac kinematík. Programovateľné logické kontroléry (PLC) patria k prvej skupine a kontroléry robotov k druhej.

Komunikácia prepojenia používaná pre spojenie operátora a systému simulácie sa nazýva OPC (OLE pre Process Control). OPC je štandardizované softwarové rozhranie definované tak, že umožní a štandardizuje prístup k údajom z PC ku základným aplikáciám v oblasti automatizačného strojárstva.

Pre operátorov to znamená poskytnúť internú informáciu partnerom, ktorý budú v spojení s COSIMIR® cez OPC sever. OPC spojenie je realizované ako OPC klient, ktorý obnovuje povinnú informáciu zo servera a schváli ju do jadra COSIMIR®.

Spojenie je uskutočnené ako rozšírený modul a je úplne integrovaný do užívateľského rozhrania programu COSIMIR®. Pretože má adekvátne spojenie operátorského rozhrania napodobňuje externý integrovaný operátor spracovanie programu a kinematiku funkcií [4].



Obr.8: Výber vhodnej kontroly

OPC je založený na DCOM (Distributed Component Object Model) technológií vyvinutej od Microsoft pre distribuované aplikácie. Zatiaľ čo, funkcie DCOM sú používané, v čase keď COSIMIR® a OPC sever externého operátora funguje na rozdielnych počítačových systémov.

DCOM používa viacero bezpečnostných zariadení, ktoré ovládajú prístup k lokálnym aplikáciám cez sieť. Početné systémové nastavenia t.j. závislé na sieťovom prostredí sú potrebné pre zavedenie sieťové pripojenie.

COSIMIR® OPC spojenie adresy OPC servera nad DCOM triedy sú zapísané v registry Windows. Za účelom uskutočnenia diaľkového prístupu, sú požadované DCOM triedy, ktoré musia byť zapísané v lokálnom registry počítača s COSIMIR®. S inštaláciou serveru musia byť vložené všetky nutné DCOM triedy do archívu [4].

6. Skúsenosti s prácou v programe

Výhody programu, podľa našich doterajších skúsenosti sú:

- integrácia 3D modelovania pomocou funkcií CAD, importovanie 3D objekt, výber hotových a funkčných komponentov z knižnice,
- integrácia programovania pomocou programovacieho jazyka pre roboty, PLC alebo OPC sever,
- monitorovanie kolízie modelov počas chodu programu,
- integrácia 3D simulovania,
- ľahké začlenenie programu do výučby automatizácie a riadenia.

Nevýhoda program je:

- pre importovanie z CAD programov je nutné zakúpiť WRLM prekladač,
- komplikované umiestnenie kinematiky pre importovaný mechanizmus,
- pre programovanie robotov musíte ovládať programovací jazyk príslušného robota (pre Mitsubishi roboty Movemaster Command alebo Melfa Basic jazyk, pre Stäubly a Adept jazyk V+, KRL pre KUKA, atď.),
- je nutné ovládať STEP 5 Manager alebo STEP 7 pre programovanie PLC,
- musíte poznať riadenie jednotlivých objektov pre správne pridelenie vstupov a výstupov.

7. Záver

Simulovanie je oprávnené uznávané medzi expertmi a odborníkmi ako výborná pomôcka pre zlepšenie priemyselnej produktivity. Avšak, mnoho spoločností, simuláciu používa len vo výnimočných situáciách aj keď potreba efektívnosti a zlepšenia siaha na vysokú úroveň nutnosti.

Program COSIMIR® Professional je veľmi výhodná pomôcka na výuku modelovania, programovania a simulácie, ale aj pre simuláciu reálneho systému v praxi.

Literatúra

- [1] COSIMIR® Professional, [12. 1. 2007], available on Internet: <http://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/software-e-learning/cosimir/cosimir-professional.htm>
- [2] Program Cosimir® PROFESSIONAL Help [1-2-2007]

- [3] COSIMIR®...The Triple Crown of Festo's Didactic Training of Robotic Simulation Software Technology, [27. 3. 2007], available on Internet: <http://www.motionshop.com/pr/festocosimir.shtml>
- [4] MIHALÍKOVÁ, J. – LÍŠKA, O.: Work in simulation software Cosimir Professional In: Academic Journal of Manufacturing Engineering 2007, ISSN 1583-7904
- [5] Saloky, T, Piteľ, J. Intelligent robots and computer vision. In.: International Carpathian Control Conference ICC'2004 – Volume II., Zakopane, Poland, May 25-28, 2004. Krakow: Faculty of Mechanical Engineering and Robotics AGH - UST, 2004. pp. 243-246. ISBN 83-89772-00-0

Poznámka

Tento príspevok bol pripravený za podpory grantového projektu KEGA 3/3156/05 Koncept zvýšenia úrovne vzdelávania v 3. stupni štúdia v meniacich sa podmienkach odborného vzdelávania.

MODEL TERMODYNAMICKÝCH PROCESŮ

Michal MOUČKA

Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra aplikované kybernetiky,
Hálekova 6, 461 17 Liberec, Česká republika, michal.moucka@tul.cz

Abstrakt: Článek se zabývá problematikou matematického modelování chování pneumatických mechanismů. Přesněji je zaměřen na lineární pneumatické pohony. Jsou zde popsány základní rovnice a vzorce matematického modelu. V závěru článku jsou prezentovány aktuální výsledky ze simulací v prostředí Matlab-Simulink, včetně porovnání simulací s dvěma modely termodynamických dějů.

Klíčová slova: pneumatický systém, matematický model, termodynamická teplota, tlak, hmotnostní průtok

1. Úvod

Návrh řídicích systémů lineárních pneumatických pohonů je velmi složitý. Je obtížný jak po stránce technické, tak po stránce časové. Pro zvýšení efektivity návrhu (rychlosti, kvality) je možné využít matematických modelů, které popisují statické a dynamické chování jednotlivých komponent pneumatických pohonů. Modely umožňují studium chování pneumatických pohonů v interakci s řídicími systémy bez nutnosti jejich fyzické realizace. To znamená, že umožňují poměrně levně porovnávat různé varianty řešení řídicích systémů, výběr řešení nejvhodnějšího, které bude následně realizováno.

Výsledky a zkušenosti autora z matematického modelování a simulací pneumatických systémů byly již publikovány, např. [1], [2]. Předkládaný článek na tyto publikace navazuje. V článku jsou porovnávány výsledky simulací s dvěma modely termodynamických dějů, které probíhají v komorách lineární pneumatické jednotky (válce).

2. Matematický model

První důležitou rovnicí modelu je pohybová rovnice. Pohybová rovnice popisuje dynamické chování pístu pneumatické jednotky. Podle [1] ji lze napsat ve tvaru

$$(m_p + m_l(t))x(t) + bx'(t) + F_f(t) + F_l(t) = p_1(t)A_1 - p_2(t)A_2 - p_a A_r, \quad (1)$$

kde m_p je hmotnost pístu, m_l je hmotnostní zatížení pístu, x je poloha pístu, b je součinitel viskózního tření, F_f je třecí síla, F_l je síla zatěžující píst jednotky, A_1 a A_2 jsou efektivní plochy pístu, p_1 a p_2 jsou tlaky v komorách jednotky, p_a je atmosférický tlak. Tlaky v komorách jednotky, hmotnostní a silové zatížení, třecí síly jsou funkcemi času. U ostatních veličin předpokládáme neměnnost.

Druhou rovnicí je rovnice, která popisuje termodynamické procesy v komorách pneumatické jednotky. Tato rovnice byla publikována v mnoha tvarech v řadě vědeckých knih a publikací. Složitější rovnicí [1] je následující rovnice

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{RT}{V_i(t)} \left(\alpha_1 \frac{dm_1(t)}{dt} - \alpha_2 \frac{dm_2(t)}{dt} \right) - \alpha \frac{p_i(t)}{V_i(t)} \frac{dV_i(t)}{dt}, \quad (2)$$

kde p je tlak plynu v komoře o aktuálním objemu V , T je absolutní teplota okolí, R je individuální plynová konstanta, m_1 je hmotnost plynu, který přitéká do komory, m_2 je hmotnost plynu, který z komory odtéká a i je index příslušné komory pneumatické lineární jednotky. Rovnice (2) respektuje charakter termodynamických procesů v komorách jednotky. Charakter vystihují termodynamické koeficienty α , α_1 a α_2 .

Jednodušší termodynamickou rovnicí je rovnice

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{p_i(t)V_i(t)}{T_i(t)} \right) = R \left(\frac{dm_1(t)}{dt} - \frac{dm_2(t)}{dt} \right), \quad (3)$$

kde T je absolutní teplota v příslušné komoře lineární pneumatické jednotky. Rovnice (3) vychází ze stavové rovnice ideálního plynu [3]

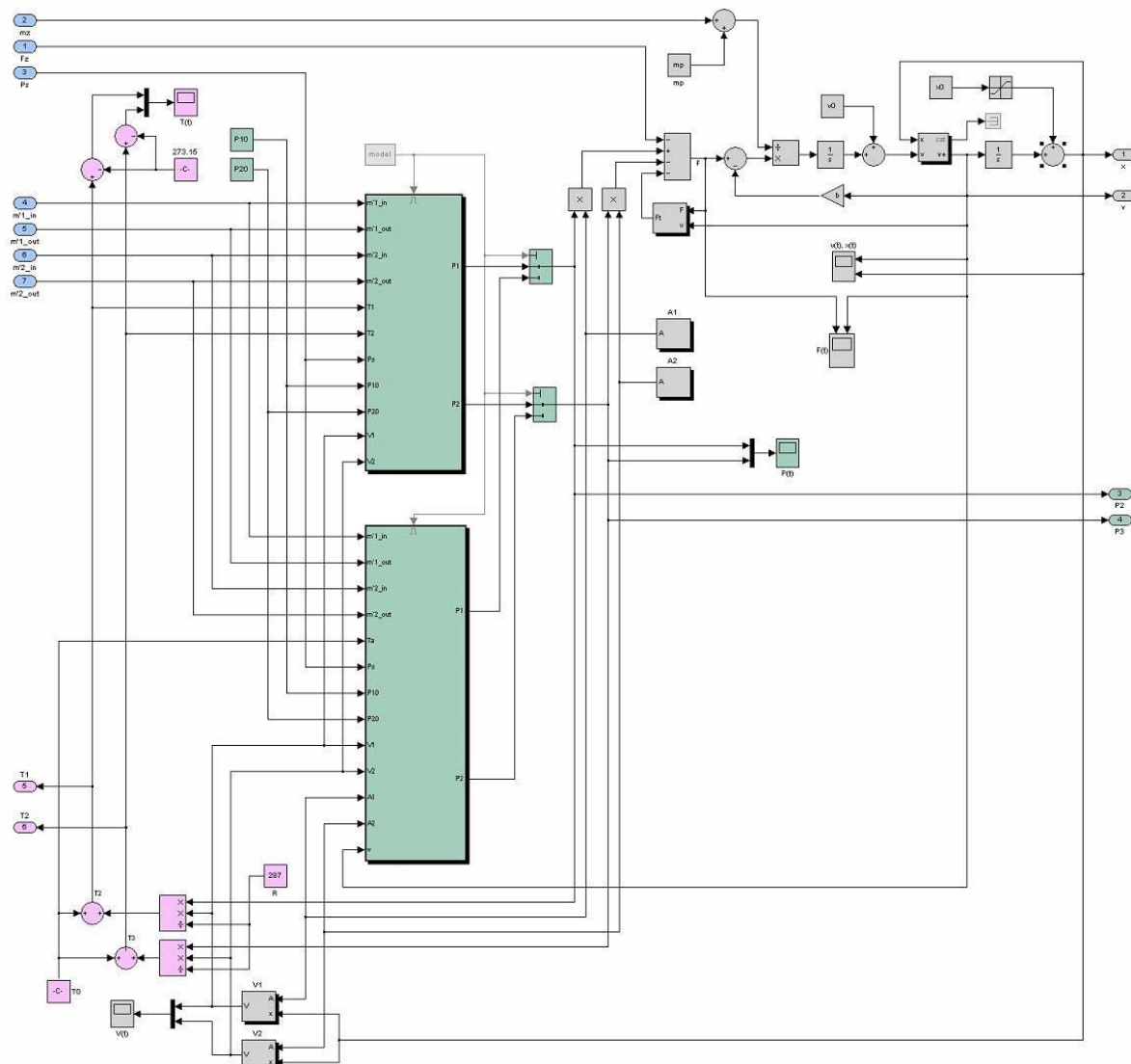
$$pV = mRT \quad (4)$$

Průběh třecí síly F_f v rovnici (1) je v simulačních schématech počítán pomocí rovnice

$$F_f(t) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\frac{|x'(t)|^{\delta_s}}{v_s}} + F_v x'(t) \quad (5)$$

kde F_c je Coulombova třecí síla, F_s je statická třecí síla, F_v je dynamická třecí síla, v_s je Striebeckova rychlost, δ_s je součinitel tvaru dosedacích ploch [4].

Z uvedených rovnic bylo sestaveno v prostředí Matlab-Simulink simulační schéma, viz následující obr. 1.

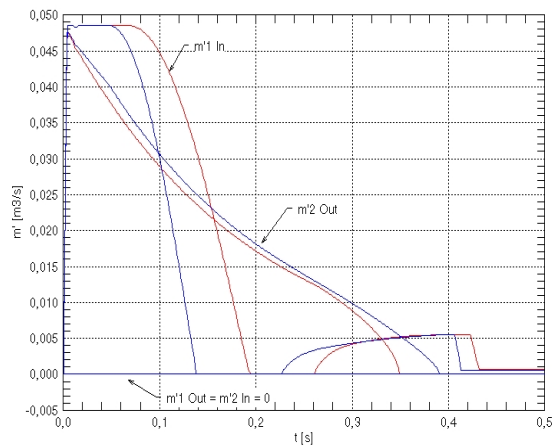


Obr.1: Simulační schéma lineární pneumtické jednotky

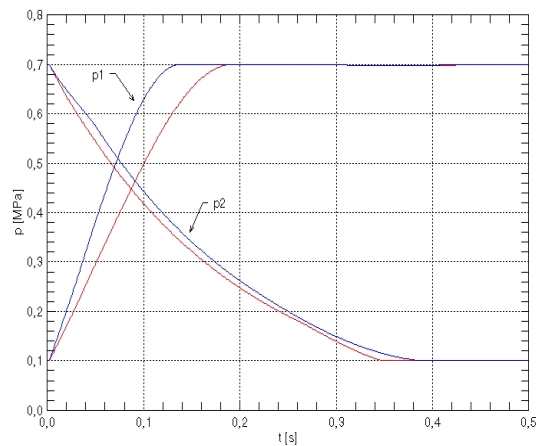
3. Simulační experiment

K matematickému modelu lineární pneumtické jednotky je nezbytné připojit model elektro-pneumtického ventilu (řízení průtoku vzduchu), například proporcionálního. Model proporcionálního pneumtického ventilu byl publikován autorem v článku [2]. Na následujících obrázcích 2 až 4 jsou uvedeny vybrané dynamické charakteristiky, které byly získány simulací v prostředí Matlab-Simulink verze 7.

Proces simulace byl realizován pro absolutní teplotu 293,15 K a absolutní tlak 0,1 MPa okolního vzduchu. Absolutní napájecí tlak byl nastaven na 0,7 MPa. Průměr pístu byl nastaven na 0,025 m, průměr pístnice na 0 m, maximální zdvih pístu na 0,225 m a hmotnost pístu na 1 kg.

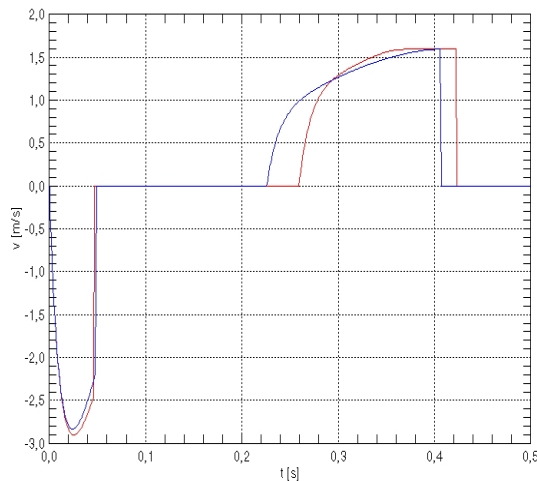


Obr. 2: Hmotnostní průtok v komorách jednotky

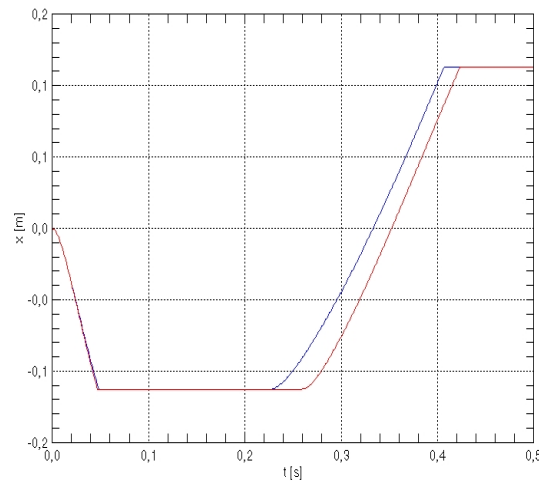


Obr. 3: Tlak vzduchu v komorách jednotky

Statická třecí síla byla nastavena na 54 N, Coulombova třecí síla na 60 N, Striebeckova rychlost na $0,1 \text{ ms}^{-1}$ a tvarový součinitel na hodnotu 1. Počáteční poloha pístu byla $-0,1125 \text{ m}$, počáteční rychlost byla 0 ms^{-1} , počáteční absolutní tlak v první komoře byl 0,1 MPa, v druhé 0,7 MPa.



Obr. 4: Rychlost pístu jednotky



Obr. 5: Poloha pístu jednotky

Modré křivky jsou výsledkem simulace s modelem termodynamických procesů podle rovnice (2). Červené byly simulovány podle rovnice (3).

Literatura

- [1] Moučka, M.: Model of the nonlinear pneumatic drive. In.: *Summaries volume of the 15th International Conference on Process Control 2005*, Štrbské Pleso – High Tatras, Slovak Republic, June 7-10, 2005. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2005. ISBN 80-227-2235-9.
- [2] Moučka, M.: Improved model of the pneumatic valve FESTO MPYE. In.: *17th International Congress of Chemical Engineering*. Praha, Czech Republic, August 21-31, 2006. Praha: Czech Society of Chemical Engineering, 2006. ISBN 80-86059-45-6.
- [3] Kundu, P., K. – Cohen, I., M.: *Fluid mechanics*. Elsevier Academic Press, London, The United Kingdom, 2004. ISBN 0-12-178253-0
- [4] Eriksson, B.: *Optimal force control to improve hydraulic drives*. Royal institute of technology, KTH, Stockholm, Sweden, 1996. ISSN 1400-1179.

Poděkování

The work presented in this paper was supported by the research project of Ministry of Education of the Czech Republic under contract MSM 4674788501.

SIMULÁCIA PRINCÍPU ČINNOSTI AKTUÁTORA NA BÁZE PNEUMATICKÝCH UMELÝCH SVALOV

Ján PITEĽ

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky, ul. Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovenská republika, email: jan.pitel@tuke.sk

Abstrakt: Z blokovej schémy aktuátora s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení bol v programe Matlab Simulink vytvorený simulačný model princípu činnosti aktuátora pri nulovom zaťažení, ktorý okrem samotných umelých svalov zahŕňa aj príslušné dvojpolohové elektropneumatické ventily pre ovládanie aktuátora. Zrealizovaný model zohľadňuje rôzne dynamické vlastnosti pneumatického umelého svalu pri napúšťaní a vypúšťaní vzduchu zo svalu, umožňuje simulovať princíp činnosti aktuátora pri zmene jednotlivých vstupných veličín a bude slúžiť ako podklad pre ďalší výskum návrhu a tvorby spresneného modelu aktuátora na báze pneumatických umelých svalov.

KLúčové slová: simulácia, model, aktuátor, umelý sval

1. Úvod

V rámci výskumných úloh riešených na pracovisku autora bol navrhnutý a zrealizovaný aktuátor na báze dvoch antagonisticky zapojených pneumatických umelých svalov, u ktorého svaly svojimi ťahovými silami pôsobia proti sebe. Ťahové sily umelých svalov sú prenášané prostredníctvom lanka na otočnú kladku. Akčnou veličinou prichádzajúcou do každého umelého svalu je tlak stlačeného vzduchu, ktorý prúdi cez príslušný elektropneumatický ventil do svalu. Výsledná poloha aktuátora je určená rovnováhou ťahových síl pri rôznych tlakoch vzduchu v jednotlivých svaloch.

Činnosť antagonistického aktuátora je založená na súčasnom zvyšovaní tlaku vzduchu v jednom svale a znižovaní tlaku v druhom (antagonistickom) svale. Na ovládanie každého z obidvoch pneumatických umelých svalov je nutné použiť dva elektropneumatické ventily (jeden napúšťací a jeden vypúšťací), t. j. pre aktuátor s dvoma pneumatickými umelými svalmi sú potrebné štyri ventily. Obidva svaly sú v takom prípade aktívne a vyžadujú súčasné riadenie veľkosti plniaceho tlaku vzduchu v jednotlivých svaloch.

Je možná aj funkcia antagonistického aktuátora s odlišnou činnosťou umelých svalov. Jeden z umelých svalov v príslušnej polovici dráhy ramena aktuátora plní úlohu pasívnej nelineárnej pneumatickej pružiny a nepotrebuje žiaden riadiaci zásah. Riadený je iba k nemu antagonistický komplementárny (aktívny) sval, ktorého pohyb je riadený a poloha nastavovaná reguláciou tlaku vzduchu príslušnými ventilmi. Aj v tomto prípade na ovládanie každého z obidvoch pneumatických umelých svalov je nutné použiť dva elektropneumatické ventily, avšak toto riešenie zjednodušuje riadenie takejto sústavy, pretože v každom okamžiku je riadený iba jeden (aktívny) sval.

2. Princíp činnosti aktuátora na báze pneumatických umelých svalov

Princíp činnosti aktuátora na báze dvoch antagonisticky zapojených pneumatických umelých svalov je možné okrem iného vyjadriť blokovou schémou aktuátora (obr. 1), ktorá okrem samotných umelých svalov zahŕňa aj príslušné dvojpolohové elektropneumatické ventily pre ovládanie aktuátora. Význam jednotlivých veličín a konštánt v blokovej schéme na obr. 1 (pričom index 1 v schéme platí pre prvý umelý sval a index 2 pre druhý umelý sval):

- U_N – ovládacie napätie napúšťacieho elektropneumatického ventilu,
- U_V – ovládacie napätie vypúšťacieho elektropneumatického ventilu,
- p_0 – plniaci tlak stlačeného vzduchu,
- p_S – tlak v umelom svale (spätný tlak),
- p_N – tlak napúšťacieho elektropneumatického ventilu,
- Q_N – prietok stlačeného vzduchu cez napúšťací elektropneumatický ventil,
- Q_V – prietok stlačeného vzduchu cez vypúšťací elektropneumatický ventil,
- Q_P – prietok stlačeného vzduchu v prívodnom potrubí ku svalu,
- Q_b – prietok stlačeného vzduchu do umelého svalu za prírodným potrubím,
- T_d – dopravné oneskorenie pretekajúceho stlačeného vzduchu cez prírodné potrubie k umelému svalu,

- K_b – integračná konštanta plnenia umelého svala,
- V_S – prírastok objemu vzduchu v umelom svale,
- F_z – zaťažovacia sila aktuátora,
- φ – uhol natočenia ramena (poloha) aktuátora.

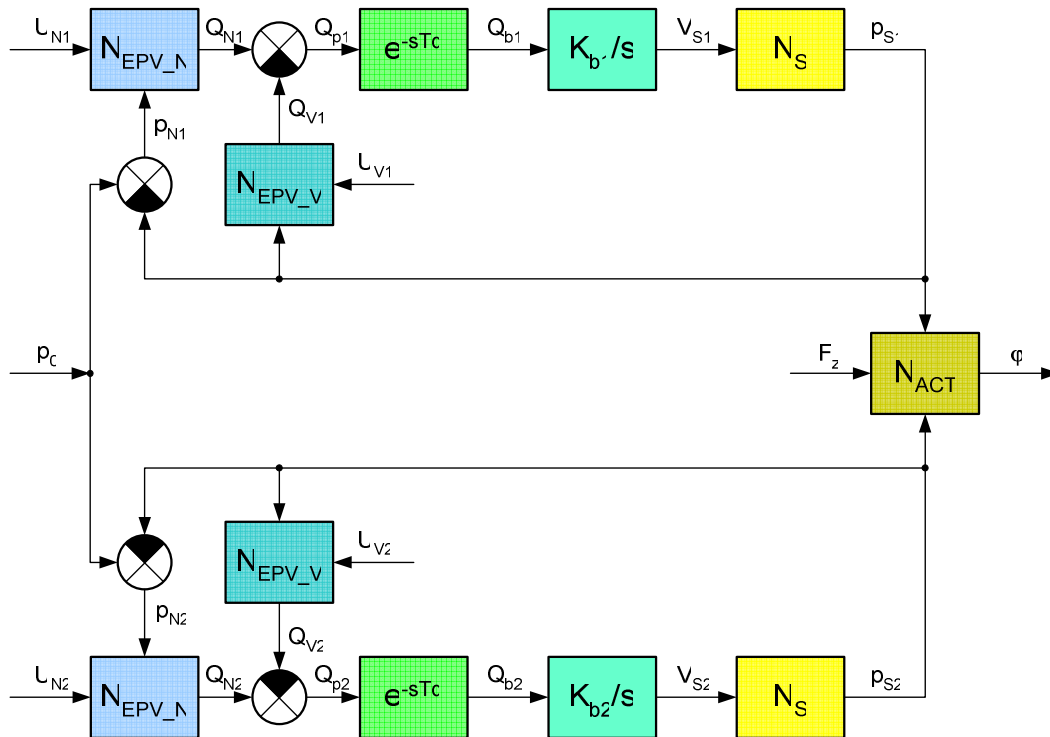
Význam jednotlivých nelinearít v blokovej schéme na obr. 1

N_{EPV_N} – nelinearita charakterizujúca závislosť prietoku stlačeného vzduchu cez napúšťací elektropneumatický ventil na vstupnom tlaku a ovládacím napätí ventilu,

N_{EPV_V} – nelinearita charakterizujúca závislosť prietoku stlačeného vzduchu cez vypúšťací elektropneumatický ventil na vstupnom tlaku a ovládacím napätí ventilu,

N_S – nelinearita charakterizujúca závislosť medzi tlakom vzduchu v umelom svale (spätný tlak) a fiktívnym objemom vzduchu v umelom svale,

N_{ACT} – nelinearita statickej charakteristiky aktuátora s antagonistickým usporiadaním umelých svalov (závislosť uhla natočenia ramena aktuátora na tlakoch vzduchu v umelých svaloch a zaťažujúcej sile).

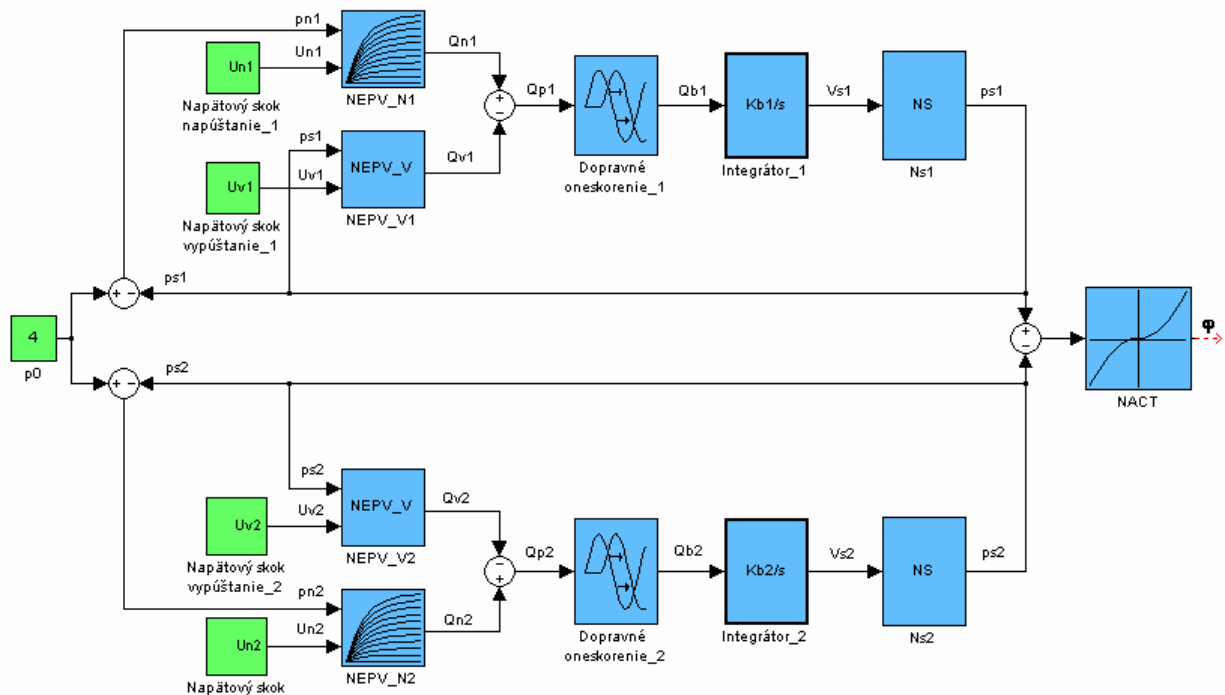


Obr.1: Blokova schéma aktuátora s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení

V počiatočnom stave sústavy na obr. 1 sú všetky veličiny nulové, okrem zaťažovacej sily aktuátora F_z a napájacieho tlaku stlačeného vzduchu p_0 . Otvorením príslušného napúšťacieho ventilu ovládacím napätím U_N bude na výstupe tohto ventilu prietok stlačeného vzduchu Q_N , ktorý sa po oneskorení T_d v prívodnom potrubí k umelému svalu integruje do fiktívneho prírastku objemu umelého svala V_S . V umelom svale narastá v zmysle nelinearity N_S tlak p_S , ktorý sa spätne prejavuje v napúšťacom ventile ako tlaková diferencia p_N medzi jeho vstupom a výstupom. Veľkosť kontrakcie príslušného svalu závisí od doby otvorenia napúšťacieho ventilu (po prepnutí ovládacieho napätia U_N na nulovú hodnotu ostane umelý sval zmrštený na poslednej získanej hodnote kontrakcie až dovtedy, kým nedôjde k ďalšiemu otvoreniu napúšťacieho ventilu). Pri súčasnom plnení cez oba napúšťacie ventily za predpokladu rovnakých tlakov p_{S1}, p_{S2} v oboch svaloch nastáva rovnosť ťahových síl umelých svalov a aktuátor sa ustáli v počiatočnej polohe „0“. V tomto bode je tuhosť aktuátora za predpokladu maximálneho tlaku vzduchu vo svaloch najvyššia a obojstranne symetrická. Pohyb ramena v kladnom alebo zápornom smere od tohto bodu sa uskutočňuje vyprázdňovaním iba jedného príslušného umelého svalu (tzv. aktívny sval), t.j. jeden z umelých svalov v príslušnej polovici dráhy ramena aktuátora plní úlohu pasívnej nelineárnej pneumatickej pružiny a nepotrebuje žiaden riadiaci zásah. Otvorením vypúšťacieho ventilu aktívneho svalu ovládacím napätím U_V bude stlačený vzduch z umelého svalu cez tento ventil unikať s prietokom Q_V buď do úplného alebo čiastočného vyprázdnenia umelého svalu (v závislosti na dobe otvorenia tohto ventilu danou prepnutím ovládacieho napätia U_V na nulovú hodnotu), a tým dôjde k zníženiu tlaku p_S v umelom svale. Rameno aktuátora sa ustáli v polohe φ v závislosti na tlakoch v umelých svaloch p_{S1}, p_{S2} a zaťažovacej sile F_z v zmysle nelinearity N_{ACT} .

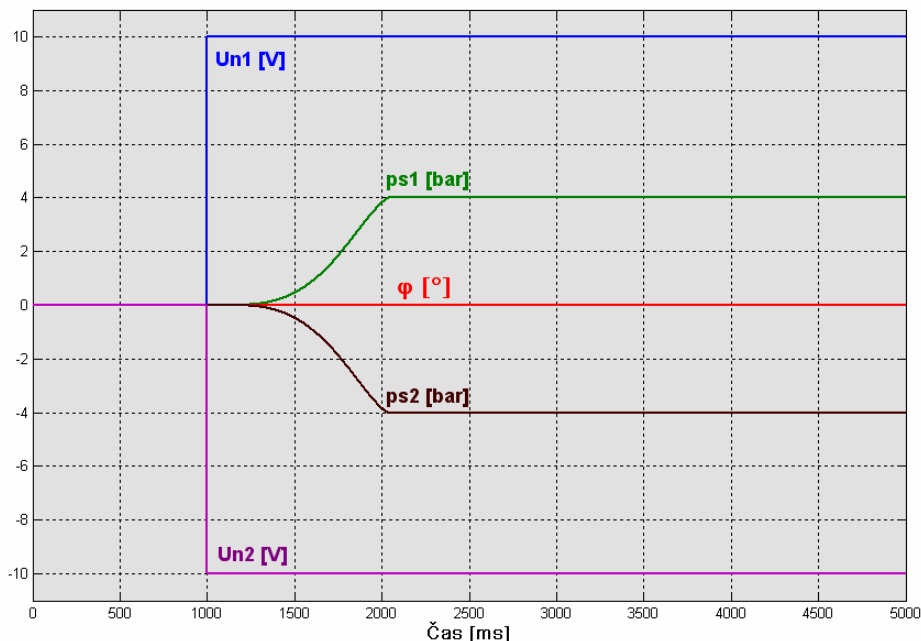
3. Simulačný model princípu činnosti aktuátora

Z blokové schémy aktuátora s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení bol v programe Matlab Simulink vytvorený simulačný model princípu činnosti aktuátora pri nulovom zaťažení (obr. 2). Uvedený model umožňuje simulovať princíp činnosti aktuátora pri zmene jednotlivých vstupných veličín a bude slúžiť ako podklad pre ďalší výskum návrhu a tvorby spresneného modelu aktuátora.



Obr.2: Simulačný model aktuátora s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení

Simulačný model bol vytvorený a simulovaný v programe Matlab Simulink. Jednotlivé nelinearity (NEPV_V, NEPV_N, NACT) boli v prvom priblížení pre simuláciu činnosti aktuátora realizované blokmi LOOK-UP-TABLE Simulink-u. Blok nelinearity NEPV_V je podobný bloku NEPV_N, pričom v sebe navyše zahŕňa vplyv škrtiacich ventilov pri vypúšťaní stlačeného vzduchu z umelých svalov (zníženie prietoku). Napätové skoky sú realizované blokmi STEP Simulink-u, pričom napätový impulz je realizovaný odčítaním dvoch časovo posunutých blokov STEP. Pre lepšiu názornosť priebehov simulácii sú v nasledujúcich obrázkoch veličiny týkajúce sa druhého umelého svalu zobrazené inverzne (v skutočnosti sú taktiež kladné).

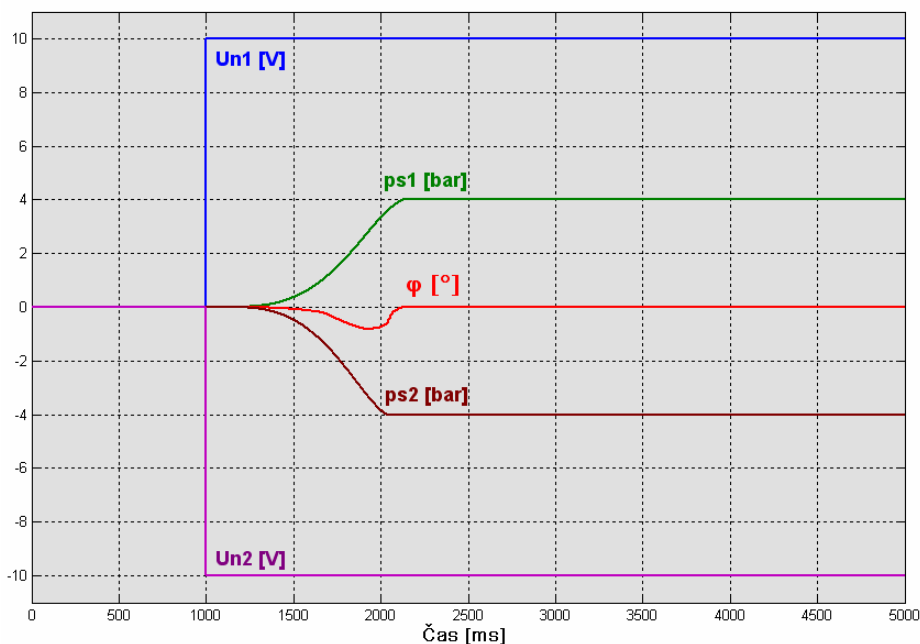


Obr. 3: Simulácia aktuátora v prípade rovnakých nelinearit umelých svalov

Na obr. 3 je znázornená odozva ramena aktuátora (poloha φ) na súčasné plnenie obidvoch pneumatických svalov (v čase 1000 ms napätím U_{n1} a U_{n2} otvorené napúšťacie ventily obidvoch umelých svalov). Rameno

aktuátora sa ustálilo v počiatočnej polohe $\varphi = 0^\circ$ za predpokladu, že nelinearity jednotlivých umelých svalov sú rovnaké (rovnaký nárast tlakov p_{s1} a p_{s2} vo svaloch).

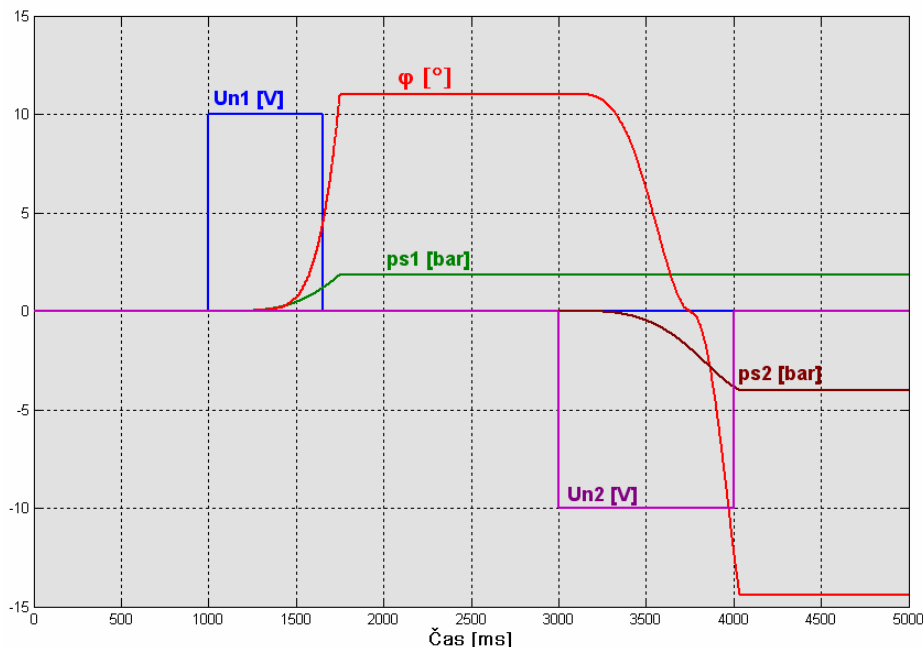
Na obr. 4 je znázornená odozva ramena aktuátora (poloha φ) na súčasné plnenie obidvoch pneumatických svalov, ktorých nelinearity sú rôzne.



Obr. 4: Simulácia aktuátora v prípade rôznych nelinearit umelých svalov

Rameno aktuátora sa najprv vychýlilo na stranu umelého svalu s rýchlejším nárastom tlaku vo svalce (p_{s2}) a potom sa ustálilo v počiatočnej polohe $\varphi = 0^\circ$. Priebehy tlakov (spätných tlakov) v príslušných svaloch sa v dôsledku rôznych nelinearit jednotlivých svalov líšia.

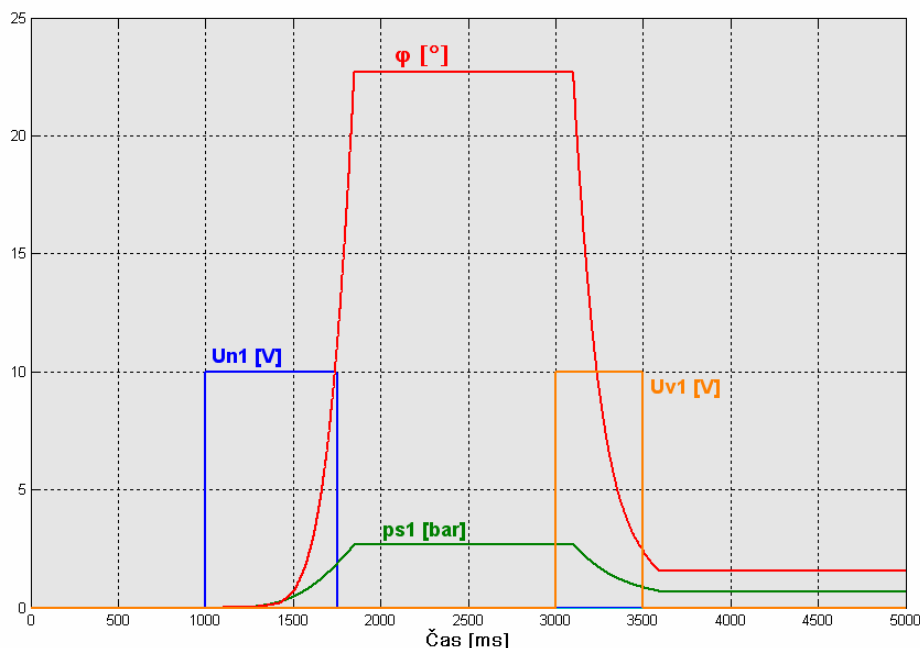
Na obr. 5 je znázornená odozva aktuátora na rôzne a posunuté doby otvorenia napúšťacích ventilov jednotlivých umelých svalov.



Obr. 5: Simulácia aktuátora pri rôznych dobách otvorenia napúšťacích ventilov

Otvorením napúšťacieho ventilu prvého svalu v čase $t = 1000 \text{ ms}$ na dobu 650 ms došlo k čiastočnému naplneniu umelého svalu vzduchom na tlak cca 200 kPa a rameno aktuátora sa ustálilo v polohe cca 11° . Následným otvorením napúšťacieho ventilu druhého umelého svalu v čase $t = 3000 \text{ ms}$ na dobu 1000 ms došlo k naplneniu druhého svalu na tlak cca 400 kPa a rameno aktuátora sa postupne vychýlilo do opačnej strany a ustálilo v polohe cca -14° .

Na obr. 6 je znázornená odozva aktuátora na časovo posunutú otvorenú a vypúšťaciu ventilu iba jedného svalu.



Obr. 6: Simulácia aktuátora pri otvorení napúšťacieho a vypúšťacie ventilu iba jedného svalu

Otvorením napúšťacieho ventilu prvého svalu v čase $t = 1000 \text{ ms}$ na dobu 750 ms došlo k čiastočnému naplneniu tohto umelého svalu vzduchom na tlak cca 300 kPa a rameno aktuátora sa ustálilo v polohe cca 23° . Následným otvorením vypúšťacieho ventilu toho istého svalu v čase $t = 3000 \text{ ms}$ na dobu 500 ms došlo k zníženiu tlaku v tomto svale na cca 100 kPa a rameno aktuátora sa ustálilo v polohe cca 2° .

4. Záver

Simulačný model aktuátora s dvoma pneumatickými umelými svalmi v antagonistickom zapojení, na rozdiel od doterajších modelov, zohľadňuje rôzne dynamické vlastnosti pneumatického umelého svalu pri napúšťaní a vypúšťaní vzduchu zo svalu. Výsledky simulácie princípu činnosti aktuátora sa zhodujú s teoretickými východiskami a predpokladmi. Aktuátor predstavuje nelineárnu sústavu s dopravným oneskorením, ktorej koncová poloha je nelineárnou stredovo symetrickou funkciou plniaceho tlaku vzduchu v umelých svaloch.

Nelinearity jednotlivých subsystémov navrhnutého modelu sú len predpokladané na základe dostupných teoretických poznatkov. Skutočné nelinearity je potrebné zostaviť na základe matematického popisu jednotlivých častí aktuátora, resp. na základe experimentálnych meraní na reálnom aktuátore, čo bude predmetom ďalšieho výskumu v tejto oblasti. Navrhnutý a odsimulovaný model princípu činnosti aktuátora s nulovým zaťažením bude slúžiť ako podklad pre ďalší výskum návrhu a tvorby spresneného modelu aktuátora.

Príspevok bol vypracovaný s grantovou podporou VEGA 1/2212/05 a VEGA 1/4077/07.

Literatúra

- [1] Balara, M., Petík, A.: Nelineárny model pneumatického umelého svalu. *Strojárstvo v hospodárstve a priemysle*, roč. 4, 2000, č. 11, str. 54-55.
- [2] Kureková, E., Halaj, M., Bohunický, A.: Návrh plánu experimentu na zistenie opakovanej presnosti polohovania plazmového rezacieho stroja. In: *Zborník 4. medzinárodnej konferencie Aplimat 2005*, str. 227-233, 1.-4.2.2005, Bratislava, Slovensko.
- [3] Mihalíková, J.: Simulácia výrobných systémov. In: *Novus scientia 2006: 9. celoštátna konferencia doktorandov technických univerzít a vysokých škôl*, str. 385-389, 6.12.2006, Košice, Slovensko.
- [4] Petík, A., Balara, M.: Pneumatický aktuátor s McKibbenovými umelými svalmi. *Automa*. roč. 10, 2004, č. 1, str. 6-8.
- [5] Petík, A., Balara, M., Balara, D.: The antagonistic system of artificial muscles. In: *Lucrarile sesiunii de comunicati stiintifice a universitatii „Petru Maior“*, pp. 177-181, 27-28 octombrie 2000, Targu-Mures, Romania.
- [6] Piteř, J., Balara, M.: Model aktuátora s pneumatickými umelými svalmi. In: *Proceedings of the 7th International Scientific - Technical Conference PROCESS CONTROL 2006*, pp. R140b-1-4, June 13. – 16, 2006, Kouty nad Desnou, Czech Republic.

VIRTUÁLNE PROJEKTOVANIE AUTOMATIZOVANÝCH VÝROBNÝCH SYSTÉMOV

Jaroslav ŠEMINSKÝ

Katedra automatizácie a riadenia, Park Komenského 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

Abstrakt: Projektanti výrobných strojov, zariadení a výrobných systémov, projektanti elektrotechnických systémov a riadiacich systémov a projektanti softvéru využívajú špecifické znalosti, komunikujú odlišným jazykom, prešli iným postupom vzdelávania a používajú odlišné nástroje. Na druhej strane projektujú spoločne jeden komplexný objekt. Jeho vznik nikdy nie je náhodný, ale je vytvorený cielene na splnenie dopredu zadaných požiadaviek. Riešenie problému takéhoto charakteru sa označuje ako integrovaný prístup. Postupy riešenia takého problému sa postupne vyvíjali, tak ako rástli technologického možnosti modelovania. Cieľom výskumu a vývoja v tejto oblasti by malo byť mimo iného aj hľadanie spoločnej systémovej platformy pre integrované virtuálne projektovanie komplexne automatizovaných výrobných systémov.

KLúčové slová: virtuálna realita, modelovanie, simulácia, Offline programovanie, virtuálne školenie

1. Úvod

Procesy projektovania výrobných systémov sa v súčasnej dobe menia a sú charakterizované týmito aspektmi [4-6]:

- stúpajúca komplexnosť,
- paralelnosť vývojových procesov,
- skracovanie doby projektovania,
- väčšie až internacionalizované vývojové tímy,
- vysoký stupeň počítačovej podpory navrhovania.

Pre tieto moderné technické objekty je charakteristické, že ich štruktúra je zložená z niekoľkých heterogénnych podsústav. Moderný výrobok obsahuje konštrukčné skupiny mechanické, elektrotechnické, elektronické, a riadiace (hardwarové a softwarové), ktoré ako celok vo svojom chovaní vykazujú väčší či menší stupeň umelej inteligencie. Toto chovanie je výsledkom synergického efektu spomínaných konštrukčných skupín. Funkčná a štruktúrna rôznorodosť konštrukčných skupín vyvoláva potrebu iného než mechanistického prístupu v riešení konštruktívneho problému. Pre tieto nové prístupy sa vžilo označenie ako mechatronický prístup [7].

2. Integrovaný prístup

Aplikáciou integrovaného prístupu v riešení mechatronických technických objektov za aké môžeme považovať komplexne automatizované výrobné systémy, dochádza k integrovanému riešeniu konštrukčných, výrobných a prevádzkových aspektov technického objektu – dochádza k vertikálnej integrácii riešenia. Komplexná integrácia pri návrhu technického objektu umožňuje dosahovať synergický efekt z predností mechatronickej konštrukcie a paralelného navrhovania. Mechatronický prístup pri návrhu technického objektu teda predstavuje komplexnú integráciu požiadaviek na všetky podstatné vlastnosti prvkov a väzieb vo všetkých štruktúralne funkčných subsystémoch technického objektu, ktoré zaisťujú jeho funkčnosť, spoľahlivosť, vyrobiteľnosť, prevádzkyschopnosť a to takým spôsobom, že aplikáciou paralelného a koordinovaného návrhu s využitím medziodborových znalostí a skúseností je dosiahnuté technické riešenie vysokej úrovne.

Keďže pre mechatronické objekty je charakteristický integrovaný, interaktívny a koordinovaný návrh prvkov a väzieb mechanických, elektrotechnických a počítačových subsystémov, toto si vyžaduje širšie uplatnenie modelovania a simulácie [8]. Tento prístup sa označuje ako virtuálne projektovanie. Úsilie integrovania geometrického modelovania a inžinierskych analýz vedú k novému konceptu – virtuálnemu navrhovaniu. Tento koncept poskytuje interaktívne možnosti procesu navrhovania a cyklu inžinierskych analýz. Uplatnenie virtuálnych technológií umožňuje projektantovi sa zahĺbiť do virtuálneho prostredia, budovať komponenty, upravovať komponenty, prevádzkovať zariadenia a vzájomne pôsobiť s virtuálnymi objektmi na vytvorenie dizajnerských činností.

Vzhľadom na rastúce potreby projektovania možno charakterizovať ciele na realizáciu virtuálneho pracovného prostredia minimálne takto [9]:

- design orientovaný na proces (Design for Manufacturing)
- integrácia členov tímu (Web-based Design),
- spoločná informačná báza (Concurrent Engineering)
- vizuálne komunikačné možnosti (Virtual Prototyping),
- vysoká produktivita a efektívna podpora pracovných procesov (PLM).

3. Záver

V súvislosti s projektovaním komplexných (mechatronických) technických systémov rastie dôležitosť poznania teórie projektovania z viacerých aspektov:

- rýchle zmeny na trhu a tým aj výrobných podmienok vedúce k systematickým inováciám výrobkov a výrobných systémov si vyžadujú adekvátne koncepty a nové inžinierske prístupy podporované príslušnou teoretickou základňou,
- nové technické systémy sa zakladajú na integrácii rôznych prvkov: mechanických, elektrických a elektronických, optických; v budúcnosti možno bionických), čo prináša novú kvalitu ale aj nové problémy v projektovaní integrovaných systémov, [14-16]
- počítačová podpora projektovania výrobkov s prepojením na počítačom podporovanú prípravu výroby a jej počítačové riadenie sa stali štandardom modernej výroby. Vytvorenie systémov pre počítačovú podporu počas celého životného cyklu výrobku si tiež vyžaduje adekvátnu teoretickú bázu projektovania. [10-13]

Pozn.: Príspevok bol vypracovaný s grantovou podporou projektu VEGA 1/3145/06 Riešenie konštruktívneho problému – klasický verzus evolučný prístup.

Literatúra

- [1] KUSIAK, A.: Intelligent Manufacturing Systems, Prentice Hall, New Jersey 1990
- [2] WARNECKE, H. J.: Die Fraktale Fabrik. Springer Verlag, 1992
- [3] Košturiak, Ján a kol.: Projektovanie výrobných systémov pre 21. storočie. 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2000. - 397 s., ISBN 80-7100-675-0
- [4] Kuric, I. - Košturiak, J. - Janáč, A.- Peterka, J.: Počítačom podporované systémy v strojárstve. Žilinská univerzita/ EDIS Vydavateľstvo ŽU, Žilina, 2002, ISBN 80-7100-948-2
- [5] GREGOR, M – KOŠTURIK, J – HALUŠKOVÁ, M: Priemyslové inžinierstvo. 1.vyd. Žilina: BLAHA, 1997. 166s. ISBN 80-966996-8-7
- [6] Jurišica, L.: Aplikovaná robotika, skriptá, ES SVŠT Bratislava, 1988
- [7] Isermann, R.: Mechatronic systems :fundamental. London : Springer, 2005, 624 s, ISBN 1-85233-930-6
- [8] JANÍČEK, P – ONDRÁČEK, E: Řešení problému modelováním, Téměř nic o téměř všem. 1.vyd. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1998. 335s. ISBN 80-214-1233-X
- [9] ŠEMINSKÝ, J.: Informačný manažment ako nástroj výrobných manažérov v strojárstve, STROJÁRSTVO v hospodárstve a priemysle. Roč. IV.,č.5/2000, s. 121-123, ISSN 1335-2938
- [10] Cosimir#174; Professional Manual:[cit:12-3-2007]
- [11] Program Cosimir#174; Profesional Help: [cit:12-3-2007]
- [12] Cosimir#174;: [cit:12-3-2007] Dostupné na internete: <http://www.cosimir.com/>
- [13] Festo Didactic: [cit:12-3-2007] Dostupné na internete: <http://www.festo-didactic.com>
- [14] KATALINIC, B. 2002. Bionické montážne systémy: Sebaorganizujúci komplexný pružný montážny system. Acta Mechanica Slovaca. Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Košice. 2/2002 ISSN 1335-2393
- [15] UEDA, K.: Emergent synthesis based approaches to complexity and uncertainty. 3rd International Workshop on Emergent Synthesis – IWES'01, March, 12 – 13, 2001, Bled, Slovenia, p.25-30, ISBN 961-6238-49-3
- [16] PEKLENIK, J.: Complexity and Emergent Properties of the Work systems in Manufacturing. 3rd International Workshop on Emergent Synthesis – IWES'01, March, 12 – 13, 2001, Bled, Slovenia, p.9-23, ISBN 961-6238-49-3

PŘÍSPĚVKY

SEKEL 2007

ZKUŠENOSTI ZE ZAVÁDĚNÍ ELEKTRONICKÝCH TESTŮ VE VÝUCE DENNÍ A KOMBINOVÉ FORMY STUDIA V PŘEDMĚTECH ELEKTROTECHNIKA I. A ELEKTROTECHNIKA II

Jan Dudek

Katedra obecné elektrotechniky, FEI, VŠB-TU Ostrava, Tř. 17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava, Česká republika
jan.dudek@vsb.cz

***Abstrakt:** Příspěvek se zabývá zkušenostmi s tvorbou a využitím testů v elektronické podobě cílenými pro zkoušení a komplexní ověření znalostí obecně zejména velkých objemů studentů. Jsou zde rozbrány rovněž praktické zkušenosti z nasazení těchto testů u studentů denní i kombinované formy. Je zde zmíněn e-learning včetně subjektivních postřehů autora ke zmíněné problematice.*

***Klíčová slova:** e-learning, elektronické testy*

1. Úvod

Katedra 452 zajišťuje výuku elektrotechnických předmětů na technických neelektrotechnických fakultách Vysoké školy báňské. Pro fakultu strojní zajišťuje výuku 4 předmětů, dvou ve třetím ročníku bakalářského studia a povinných pro všechny obory FS, dvou v prvním ročníku navazujícího magisterského studia. Předměty vyučované na fakultě strojní v bakalářském studiu jsou Elektrotechnika I. (ukončení klasifikovaný zápočet) a Elektrotechnika II. (ukončení kombinovaná zkouška). Typicky je v ročníku přibližně 250 posluchačů zapsaných na denním studiu a 120 posluchačů kombinované formy.

Původně byla myšlenka implementovat elektronicky vyhotovené testy v předmětu Elektrotechnika I. Za účelem unifikace závěrečných testů pro udělení klasifikovaného zápočtu, kde do té doby byly testy (rozumí se jejich rozsah a obsah) zcela v kompetenci vedoucích cvičení. Po úspěšném odzkoušení v zimním semestru akademického roku 2006/2007 bylo rozhodnuto implementovat tyto testy rovněž v předmětu Elektrotechnika II, jako součást obecného přehledu učiva při písemné části zkoušky.

2. E-learning, testy, vymezení pojmů

Poslední dobou se hodně hovoří o termínu e-learning. Tento pojem znamená tvorbu komplexních výukových podkladů, tj. testů, učebních textů, multimediálních sekvencí, obrázků a simulací v elektronické podobě. Obecně toto lze takto chápat, ovšem není možné označit jakýkoliv dokument v elektronické podobě za e-learningový materiál. Tak ani zde vytvořené testy nejsou ve své podstatě e-learningovým komplexním materiálem, nýbrž pouze jeho možným dílčím celkem.

Obecně se na texty a dokumentaci e-learningu kladou zvláštní požadavky plynoucí z odlišného pojetí výuky v distančním studiu, pro něž jsou tyto materiály primárně tvořeny. Hlavní odlišnosti odlišného pojetí se dají shrnout následně:

- Student nestuduje prezenčně, nechodí na přednášky, nemá zpětnou vazbu na přednášejícího. Proto veškeré materiály musí být zpracovány tak, aby student byl schopen vzdělávání a pochopení učiva bez nutnosti konzultací.
- Materiály jsou děleny tématicky a vizuálně do menších celků, s ohledem na zobrazení na obrazovce osobního počítače (nikoliv optimalizovány pro tisk na formát A4).
- Protože se student učí doma s využitím výpočetní techniky, jsou materiály plné hypertextových odkazů na další prameny, odkazy od tématu, resp. odkazy k hlubší nebo objasňující tématice. Výuka tedy připomíná v mnohém surfování na internetu.
- Je nutné neustále kontrolovat tzv. zpětnou vazbu a prověřovat úroveň pochopení učiva pomocí otázek průběžně v testu, zde je ovšem nutné volit otázky tak, aby odpověď nešla jednoduše dohledat v textu, ale aby byla důsledkem logických úvah pramenících z přečteného a pochopeného učiva.

- Tato zpětná vazba by měla po větších celcích být doplněna o větší test na konci každého tematického celku.
- Pravidelné setkání distančních studentů s kantorem tzv. tutoriál by měl být diskuzí nad studenty již nastudovanými tématy a případně by zde měl být dán prostor objasnit, popř. hlouběji nad rámec učiva rozvést danou problematiku
- Při tvorbě plnohodnotných e-learningových materiálů je nutné postupovat komplexně systémem svrchu dolů tj. od vymezení didaktických cílů a profilu absolventa, přes definici způsobu jejich dosažení po implementaci dílčích celků, aby byla zachována konzistentnost celků, včetně vymezení cílů a způsobů dosažení a předpokládané doby studia.

Tímto jsem chtěl naznačit, že význam slova e-learning je poněkud širší, než pouhé zveřejnění materiálů v elektronické formě pro zobrazení v osobním počítači uživatele, ale znamená zcela jiné pojetí sestavování výukových materiálů včetně mechanismů zpětné vazby, umožňující prověřit úroveň zvládnutí učiva.

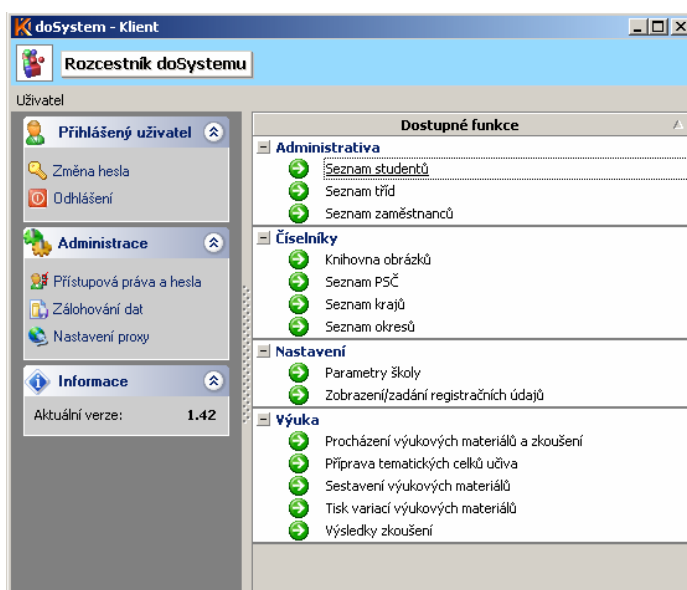
3. Volba vhodného softwaru, požadavky na jeho funkce

Pro účely sestavení testů, jejich modifikací a generování variací existuje mnoho softwarových produktů. Většina z nich obsahuje komplexní služby využitelné pro tvorbu testů a e-learning. Jmenujme například MsClass Server od společnosti Microsoft, iTutor tuzemské firmy Kontis, s.r.o, nebo systém Moodle.

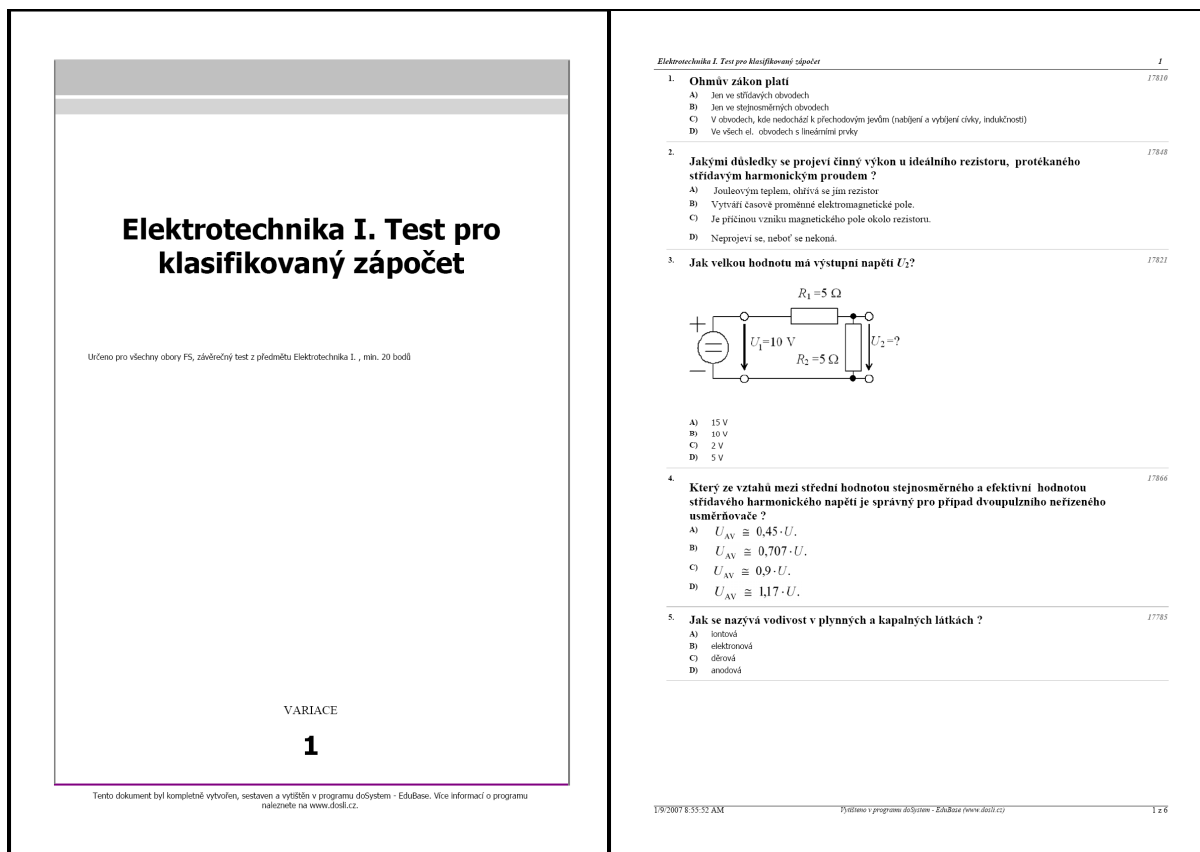
Pro potřeby tvorby testů jsme zvolili software firmy Dosli, s názvem EduBase. Důvodem byla jednoduchost ovládání a pozitivní zkušenosti z předchozího používání pro malé skupinky studentů. Není účelem příspěvku rozebírat konkrétní vlastnosti editorů a funkcí, snad jen pro vymezení si řekněme obecné rysy softwaru pro tvorbu e-learningových podkladů.

Programy by měly mít možnost tvorby výukových materiálů tj. textů a testů se snadnou editací, možností vkládáním objektů jako obrázek (formáty *gif, jpg, png*), rovnice z editoru rovnic a textu přes schránku. Mnohé ze softwarů umožňují rovněž tvorbu e-learningových textů. Formáty těchto dat jsou v zásadě buď čistě proprietární (EduBase) nebo se jedná o *xml* soubory dle specifikací SCORM (Sharable Content Object Reference Model). Existují převaděče z formátu *doc, ppt a html* resp. *xhtml* právě na zmíněné *xml* soubory zpravidla však vyžadují korekce. Pro naše účely byly testy tvořeny nově, tedy přímo do proprietárního formátu EduBase (který bohužel zmíněnou vlastnost importu jiných formátů postrádá).

U testů je nutné mít možnost vygenerovat náhodné variace testů z různých tematických celků a podcelků včetně vyhodnocovacích tabulek v tisknutelném formátu. Zde si je nutné uvědomit, že ne všechny druhy otázek (např. otevřené, doplňovací atd.) jsou vhodné pro tisk a pro hromadnou opravu šablonami, proto je vhodné si ujasnit, zda budou studenti vykonávat testy na osobním počítači, popř. v malých skupinách nebo jako větší skupiny „papírově“. Je rovněž výhodné mít možnost vygenerovat variace všech otázek skupin a podskupin popř. všech otázek a správných odpovědí pro kontrolu konzistentnosti a správnosti.



Obr.1: Programové prostředí EduBase



Obr. 2: Náhled vygenerované variace testu EduBase

Mnohé z těchto softwarů vyžadují pro výuku formou e-learningu trvalé připojení k internetu a alespoň průměrnou znalost obsluhy PC, což může být problém. Výhodou snad může být fakt, že software si hlídá studium každého jedince monitoringem času stráveného u osobního počítače a úrovní zvládnutí předložených testů. Na druhou stranu to zcela jednoznačně vede k nemožnosti individuální volby způsobu učení (skripta/ e-learningové podklady/ technické listy resp. populárně vědecká literatura) a prostředí (student je vázán osobním počítačem s připojením na internet) a do značné míry tak popírá individualitu každého jedince na úkor přísné unifikace.

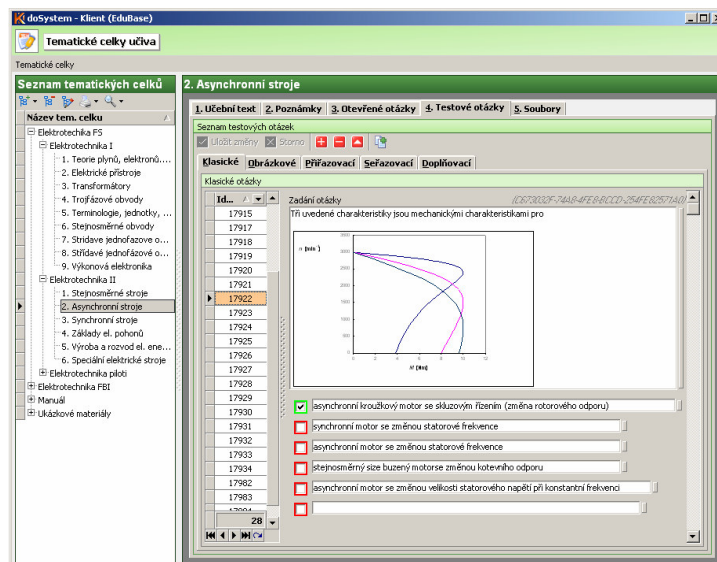
4. Implementace testů

Přestože testům byla věnována patřičná pozornost, jejich vypracování bylo s dostatečnou časovou rezervou a promyšlené vyskytly se při realizaci dva problémy, které stojí za zmínku.

Jako zkušební skupinu pro implementaci testů jsem použil studenty kombinované formy, na kterých vzhledem k malému počtu a časněji udělovanému zápočtu šlo odladit testy. Přestože byly testy recenzovány a korigovány dvěma dalšími kolegy, byly zde formální nedostatky způsobené odlišným pochopením otázky lektorem a studentem, což se často při hromadných opravách neprojevilo. Je vhodné tedy první sady testů opravovat za přítomnosti studentů, kteří mohou poukázat na výše uvedené formální nedostatky.

Druhý aspekt spočívá v chybném začlenění a pojetí testů. Tento negativní element se projevil až v průběhu letního semestru při ústních zkouškách z předmětu Elektrotechnika II. Pro účely zkvalitnění výuky a ve snaze poskytnout studentům tématické opory jsme seznam otázek s možnostmi odpovědí (bez vyznačení správné odpovědi) uveřejnili na web. Tento krok jsme chápali jako jednoznačné vyčlenění rámce učiva, které by studenti měli zvládnout, s uvažováním, že podle otázek na něž neznají odpověď si před zkouškou zopakují příslušné pasáže.

Tento pedagogický krok, avšak, zcela ztroskotal na vypočítavosti studentů. Tito (až na výjimky) obešli krok studia příslušných pramenů a věnovali se pouze testovým otázkám. Tímto si asociovali, že např. k otázce s obrázkem uvedeným výše (Obr. 3 – jsou zde mechanické charakteristiky asynchronního motoru s proměnným rotorovým odporem) patří odpověď „asynchronní kroužkový motor se skluzovým řízením“, zcela bez pochopení souvislostí, tedy zdůvodněním tohoto jevu.



Obr. 3: Tvorba testových otázek

Náprava tohoto kroku existuje buď v neuvěřejnění otázek pro test, čímž se studenti budou muset naučit příslušné učivo, protože neví, jaké otázky dostanou, toto ovšem znemožní použití těchto veřejných otázek jako učební opora nebo v uveřejnění otázek bez možností odpovědí a doplněním otázek o otázky otevřené - formulované slovy „zdůvodněte, objasněte, popište“. Druhý zmíněný krok odstraňuje mechaničnost učení se otázek, avšak prodlužuje dobu opravy testů.

Přes výše uvedené nedostatky jsou dojmy z testů, jak na straně studentů, tak na straně lektorů pozitivní, jedná se o jednoznačně objektivnější formu, než když podmínky byly v kompetenci cvičících, kde jsou dané podmínky a při udělování klasifikovaných zápočtů, popř. u zkoušky se jednoznačně zrychlilo a zefektivnilo opravování těchto testů.

5. Výhledy

Výhody těchto testů pro studenty denní i kombinované formy povedou k nasazení těchto testů i do jiných předmětů. Rovněž poněkud kontroverzní krok zveřejnění testových otázek asi zůstane i nadále, byť s výše uvedenými korekcemi, protože jej lze chápat jako jednoznačné vymezení požadavků na studenty.

Ačkoliv systém umožňuje nasazení testů v čistě elektronické podobě, tj. na osobním počítači s mnoha vylepšeními a zcela automatizovanými opravami, vymezeným časovým limitem a efektněji zpracovanými otázkami, je vzhledem k nutnosti mít k dispozici pro zkoušku počítačovou učebnu, neaktuální jeho nasazení na osobních počítačích.

Tvorba e-learningových aplikací je prozatím ve fázi příprav a seznamování se s problematikou, je však už dnes jisté, že zde bude hrát především roli otevřený formát dat (*html*, nebo *xml* dle specifikací SCORM). Za poněkud diskutabilní považuji osobně nasazení e-learningového softwaru na serverech hlídajících si plnění úkolu studentem, z důvodů výše uvedených, je však zcela jisté, že pro plnohodnotný e-learningový systém nebude dostačující jednoduše zveřejnit skripta či syllaby na internetu, ale zvládnout zcela novou koncepci tvorby, kde ideálně by student měl mít možnost přecházet mezi klasickými a e-learningovými formami dle chuti a dispozic. Právě k tomuto účelu by měly sloužit průběžné dílčí a závěrečné testy, jež jsou schopny definovat požadovanou úroveň pochopení a zvládnutí učiva.

Přestože systém učení bez učitele se jeví jako výhodný, je nutné si uvědomit, že pro výuku technických předmětů (a zejména abstraktních, za něž lze považovat Elektrotechniku) může mít jeho špatná implementace negativní dopad. Studenti a někteří lektori totiž nabývají dle mého soudu dojmu, že existuje pověstný trychtýř, který bude chopen studentovi bez časové a mentální zátěže umožnit získat potřebné znalosti. Je nakonec přece úplně jedno vezmu-li si do ruky populární vědeckou literaturu, kvalitní skripta nebo zmíněný e-learningový text, abych získal potřebné znalosti.

Literatura

- [1] Průcha, J.: Jak psát učební texty pro distanční studium, VŠB-TU Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0281-3
- [2] Internet, <http://www.net-university.cz/standardy.php>, www.moodle.cz, www.kontis.cz

ŠUMOVÁ ANALÝZA OPERAČNÍHO ZESILOVAČE

Iva DVOŘÁKOVÁ

Katedra optiky, PřF Univerzity Palackého Olomouc, 17.listopadu 50, 772 00 Olomouc, Česká republika
dvorakova@optics.upol.cz

Abstrakt: V článku je ukázána možnost určení výstupního šumu v obvodu s operačním zesilovačem. Využívá se šumový model operačního zesilovače a jeho parametry známé z katalogového listu. Cílem je stanovit mezivrcholovou hodnotu šumového napětí na výstupu operačního zesilovače, která může být orientační hodnotou určovanou např. před šumovou analýzou pomocí simulačního programu.

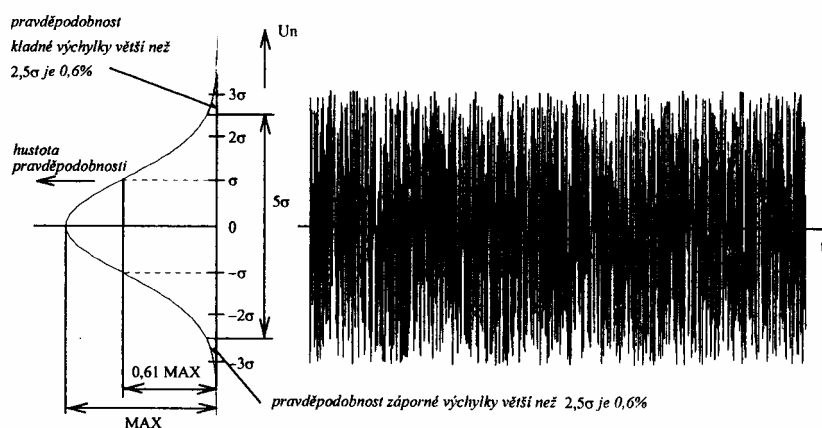
Klíčová slova, napěťový šum, spektrální hustota, šumový model

1. Úvod

Při modelování a simulacích přenosu malých signálů se obvykle v rámci analýzy také zjišťují šumové poměry v daném obvodu. Pro určení vlivu šumů na tyto přenosy se využívá šumová analýza (*Noise analysis*), která bývá součástí všech standardních simulačních programů. Všechny součástky však nemusí být vybaveny svými šumovými modely, máme-li např. k dispozici pouze omezenou verzi (demoverzi) programu. Proto je vhodné si provést orientační výpočet možného šumu pro určitou součástku, pokud o ní najdeme potřebné informace v katalogovém listu. V tomto příspěvku bude ukázán jednoduchý postup, jak využít katalogové veličiny pro určení šumu na výstupu operačního zesilovače výpočtem.

2. Základní pojmy

Rušivá napětí a rušivé proudy představují zásadní problém při zpracování malých signálů. Užitečné signály mohou být srovnatelné, proto se musí volit operační zesilovač i podle šumových vlastností. Šumy se nazývají spektrální složky rušivých napětí s frekvencí nad 0.01 Hz [1]. Mění se náhodně v čase, ale jejich statistické vlastnosti jsou stálé. Šumová napětí a proudy jsou zpravidla nezávislé. Takové signály lze popsat buď jejich časovými průběhy, nebo tzv. spektrálními hustotami. Časové průběhy se mění náhodně v čase a lze je zpracovávat pomocí statistiky. Záznam časového průběhu šumového signálu a jeho pravděpodobnostního rozdělení je na obr.1.



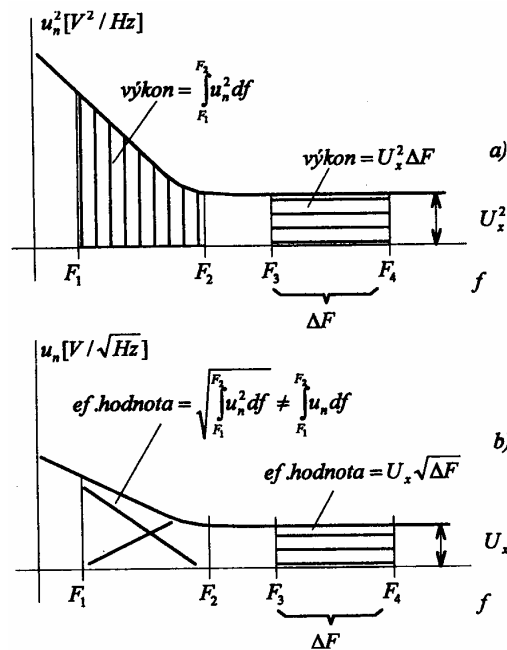
Obr.1 : Typický časový záznam šumu a hustota pravděpodobnosti jeho výskytu [1]

Šumové vlastnosti elektronických prvků lze modelovat pomocí náhradních šumových zdrojů napětí a proudů. Jejich velikosti se vyjadřují buď bod po bodu spektrální hustotou, nebo v zadaném kmitočtovém pásmu odpovídající efektivní hodnotou šumového napětí U_n a šumového proudu I_n . Spektrální hustota je důležitou charakteristikou šumu, je obvykle udávána v katalogu. Vzájemné souvislosti těchto veličin budou nyní popsány. Při šumové analýze můžeme vyjít z analýzy výkonu šumu, který lze určit na základě znalosti rozložení tohoto výkonu ve spektru.

Výkon šumu, soustředěný v daném pásmu kmitočtů, je dán plochou, kterou nad tímto pásmem ohraničuje křivka spektrální hustoty šumového výkonu. Výkonová spektrální hustota má tedy význam středního výkonu šumu v jednotkové šířce frekvenčního pásma a udává se ve V^2/Hz nebo A^2/Hz . V praxi se však častěji pracuje se spektrálními hustotami šumového napětí u_n , případně šumového proudu i_n , které jsou odmocninou ze spektrální hustoty výkonu šumu a mají odpovídající rozměry V/\sqrt{Hz} a A/\sqrt{Hz} . Typické křivky spektrálních hustot pro polovodičové prvky jsou na obr.2. Jedná se o spektrální hustotu výkonu a průběh spektrální hustoty napětí. V katalogu součástek jsou nejčastěji uváděny průběhy spektrální hustoty napětí, resp. proudu v závislosti na kmitočtu, protože jsou v čase relativně stálé a dobře měřitelné. Pomocí nich lze potom určit efektivní hodnoty ve sledovaném frekvenčním pásmu integrací dle vztahů

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\int_{F_1}^{F_2} u_n^2 df} \quad I_{\text{ef}} = \sqrt{\int_{F_1}^{F_2} i_n^2 df} \quad (1)$$

Z obr.2 jsou také dobře patrné vztahy mezi jednotlivými veličinami.



Obr.2 : Průběh křivky spektrální hustoty a) výkonu b) šumového napětí polovodičového prvku, [1]

Podle typu polovodičové součástky se na nízkých kmitočtech (asi do 1 Hz až 1 kHz) uplatňuje blikavý šum a další šумы, které mají charakter $1/f$. Jejich výkon s rostoucím kmitočtem zaniká. V navazujícím kmitočtovém pásmu se pak uplatňuje tepelný a výstřelový šum, který je zhruba konstantní a nazývá se bílý šum.

Známe-li efektivní hodnotu šumu, můžeme ve většině případů dosti přesně odhadnout jeho mezivrcholovou hodnotu, označovanou v katalogích obvykle jako p-p. Většina šumů má totiž Gaussovo normální rozložení okamžitých hodnot a pro ně ze statistiky platí, že mezivrcholovou hodnotu lze odhadnout jako 5 až 6-ti násobek efektivní hodnoty (obr.1). Pravděpodobnost, že šumový signál nebude větší než $\pm 2,5 \sigma$, neboli, že mezivrcholová hodnota šumu nepřesáhne oblast 5σ , je asi 1,2 %, pro hodnotu 6σ to vychází jen 0,27 %. Směrodatná odchylka σ je zároveň i efektivní hodnota šumu [1].

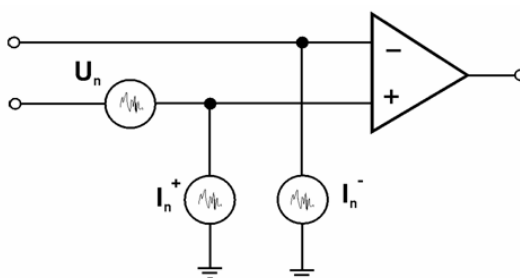
Rezistory obvodu jsou obvykle zdrojem tepelného šumu (Johnsonův, bílý šum). Tento šum působí v širokém pásmu frekvencí a jeho spektrální hustota u_t resp. efektivní hodnota U_t se určí pomocí vztahů

$$u_t = \sqrt{4kTR} \quad [V/\sqrt{Hz}] \quad U_t = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad [V] \quad (2)$$

kde k je Boltzmanova konstanta, T je teplota rezistoru [K], R je odpor rezistoru [Ω], Δf je šířka frekvenčního pásma

3. Šumový model operačního zesilovače

Šumové vlastnosti operačního zesilovače se vyjadřují obvykle jeho standardním šumovým modelem pomocí tří náhradních šumových zdrojů, dvou proudových a jednoho napěťového [4]. Jsou připojeny na vstupy operačního zesilovače, obr.3.



Obr.3 : Šumový model operačního zesilovače

Proudové zdroje I_n^+ , I_n^- jsou nekorelované. Zdroje jsou definované buď efektivními hodnotami šumového napětí U_n a šumového proudu I_n , nebo spektrálními hustotami napětí u_n a proudu i_n . Vlastní operační zesilovač je považován za bezšumový. Všechny tři uvedené zdroje šumu na vstupu zesilovače lze nahradit jedním náhradním šumovým zdrojem napětí, jak bude uvedeno dále.

4. Základní vztahy pro určování šumu

Naším cílem při analýze šumu v obvodu s operačním zesilovačem bude určit mezivrcholovou hodnotu výstupního šumu na základě známých parametrů odečtených z katalogového listu konkrétní součástky. Výsledný šum na výstupu operačního zesilovače je podmíněn zapojením. Následující příklad se bude týkat obvodu jednoduchého neinvertujícího zesilovače. Je potřeba stanovit odpovídající hodnoty zdrojů šumového modelu operačního zesilovače použitím křivek spektrální hustoty použité součástky.

Jak vyplývá z obr.2, integrováním křivky výkonu spektrální hustoty výkonu a převedením přes odmocninu výsledku dostaneme hledané efektivní hodnoty jednotlivých zdrojů. Šumy jsou však frekvenčně závislé a proto se musí vždy definovat pásmo, ve kterém byly zjišťovány. Reálný přenos však nikdy nemá ideální (pravoúhlý) průběh dolní propusti. Proto je třeba přepočítat šířku pásma pravoúhlého filtru na jeho ekvivalentní šumovou šířku pásma [3]. Ta odpovídá oblasti, ve které se přenesou stejná energie šumu, jakou by propustil ideální filtr. Určíme ji dle vztahu

$$f_{Hn} = f_H K_n \quad (3)$$

kde K_n je faktor závislý na řádu filtru
 f_H je horní frekvence při poklesu přenosu o 3 dB
 f_{Hn} je šumová šířka pásma

Hodnoty faktoru K_n jsou uvedeny např. v [3]. Pro filtr prvního řádu je $K_n = 1.57$ a odpovídá přenosu se sklonem - 6 dB/okt. Pro vyšší řády jeho hodnota klesá.

Křivka spektrální hustoty obsahuje dvě oblasti - širokopásmovou oblast dolnofrekvenčního filtru a oblast šumu 1/f. Každá z nich přispěje svojí složkou do šumového zdroje, jak bude uvedeno dále [4].

Příspěvek širokopásmové oblasti.

Když máme určenou hodnotu šířky pásma pro pravoúhlý ekvivalent, je snadné integrovat výkonové spektrum. Integrace šířky pásma s dolnofrekvenčním filtrem, který je v podstatě konstantní hodnotou, představuje plochu obdélníku pod křivkou výkonového spektra. Tuto hodnotu, která je zároveň kvadrátem napěťového spektra, převedeme pomocí odmocniny na efektivní hodnotu napětí U_{nx} dle vztahu

$$U_{nx} = \sqrt{u_n^2 f_H K_n} = u_n \sqrt{f_H K_n} \quad (4)$$

Príspevek v nízkofrekvenční oblasti 1/f.

Nejprve si určíme tzv. normovanou hodnotu šumové hustoty napětí [4]. Pro zvolenou frekvenci f z oblasti $1/f$ odečteme odpovídající spektrální hustotu napětí u_{nf} a dosadíme do vztahu

$$u_{no} = u_{nf} \sqrt{f} \quad (5)$$

Hodnotu u_{no} lze rovněž jednoduše získat odečtením z grafu spektrální hustoty pro frekvenci 1 Hz.

Efektivní hodnota šumového napětí pak bude

$$U_{nf} = u_{no} \sqrt{\ln(f_H / f_L)} \quad (6)$$

kde f_H je signálová mezní frekvence

f_L je dolní frekvence (používaná hodnota je 0.1 Hz)

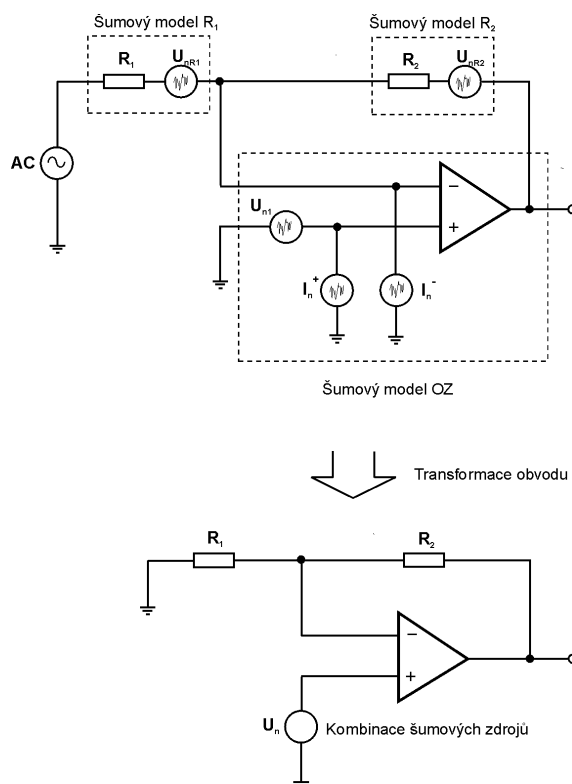
Sloučíme příspěvky šumových napětí od obou oblastí podle pravidla pro nekorelované zdroje (statisticky nezávislé). Celková hodnota efektivního napětí šumového zdroje na vstupu operačního zesilovače bude

$$U_{nv} = \sqrt{U_{nt}^2 + U_{nf}^2} \quad (7)$$

Může se zdát, že výpočet bude zatížen chybou tím, že příspěvek šumu od oblasti $1/f$ zasahuje do širokopásmového příspěvku. Je třeba si uvědomit, že grafy spektrálních hustot jsou znázorněny s logaritmickou stupnicí, takže oblast $1/f$ má malý vliv v oblasti, kde poklesne pod hodnotu širokopásmového spektra. Pouze oblast frekvence f_{CE} (přechodná oblast, kde se lomí křivka spektrální hustoty napětí) je poznamenána obojím šumem. Aproximace v přechodné oblasti pomocí (4) je vhodná v případě dostatečného odstupu $f_H \gg f_{CE}$, jak je ukázáno v [2].

5. Výpočet šumu v reálném obvodu

Výsledný šum na výstupu operačního zesilovače je podmíněn zapojením, pro které výpočet provádíme. V této části si ukážeme, jak použít šumový model k určení totálního šumu na výstupu jednoduchého neinvertujícího zesilovače. Šumový model celého obvodu a jeho zjednodušení pro další výpočet je na obr.4.



Obr.4 : Obvod s kombinovanými šumovými zdroji a jeho transformace

Totální šum vztažený ke vstupu operačního zesilovače bude obsahovat šum napěťového zdroje, šum proudového zdroje a šum rezistorů. Signály jednotlivých zdrojů lze považovat za nekorelované. Převědeme je na jeden šumový zdroj a vynásobíme šumovým ziskem. Dostaneme tak šumovou odezvu na výstupu operačního zesilovače. Šumový zisk je zisk, který se určuje ze strany výstupu operačního zesilovače vzhledem k totálnímu vstupnímu šumu. Poznamenejme, že nemusí být totožný se signálovým ziskem. Veškeré příspěvky, týkající se šumu, budeme vztahovat k neinvertujícímu vstupu operačního zesilovače, dle šumového modelu. Pro zapojení na obr.4 bude šumový zisk G_n vztažený k šumovému zdroji U_n a je daný vztahem

$$G_n = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (8)$$

V předchozí kapitole jsme ukázali, jak určit hodnotu napěťového šumového zdroje U_{nv} . Nyní se zaměříme na proudové šumové zdroje. V našem jednoduchém obvodu převedeme proudové zdroje na napěťové zdroje pomocí ekvivalentního rezistoru R_{ekv} dle vztahů

$$U_{ni} = i_n R_{ekv} \quad R_{ekv} = R_1 // R_2 \quad \text{platí pro dané zapojení [4]} \quad (9)$$

Dále je třeba vzít do úvahy tepelný napěťový šum na rezistorech v obvodu operačního zesilovače. Protože napěťové zdroje mohou být analyzovány nezávisle, pomocí superpozice, lze využít i zde ekvivalentní odpor a tepelný napěťový šum vyjádřit dle vztahu

$$U_{nr} = \sqrt{4kTR_{ekv} \Delta f} \quad (10)$$

Dalším krokem k výpočtu šumu je kombinace všech těchto zdrojů šumu na vstupu zesilovače U_{min} a jeho vynásobení šumovým ziskem, abychom získali efektivní hodnotu výstupního šumu U_{nout}

$$U_{min} = \sqrt{U_{nv}^2 + U_{ni}^2 + U_{nr}^2} \quad (11)$$

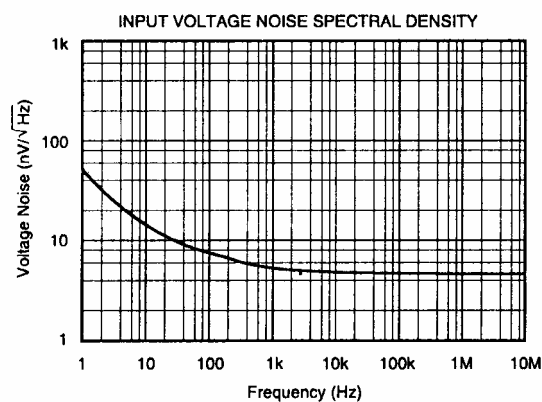
$$U_{nout} = U_{min} \cdot G_n \quad (12)$$

Efektivní hodnotu výstupního napěťového šumu pak použijeme k odhadu mezivrcholové hodnoty šumového napětí. Pokud ji vynásobíme např. 5 x, potom dle statistiky v pásmu $\pm 2.5 \sigma$ je pravděpodobnost výskytu šumu většího než určená mezivrcholová hodnota 1.2 %

$$U_{nout-pp} = 5 \cdot U_{nout} \quad \text{pro } \pm 2.5 \sigma \quad (13)$$

Konkrétní výpočet pro reálný obvod:

Vezmeme do úvahy zapojení na obr.4 s operačním zesilovačem TI OPA627. Cílem je zjistit mezivrcholovou (p-p) hodnotu šumu na výstupu zesilovače. K výpočtu potřebujeme parametry, které poskytuje katalogový list zesilovače TI OPA627. Použijeme frekvenční závislost spektrální hustoty napětí uvedenou na obr.5.



Obr.5 : Frekvenční závislost spektrální hustoty napětí

Dále potřebujeme k výpočtu určité parametry uvedené v tabulce Tab.1.

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, and $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	OPA627BM, BP, SM OPA637BM, BP, SM			OPA627AM, AP, AU OPA637AM, AP, AU			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
NOISE								
Input Voltage Noise								
Noise Density: $f = 10\text{Hz}$			15	40		20		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 100\text{Hz}$			8	20		10		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			5.2	8		5.6		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 10\text{kHz}$			4.5	6		4.8		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Voltage Noise, BW = 0.1Hz to 10Hz			0.6	1.6		0.8		$\mu\text{Vp-p}$
Input Bias Current Noise								
Noise Density, $f = 100\text{Hz}$			1.6	2.5		2.5		$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Current Noise, BW = 0.1Hz to 10Hz			30	60		48		fA-p
Gain-Bandwidth Product: OPA627	G = 1		16			*		MHz
OPA637	G = 10		80			*		MHz

Tab.1 : Základní parametry z katalogového listu pro OPA627

Prvním krokem je určit šumový zisk a šumovou šířku pásma pro daný obvod

$$G_n = \frac{R_2}{R_1} + 1 = \frac{100\text{k}}{1\text{k}} = 101$$

Z katalogového listu (Tab.1) zjistíme parametr GBP pro OPA627, abychom určili horní mezní frekvenci f_H pro uzavřenou smyčku zpětné vazby, GBP = 16 MHz

$$f_H = \frac{GBP}{G_n} = \frac{16\text{MHz}}{101} = 158\text{kHz}$$

Šumová šířka pásma

$$f_{Hn} = f_H \cdot K_n = 158\text{kHz} \cdot 1.57 = 248\text{kHz}$$

Dále budeme určovat jednotlivé příspěvky zdrojů šumu (napětového, proudového a tepelného) vztahené na vstup zesilovače.

▪ **Příspěvek napětového šumu.**

a) složka širokopásmového šumu

Z grafu katalogového listu na obr.5 odečteme hodnotu spektrální hustoty napětí v oblasti, kde je téměř konstantní, např. pro $f = 100\text{kHz}$, $u_n = 5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Efektivní hodnota šumového napětí bude

$$U_{nx} = u_n \sqrt{f_H K_n} = u_n \sqrt{f_{Hn}} = (5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{248\text{kHz}} = 2490\text{ nV}$$

b) složka šumu $1/f$

Normovanou hodnotu šumového napětí odečteme z grafu na obr.5 pro frekvenci 1 Hz, nebo určíme výpočtem dle vztahu (5), $u_{no} = 50\text{ nV} \cdot \sqrt{1\text{Hz}}$ [nV]. Potom efektivní hodnota šumového zdroje bude

$$U_{nf} = u_{no} \sqrt{\ln(f_H / f_L)} = (50\text{ nV}) \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{248\text{kHz}}{0.1\text{Hz}}\right)} = 191.8\text{ nV}$$

Pozn. Při výpočtu jsme použili místo horní mezní frekvence šumovou šířku pásma a typickou hodnotu $f_L = 0.1\text{ Hz}$.

Celková efektivní hodnota napětového šumu na vstupu zesilovače bude

$$U_{nv} = \sqrt{U_{nx}^2 + U_{nf}^2} = \sqrt{(2490\text{ nV})^2 + (191.8\text{ nV})^2} = 2497.4\text{ nV}$$

▪ **Příspěvek proudového šumu**

Také v případě proudového šumu musíme počítat se šumovou šířkou pásma. Bude stejná jako pro napěťový šum $f_{Hn} = 248 \text{ kHz}$.

a) složka širokopásmového šumu

Proudovou spektrální hustotu bílého šumu určíme z katalogového listu (Tab.1), $i_n = 2.5 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Efektivní hodnota šumového proudu bude určena obdobně jako u napětí

$$I_{nx} = i_n \sqrt{f_{Hn}} = \left(2.5 \frac{\text{fA}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right) \sqrt{248 \text{ kHz}} = 1.244 \text{ pA}$$

b) složka šumu $1/f$

Tato proudová složka se zde neuplatní, protože operační zesilovač má na vstupu tranzistory J-FET.

Ekvivalentní odpor R_{ekv} použijeme pro převod proudového zdroje na napěťový

$$R_{ekv} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0.99 \text{ k}\Omega$$

Odpovídající ekvivalentní efektivní hodnota proudového příspěvku vztaženého na vstup zesilovače bude

$$U_{ni} = I_{nx} R_{ekv} = 1.244 \text{ pA} \cdot 0.99 \text{ k}\Omega = 1.23 \text{ nV}$$

▪ **Příspěvek tepelného šumu**

Tepelný šum budeme vztahovat na už určený ekvivalentní odpor našeho obvodu R_{ekv} . Jeho působení ohraničíme šířkou šumového pásma $f_{Hn} = 248 \text{ kHz} = \Delta f$.

Efektivní hodnota zdroje tepelného šumového napětí

$$U_{nr} = \sqrt{4kT R_{ekv} \Delta f} = \sqrt{4(1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}) \cdot (300 \text{ K}) \cdot (0.99 \text{ k}\Omega) \cdot (248 \text{ kHz})} = 2010 \text{ nV}$$

Celková efektivní hodnota šumového napětí na vstupu zesilovače

$$U_{nin} = \sqrt{U_{nv}^2 + U_{ni}^2 + U_{nr}^2} = \sqrt{(2497.4 \text{ nV})^2 + (1.23 \text{ nV})^2 + (2010 \text{ nV})^2} = 3205 \text{ nV}$$

Je zřejmé, že pro tento operační zesilovač je příspěvek od proudových zdrojů zanedbatelný.

Celková efektivní hodnota šumového napětí na výstupu zesilovače

$$U_{nout} = U_{nin} \cdot G_n = 3205 \text{ nV} \cdot 101 = 324 \text{ }\mu\text{V}$$

Odhadnutá mezivrcholová hodnota (p-p) šumu na výstupu zesilovače

$$U_{nout-pp} = 5 \cdot U_{nout} = 5 \cdot (324 \text{ }\mu\text{V}) = 1.62 \text{ mV}_{pp}$$

6. Závěr

V článku je ukázaný postup výpočtu šumu pro jednoduchý obvod s operačním zesilovačem na základě parametrů zjištěných z jeho katalogového listu. Pro daný obvod jsme pak schopni odhadnout jaká bude asi mezivrcholová hodnota šumu na výstupu zesilovače. Je pravda, že tento výpočet, vyžadující řadu kroků ke získání jednotlivých příspěvků šumu až ke konečné hodnotě, se dá nahradit simulačním softwarem pro získání výsledků i přesnějších. Podstatné však je, že prostřednictvím tohoto postupu si lze objasnit teoretické základy a rovněž i lépe porozumět působení šumu v obvodu operačního zesilovače.

Literatura

- [1] Biolk, D.: Řešíme elektronické obvody. BEN, Praha, 2004
- [2] Dostál, J.: Operační zesilovače. BEN, Praha, 2005.
- [3] Punčochář, J.: Operační zesilovače v elektronice. BEN, Praha, 1999.
- [4] http://www.analogzone.com/avt_1023
Katalogový list TI OPA627

INOVACE VÝUKY PŘEDMĚTU SPECIÁLNÍ BEZPEČNOSTNÍ TECHNOLOGIE

Stanislav GOŇA

Ústav elektrotechniky a měření, Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Baři ve Zlíně, Nad
Stráněmi 4511, 760 05 Zlín, Česká Republika, gona@fai.utb.cz

***Abstrakt:** Tento příspěvek popisuje inovovanou podobu kurzu speciální bezpečnostní technologie. Cílem příspěvku je přiblížit začlenění tohoto předmětu do výuky bezpečnostních technologií na FAI UTB ve Zlíně a seznámit s obsahem kurzu. V příspěvku jsou uvedeny příklady ze dvou laboratorních úloh věnovaných radiových odposlechovým zařízením a rušičkám mobilních telefonů.*

***Klíčová slova:** Speciální bezpečnostní technologie, odposlechová zařízení, technika proti odposlechu.*

1. Výuka bezpečnostních technologií na FAI UTB

Výuka předmětu speciální bezpečnostní technologie probíhá na UTB FAI ve Zlíně na Ústavu elektrotechniky a měření (UEM). Tento ústav zajišťuje bakalářské a magisterské studium oboru Bezpečnostní technologie, systémy a management (BTSM). Kurz speciální bezpečnostní technologie probíhá ve čtvrtém ročníku a navazuje na základní kurzy týkající se zabezpečovacích systémů a kurzy věnované elektrotechnice a měření. Z těchto základních kurzů jsou to například kurzy „Objektová bezpečnost I,II“, „Nadstandardní prvky objektové bezpečnosti“ nebo „Technické prostředky bezpečnostního průmyslu“. Z kurzů věnovaných elektrotechnice jsou to základní kurzy „Elektrotechnika a průmyslová elektronika“ a „Mikroelektronika“. Na základní elektrotechnické kurzy pak dále navazují „Instrumentace a měření“ a „Zpracování signálů“.

Univerzita Tomáše Baři je mladou vzdělávací institucí, která existuje od roku 2000. Vlastní fakulta aplikované informatiky vznikla v roce 2006 z Institutu řízení procesů a aplikované informatiky, který byl do té doby součástí fakulty technologické (FT). V roce 2005 ukončili na UTB FAI studium první absolventi magisterského studia.

Na studenty oboru BTSM jsou kladeny požadavky na znalost jak technických aspektů bezpečnostních technologií (zabezpečovací a signalizační zařízení pro ostrahu objektů) tak otázky legislativní a právní. Součástí studia tohoto oboru je také speciální tělesná příprava, kde probíhá výuka sebeobrany a použití donucovacích prostředků. Absolventi pak nacházejí uplatnění nejenom jako bezpečnostní technici v komerčních sféře, ale také jako pracovníci bezpečnostních agentur.

Takto široký rozsah znalostí pochopitelně vede k tomu, že studenti nemůžou obsáhnout do hloubky znalost ze všech oblastí. Tomu je také přizpůsobena výuka elektrotechniky a bezpečnostních technologií. Kdy elektrotechnické kurzy mají charakter „základů elektrotechniky“ s cílem porozumět základním zákonům, technikám měření. Nepředpokládá se však že by studenti sami navrhovali elektronická zařízení. Na druhou stranu je však výuka pochopitelně vedena hlouběji než jenom z uživatelského hlediska. To znamená, že například zmiňovaný kurz musí studenty seznámit například se základním uspořádáním radiových přijímačů, jejich technickými parametry, ale také s anténami a šířením radiových signálů. Což je sama o sobě dosti speciální oblast vyučovaná podrobně na elektrotechnických fakultách. Zde se pochopitelně nejde tolik do hloubky, ale je cílem vhodnou formou naučit studenty zacházet s těmito pojmy spadajícím do oblastí radioelektroniky a získat praktické dovednosti s měřením.

Po absolvování tohoto kurzu by studenti měli být schopni za pomoci za dostupných technických prostředků, provést detekci a odhalení základních druhů odposlechových zařízení (tzv. „stěnic“) a zabránit pak v praxi průmyslové špionáži od konkurence.

2. Speciální bezpečnostní technologie – inovace obsahu

Předmět speciální bezpečnostní technologie byl v letech 2005 a 2006 částečně orientován do oblasti právní (odposlechy) a částečně technické zaměřené na elektromagnetickou všeobecnou kompatibilitu elektronických zařízení.

Po nákupu potřebných technických prostředků pro radiový odposlech a techniku proti odposlechu (nezbytných pro praktickou laboratorní část předmětu) byl předmět nově koncipován následovně:

Přednášky:

1. Úvod, právní otázky týkající se odposlechu, rušení, sledování pohybu osob
2. Kmitočtové spektrum (rozdělení kmitočtových pásem, standardizace (ETSI, ITU, ČTÚ), přehled vybraných kmitočtových pásem podle aplikací (VKV, UHF, ISM 433 MHz, GSM 900, 1800, ISM 2,4 a 5,8 GHz)
3. Radiové přijímače, uspořádání, základní pojmy
4. Modulace vysokofrekvenčních a mikrovlnných signálů (analogová AM,FM,PM,Gauss, digitální klíčování ASK, FSK, PSK, GMSK)
5. Antény a šíření (základní parametry: směrová charakteristika, zisk, vstupní impedance)
6. Odposlechové zařízení (bezdrátové mikrofony, laserový odposlech, šumové generátory)
7. Technika proto odposlechu (přehledové radiové přijímače (scannery))
8. Vyhledávání nelineárních přechodů (detektor nelineárních přechodů)
9. Zaměřování radiových zdrojů rušení (zjišťování směru příchodu signálu)
10. Rušení kmitočtového spektra (záměrné: rušičky mobilních telefonů, nechtěné: EMI)
11. Elektromagnetická odolnost zařízení (EMS)
12. Bezpečnost mobilních zařízení (zařízení s plovoucím kódem)
13. Nové směry v oblasti sledování a identifikace osob (mikrovlnné kamery, radary vidící přes zeď apod.)

Laboratorní cvičení:

V první polovině semestru probíhají seminární formou, kdy studenti řeší u tabule příklady týkající se „radiové“ části předmětu, probírané v první polovině semestru. Cílem je porozumět základním probíraným pojmům z oblasti radiových přijímačů, modulací používaných u vř. a mikrovlnných signálů a dobře porozumět základním pojmům z oblasti antén a šíření.

V druhé polovině semestru studenti prakticky měří šest laboratorních úloh:

1. Radiová odposlechové zařízení 1 – analogové radiomikrofony
2. Radiová odposlechové zařízení 2 – digitální radiomikrofony
3. Laserový odposlech – šumové generátory, kontrola
4. Odhalování odposlechového zařízení – detekce vodičů nebo zdrojů pomocí detektoru RFD-5
5. Rušičky mobilních telefonů
6. Vyhledávání a zaměřování zdrojů rušení

3. Požadavky na studenta

Jak bylo řečeno v první kapitole na studenty oboru BTSM jsou kladeny požadavky z dosti vzdálených oblastí technických i netechnických (právo a legislativa). Předmět speciální bezpečnostní technologie je orientován téměř výhradně technicky, kdy se požadují základní znalosti z oblasti radioelektroniky.

Studenti musí mít během semestru 80% účast na první seminární části laboratoří a úspěšně absolvovat test z této seminární části (limit 60 % správných odpovědí). V druhé polovině laboratoří musí úspěšně změřit a odevzdat všech 6 laboratorních úloh.

Zkouška z tohoto předmětu má písemnou a ústní část.

4. Ukázky z laboratorních úloh

1.1 Radiová odposlechová zařízení 1 – analogové radiomikrofony

Stručný popis úlohy č.1 - abstrakt

Tato úloha seznamuje studenty se základními technickými prostředky sloužícími k audio odposlechu (špionáži). Prakticky se zde ověřuje činnost odposlechového mikrofону RM-M3 pracujícího na kmitočtu 417 MHz. Vlastní odposlech je prováděn pomocí FM přijímače UNIVERSAL. Dále se v úloze pracuje s profesionálním paměťovým radiovým analyzátozem MRA-3, který slouží v praxi jako technický prostředek k zjišťování/prověřování odposlechu.

Hlavním cílem úlohy je získat základní přehled o technickém řešení odposlechových zařízení, kdy studenti musí prokázat základní technické znalosti z oblasti radiových přijímačů. Je přitom vyžadováno, aby porozuměli technickému řešení přijímačů na blokové úrovni a dokázali pracovat s jejich technickými parametry (kmitočet, modulace, výkon, citlivost a dosah).

Úloha č.1: zadání

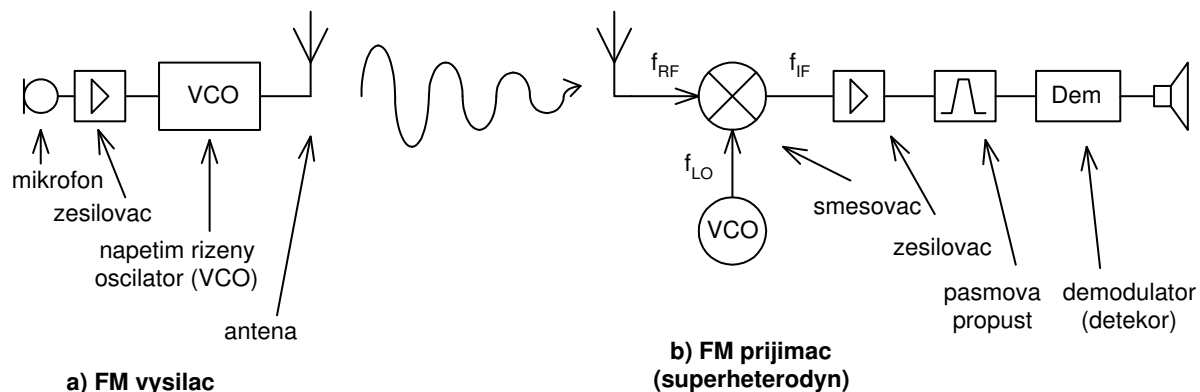
- seznámte se odposlechovými audio zařízeními a technikou proti odposlechu
- proveďte praktické ověření funkce jednoduchého odposlechového mikrofону RM-M3 a zjistěte jeho základní parametry (vysílací kmitočet, výstupní výkon, kmitočtový zdvih, dosah v místnosti a zástavbě při použití přijímače UNIVERSAL)
- proveďte odposlech bezdrátového mikrofону RM-M3 pomocí univerzálního přijímače MRA-3 (radiového přehledového přijímače)

Úloha č.1: teorie

V úloze 1 se pracuje s analogovým radiomikrofonem, který pracuje jako FM vysílač. Blokové schéma tohoto vysílače je uvedeno na Obr. 1 vlevo. Analogový signál z mikrofону je po zesílení využit ke kmitočtové modulaci vysokofrekvenční nosné (cca. 418 MHz). Kmitočtový zdvih se pohybuje okolo 10kHz a modulační audio signál má kmitočtový rozsah od 300 Hz do 4500 Hz. Kmitočtově modulovaný vysokofrekvenční signál je přiveden do drátové antény (dlouhé přibližně $\frac{1}{4}$ vlnové délky, na 418 MHz je to cca. 180mm).

Pro vlastní odposlech se v této úloze používá přijímač UNIVERSAL nebo přehledový přijímač MRA-3. Oba přijímače pracují s dvojitým směřováním, a jejich blokové schéma je uvedeno na Obr. 1 vpravo. Směřování je proces, kdy se přijímaný vysokofrekvenční modulovaný signál násobí se signálem oscilátoru o kmitočtu f_{LO} (je součtem přijímaného kmitočtu f_{RF} a konstantního mezifrekvenčního kmitočtu f_{IF}). Výsledkem směřování je tak snížení (kmitočtová konverze), velkého vysokofrekvenčního kmitočtu na mnohem menší mezifrekvenční kmitočet, který lze snadněji demodulovat nebo jinak zpracovávat.

Oba přijímače obsahují demodulátor kmitočtové (FM) modulovaných signálů, které lze přímo poslouchat v reproduktoru nebo ve sluchátkách.



Obr.1 Blokové schéma a) radiomikrofónu (FM vysílače) b) přijímače UNIVERSAL nebo MRA-3 (FM přijímače)

Úloha č.1: - pokyny pro měření

K vlastnímu odposlechu použijte mikrofon RM-M3 napájený dvěma AA články. Ve dvojici ověřte funkčnost mikrofonu. Jeden student umístí mikrofon pod oblečení, svetr, nebo ho skryje v kapse. Druhý pak provádí odposlech v různě vzdálených místech (sousední místnost, chodba, další patro). K odposlechu použijte přijímač UNIVERSAL.

Nosný kmitočet se určí tak, že se provede manuální naladění, tak aby byl srozumitelnost nejlepší. Ostatní parametry (vysílací výkon, kmitočtový zdvih lze získat z aplikační listu dodávaného výrobcem RM-M3).

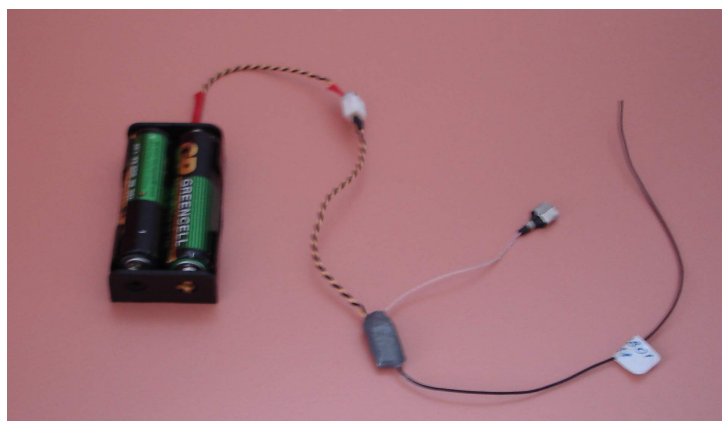
Typické hodnoty těchto parametrů jsou tyto:

- vysílací kmitočt 418 MHz
- vysílací výkon 10mW
- kmitočtový zdvih 10kHz

V druhé části použijte radiový mikrofon RM-M3 z bodu 1 a s pomocí přijímače MRA-3 proveďte manuální naladění přijímače na kmitočt mikrofonu RM-M3 (cca. 418 MHz) a proveďte vlastní odposlech.

Úloha č.1: ukázka z měření

V Obr.2a je fyzické provedení analogového bezdrátového mikrofonu RM-M3. Odposlech z tohoto mikrofonu se typicky provádí přijímačem UNIVERSAL (Obr.2b), který umožňuje kromě poslechu v reproduktoru nebo sluchátek „hovor“ také zaznamenat do paměti FLASH (trvání 3 až 12 hod) a poté jej přenést po USB do počítače. Velmi komfortní způsob jak dostat rychlý přehled o odposlechu nabízí přehledový přijímač MRA-3 (Obr.3), který porovnává naměřený stav signálů ve všech kanálech s tím co je uloženo v paměti jako „pozadí“, a pokud dojde trvale výskytu nového signálu tak vyhlásí poplach (Viz.Obr 3, kdy svítí červená dioda ALARM).



Obr.2: a) Bezdrátový mikrofon RM-M3 b) přijímač UNIVERSAL



Obr.3: Přehledový radiopřijímač MRA-3 (zaznamenán odposlech – poplach)

1.2 Rušičky mobilních telefonů

Stručný popis úlohy č.5 - abstrakt

Tato úloha seznamuje studenty se základními technickými prostředky sloužícímu k rušení v příjmu v sítích GSM. V úloze studenti měří vlastnosti komerčně prodávané duální rušičky pro pásma GSM900 a GSM1800.

Hlavním cílem úlohy seznámit studenty se ze základním uspořádáním rušičky, prakticky ověřit její funkci, změřit její základní parametry a ověřit dosah rušičky v zástavbě.

Úloha č.5: zadání

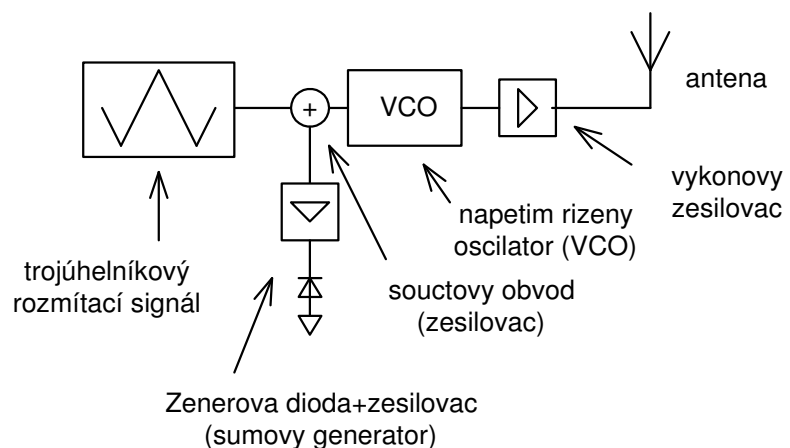
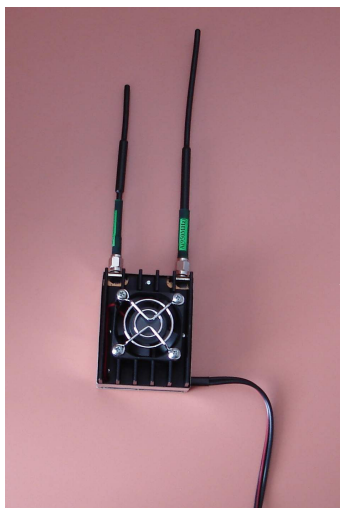
- seznámte se s blokovým uspořádáním rušičky mobilního telefonu (pro síť GSM)
- určete její základní parametry (výstupní výkon, kmitočtový rozsah)
- proveďte ověření funkce rušičky a měření jejího dosahu v budově, srovnajte jak se liší dosah v horizontální rovině a jak vypadá situace ve vertikální rovině (vyšších patrech)

Úloha č.5: Pokyny pro měření

Pro měření výstupního výkonu použijte umělou zátěž tvořenou útlumovým článkem, který je připojen na detektor. Kmitočtový rozsah určete ve stejném zapojení, kdy je útlumový článek připojen ke spektrálnímu analyzátoru FSH-3.

Úloha č.5: Teorie

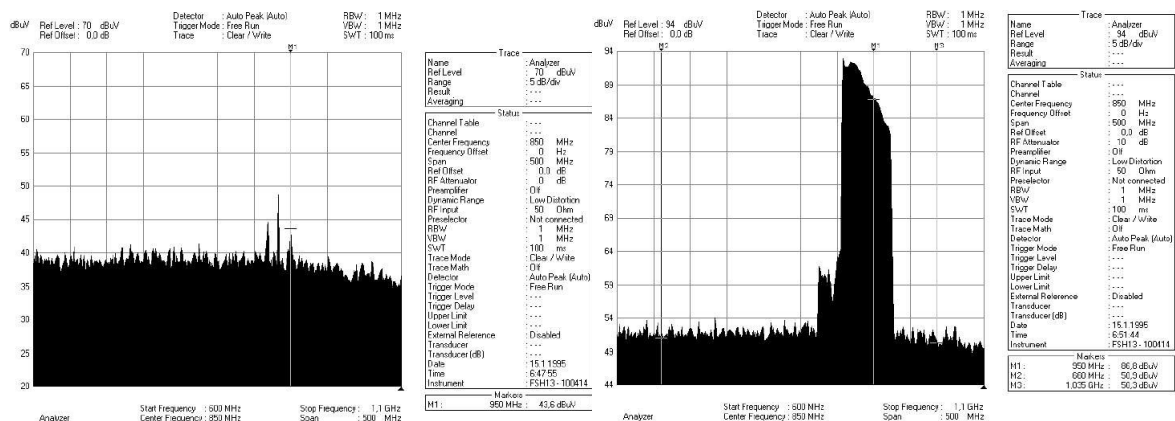
Rušička mobilního telefonu použitá v úloze č.5 k měření, je komerčně dostupná duální rušička pro pásma GSM 900 a 1800 (Obr.3a). Její výkon se pohybuje okolo 1 až 2 W. Rušička je napájena ze stejnosměrného zdroje 12V, a je vybavena dvěma prutovými anténami pro příslušná pásma. Blokové uspořádání rušičky je uvedeno v Obr. 3b



Obr. 3 a) provedení rušičky b) blokové uspořádání rušičky

Rušička pracuje jako rozmítaný generátor/oscilátor. Rozmítání se děje trojúhelníkovým signálem v kmitočtovém rozsahu 890-915 Mhz (spoj základnová stanice -> mobilní telefon, tzv. downlink, šířka pásma 25 MHz). K rozmítacímu signálu je dále přičten malý šumový signál (generovaný nejčastěji Zenerovou diodou). Takto upravený signál potom rychle přeladuje/ rozmítá (typicky každou 1ms) vysokofrekvenční oscilátor (VCO). Na konce řetězce už následuje jenom výkonový zesilovač a anténa.

Úloha č.5: ukázka z měření



Obr. 4 Měření kmitočtového rozsahu/spektra rušičky a) spektrum GSM 900 (bez rušičky) b) spektrum GSM 900 (rušička aktivní)

5. Přehled kurzů v návaznosti na elektrotechniku na UEM

Tato krátká kapitola dává stručný přehled výuky pro obor BTSM na FAI UTB ve Zlíně. Jsou zařazeny jenom kurzy věnované bezpečnostním technologiím a kurzy elektrotechnické. Ostatní kurzy (matematika, fyzika, ekonomika a právní kurzy nejsou uvedeny).

Ročník	Elektrotechnické kurzy	Kurzy zaměřené na bezpečnostní technologie
1		- systemizace bezpečnostního průmyslu
2	- elektrotechnika a průmyslová elektronika - instrumentace a měření	- technické prostředky bezpečnostního průmyslu - objektová bezpečnost I
3	- mikroelektronika	- objektová bezpečnost II - nadstandardní prvky objektové bezpečnosti
4	- telekomunikace - mikropočítače a PLC - robotika	- speciální bezpečnostní technologie
5		

6. Závěr

Inovovaný předmět speciální bezpečnostní technologie je specializovaným kurzem, který vyžaduje základní znalosti elektroniky, které studenti získávají v předešlých kurzech „elektrotechnika a průmyslová elektronika“ a „mikroelektronika“. Vzhledem k tomu, že jde prozatím o kurz, který poběží poprvé v akademickém roce 2007/2008 nejsou v tuto praktické zkušenosti z výuky. Nicméně lze očekávat, že tento předmět bude atraktivní pro obě skupiny studentů, jak ty kteří mají středoškolské elektrotechnické vzdělání (pro tyto studenty jsou základní kurzy víceméně opakováním), tak pro studenty bez předchozího nebo minimálního elektrotechnického technického vzdělání (např. z gymnázií, kdy je problematika špionáže, odposlechů a radiové bezpečnosti všeobecně, velmi aktuální).

Literatura

[1] Sborník mezinárodního odborného semináře SEKEL 2005, 14.-16.září 2005, Rusava, Česká Republika.

MODERNIZACE VÝUKY ELEKTROTECHNIKY NA FAKULTĚ STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNĚ

Miloš HAMMER

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky –
Odbor elektrotechniky, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Česká republika, e-mail: hammer@fme.vutbr.cz

Abstrakt: Příspěvek je zaměřen na stručný popis modernizace výuky elektrotechnických předmětů na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Po krátkém historickém přehledu modernizačních snah na uvedeném pracovišti je pozornost soustředěna na v roce 2006 realizovaný grantový projekt, jehož cílem bylo využití moderních technologií a přístrojové techniky k rozvoji výuky elektrotechnických předmětů, a to s cílem inovace a zlepšení kvality náplně této výuky, zvýšení efektivity výukového procesu a samostatné práce studentů a inovace vybavení elektrotechnických laboratoří.

Klíčová slova: Modernizace, výuka, elektrotechnika.

1. Úvod

Dlouhou dobu výuku elektrotechniky pro budoucí strojní inženýry na Fakultě strojní VUT v Brně zajišťovala Katedra elektrotechniky. Tato však byla v roce 1996 zrušena. Po zrušení Katedry elektrotechniky na Fakultě strojní VUT v Brně byl v rámci Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky vytvořen Odbor elektrotechniky, jehož posláním bylo zajistit výuku všech elektrotechnických předmětů na fakultě. Z tohoto důvodu byl i vedením fakulty přidělen k řešení grantový úkol s názvem „Aplikace nových vědeckých pedagogických poznatků ve výuce elektrotechniky na FS VUT Brno“, který byl ukončen v roce 1997 opanovanou výzkumnou zprávou [4]. Hlavním úkolem uvedeného projektu bylo zkvalitnit výuku elektrotechniky na Fakultě strojní a především promítnout nové vědecké poznatky do pedagogického procesu. Na základě úspěšné oponentury byly do výuky elektrotechniky téměř okamžitě zapracovány všechny přijaté závěry. Snahy o zkvalitnění pedagogického procesu probíhaly neustále a soustavně, což se projevilo mimo jiné např. psaním skript především pro laboratorní cvičení základního předmětu Elektrotechnika a elektronika pro magisterské a bakalářské studium [5], [6], [7], [8], tvorbou nových výukových filmů [9], [10], [11], [12] a dále vytvářením studijních opor [13], [14]. Rozvíjelo se i využití internetu ve výukovém procesu a vlastní přípravě studentů ke zkouškám. Po této fázi modernizace výuky elektrotechniky na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně jsme se soustředili na další modernizaci výukového procesu, a to především na inovaci vlastních laboratoří a jejich přístrojového vybavení. Naše představy byly konkrétní a jasné, avšak vždy narážely na chybějící finanční prostředky. Proto jsem s některými mladými nadšenými kolegy připravil pedagogický projekt, který by naše cíle pomohl realizovat. Nakonec jsme tento grantový projekt podali na MŠMT Praha. Tento byl v roce 2005 přijat jako projekt jednorocní v rozsahu cca 1 mil. Kč pod názvem „Rozvoj informačních a komunikačních technologií podporujících akreditované studijní programy a řízení vysoké školy“, subsystém B „Využití moderních technologií a přístrojové techniky při výuce elektrotechnických předmětů u nových akreditovaných studijních programů na FSI VUT v Brně“. Projekt byl v roce 2006 na Odboru elektrotechniky Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně realizován. I když přidělené finanční prostředky byly oproti našim původním představám podstatně menší, rozhodli jsme se tento nedostatek odstranit intenzivním pracovním nasazením účastněných a přidělené finanční prostředky použít pouze na práce a věci, které nejsme sami schopni realizovat. Díky podpoře vedení fakulty a enormního pracovního výkonu všech řešitelů byly vytčené cíle projektu splněny. Odbor elektrotechniky ÚVSSR FSI VUT v Brně nyní disponuje moderními technologiemi a nejnovějším přístrojovým vybavením v laboratořích pro výuku elektrotechnických předmětů. Výsledky projektu jsou částečně shrnuty v [1], [2], [3] a právě tyto jsou dále podrobněji popsány.

2. Modernizace výuky elektrotechniky

Záměrem současné modernizace výuky elektrotechniky realizované pomocí grantového projektu bylo využití moderních technologií a přístrojové techniky k rozvoji výuky elektrotechnických předmětů na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, a to s cílem inovace a zlepšení kvality náplně této výuky, zvýšení efektivity výukového procesu a samostatné práce studentů a inovace vybavení elektrotechnických laboratoří. Konkrétně se jedná o skutečnosti, které jsou vždy dále podrobněji rozvedeny:

Inovace a zlepšení kvality náplně studijních programů jednotlivých předmětů.

• Inovovaná náplň přednášek jednotlivých předmětů

- kontrola náplně přednášek jednotlivých předmětů, inovace a korekce
- využití zkušeností při výuce elektrotechnických předmětů na jiných vysokých školách v ČR, např. ČVUT Praha, TU Ostrava, ZČU Plzeň, apod.
- využití zkušeností a poznatků ze zahraničních vysokých škol, např. Německo, Anglie, Francie, apod.
- využití zkušeností z průmyslové praxe z firem, s kterými ÚVSSR spolupracuje, např. ŽDAS Žďár nad Sázavou, TOS Kuřim, Šmeral Brno, apod.
- od letního semestru ak. roku 2006/2007 byly přednášky realizovány „novým“ způsobem. Především se částečně inovovala obsahová náplň přednášek. Obsah odpovídá nejnovějším poznatkům současné elektrotechnické vědy, a to se zaměřením na potřeby budoucích odborníků ve strojírenském průmyslu. Dále se mění i způsob výuky. V přednáškách je důsledně využíváno videodataprojektorů (což dříve nebylo), a to zvláště k promítání a popisu obrázků (schémat zapojení a grafických průběhů) a použitých matematických vztahů. Protože k tomuto účelu byla napsána skripta s cíleným obsahem a ta jsou studentům doporučována, nemusí si při výkladu posluchači grafické záležitosti znovu kreslit. Během přednášek aktivně používají skript a do svých sešitů si dělají poznámky, případně zaznamenávají skutečnosti, které jsou přednášejícím uváděny oproti skriptům navíc. Ve výuce vzniká během přednášky časový prostor a tento je využit k důkladnějšímu výkladu a rozboru probíraných skutečností. Tímto je také možné se více soustředit na praktické důsledky probíraných témat a samozřejmě se výrazně zlepší i grafická úroveň přednášek. Podobný způsob výuky bude aplikován také na laboratorní výuku v laboratořích Odboru elektrotechniky ÚVSSR FSI VUT v Brně.

• Inovovaná náplň laboratorních cvičení jednotlivých předmětů

- inovace náplně laboratorních cvičení v předmětu CEL (Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium – profesní bakalář), CEL-K (Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium- profesní bakalář - kombinovaná forma), 6EE (Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium – obecný bakalář).

Jedná se o laboratorní cvičení s názvem:

Základy elektrických a elektronických obvodů
Střídavé elektrické obvody
Stabilizátory a usměrňovače
Logické obvody operační zesilovač
Trojfázový transformátor
Asynchronní motor
Stejnoseměrný motor s cizím buzením
Asynchronní motor s měničem frekvence
Použití stykačů v praxi
Jistící a ochranné přístroje a rozvod elektrické energie

Zvýšení efektivity výukového procesu a samostatné práce studentů pomocí výukových a studijních materiálů, které využívají soudobé moderní technologie.

• Kontrola současných výukových textů a studijních materiálů a jejich inovace

- kontrola existujících studijních materiálů a opor: skripta pro laboratorní cvičení vydaná dříve jsou samozřejmě rozebrána, jiné výukové texty neexistují – byla nutná příprava nových studijních materiálů (viz dále). Existující studijní opory byly zkontrolovány a inovovány. Jedná se o oporu *Měniče elektrické energie*, která byla stažena a nahrazena textem ve skriptech Hammer, M.: Elektrotechnika a elektronika. Přednášky. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2006. ISBN 80-214-3334-5. Další opora *Úvod do laboratorních cvičení* byla inovována a tato se stala základem i těchto nových opor:

Úvod do laboratorních cvičení z elektrotechniky
Bezpečnost při práci na elektrotechnickém zařízení
Návody k laboratorním cvičením

Výše uvedené opory byly vytvořeny především pro tyto předměty:

Bezpečnost práce v elektrotechnice (VE0, XB0)
Elektrotechnika a elektronika (CEL, CEL-K, 6EE)
Elektrotechnika a elektronika SaZ (JEE, JEE-K)
Výroba, rozvod a užití elektrické energie (FVE)

- ***Tvorba www stránek pro studijní dokumentaci elektrotechnických předmětů***

- příprava www stránek na Odboru elektrotechniky, kde jsou umístěny všechny potřebné materiály pro studium elektrotechnických předmětů na FSI.

- ***Tvorba nové studijní dokumentace (syllaby pro přednášky; interaktivní texty pro: laboratorní cvičení, základy elektrických měření, bezpečnost práce v laboratoři – zásady, zkušební testy)***

- tvorba syllabů pro přednášky pro předmět Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium – profesní obory (CEL) a obory obecné (6EE). Byla vytvořena skripta: Hammer, M.: Elektrotechnika a elektronika. Přednášky. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2006. ISBN 80-214-3334-5. Jsou k dostání v prodejní síti.
- příprava ostatních studijních materiálů
Byly vytvořeny tyto studijní opory:

Úvod do laboratorních cvičení z elektrotechniky
Bezpečnost při práci na elektrotechnickém zařízení

- ***Umístění studijní dokumentace na www stránky (syllaby pro přednášky; interaktivní texty pro: laboratorní cvičení, základy elektrických měření, bezpečnost práce v laboratoři; zadání laboratorních cvičení, pokyny ke zpracování laboratorních měření, zásady bezpečnosti práce v elektrotechnických laboratořích, podrobnosti k přezkoušení z bezpečnostních předpisů dle vyhl. č.: 50/1978 Sb.; další studijní opory, apod.)***

- postupné umístování uvedených učebních textů na www stránky Odboru elektrotechniky.

- ***Inovace výukových filmů (DVD)***

-základní inovace výukových filmů – umístěno na DVD nosiče. Seznam výukových filmů, které byly inovovány:

I. Pomoc
Bezpečnost práce na elektrických zařízeních
Základy měření v elektrotechnice
Elektrická instalace
Rozvod energie
Výroba asynchronních motorů
Výroba a užití stejnosměrných motorů
Výroba transformátorů
Výroba elektrické energie

- ***Zavedení bodového hodnocení studentů***

- zkoušky v odletního semestru ak.roku 2006/2007 jsou hodnoceny bodově. Při písemném testu u závěrečné zkoušky je každá otázka hodnocena příslušným počtem bodů, celkově lze z testu získat 100 bodů. Počet bodů určí udělenou známku, hodnocení vychází ze stupnice ECTS.

- ***Posílení internetové podpory pro samostatnou práci studentů (příprava na laboratorní cvičení, studium, příprava ke zkouškám)***

- posílení internetové podpory pro samostatnou práci studentů

Studenti se připravují na každé laboratorní cvičení dle materiálů, které jsou umístěny na internetu. Rovněž se takto připravují na povinné přezkoušení z bezpečnostních předpisů na začátku semestru. Totéž se týká i přípravy ke zkouškám .

Inovace vybavení laboratoří a posílení samostatné práce studentů v laboratorních cvičeních.

- ***Inovace vybavení elektrotechnických laboratoří a učeben v objektu budovy A1 (obr.1, obr.2, obr.3)***

Jedná se o laboratoře Odboru elektrotechniky ÚVSSR v budově A1, tzv. „lehké“ laboratoře pro výuku laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium (CEL) a (6EE) a předmětu Elektrotechnika strojů a zařízení pro navazující magisterský program (JEE), předmětu Elektrotechnika (2EL) programu B 3901-3 Aplikované vědy v inženýrství, obor Mechatronika.

- laboratoř č. 0413 a 0430 a učebny 0430 a 0429 - bylo provedeno vymalování prostorů, nová podlahová krytina a elektroinstalace, úprava stolů – nové povrchové desky, nová elektroinstalace laboratorních stolů, montáž rozváděčů a jejich revize
- inovace laboratorních cvičení a jejich vybavení moderní měřicí technikou
- vybavení učeben souvisejících s laboratořemi (učebna č. 0430, 0429): bylo zakoupeno a instalováno: videodataprojektory, promítací plátna (dodavatel: firma ENGEL)

Původní stav a vybavení laboratoří ukazuje obr.1 a obr. 2, stav po modernizaci je znázorněn na obr.3.

- ***Inovace vybavení elektrotechnických laboratoří v objektu budovy B2***

Jedná se o laboratoře Odboru elektrotechniky ÚVSSR v budově B2, tzv. „střední“ laboratoře pro výuku laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika pro bakalářské studium – CEL a 6EE, pro navazující magisterský program – Elektrotechnika strojů a zařízení (JEE) a Elektrotechnika (2EL) programu B 3901-3 Aplikované vědy v inženýrství, obor Mechatronika (výuka ve všech předmětech je zaměřena na problematiku elektrických strojů a pohonů).

- laboratoř č. 207/1, 207/2 a 207/3 – bylo provedeno: vymalování, položena nová podlahová krytina a provedena elektroinstalace, realizována úprava stolů – nové desky, elektroinstalace, zakoupení a montáž rozváděčů a provedení revize nových laboratorních stolů
- zakoupení 2 ks trojfázových asynchronních motorů, 1 ks stejnosměrného stroje a 3 ks měničů. Elektrické stroje a měniče byly instalovány a uvedeny do provozu. Od letního semestru ak. roku 2006/2007 je na těchto strojích a měničích prováděno měření v laboratorních cvičeních.



Obr.1: Stav a vybavení laboratoří před modernizací



Obr.2: Stav a vybavení laboratoří před modernizací



Obr.3: Stav a vybavení laboratoří po modernizaci

3. Závěr

Předkládaný příspěvek stručným způsobem shrnuje základní modernizační principy, které byly uskutečňovány na Odboru elektrotechniky Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Důraz je kladen na období roku 2006, kdy byl na pracovišti úspěšně řešen grantový projekt [1], [2]. I tento úkol dokázal, že nadšení lidí pro věc je značně důležité a že i s malými finančními prostředky se mohou dokázat i rozsáhlé modernizace. Chtěl bych také touto cestou poděkovat vedení VUT a

především FSI, že snahy o získání grantového projektu podpořila a také, že vytvořili podmínky pro jeho úspěšné splnění. Jako odpovědný řešitel projektu subsystému B také děkuji jeho hlavním realizátorům:

Ing. Petru Kratochvílovi, Ph.D

Ing. Petru Latinovi

Ing. Josefu Kolčabovi.

Rovněž děkuji všem ostatním za aktivní pomoc a podporu při řešení projektu.

Literatura

- [1] Hammer, M.: Dílčí výzkumná zpráva projektu MŠMT Praha č. 456 „Rozvoj informačních a komunikačních technologií podporujících akreditované studijní programy a řízení vysoké školy“, subsystém B „Využití moderních technologií a přístrojové techniky při výuce elektrotechnických předmětů u nových akreditovaných studijních programů na FSI VUT v Brně“. Brno, červen 2006.
- [2] Hammer, M.: Závěrečná výzkumná zpráva projektu MŠMT Praha č. 456 „Rozvoj informačních a komunikačních technologií podporujících akreditované studijní programy a řízení vysoké školy“, subsystém B „Využití moderních technologií a přístrojové techniky při výuce elektrotechnických předmětů u nových akreditovaných studijních programů na FSI VUT v Brně“. Brno, únor 2007.
- [3] Kratochvíl, P., Hammer, M., Latina, P., Kolčaba, J.: Rozvoj informačních a komunikačních technologií podporujících akreditované studijní programy a řízení vysoké školy. Sborník příspěvků SEKEL 2006, Žilina, 2006, SR.
- [4] Hammer, M., Kolíbal, Z., Cibulka, F.: Aplikace nových vědeckých pedagogických poznatků ve výuce elektrotechniky na FS VUT Brno. Výzkumná zpráva grantového úkolu. FS VUT Brno, 1997.
- [5] Hammer, M., Kudláč, B., Balabán, B.: Elektrotechnika. Laboratorní cvičení. Skriptum pro bakalářské studium. Brno, 1997. ISBN 80-214-0932.
- [6] Hammer, M., Kudláč, B., Balabán, B., Singule, V.: Elektrotechnika. Laboratorní cvičení pro magisterské studium. Skriptum pro magisterské studium. Brno, 1998. ISBN 80-214-1161-9.
- [7] Hammer, M., Kudláč, B., Balabán, B.: Elektrotechnika. Laboratorní cvičení. Skriptum pro bakalářské studium. Brno, 1999. ISBN 80-214-1301-8.
- [8] Hammer, M.: Elektrotechnika a elektronika. Přednášky. Učební texty vysokých škol - skripta. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, Brno, prosinec 2006. ISBN 80-214-3334-5.
- [9] Hammer, M. a kol. : Rozvod elektrické energie. Výukový film. Odborná spolupráce při výrobě scénáře filmu a vlastní výrobě filmu. Sponzor: Jihomoravská energetika, a.s. Brno, Brno, 2000.
- [10] Hammer, M. a kol.: Základní měření v elektrotechnice. Výukový film. Odborná spolupráce při výrobě scénáře filmu a vlastní výrobě filmu. Film byl vyroben v rámci transformačních a rozvojových programů MŠ ČR Praha, a to grantového projektu „Kombinovaná forma bakalářského studijního programu Strojírenství uskutečňovaná ve spolupráci s regionálními VOŠ“. Brno, 2002.
- [11] Hammer, M. a kol.: Bezpečnost práce na elektrických zařízeních. Výukový film. Odborná spolupráce při výrobě scénáře filmu a vlastní výrobě filmu. Film byl vyroben v rámci transformačních a rozvojových programů MŠ ČR Praha, a to grantového projektu „Kombinovaná forma bakalářského studijního programu Strojírenství uskutečňovaná ve spolupráci s regionálními VOŠ“. Brno, 2003.
- [12] Hammer, M. a kol.: Elektrické instalace. Výukový film. Odborná spolupráce při výrobě scénáře filmu a vlastní výrobě filmu. Film byl vyroben v rámci transformačních a rozvojových programů MŠ ČR Praha, a to grantového projektu „Kombinovaná forma bakalářského studijního programu Strojírenství uskutečňovaná ve spolupráci s regionálními VOŠ“. Brno, 2004.
- [13] Hammer, M., Kratochvíl, P.: Úvod do laboratorních cvičení z elektrotechniky. Interaktivní studijní text. Text byl vyroben v rámci pokračujících projektů transformačních a rozvojových programů MŠ ČR Praha, a to grantového projektu „Strojírenství ve spolupráci s regionálními VOŠ“. Brno, 2004.
- [14] Hammer, M., Kratochvíl, P.: Měniče elektrické energie.. Interaktivní studijní text. Text byl vyroben v rámci pokračujících projektů transformačních a rozvojových programů MŠ ČR Praha, a to grantového projektu „Strojírenství ve spolupráci s regionálními VOŠ“. Brno, 2004.

NÁVRH MODULÁRNEHO DATALOGERA NA DLHODOBÉ TERÉNNE MERANIA NEELEKTRICKÝCH VELIČÍN

Dušan HRUBÝ, Tomáš GÉCI

Katedra elektrotechniky a automatizácie, MF SPU v Nitre, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, SR

e-mail: dusan.hruby@uniag.sk, tomas.geci@seznam.cz,

Abstrakt: Článok sa zaoberá návrhom meracieho zariadenia vhodného na terénne merania v poľnohospodárskej a technickej praxi. Zariadenie je modulárne, jednotlivé moduly pozostávajú zo snímačov neelektrických veličín, riadiaceho obvodu s polovodičovou pamäťou a obvodu hodín reálneho času. Na použitie neštandardných snímačov je zariadenie doplnené o modul A/D prevodníka. Do pamäte sa zaznamenáva hodnota meranej veličiny, dátum a čas merania. Výstupy z meracieho zariadenia sú spracované pomocou osobného počítača PC a špecializovaného programového vybavenia. Cieľom je zvýšenie efektivity pri návrhu datalogerov na meranie neelektrických veličín v terénnych podmienkach, pri využití rôznych snímačov pre meranie v oblasti poľnohospodárstva.

Kľúčové slová: dataloger, moduly, snímač, mikrokontrolér, prevodník

1. Úvod

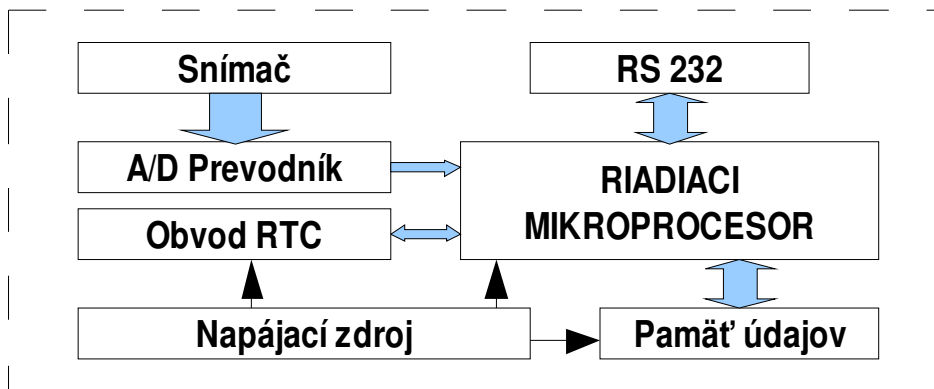
Monitorovanie a meranie všetkých fyzikálnych veličín v oblasti poľnohospodárstva je možné v súčasnosti realizovať niekoľkými spôsobmi. Každý z týchto spôsobov má určité výhody a aj nevýhody. Vybrať vhodný spôsob merania znamená vlastne kompromis medzi priaznivými a nepriaznivými vlastnosťami meracieho systému. Požiadavka na meranie a vyhodnocovanie veličín priamo v teréne býva v oblasti poľnohospodárskej výroby častá. Pri jednoduchých meraniach tento je tento spôsob výhodný, hlavne ak počet nameraných údajov nie je vysoký. Použitie snímače je možné v prípade potreby natrvalo zabudovať do meraného objektu. Pre dlhodobé merania s veľkým počtom nameraných údajov sa ponúka ako vhodné riešenie ukladať merania do pamäťového média na mieste merania. Zariadenie používané na tento účel sa skladá zo snímačov, prevodníkov, mikroprocesora a pamäťového média. Takéto usporiadanie jednotlivých blokov umožňuje meranie v pravidelných intervaloch, záznam meranej veličiny do pamäte a súčasný záznam dátumu a času. Uvedené usporiadanie blokov do celku tvorí meracie a záznamové zariadenie (dataloger). Po skončení meracieho cyklu je možné namerané dáta skopírovať pre účely vyhodnotenia napríklad do počítača typu PC. Dataloger je na tento účel vybavený štandardným komunikačným rozhraním RS232C pre pripojenie k osobnému počítaču PC.

2. Materiál a metódy

Možnosti merania a záznamu dát

V súčasnosti sa používajú rôzne typy snímačov fyzikálnych veličín v kombinácii s A/D prevodníkmi. Digitálne výstupy A/D prevodníkov sú pripojené k riadiacemu mikrokontroléru. Pre jednoduchú komunikáciu sa najčastejšie volia štandardné typy zberníc, napr. I²C alebo 1-Wire. vlastný A/D prevodník je v niektorých prípadoch súčasťou snímača, ktorý je vyhotovený ako monolitický integrovaný obvod, prípadne ako hybridný obvod na miniatúrnej doske plošných spojov.

Mikrokontrolér pracuje ako riadiaci člen. Spracováva digitálnu informáciu z jednotlivých prevodníkov, riadi záznam do pamäte, komunikuje s riadiacim počítačom PC. Hodiny reálneho času (obvod RTC) generujú dátum a čas. V nastaviteľných časových intervaloch obvod RTC poskytuje impulz – alarm, ktorý riadi časový program merania a záznamu nameraných veličín. Ako pamäť údajov sa najčastejšie používa typ EEPROM. Pamäť údajov je pripojená najčastejšie na štandardnú zbernicu I²C, pomocou ktorej komunikuje s riadiacim mikroprocesorom. Tým je zabezpečený trvalý záznam údajov a nezávislosť týchto údajov od napájacieho napätia. Dataloger má byť prenosný, preto je nutné použiť ako napájací zdroj batérie. Pre dlhodobé merania je napájanie celého datalogera riadené pomocou obvodu RTC. Dosiahne sa tým dostatočne dlhá doba prevádzky na jednu sadu batérií, ktorá môže byť v niektorých prípadoch až 1 rok.



Obr. 1: Bloková schéma štandardného datalogera

Výber mikrokontroléra

Výber vhodného mikrokontroléra zohráva podstatnú úlohu pri návrhu a konštrukcii datalogera pre meranie fyzikálnych veličín. Nakoľko dataloger môže byť rôzneho vyhotovenia a môže byť umiestnený v rozličných prostrediach, je potrebné použiť mikroprocesor, ktorý vyhovuje daným požiadavkám. Z hľadiska napájania môžu byť datalogery napájané z batérie alebo zo sieťového zdroja. Závisí to od vyhotovenia a možnosti získať elektrickú energiu na napájanie datalogera. V miestach, kde je možná nepretržitá dodávka elektrickej energie je možné dataloger napájať z elektrickej siete. V takomto prípade nie sú kladené vysoké nároky na energetickú náročnosť, nakoľko celý mikroprocesorový systém je napájaný z elektrickej siete. Pri dodržaní niektorých podmienok je možné použiť na napájanie datalogera výhradne batérie. V takomto prípade môžu byť použité len prvky s nízkou energetickou náročnosťou. Počet prvkov v zapojení datalogera sa minimalizuje, čo pri súčasnom využívaní šetriacich režimov mikroprocesora umožňuje použiť batériové napájanie. S ohľadom na uvedené požiadavky bol zvolený mikroprocesor AT89C4051 od firmy ATMEL s nasledovnými parametrami: CISC inštrukčná sada, 8 bitové slovo, 4 kB pamäte programu FLASH, 128 B operačnej pamäte, taktovacia frekvencia max. 24 MHz, 15 portov, UART.

Výber obvodu hodín reálneho času

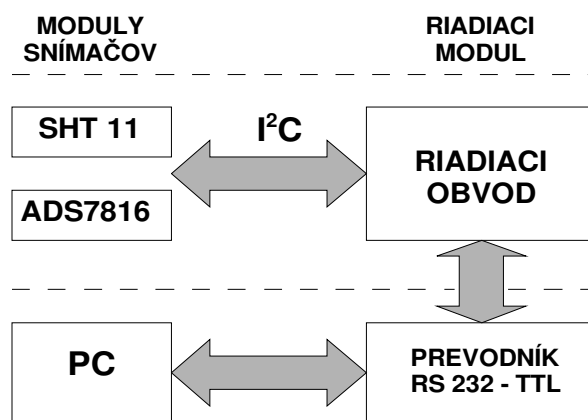
Aby bolo možné použiť dataloger v reálnych podmienkach, je nutné, aby bol údaj teploty sprevádzaný údajom o dátume a čase. Činnosť hodín reálneho času a dátumu je možné obslužiť aj samotným mikroprocesorom. Toto je ale neprípustne náročné na energetické zdroje datalogera a výrazne by to skomplikovalo vývoj potrebného obslužného software mikroprocesora. Z tohto dôvodu funkciu hodín reálneho času preberá externý integrovaný obvod, ktorý je pripojený prostredníctvom štandardnej sériovej zbernice typu I²C alebo zbernice 1-Wire. Energetická náročnosť týchto obvodov je nízka, čo umožňuje ich použitie v spolupráci s batériovým napájacím zdrojom datalogera. Tieto špeciálne integrované obvody majú aj mnohé iné funkcie, ktoré zjednodušujú konštrukciu subsystému reálneho dátumu a času. K týmto funkciám patrí aj alarm, ktorý umožňuje v nastavenom dátume, čase alebo v pravidelných časových intervaloch vyslať impulz pre ďalšie obvody. Pomocou tohto impulzu môže napríklad mikroprocesor vykonať akúkoľvek naplánovanú úlohu. V prípade datalogera by to znamenalo napríklad vykonať pravidelné meranie a zaznamenať namerané hodnoty do pamäte. Samotná funkcia integrovaného obvodu reálneho času je vždy programovateľná pomocou riadiacich príkazov, ktoré odosiela mikroprocesor a obvod reálneho času si tieto nastavenia uloží do interných pamäťových registrov. Týmto spôsobom sa obvod reálneho času nakonfiguruje podľa zvolených parametrov. Na účely terénnych meraní v širokom rozsahu časov merania je vhodné použiť integrovaný obvod **PCF 8583** od firmy PHILLIPS s týmito vlastnosťami: zbernica I²C, 24 hodinový a 12 hodinový časový mód, 32768 Hz alebo 50 Hz časová základňa, funkcie hodín s ročným kalendárom, možnosť nastavenia alarmov, pracovný prúd 50 μ A, rozsah napájacieho napätia 1 – 6 V, rozsah teplôt od 0 do 70 °C

Výber polovodičovej pamäte pre dataloger

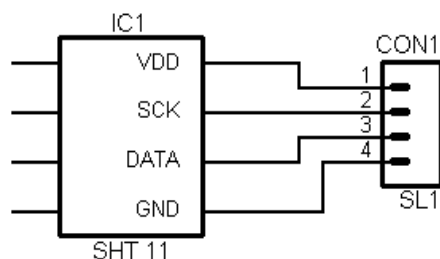
Sériové pamäte EEPROM sa vyrábajú v rôznych prevedeniach, líšia sa hlavne veľkosťou pamäťového priestoru a organizáciou dát. Ako vhodná pamäť sa javí typ *AT24C256* od firmy ATMEL. Uvedená pamäť má tieto technické údaje: veľkosť pamäťového priestoru 256 kB, organizácia dát 32 768 x 8 bit, rozsah napájacieho napätia od 2,7 do 5,5 V, I²C sériová zbernica, 5 ms zapisovací čas, 1000000 zapisovacích cyklov, výdrž dát 40 rokov, filtrované vstupy, 64B veľkosť stránky, podpora stránkovaného zápisu.

Výber snímačov pre meranie neelektrických veličín

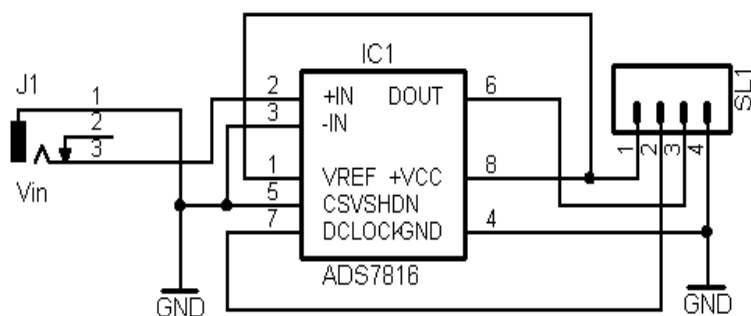
Výber snímačov pre meranie v terénnych podmienkach závisí od meraných fyzikálnych veličín. V terénnych podmienkach na účely poľnohospodárskych meraní sa najčastejšie meria vlhkosť a teplota. Pre meranie oboch uvedených veličín je možné použiť integrovaný obvod *SHT11* od firmy SENSIRION. Na meranie iných fyzikálnych veličín je možné tieto veličiny previesť na elektrické napätie a pomocou modulu A/D prevodníka s integrovaným obvodom *ADS7816* ich odmerať a zaznamenať datalogerom. Snímače sú vyhotovené ako moduly a pomocou zbernice I²C je ich možné pripojiť k riadiacemu modulu s mikroprocesorom. Riadiaci mikroprocesor identifikuje merací modul a dokáže ho jednoznačne rozlíšiť od ostatných na spoločnej zbernici. V praxi to znamená, že jednotlivé moduly je možné vzájomne kombinovať na spoločnej zbernici.



Obr. 2: Bloková schéma modulárneho datalogera



Obr. 3: Schéma modulu snímača teploty a vlhkosti s obvodom SHT11



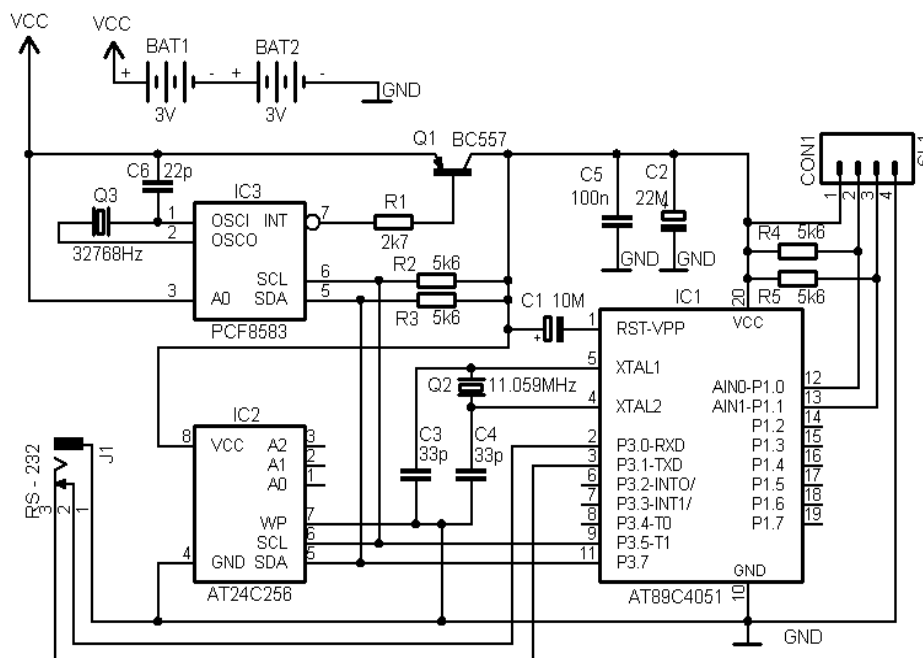
Obr. 4: Schéma modulu A/D prevodníku pre meranie elektrického napätia

Popis a schéma riadiaceho modulu s mikroprocesorom AT89C4051

Riadiaci obvod pozostáva z mikroprocesora IC1. Mikroprocesor je taktovaný pomocou kremenného kryštálu Q2 na frekvenciu 11,0592 MHz. Frekvencia je volená s ohľadom na komunikačnú rýchlosť štandardného sériového portu a má hodnotu 19200 b/s. Na konektor J1 sa pripája prevodník TTL → RS 232 osadený napríklad integrovaným obvodom MAX 232. Bipolárny výstup prevodníka je pripojený k sériovému portu počítača PC. Integrovaný obvod IC3 je trvalo pripojený na batérie BAT1 a BAT2. Ako etalón frekvencie používa hodinový kryštál Q3. Alarm vygenerovaný obvodom IC3 pomocou výstupu INT a tranzistora Q1 spôsobí pripojenie napájacieho napätia na všetky aktívne prvky modulu. Počas tejto doby sa vykonáva samotné meranie a záznam údajov do sériovej pamäti IC2. Integrované obvody IC2 a IC3 komunikujú s riadiacim mikroprocesorom IC1 pomocou internej zbernice I²C. Moduly snímačov a prevodníka sa pripájajú na konektor CON1 hlavného modulu. Na uvedený konektor je vyvedená externá zbernica I²C. V prípade potreby viacerých snímačov je možné ich pripojiť na uvedený konektor paralelne formou zbernice.

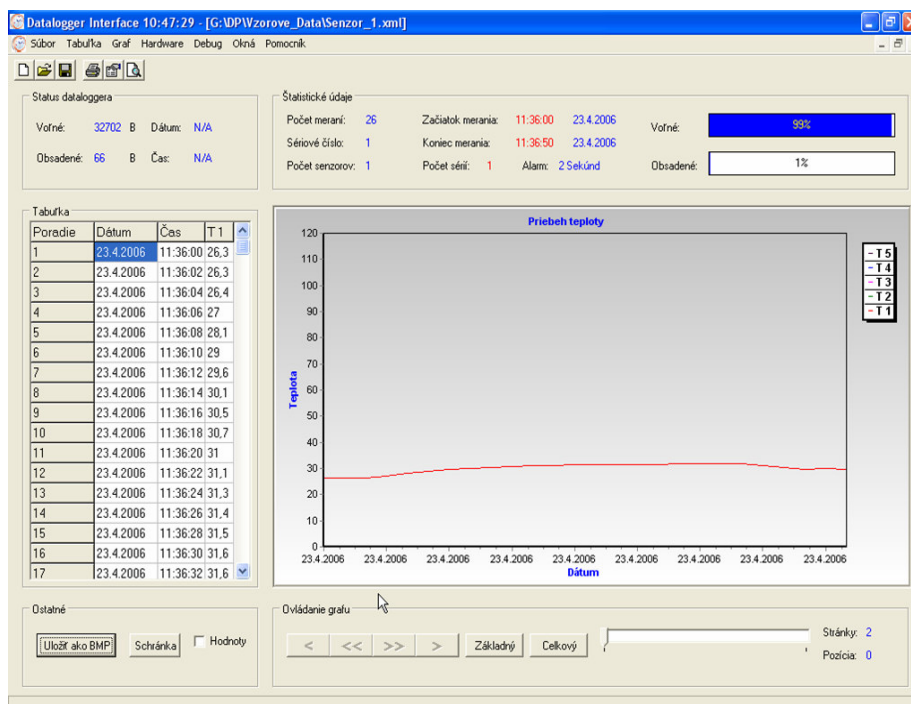
3. Výsledky a diskusia

Schéma riadiaceho modulu je na obr. 5. K výhodám uvedeného návrhu patrí modulárnosť, ktorá umožňuje prispôbiť snímače potrebám merania. Jednotlivé moduly je možné nezávisle kombinovať, pretože riadiaci modul pracuje s dátami v štandardnom formáte zbernice I²C.



Obr. 5: Schéma riadiaceho modulu

Programové vybavenie mikrokontroléra je napísané v jazyku C51 a odladené vo vývojovom systéme Keil. Na export dát z datalogera do PC vo formáte *txt* a *xls* slúži programové vybavenie, ktorého základné zobrazenie je na obr. 6.



Obr. 6: Programové vybavenie na export nameraných dát do PC

4. Záver

Modularita datalogerov je efektívnym riešením na účely terénneho merania v oblasti poľnohospodárstva. Jednotný systém riadiacich modulov je možné vhodne usporiadať, čím sa dosiahne vysoká pamäťová kapacita. To umožňuje merať na viacerých miestach a hodnoty centrálné zaznamenávať. Stúpa tým efektívnosť jednotlivých meraní. Celý systém je možné použiť hlavne pri vývoji datalogerov pre jednoúčelové merania. Modularita je v tomto prípade využitá len pri testovaní počas vývoja prototypu datalogera. Jednoduchosť celkovej koncepcie umožňuje použiť popisované moduly aj pre účely výučby, prípadne pre dlhodobé laboratórne merania.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol na základe riešenia projektu VEGA 1/4399/07 Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV.

Literatúra

- [1] LUKÁČ, O. 2005. Inteligentný snímač na meranie vlhkosti prostredia. In: Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie „Informačné a automatizačné technológie v riadení kvality produkcie“, Vernár-Slovenský raj, 2005. ISBN: 80-8069- 577-6, s. 39 – 42.
- [2] MATOUŠEK D. 2003. Udělejte si z PC v Delphi..., 1.díl. Praha: BEN, 2003, 272 s., ISBN 80-7300-111-X
- [3] ATMEL 2005 8-bit Microcontroller with 4K Bytes Flash., [online]. 2005 Dostupné na internete <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1001.pdf>
- [4] KAINKA B. 1999. Využití rozhraní PC. Ostrava: HEL, 1999, 133 s., ISBN 80 – 902059 – 3 – 3
- [5] KAINKA B. 2002. Využití rozhraní PC pod Windows. Ostrava: HEL, 2002, 152 s., ISBN 80-86167-13-5
- [6] MAXIM 2005 +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers [online]. 2005 Dostupné na internete <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>>
- [7] PEACOCK C. 2005 Interfacing the Serial / RS232 Port [online]. 2005 Dostupné na internete <<http://www.beyondlogic.org/serial/serial.htm>>
- [8] ŘEHÁK J. 1999 Ovladače v DELPHI pro RS 232 [online]. 1999 Dostupné na internete <<http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Software/ART670-Ovladace-v-DELPHI-pro-RS-232.html>>
- [9] STRANGIO C. 2006 The RS – 232 standard [online]. 2006 Dostupné na internete <http://www.camiresearch.com/Data Com Basics/RS232_standard.html>

APLIKÁCIA FOTOVOLTAICKÉHO SOLÁRNEHO SYSTÉMU V ZÁVLAHOVOM ZARIADENÍ

Dušan HRUBÝ, Pavol BYSTRIANSKY, Zuzana PALKOVÁ

Katedra elektrotechniky a automatizácie, MF SPU v Nitre, Tr.A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, SR
e-mail: pavol.bystriansky@uniag.sk, zuzana.palkova@uniag.sk

Abstrakt: Cieľom príspevku je ukázať možnosť využitia fotovoltaiiky ako jedného z obnoviteľných zdrojov energie v špecifickej aplikácii elektrického zdroja pre závlahové zariadenie. Cieľom práce je tiež zistiť efektívnosť využitia fotovoltaiických panelov v poľnohospodárstve, navrhnúť systém závlah napájaných fotovoltaiickým systémom a porovnať náklady na výstavbu fotovoltaiického zdroja a na vybudovanie prípojky pevnej elektrickej siete. Napokon je uvedené porovnanie prevádzkových nákladov v prípade fotovoltaiického zdroja a pevnej elektrickej prípojky, najmä z hľadiska náročnosti údržby.

Kľúčové slová: fotovoltaiický systém, závlahové zariadenie, kvapková závlaha, elektrická prípojka

1. Úvod

Rozšírenie aplikácií obnoviteľných zdrojov energie je v súčasnosti a v blízkej budúcnosti nutnosťou, vyplývajúcou najmä z ustanovení Kjótskeho protokolu, ktoré sú pre členské štáty Európskej únie záväzné. Globálne oteplenie a s ním súvisiace zmeny klimatických podmienok zvyrazňujú potrebu využívania závlah pri pestovaní mnohých poľnohospodárskych plodín, či na potravinárske, krmovinárske alebo energetické účely.

Nakoľko v našich zemepisných šírkach vzrastá dĺžka trvania slnečného svitu a teda rastie množstvo solárnej energie dopadajúcej na zemský povrch, stáva sa zaujímavou otázkou využitia solárnej energie v zavlažovacích systémoch.

Závlahy sú melioračné opatrenia, vykonané za účelom zavlaženia porastu vodou a zavlaženia prízemnej vrstvy vzduchu. Ich cieľom je dosiahnuť optimalizáciu produkčného systému pri získavaní stálych a vysokých úrod. Cieľom závlahy je pokryť vlhový deficit plodín v optimálnom zosúladení s inými intenzifikačnými faktormi.

Vlahová potreba vody pre rastliny je optimálne množstvo vody, ktoré rastliny potrebujú počas vegetačného obdobia na svoj rast, vývin a dosiahnutie úrody. Vlahovú potrebu si rastlina kryje zo zrážok a podzemnej vody. Ak tieto zdroje nepostačia, treba doplniť deficit doplnkovou závlahou, pričom dodané množstvo má názov závlahové množstvo.

Poznáme rôzne spôsoby a technické riešenia zavlažovania a závlahových systémov. Delia sa podľa viacerých kritérií, najmä čo sa týka smeru postupu vody do aktívnej vrstvy pôdy, podľa spôsobu, ako sa dostáva voda do zavlažovacieho prvku a tlakového spôsobu závlahy. Pri posúdení možností aplikácií fotovoltaiických systémov má najväčší význam energetická náročnosť jednotlivých spôsobov závlah. Z tohto parametra sa odvíja koncepcia a dimenzovanie vhodného fotovoltaiického elektrického zdroja pre závlahové zariadenia.

2. Materiál a metódy

Rozdelenie, spôsoby a technické riešenie závlah

V závislosti na smere postupu vody do aktívnej vrstvy pôdy rozdeľujeme závlahové systémy na:

- Podpovrchovú závlahu: drenážny podmok, bodová závlaha, regulačná drenáž.
- Povrchovú závlahu: závlaha výtopou, preronom, brázdovým podmokom, kvapková závlaha, závlaha postrekom.

Podľa spôsobu, ako sa dostáva voda do zavlažovacieho prvku:

- Gravitačný spôsob závlahy: voda sa k pôde dostáva voľne výtokom pomocou gravitačnej sily. Patrí sem závlaha výtopou, preronom, brázdovým podmokom, drenážnym podmokom, niekedy aj kvapková závlaha.
- Tlakový spôsob závlahy: voda sa dostáva k pôde pomocou umelo vytvoreného tlaku. Typickým tlakovým spôsobom závlahy je závlaha postrekom. Podľa tlakových pomerov môže mať tlakový charakter aj kvapková závlaha.

Pre zamýšľané uplatnenie fotovoltaických článkov ako zdroja elektrickej energie v závlaha je dôležité brať do úvahy ešte jedno kritérium, a to je *energetická náročnosť* závlah.

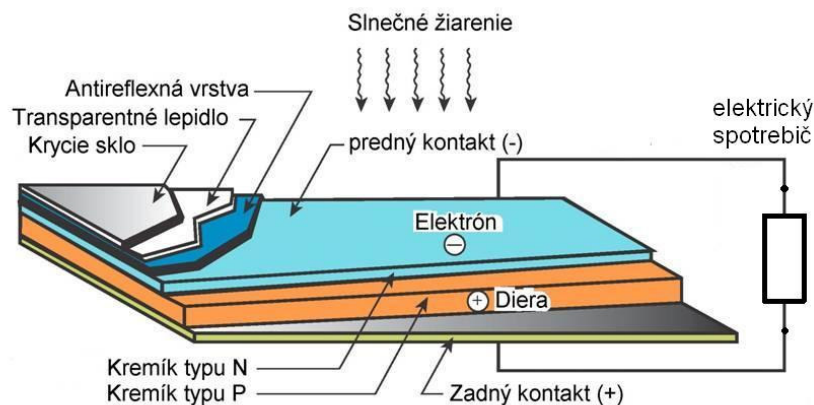
Spomedzi uvedených spôsobov je najnáročnejší tlakový spôsob závlahy *postrekom*. Pred ostatnými povrchovými závlahami má závlaha postrekom mnoho predností. Voda je pravidelne rozdelená po ploche v presne merateľnom množstve a je dobre prekysličená. Voda sa dodáva spôsobom, ktorý napodobňuje dažďové zrážky. Do závlahového potrubia sa dajú ľahko pridávať hnojivé roztoky, prípadne chemické ochranné látky. Ďalšou výhodou je ich univerzálne použitie pre všetky plodiny. K nevýhodám závlahy postrekom patria hlavne vyššie investičné náklady a najvyššia energetická náročnosť, ktorá vyplýva z nutnosti dostatočného výkonového dimenzovania čerpadiel na vytvorenie dostatočného pracovného tlaku (0,2 až 0,5 MPa a viac).

Naproti tomu využitím gravitačnej sily sa môže energetická náročnosť znížiť natoľko, že začína byť zaujímavé využitie fotovoltaických generátorov elektrickej energie v závlahových systémoch. Ako najpriateľnejšia sa javí *kvapková závlaha*. Je založená na povrchovom rozvode vody potrubím s malými priermi. Vytekanie vody sa zabezpečuje pomocou kvapkovačov napojených na potrubie, alebo priamo otvormi v potrubí. Voda je privádzaná priamo ku koreňovým systémom jednotlivých zavlažovaných rastlín.

Fotovoltaický systém a možnosti jeho využitia

Fotovoltaický článok premieňa energiu slnečného žiarenia priamo na elektrickú energiu. Technológia, ktorá bola pôvodne vyvinutá na zabezpečenie dodávok elektrickej energie vesmírnym družiciam, nachádza v súčasnom období mnoho terestriálnych aplikácií.

Elektrická energia sa vo fotovoltaickom článku vyrába na polovodičovom P-N priechode, ktorý je pri dopade slnečného žiarenia aktivovaný energiou fotónov. Situácia je vyobrazená na obrázku 1.



Obr. 1: Princíp činnosti fotovoltaického článku

Najpoužívanejším materiálom na výrobu článkov je v súčasnosti kremík. Až do r. 1981 bola používaná výlučne jeho monokryštalická forma hrúbky 250-350 nm, pričom maximálna účinnosť dosiahnutá s pomocou tohto polovodiča bola v roku 1992 asi 35,2 %. Neskôr sa objavili aj fotovoltaické články s polykryštalickým kremíkom hrúbky 150 nm. Účinnosť takýchto článkov sa pohybuje v rozmedzí 17-22 %, ale táto nevýhoda oproti monokryštalickým je vyvážená ekonomicky menšou náročnosťou výroby a teda i prijateľnejšou cenou pre spotrebiteľa.

Výhodnou náhradou oboch týchto foriem kremíka sa stal amorfný hydrogenizovaný kremík. Šírka zakázaného pásma okolo 1,7 eV, súčiniteľ absorpcie pre viditeľné svetlo je väčší ako 10^6 m^{-1} , čo znamená, že veľká časť dopadajúceho žiarenia sa pohltí už vo vrstve hrúbky 1 nm. Navyše je možné amorfný hydrogenizovaný kremík ľahko dopovať a legovať uhlíkom, dusíkom, cínom či germániom.

Fotovoltaické články sa montujú do fotovoltaických panelov (FVP), v ktorých sú navzájom poprepájané a chránené skleneným pokrytím. Čím väčšia je plocha FVP a intenzita žiarenia, tým väčší prúd nimi tečie. Výkon panelov sa vyjadruje hodnotou tzv. špičkového výkonu W_p , meraného pri štandardných podmienkach, t.j. pri intenzite slnečného žiarenia 1000 W.m^{-2} , nominálnej teplote $25 \text{ }^\circ\text{C}$, v slnečnom spektre AM1,5. Tieto podmienky sú u nás dosahované v čase, keď sa Slnko nachádza v najvyššom bode na oblohe v období letného slnovratu.

3. Výsledky a diskusia

Navrhnutá aplikácia závlahového zariadenia s fotovoltaickým elektrickým generátorom vychádza z výberu *kvapkovej závlahy* ako efektívneho spôsobu závlahy s malou spotrebou vody a energie. Je mimoriadne účinná a obľúbená v lokalitách s nedostatkom vodných zdrojov a pre rastliny vysádzané vo väčších sponoch. Kvapková závlaha je široko rozšírená v ovocných sadoch, plantážach drobného ovocia a jahôd, vo viniciach a chmeľniciach, na okrasných plochách, v poľnom pestovaní riadkových kultúr zeleniny, v skleníkoch, fóliovníkoch a pareniskách. Stále viac sa používa i pri závlaha okrasných záhrad a komunálnych plôch.

Technické riešenie kvapkovej závlahy

Navrhnutý závlahový systém kvapkovej závlahy sa skladá z týchto komponentov:

- zdroj vody (studňa)
- hlavná sústava, do ktorej patria čerpace zariadenie, regulátor tlaku a množstva vody, filtrácia vody, zariadenie na prihnojovanie a dávkovanie ochranných látok – dávkovacie zariadenie
- fotovoltaický generátor s riadiacou elektronikou
- zásobná nádrž načerpanej vody, prírodné a rozvodné potrubie s priemerom dimenzovaným na požadovaný prietok a dopravnú vzdialenosť
- zavlažovacie linky napojené na rozvodné potrubie položené paralelne v radoch rastlín
- výtokové zariadenia – kvapkovače

Schématické znázornenie navrhnutého komplexu je na obrázku 3.

Postup pri navrhovaní závlahovej sústavy, v ktorej ako zdroj elektrickej energie slúži fotovoltaický systém, zohľadňuje:

- ✚ zistenie množstva závlahovej vody ktoré potrebujeme na zavlažovanie
- ✚ výber vhodného závlahového systému – kvapková závlaha
- ✚ výber vodného zdroja
- ✚ návrh zásobnej nádrže
- ✚ výber čerpadla
- ✚ výpočet potrebného výkonu FVP

Dimenzovanie navrhnutého závlahového zariadenia

Z veľkosti zavlažovanej plochy a z potreby závlahovej vody pre danú plodinu určíme *množstvo závlahovej vody* M_{ZD} , ktoré je potrebné dodať do pôdy závlahovým systémom za jeden deň.

Na základe M_{ZD} určíme potrebný *objem zásobnej nádrže*, ktorý by mal pokrývať dennú spotrebu závlahovej vody. Výška dna nádrže nad terénom musí byť taká, aby bol dosiahnutý požadovaný tlak vody pre kvapkovú závlahu.

Voľba *čerpadla* vody vychádza z dopravnej výšky, ktoré musí čerpadlo prekonať. Dopravná výška je súčtom výšky nádrže a hĺbky, v akej je voda vo vodnom zdroji. Najvhodnejšie pre našu aplikáciu sú ponorné čerpadlá poháňané jednosmerným motorom, tzv. *solárne čerpadlá*. Do úvahy prichádzajú čerpadlá Grundfos typu SQ Flex s výkonom 900 W a pracovným napätím 30 až 300 V (www.grundfos.com, 2007) alebo čerpadlá spoločnosti Kyocera s výkonmi od 20 W do 140 W pri napätí 12 V až 30 V alebo od 140 W do 1000 W pri napätí 30 V až 120 V (www.kyocerasolar.com, 2007). Prietok čerpadiel závisí od dopravnej výšky.

Čas prevádzky čerpadla T_C za ktorý načerpá M_{ZD} sa vypočíta :

$$T_C = \frac{M_{ZD}}{Q_C} \quad (\text{hod}) \quad (1)$$

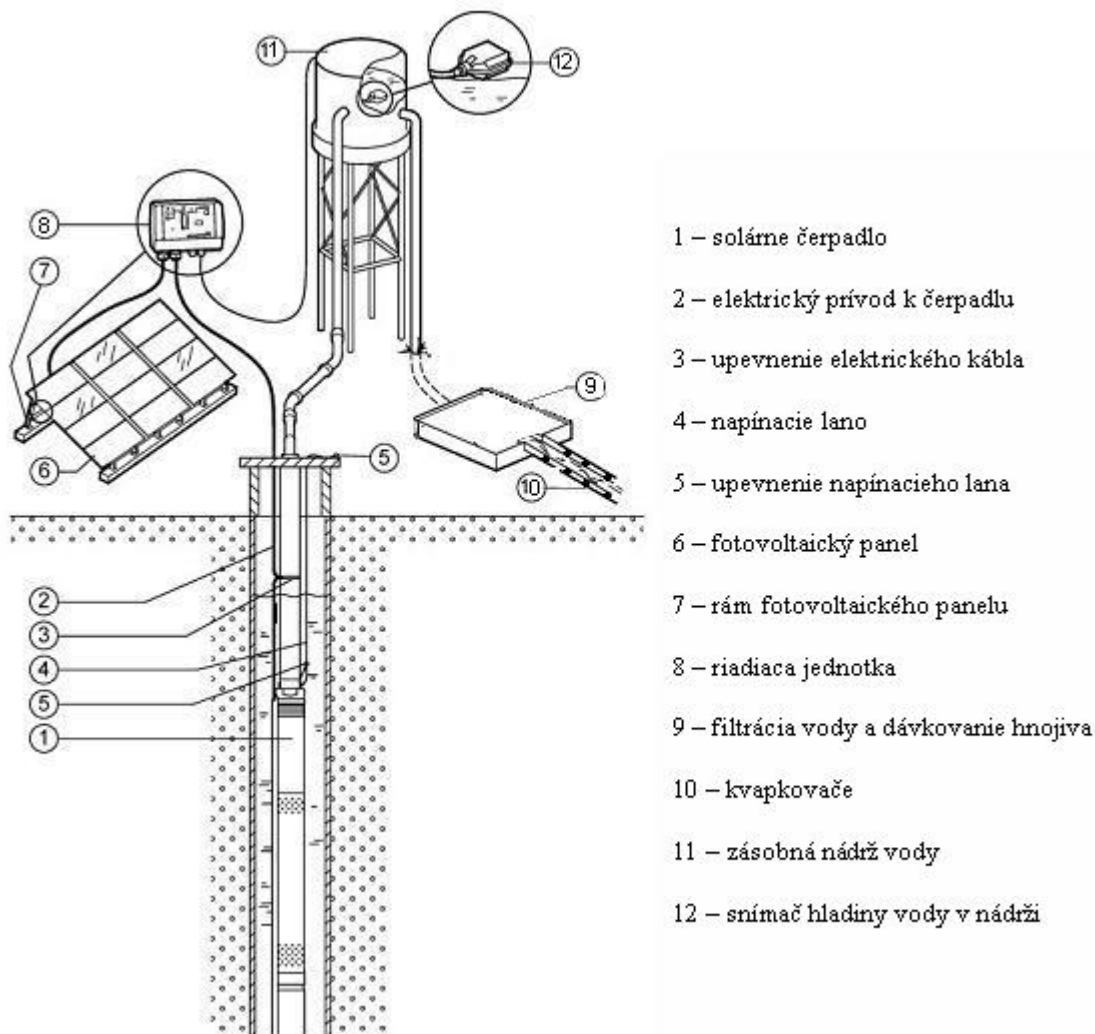
kde M_{ZD} – priemerná denná potreba vody počas zavlažovania (dm^3)

Q_C – prietok čerpadla ($\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

Elektrická energia spotrebovaná čerpadlom je:

$$E_C = T_C \cdot P_C \quad (\text{Wh}) \quad (2)$$

kde P_C – elektrický príkon použitého čerpadla (W)



Obr. 2: Kvapková závlaha s využitím fotovoltaičného systému

Potrebný elektrický výkon fotovoltaičného systému určíme nasledovne:

$$P_p = \frac{E_c}{E_p} \quad (W_p) \quad (3)$$

kde E_p - priemerné množstvo elektrickej energie získanej FVP s výkonom $1W_p$ za jeden deň počas obdobia zavlažovania (Wh). Hodnota E_p pre strednú Európu je približne 3,58 Wh pre obdobie máj až október (www.solartec.cz). Pre celoročnú prevádzku je hodnota $E_p = 2,72$ Wh

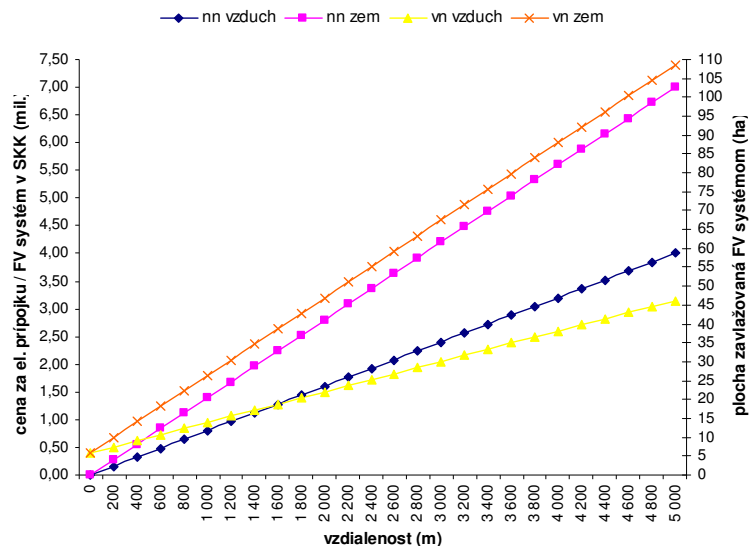
Celkový výkon použitých FVP musí zodpovedať výkonu použitých čerpadiel.

Ekonomické zhodnotenie navrhnutého závlahového zariadenia

Výška investičných nákladov navrhnutého závlahového zariadenia je najviac ovplyvnená cenou FVP, ktorá je v SR v súčasnosti ešte príliš vysoká aj kvôli zaostávaniu v uplatnení dotačnej politiky v praxi. Cena jedného FVP Solartec SST72-155 s výkonom 155W je 18 547Sk bez DPH. Podobne ceny solárnych čerpadiel sú pomerne vysoké. Celkovo je systém navrhnutý veľmi úsporne a nevyžaduje napr. použitie akumulátorov a elektrických striedačov, čo by viedlo k ďalšiemu zvýšeniu nákladov.

Prevádzkové náklady navrhnutého systému možno hodnotiť veľmi priaznivo najmä preto, že FVP nepotrebujú prakticky nijakú údržbu, okrem občasného vyčistenia od prachu.

Odôvodnené použitie FVP pri závlahách je v súčasnosti v tzv. ostrovej prevádzke v odľahlých lokalitách s veľkou vzdialenosťou od existujúcej elektrickej siete ako alternatíva ku klasickému riešeniu závlah. Na ilustráciu uvádzame cenové relácie na vybudovanie elektrickej prípojky vysokého napätia (vn) a nízkeho napätia (nn) formou vzdušného vedenia alebo podzemného kábla – obrázok 3.



Obr. 3: Cena realizácie elektrických prípojkov v závislosti na ich dĺžke a ploche, ktorú by bolo možné zavlažovať FV systémom za cenu ekvivalentnú cene prípojky

4. Záver

Cieľom príspevku bolo ukázať možnosti využitia solárnej energie v závlahových zariadeniach. Keďže závlahy sú pomerne náročné na množstvo energie a vody, náklady na solárny fotovoltaický systém aj pre najúspornejšiu kvapkovú závlahu vychádzajú veľmi vysoké. Napriek tomu práve využitie solárnej energie tu má svoju logiku a opodstatnenie, hoci v súčasnosti iba v ostrovných systémoch v takých lokalitách, ktoré sú vzdialené od existujúcej elektrickej siete (napr. vinice).

V budúcnosti sa dá očakávať zníženie cien FVP, priaznivejšia dotačná politika zo strany štátu a štedrá podpora takýchto aplikácií zo strany EÚ.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol na základe riešenia projektu VEGA 1/4399/07 Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV.

Literatúra

- [1] BOŽIKOVÁ, M. 2004. Measurement of Thermophysical Parameters by EDPS. In: Proceedings of 3rd International Workshop: Applied Physics in Life Science, Czech University of Agriculture, Prague, 22nd October 2004, Praha: Editpress, 2004, p. 4-7, ISBN 80-213-1257-2
- [2] PAP, M. 2005. Optimalizácia prietoku média v primárnom okruhu kombinovaného systému na ohrev TÚV. In: Sekel 2005: mezinárodní odborný seminář kateder zajišťujících výuku elektrotechnických předmětů na neelektrotechnických fakultách, - Elektronický konferenční zborník. – Zlín : Univerzita T. Bati ve Zlíne, 2005. - ISBN 80-7318-346-3
- [3] PAULOVICH, S. - MAKVA, M. 2005. Zariadenie na získavanie elektrických veličín obehového čerpadla slnečného kolektora. In: Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie „Informačné a automatizačné technológie v riadení kvality produkcie“, Vernár-Slovenský raj, 2005. ISBN: 80-8069-577-6, s. 96 –98.
- [4] SIMONÍK, J. - PALKOVÁ, Z. - OKENKA, I., 2004. Racionalizácia a modelovanie zavlažovania poľných plodín postrekom, monografia. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2004. – 169 s. : obr., tab. - ISBN 80-8069-380-3.
- [5] ŠIŠKA, B. – ČIMO, J. 2006. Klimatická charakteristika rokov 2004 a 2005 v Nitre. - 1. vyd.. - Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2006. - 50 s., 53 tab. - ISBN 80-8069-761-2
- [6] <http://www.solartec.cz>, 2007
- [7] <http://www.grundfos.com>, 2007
- [8] <http://www.kyocerasolar.com>, 2007

MODEL PASTERAČNÍ LINKY

Jan CHYSKÝ

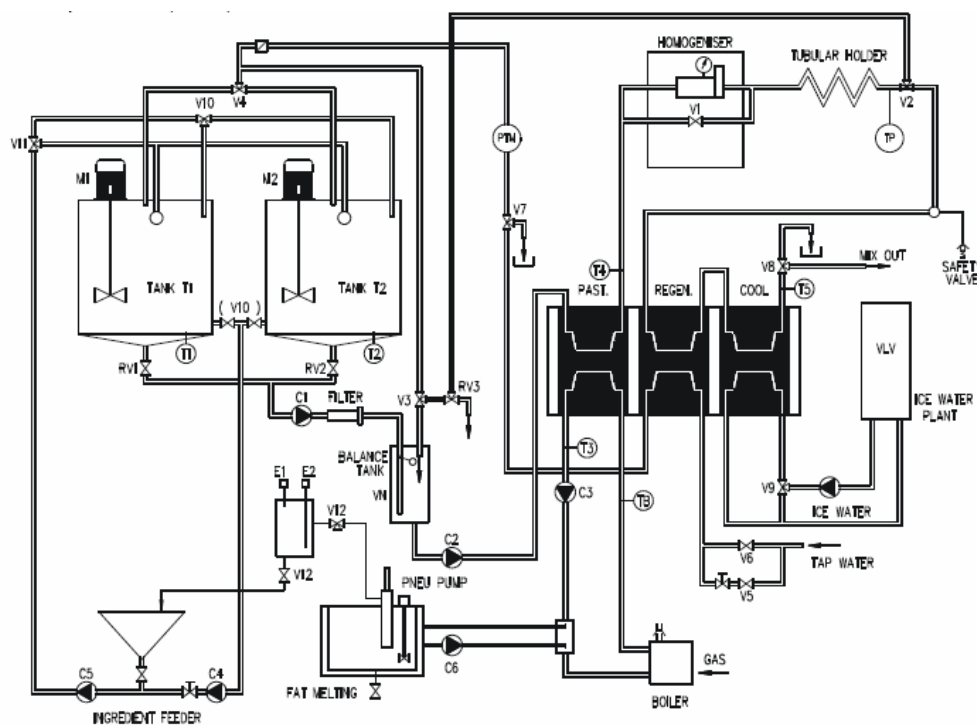
Ústav přístrojové a řídicí techniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

Abstrakt: V moderní potravinářské výrobě se často používají zařízení pro pasteraci různých potravinových směsí. S rozvojem nových technologií je klasický způsob pasterace zahřátím určitého objemu směsi v tanku na potřebnou teplotu po určitou dobu nahrazován kontinuálním způsobem ohřevu. Při tomto způsobu směs prochází výměníkem tepla, kde je zahřáta na pasterační teplotu, dále pokračuje do tzv. výdržníku, kde po stanovenou dobu zůstává na požadované teplotě a pak pokračuje k dalšímu zpracování. Následující příspěvek se zabývá vytvořením modelu kontinuálního procesu, který bude následně využíván pro návrh a nastavení regulace zdroje tepla pro primární stranu výměníku tepla.

Klíčová slova: Kontinuální pasterizace, deskový protiproudý výměník, řízení, simulace, Matlab, Simulink.

1. Úvod do problematiky

Efektivnost potravinářské výroby vyžaduje nahrazení dávkového způsobu výroby postupem kontinuálním. Je to dáno zejména zvyšujícími se požadavky na výkon zpracovatelských linek, zvyšováním kvality a v neposlední řadě i na snižování investičních a výrobních nákladů. Jednou z takových technologií je i pasterizace různých směsí kdy se potravinářská směs udržuje po stanovenou dobu na stanovené teplotě, aby se zničily všechny patogenní zárodky. Veřejnosti je proces pasterizace znám především z výroby mléka nebo piva avšak používá se i v jiných výrobcích. Při kontinuálním způsobu pasterizace je použit protiproudý výměník, ve kterém je pasterovaná směs ohřáta na požadovanou teplotu. Směs dále pokračuje do tzv. výdržníku, ve kterém zůstává po stanovenou dobu a dále pokračuje k následnému zpracování. Při zahřívání směsi ve výměníku je třeba dodržet přesné parametry teploty, protože při příliš nízké teplotě k pasteraci nedojde nebo je neúplná, při příliš vysoké teplotě dochází k znehodnocení směsi, případně k poruše výměníku vlivem napečení směsi na stěny výměníku. Dále popsany model tepelného hospodářství části výrobní linky pro výrobu zmrzlinové směsi vznikl za účelem nalezení vhodného typu regulátoru a jeho seřízení pro regulaci zdroje tepla pro primární okruh výměníku tepla.



Obr.1: Technologické schéma výrobní linky

Jako zdroj tepla se podle místních podmínek používají spojitě říditelné výměníky voda/voda, pára/voda nebo elektrické kotle, případně dvoustupňové plynové kotle. Výkon zdroje tepla a tím i výměníku se pohybuje řádově v desítkách kW, regulovaná pasterační teplota na výstupu výměníku je $85 \pm 1^\circ\text{C}$ při ořátí směsi o cca 30°C a průtoku tisíců litrů za hodinu.

Připravená směs přichází z míchacího tanku T1 nebo T2 viz obr. 1 do vyrovnávací nádrže VN odkud pokračuje do protiproudého deskového výměníku pasteru. Po ohřátí na pasterační teplotu pokračuje do homogenizátoru, ve kterém je pod vysokým tlakem protlačována tryskou, a pokračuje výdržníkem k výstupnímu trojcestnému ventilu V2. Pokud je dodržena pasterační teplota směs odchází do regeneračního výměníku, kde předává své teplo vodě, kterou je současně plněn druhý tank, ve kterém se připravuje další směs. Pokud pasterační teplota dodržena není, přepne ventil V2 a směs se vrací do vyrovnávací nádrže a k nové pasteraci. V procesu se měří vstupní a výstupní teplota promární topné vody, výstupní teplota z pasteru a výstupní teplota výdržníku.

Regulační obvodové schéma je na obr. 2. Z hlediska matematického popisu jednotlivých částí, která bude uveden dále lze systém v prvním přiblížení popsat bloky s přenosem 1. řádu s dopravním zpožděním, výjimkou je pak výdržník, který je soustavou s rozloženými parametry. Problém však nastává s regulací vzhledem ke značným dopravním zpožděním v systému, proměnným vlastnostem některých zdrojů tepla a vstupní teploty do pasteru z vyrovnávací nádrže.

2. Modely jednotlivých bloků

Pro sestavení modelů jednotlivých komponent se využívá tepelné bilance přívodu a odvodu tepla s uvažováním dominantní časové konstanty a zanedbání minoritních vlivů. Vychází se především z diferenciální rovnice pro akumulaci tepla Q v zařízení:

$$\frac{dQ}{dt} = mc \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad (1)$$

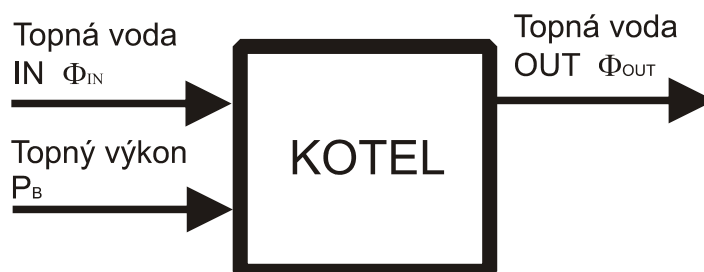
kde Q je akumulované teplo v kapalině
 m hmotnost kapaliny
 c měrné teplo kapaliny
 ϑ teplota kapaliny

a rovnice tepelného toku Φ :

$$\phi = \dot{m}c\vartheta(t) \quad (2)$$

kde Φ je tepelný tok
 \dot{m} hmotnostní průtok kapaliny
 c měrné teplo kapaliny
 ϑ teplota kapaliny

2.1 Kotel



Obr 2: Kotel

Tepelná bilance při zanedbání ztrát kotle a akumulace v tělese kotle je dle obr. 2 popsána následujícími rovnicí:

$$\frac{dQ}{dt} = \Phi_{IN} + P_B - \Phi_{OUT} \quad (3)$$

Po dosažení rovnic 1 a 2 do 3 dostaneme:

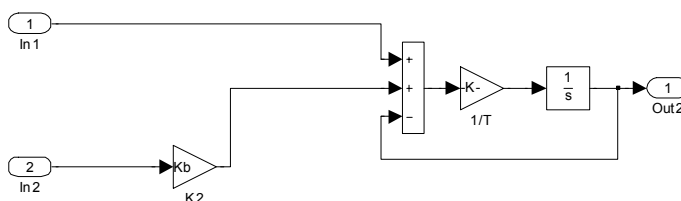
$$m_B c_W \frac{d\vartheta_{OUT}}{dt} = \dot{m}_{IN} c_W \vartheta_{IN}(t) + P_B - \dot{m}_{OUT} c_W \vartheta_{OUT}(t) \quad (4)$$

kde m_B je hmotnost vody v kotli
 ϑ_B je teplota vody v kotli

při konstantním průtoku vody kotlem $\dot{m}_{IN} = \dot{m}_{OUT}$ dostáváme po úpravě

$$\frac{m_B}{\dot{m}_{OUT}} \frac{d\vartheta_{OUT}}{dt} = \vartheta_{IN}(t) + \frac{P_B}{\dot{m}_{OUT} c_W} - \vartheta_{OUT}(t) \quad (5)$$

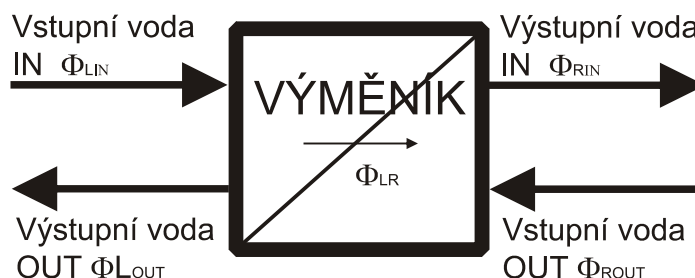
kde $T_B = \frac{m_B}{\dot{m}_{OUT}}$ je časová konstanta kotle a $K_B = \frac{P_B}{\dot{m}_{OUT} c_W}$ je zesílení akční veličiny



obr. 3: Model kotle

2.2 Výměník tepla

Pro sestavení modelu protiproudého výměníku tepla je výměník rozdělen na dvě samostatné části, z nichž je každá popsána samostatnou rovnicí tepelné bilance. Při sestavení rovnic byly opět zanedbány ztráty tepla do okolí a akumulace tepla v tělese výměníku.



Obr 4: Protiproudý výměník tepla

levá strana: $\frac{dQ_L}{dt} = \Phi_{LIN} - \Phi_{LR} - \Phi_{LOUT} \quad (6)$

pravá strana: $\frac{dQ_R}{dt} = \Phi_{RIN} + \Phi_{LR} - \Phi_{ROUT} \quad (7)$

kde tepelný tok Φ_{LR} udává tepelný tok mezi levou a pravou částí výměníku. Pro tento tok platí

$$\Phi_{LR} = K_v \Delta T \quad (8)$$

kde ΔT je tepelný spád. Při jeho určení lze použít různé aproximace, pro účely tohoto modelu byla použita aproximace podle středního aritmetického spádu dle [2]:

$$\Delta T = \frac{\vartheta_{LIN} - \vartheta_{RIN} + \vartheta_{LOUT} - \vartheta_{ROUT}}{2} \quad (9)$$

Po dosazení do vztahů 6 a 7 z 1, 2 a 9 a následné úpravě dostaneme:

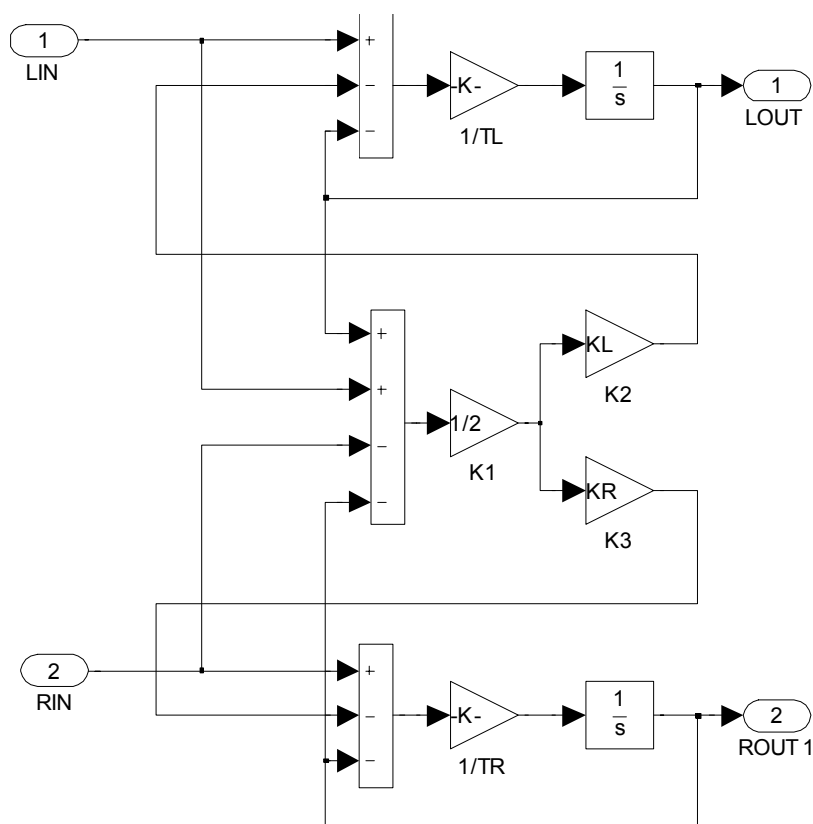
$$\frac{m_L}{\dot{m}_{LOUT}} \frac{d\vartheta_{LOUT}}{dt} = \vartheta_{LIN} - \vartheta_{LOUT} - \frac{K}{\dot{m}_{LOUT}c_w} \left(\frac{\vartheta_{LIN} - \vartheta_{RIN}}{2} + \frac{\vartheta_{LOUT} - \vartheta_{ROUT}}{2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{m_R}{\dot{m}_{ROUT}} \frac{d\vartheta_{ROUT}}{dt} = \vartheta_{RIN} - \vartheta_{ROUT} + \frac{K}{\dot{m}_{ROUT}c_m} \left(\frac{\vartheta_{LIN} - \vartheta_{RIN}}{2} + \frac{\vartheta_{LOUT} - \vartheta_{ROUT}}{2} \right) \quad (11)$$

kde $T_L = \frac{m_L}{\dot{m}_{LOUT}}$ a $T_R = \frac{m_R}{\dot{m}_{ROUT}}$ jsou časové konstanty levé a pravé části výměníku a

$K_L = \frac{K}{\dot{m}_{LOUT}c_w}$ a $K_R = \frac{K}{\dot{m}_{ROUT}c_m}$ jsou konstanty související s přestupem tepla ve výměníku

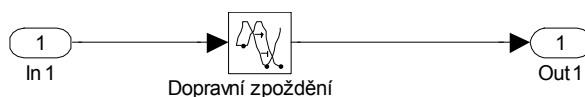
Model výměníku je na obr. 5



Obr. 5: Model protiproudého výměníku tepla

2.3 Výdržník

Výdržník je potrubí takové délky, aby pasterovaná směs, která jím prochází zůstala na teplotě pasterace. Jedná se tedy o systém s dopravním zpožděním a rozloženými parametry. Pro účely modelu je výdržník modelován čistým dopravním zpožděním. Pokud se ukáže nutnost zahrnout do modelu akumulaci tepla v potrubí bylo by možné výdržník nahradit několika seriově zapojenými systémy 1. řádu s dopravním zpožděním. Model výdržníku je na obr. 6.



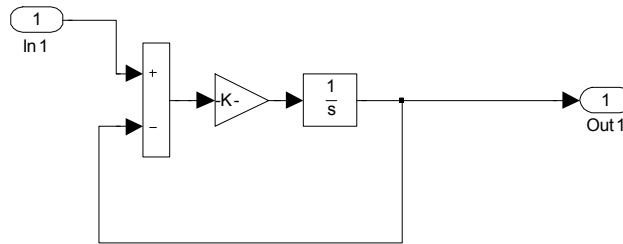
Obr. 6: Výdržník

2.4 Vyrovnávací nádrž

Vyrovnávací nádrž slouží pro vyrovnávání průtoků pasterované směsi a v případě nesplnění podmínek pasterace se do ní vrací nezpasterovaná směs k nové pasteraci. Jedná se o nádobu o objemu asi 70 litrů, di které je přiváděna směs buď z tanku nebo z ventilu V2. Jako model byl zvolen systém 1. řádu se statickým přenosem

rovným jedné a časovou konstantou $T_v = \frac{m_v}{\dot{m}_{ROUT}}$ popsany rovnicí:

$$\frac{m_v}{\dot{m}_{ROUT}} \frac{d\vartheta_{vOUT}}{dt} = \vartheta_{vIN} - \vartheta_{vOUT} \quad (12)$$



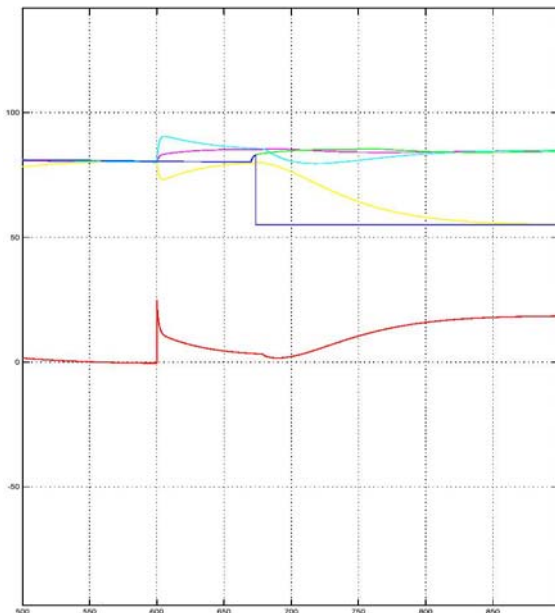
Obr. 7: Model vyrovnávací nádrže

3. Celkový model

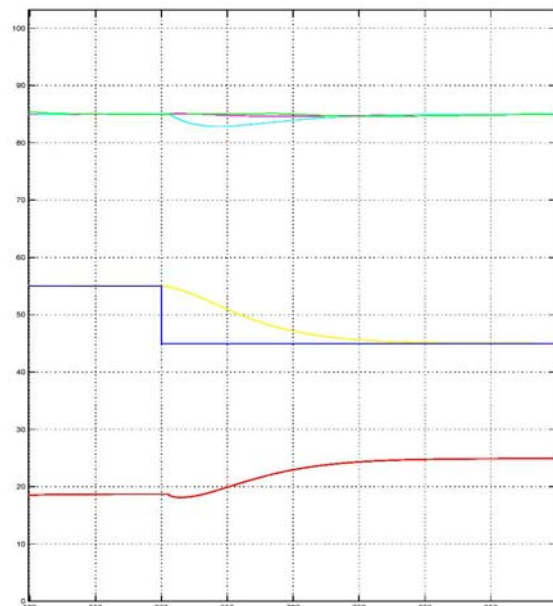
Na základě sestavených dílčích modelů byl sestaven celkový zjednodušený model pasterační linky vyobrazený na obrázku 10.

Pro odzkoušení chování byl model doplněn dvoupolohovým regulátorem pro ovládání nespojitě pracujícího plynového kotle. Konstanty použité v modelu byly stanoveny částečně ze znalosti fyzikálních parametrů jednotlivých bloků (objem vodní náplně kotle, výměníku tepla vyrovnávací nádrže, hmotnostní průtok pasterované směsi, příkon plynového kotle) částečně odvozeny z měření na pasterační lince případně odhadnutyna základě zkušenosti autora.

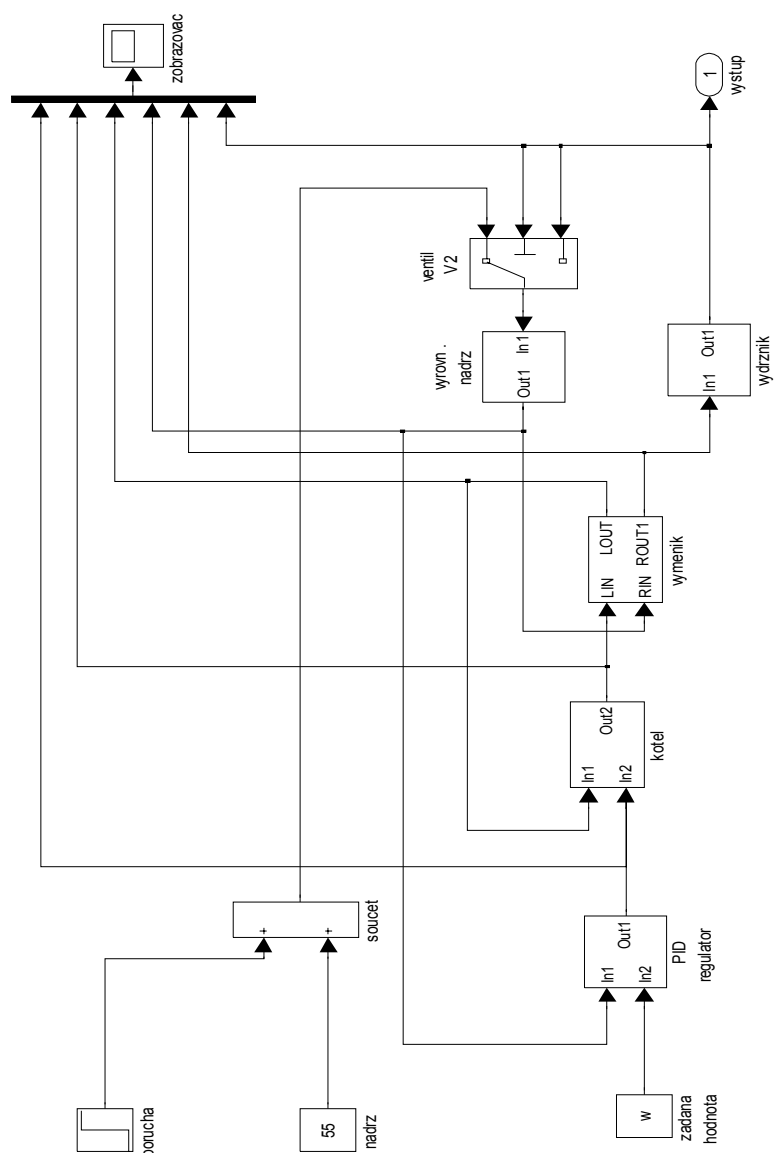
Průběh teplot jako odezva na skok žádané hodnoty z 80°C na 85°C získaných simulací na modelu je na obrázku 8. Fialová křivka udává průběh pasterační teploty, zelená průběh výstupní teploty, bleděmodrá výstupní teplotu z kotle a žlutá teplotu zpáteční vody do kotle. Odezva na skok poruchy -5°C je na obr 9.



Obr.: 8 Odezva na změnu žádané veličiny



Obr.: 9 Odezva na skok poruchy



Obr. 10: Celkové schéma modelu pasterační linky

4. Závěr

Vytvořený model celkem dobře odpovídá chování skutečné soustavy se spojitým PID regulátorem a je použitelné pro simulování chování soustavy v blízkosti pracovního bodu. V přechodových stavech, zejména při nabíhání regulace dává model rozdílné výsledky (ve smyslu regulace horší) od chování skutečné soustavy, což je způsobeno použitými zjednodušeními soustavy, především dalších časových článků, zanedbáním nelinearit a omezení daných možnostmi technologie. Otázkou také zůstává přesnost identifikace parametrů jednotlivých bloků, zejména výměníku tepla, jehož popis a zejména identifikaci parametrů bude třeba zpřesnit

Rovněž při simulaci soustavy s plynovým kotlem ovládaným dvoupolohovým regulátorem je odezva systému proti skutečnému zařízení rychlejší, což v některých případech vede k nestabilitě a rozkmitání soustavy, ke které ve skutečnosti dochází při jiných, horších pracovních podmínkách.

Z těchto důvodů bude třeba model dále doplnit o některé významné nelinearity a omezení a dále zpřesnit popis některých bloků, zejména zahrnout akumulaci tepla v tělesech kotle, výměníku a výdržníku.

Literatura

- [1] Šulc B., Vítečková M.: Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [2] Paulů K.: Řízení víceparametrové tepelné soustavy pomocí zpětných vazeb od stavových proměnných. Diplomová práce, ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2006
- [3] Kuneš J.: Modelování tepelných procesů, SNTL – TKI, Praha 1989.

HISTORICKÝ VÝVOJ A SÚČASNOSŤ JEDNOSMERNÉHO MOTORA

Ján KAŇUCH

FEI Technická univerzita, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika, E-mail: jan.kanuch@tuke.sk

Abstrakt: V tomto príspevku je popísaný historický vývoj jednosmerného stroja a ukázané jeho postupné zavádzanie do praxe, tak ako pohonného stroja, ako aj stroja na výrobu jednosmerného napätia. Na vývoji jednosmerného stroja sa podieľalo veľa vedcov, známych aj menej známych, a preto asi nenájdeme jednotlivca, o ktorom by sme mohli vyhlásiť, že práve on je vynálezcom jednosmerného stroja. Preto je tu rozobratý podiel jednotlivých vedcov, ktorí sa zaoberali vývojom a postupným zdokonaľovaním jednosmerného motora aj jednosmerného dynamu.

Kľúčové slová: jednosmerný stroj, motor, dynamo, generátor, magnetizmus.

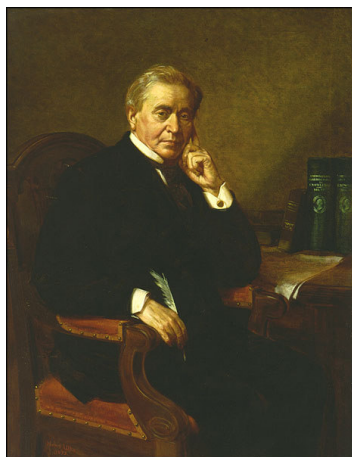
1 Úvod

Jednosmerný stroj prešiel dlhým vývojom a z tohoto pohľadu sa nedá presne určiť kto, kedy a ako vynášiel prvý jednosmerný motor, ktorý sa dal aj použiť na pohon, či prvý jednosmerný generátor (dynamo), ktorý bol použitý na výrobu jednosmerného napätia. Rôzni ľudia ho neustále vylepšovali, a tak postupom času aj priblížili tej dnešnej podobe. Asi nenájdeme jednotlivca, o ktorom by sme mohli s čistým svedomím vyhlásiť, že práve on je ten vynálezca jednosmerného stroja. Je to práca mnohých vedcov, známych i menej známych, a preto si všetci zaslúžia uznanie, že sa podieľali na jeho vývoji.

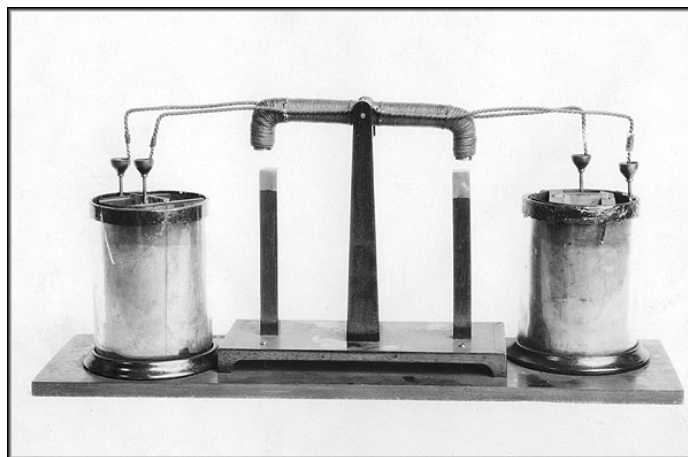
2 Historický vývoj jednosmerného stroja

Základom pre vývoj jednosmerných strojov, tak ako ich dnes poznáme, boli práce dvoch veľmi dobre známych vedcov. Michael Faraday (1791 - 1867) a Jozeph Henry (1797 - 1878) sa v prvej polovici devätnásteho storočia intenzívne venovali aplikáciám elektromagnetizmu v praxi a vytvorili tak veľmi dobré a pevné základy pre výskum a vývoj jednosmerných strojov.

Jozeph Henry svoj prvý článok o elektromagnetizme prezentoval už 10. októbra 1827 [1]. Potom sa venoval a skúmal praktické využitie elektromagnetizmu a elektromagnetov.



Obr.1: Jozeph Henry



Obr.2: Rekonštrukcia Henry-ho originálneho kmitavého elektromagnetického motora

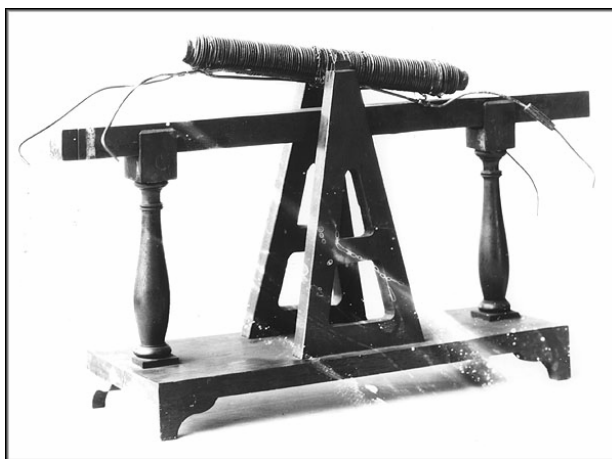
V lete roku 1831 Henry popísal jednu z aplikácií elektromagnetizmu (elektromagnetu) v krátkom článku „O vratnom pohybe vyrobenom magnetickou príťažlivosťou a odpudivosťou“ [2]. Bol to jednoduchý vynález (Obr. 2), kde pohybujúci sa diel bol priamy elektromagnet, kývajúci sa vo vodorovnej osi. Polarita prúdu v elektromagnete bola otáčaná automaticky pri jeho pohybe, keď dva páry vodičov vyčnievajúce z jeho koncov

sa striedavo pripájali na dva elektrochemické články. Dva zvislé permanentné magnety striedavo priťahovali a odpudzovali konce elektromagnetu, ktorý kmital hore-dolu 75 krát za minútu.

Henry v tomto čase považoval jeho malý stroj iba za „filozofickú hračku“, ale aj napriek tomu to bola prvá ukážka kontinuálneho pohybu vyrobeného magnetickou reakciou. Henry-ho stroj bol prvý zreteľný prípad jednoduchého motora schopného ďalšieho mechanického vývoja. Mal základy moderného jednosmerného motora: permanentný magnet vytváral budiace magnetické pole a elektromagnet plnil funkciu kotvy. Ale aj iní vynálezcovia neskôr vyvíjali motory rôznych konštrukcií založených na podobných vratných akciách, ale nie je jasné, či vedeli o Henry-ho stroji, alebo ich vytvárali nezávisle. V každom prípade, tieto motory sa nikdy nestali komerčne úspešné; pretože kontinuálny rotačný pohyb sa ukázal byť účinnejší a vhodnejší.

V novembri 1832 sa Henry odsťahoval z Albany do Princetону, v New Jersey, kde pokračoval v svojich pokusoch vždy, keď si našiel čas mimo výukových povinností. V roku 1834 požičal svoj stroj (jeho originál) svojmu spolupracovníkovi (Jacob Green, Filadelfia), ktorý ho chcel použiť pri svojej prednáške. V ich korešpondencii o tejto pôžičke Henry podotkol, že skonštruoval už novú verziu stroja na inom princípe (obr. 3), kde použil len jeden rovný magnet (na budenie).

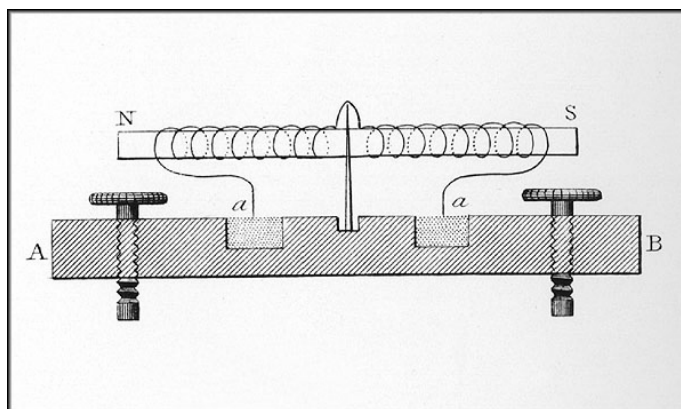
Miesto dvoch kolmých tyčových magnetov, pod elektromagnetom bol umiestnený jednodielny vodorovný tyčový magnet. Pri tejto konfigurácii, konce elektromagnetu musia mať dva rozdielne magnetické póly, sever a juh. V originálnom prístroji dva boli severné póly. Následkom tejto zmeny, štandardný elektromagnet by nekmital, pretože obidva konce by boli priťahované alebo odpudzované súčasne. Očividne presnú reprodukciu prístroja z Princetonu urobili v inštitúte Smithsonian, kde predpokladali, že Henryho elektromagnet je teda navinutý v opačnom smere od stredu ku koncom, čiže Henry vytvoril v podstate dva elektromagnety s koncami pri sebe, teda so súhlasnými pólmi v strede. No toto nebolo nikde popísané a ako dôkaz nám môže poslúžiť len samotný stroj. Pravdepodobne bola vytvorená aj iná verzia, kde bol použitý namiesto rovného, magnet v tvare „C“.



Obr.3: Henry-ho modifikovaný kmitavý elektromagnetický motor

V roku 1833, nie dlho po Henry-ho objave kmitavého elektromagnetu, Viliam Ritchie, kňaz, pedagóg, a výskumný pracovník v Anglicku, vynachádza spôsob, ako zrealizovať, aby sa elektromagnet otáčal plynulo [3]. Polarita napájacieho prúdu elektromagnetu sa mení dva krát počas jednej otáčky v dôsledku použitia jednoduchého ortuťového komutátora. Napájacie vodiče elektromagnetu sú ponorené do ortuti, ktorá je naliata v dvoch oddelených polkruhových žľaboch (Obr. 4).

Je nepravdepodobné, že Ritchie počul o Henry-ho stroji, preto sa môžeme domnievať, že Ritchie urobil návrh stroja samostatne. Napriek tomu, keď sa Henry dopytal o tom, tak ho podozrieval, že Ritchie videl ním objavený stroj. Aj potom v svojich poznámkach a korešpondencii často tvrdil o svojom prednostnom postavení. V roku 1840, napríklad popisoval pre americkú filozofickú spoločnosť ešte iný variant svojho stroja a z jeho poznámok bolo jasne cítiť, že je urazený, keď napísal, že Dr. Ritchie, z Londýna popísal a upravil jeho elektromagnetický motor vynájdený v roku 1831. Na obr 5 je zobrazený pokusný motor s miskou pre ortuťový komutátor, ktorý bol urobený podľa Ritchie-ho projektu.



Obr.4: Nákres Ritchie-ho rotačného elektro-magnetického motora

Ritchie-ho prístroj, tak ako aj Henry-ho, boli v podstate didaktické pomôcky so žiadnym praktickým použitím, okrem ukážky potvrdenia platnosti elektromagnetických zákonov a princípov. Zdá sa, že prvý výrobca učebných pomôcok a teda aj elektromagnetických prístrojov v Spojených štátoch, Daniel Davis z Bostonu, na začiatku ignoroval Henry-ho stroj. Až v r. 1838 v jeho katalógu je uvedený Ritchie-ho stroj a tiež aj podobný prístroj - „Rotačný magnet“ [4]. Ale v tomto prístroji, Ritchie-ho ortuťový komutátor bol vymenený za tzv. „pólový menič“, zhodný s dnešným komutátorom. Tento prístroj, ktorý sa najprv používal pre rôzne aplikácie, bol pomocou dvoch vodičov pripojený k pólom batérie a pracovný kontakt na otáčajúci sa hriadeľ bol urobený

cez dvojicu odizolovaných polovičných valcov. Každý pol-valec bol prispájkovaný k jednému koncu točiaceho sa elektromagnetu a takto bola menená polarita prúdu v elektromagnete pri každej pol otáčke.

Davis pripisoval túto vylepšenú verziu Ritchie-ho stroja Charles G. Page-mu, experimentátorovi a plodnému vynálezovi elektromagnetických prístrojov [5]. Davis ponúkal veľa jeho prístrojov aj na predaj. Dokonca v katalógu z r. 1848 Davis zmenil aj pomenovanie tohto stroja na „Točivý elektro-magnet“. Napriek tomu, aj keď Henry mal pocit nedostatku uznania pre jeho príspevok k rotujúcemu elektromagnetu, Davis-ova komerčná verzia bola práve druhom pôsobivého demonštračného zariadenia, ktoré Henry tiež použil pri vyučovaní a prednáškach.

Takže, keby sme to zhrnuli, tak tu v jednom prístroji sú včlenené príspevky niekoľkých elektrotechnických výskumníkov. Pokiaľ sa týka Henry-ho, Ritchie-ho, a Page-ho, možno by bolo spravodlivé povedať, že Henry bol prvý čo ukázal, ako by bolo možné automaticky meniť polaritu elektromagnetu a Ritchie ako prvý vyrobil otáčavý pohyb elektromagnetu, zatiaľ čo Page zaviedol do Ritchie-ho prístroja jednoduchý a efektívny komutátor, ktorý sa používa v modifikovanej podobe aj v súčasnosti.

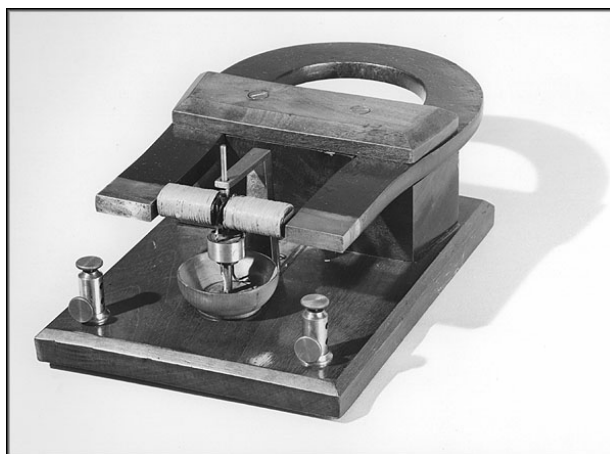
Michael Farraday (Obr. 6) sa tiež nemalou mierou pričínili o vývoj jednosmerného stroja. Jeho výskum v oblasti elektromagnetizmu a vynálezy elektromagnetických točivých zariadení tvorili základ výroby elektrického motora.

Počas svojich pokusov ešte v roku 1821 zistil, že elektrický prúd prechádzajúci vodičom, umiestnenom v magnetickom poli, môže vyvolať magnetickú silu. Čoskoro potom, ako dánsky fyzik a chemik, Hans Christian Oersted objavil jav elektromagnetizmu (1820), britskí vedci Humphry Davy a Viliam Hyde Wollaston urobili neúspešné pokusy, keď chceli zostrojiť elektromotor. Faraday, po diskusií s nimi o tomto probléme, pokračoval v stavbe zariadenia, ktoré vytváralo kontinuálny kruhový pohyb v dôsledku magnetickej sily pôsobiacej na vodič. Tento prístroj mal magnet, umiestnený vo vnútri a bol napojený na chemickú batériu pomocou nádržky s ortuťou. Neskoršie je tento prístroj známy ako „unipolárny motor“. Faraday publikoval svoje výsledky bez súhlasu Wollastona a Davy-ho, a spor medzi nimi bol príčinou toho, že Faraday zanechal elektromagnetický výskum na niekoľko rokov.

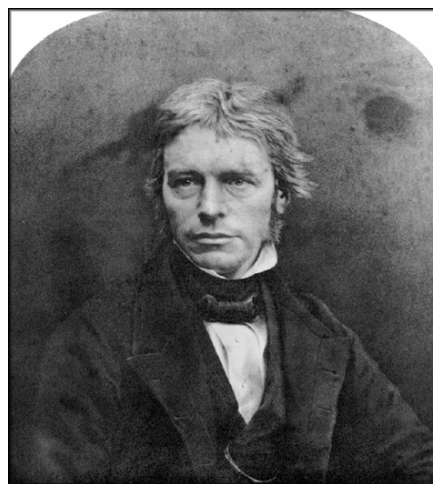
Keď potom pokračoval vo výskume, tak niekoľko rokov strávil snahou dokázať, že existuje aj opačná možnosť, aby pôsobenie magnetu vyvolalo elektrický prúd. V roku 1831 sa konečne dostavil úspech: Faraday objavil elektromagnetickú indukciu, magnetické a elektrické siločiarly a dokázal, že elektrina a magnetizmus sú len dva rôzne prejavy toho istého javu - elektromagnetizmu. To bol kľúčový objav, ktorý mal už čoskoro ďalekosiahle dôsledky. Jeho objav bol významný prevažne v tom, že doposiaľ sa elektrická energia vyrábala len chemickou cestou, z batérií a Faraday tak dal teoretický základ pre všetky dynamy a elektromotory.

Keď spomíname na vedcov, ktorí sa nemalou mierou pričínili o vývoj jednosmerného stroja, tak nemôžeme nespomenúť človeka slovenskej národnosti, ktorý pochádzal z chudobnej roľníckej rodiny, ktorá sa vysťahovala z Liptova do Zemného pri Komárne. Bol to PhDr. Štefan Anián Jedlík (1800 – 1895), ktorého ako neospevovaného hrdinu odborná verejnosť považujeme za otca jednosmerného dynamy.

Štefan Jedlík (Obr. 7) bol vynálezca, technik, prírodovedec, priekopník elektrotechniky, pedagóg a rímskokatolícky kňaz. Svojimi výsledkami najmä v oblasti skúmania elektromagnetických javov sa zaradil medzi najvýznamnejších vedcov 19. storočia. Obohatil vedu a techniku desiatkami vynálezov a zlepšení (niektoré pramene ich uvádzajú až osemdesiat), vynášiel nový typ kondenzátora, zaoberal sa tiež zdokonalením galvanických článkov. O svojich experimentoch len málo publikoval a väčšinu svojich prístrojov skonštruoval len ako demonštračné pomôcky, čím jeho objavy zostali väčšinou nepovšimnuté.



Obr.5: Pokusný motor podľa Ritchie-ho projektu



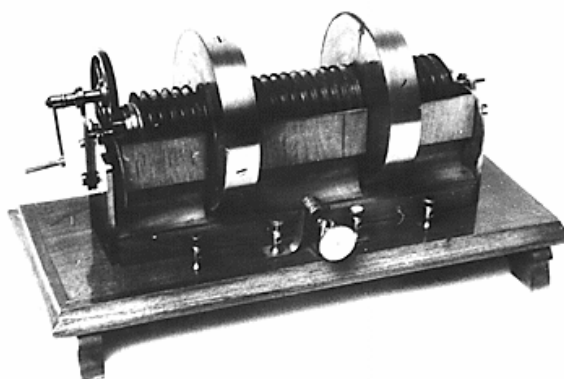
Obr.6: Michael Farraday (1849)



Obr.7: Štefan Jedlík

Dokázateľne už v r. 1827 – 1829, ako prvý na svete skonštruoval model elektromotora, v ktorom pevnú aj otáčajúcu sa časť tvorili elektromagnety. Jeho „elektromagnetický rotor“ bol priekopnícky aj v tom, že použil ortuťový komutátor. V r. 1842 použil podobný motor na pohon vozíka pohybujúceho sa na koľajniciach.

Najväčšie zásluhy si získal v období po roku 1850, kedy sa zaoberal hľadaním dokonalejšieho zdroja napätia (prípadne prúdu). Z tohto obdobia pochádza jeho najvýznamnejší vynález - prototyp dynamy (Obr. 8), ktorý však nepublikoval. Skonštruoval ho najmenej šesť rokov pred Wernerom Siemensom, ale svoj objav si nedal patentovať a tak v učebniciach fyziky a v encyklopédiách pri tomto vynáleze nie je uvedené jeho meno. V roku 1861 popísal a použil princíp samobudenia na dynamu vlastnej konštrukcie. Tu v podstate namiesto trvalých magnetov, použil dva opačné elektromagnety, ktoré vytvárali magnetické pole okolo rotora.



Obr. 8: Jedlíkovo dynamo

2.1 Chronológia vývoja a použitia jednosmerného generátora – dynamy

Obsahom tohto príspevku je vývoj jednosmerného motora, ale tento je úzko spätý a naväzuje na vývoj jednosmerného generátora. Preto aspoň v stručnosti uvediem chronológiu vývoja jednosmerného generátora.

V r. 1831 Faraday predviedol stroj na výrobu elektrického prúdu, využívajúci magnetoelektrickú indukciu. Prvé zverejnené dynamo zostrojil Hippolyte Pixii v Paríži na podnet Ampéra. Jeho model (Obr. 9) bol urobený v r. 1832 a tvorili ho dve cievky, pod ktorými sa otáčal magnet v tvare podkovy.

V cievkach sa indukovalo striedavé napätie, ktoré v tých časoch bolo považované za zbytočné a preto bolo usmernené prostredníctvom komutátora. Taktiež v roku 1832 skonštruoval podobný kmitajúci prístroj aj Dal Negro.

Po r. 1850 sa jednosmernými strojmi na výrobu napätia intenzívne zaoberal aj Štefan Jedlík.

V r. 1856 Werner von Siemens navrhol nový typ dynamy.

V r. 1861 použil Štefan Jedlík princíp samobudenia na dynamu vlastnej konštrukcie.

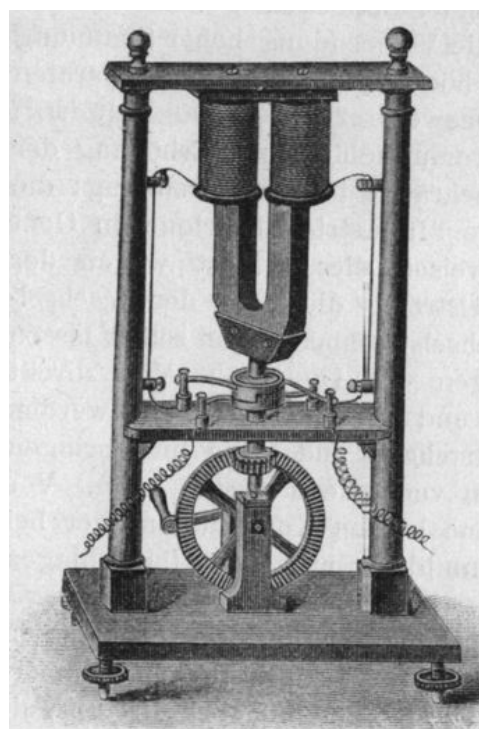
V r. 1867 Werner von Siemens zostrojil moderný dynamoelektrický stroj, kde namiesto trvalých magnetov použil elektromagnety. Zavádza tým do priemyselnej výroby svoje prvé použiteľné dynamo.

V Paríži na Akadémii vied v r. 1871 Zenobe Theophil Gramm demonštroval svoje dynamo.

V r. 1881 bola postavená prvá vodná elektráreň s jednosmerným dynamom.

V r. 1882 Edison nechal rozžiariť 5000 žiaroviek v New Yorku na jednosmerný prúd. Elektráreň mala štyri dynamá. Bola poháňaná parou a v New Yorku bola prvá. Štandardne z nej bolo napájaných 1000 žiaroviek, no tieto Edisonové žiarovky mali len krátku životnosť a navyše boli niekoľkokrát drahšie ako lampy na plyn. Elektráreň sa ale musela uzavrieť z dôvodu dymu a zápachu šíriaceho sa do mesta.

V r. 1891 sa rozhodlo v prospech prenosu striedavého napätia (presadil to hlavne Michail O. Dolivo Dobrovolski, ruský elektrotechnik, pracujúci v AEG, konštruktér prvého asynchrónneho motora) a do elektrárni sa začali inštalovať striedavé generátory. Ale využitie jednosmerných dynám týmto nekončí. Po ich postupnom vylepšovaní sa začali používať hlavne ako zdroje jednosmerného napätia. Najznámejšie a najvyužívanejšie bolo ich použitie vo Ward-Leonardovom sústorojení a donedávna sa používali aj ako zdroje jednosmerného napätia v automobilovom priemysle. Nie menej známe je využívanie derivačných dynám ako zdrojov pre zvracacie systémy a ako budičov pre synchronné generátory, kde sa používajú aj dnes.

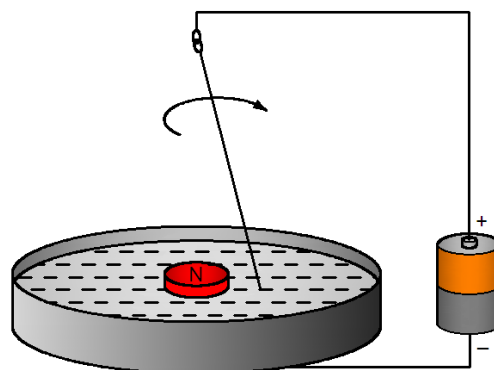


Obr. 9: Prvý krát zverejnené magneto-elektrické dynamo

2.1 Stručná chronológia vývoja a použitia jednosmerného motora

Hans Cristian Oersted a Andre Marie Ampere v r. 1820 objavili, že elektrický prúd vytvára magnetické pole. Ďalších 15 rokov pokusov a inovácií, do ktorých bolo zapojených niekoľko ľudí, viedli nakoniec ku výrobe jednoduchého jednosmerného točivého motora.

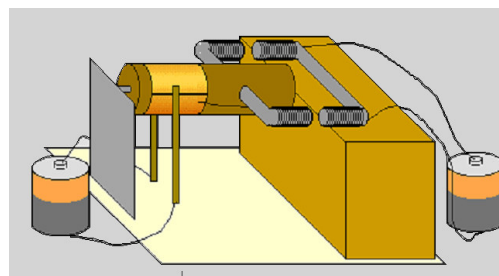
V októbri 1821 Michael Faraday jednoduchým pokusom ukázal, že vzájomným silovým pôsobením dvoch elektromagnetických polí je jednoduchý pohyb. Faraday do misy s ortuť umiestnil uprostred permanentný magnet. Nad týmto magnetom voľne visel pohyblivý drôt, ktorý bol tak dlhý, že voľný koniec drôtu bol ponorený do ortuti (Obr. 10). Keď zapojil akumulátor a vytvoril prúdový obvod, tak drôt krúžil okolo magnetu. Faraday potom zmenil usporiadanie, tentoraz bol zafixovaný drôt a magnet voľne visel. V tomto prípade sa zase magnet otáčal okolo drôtu. Toto bola prvá ukážka premeny elektrickej energie na pohyb a zásluhou toho je Faraday považovaný za vynálezcu prvého elektromotora. Ale treba mať na pamäti, že Faradayov elektromotor je skutočne vhodný len pre laboratórnu demonštráciu a nie je možné ho zaťažovať [6].



Obr. 10: Faradayov experiment

Trvalo až desať rokov, keď v lete 1831 Jozef Henry vylepšil Faradayov experimentálny motor. Henry postavil jednoduchý stroj, ktorého pohyblivý diel bol

priamy elektromagnet, ktorý sa kolísal vo vodorovnej osi a je podrobne popísaný v kapitole 2 (Obr. 2). Len rok po tom, čo Henry predviedol svoj „kmitavý motor“, Viliam Sturgeon (1783 – 1850, anglický fyzik a vynálezca) vynášiel komutátor (ktorý pravdepodobne o niekoľko rokov neskôr použil v svojom stroji aj Charles G. Page) a s tým teda aj prvý točivý elektromotor, ktorý je v mnohých rysoch podobný Henry-ho kmitavému motoru. Sturgeonov motor, bol síce zatiaľ veľmi jednoduchý, ale ako prvý vytvoril rotačný kontinuálny rotačný pohyb a obsahoval v podstate všetky základy moderného jednosmerného motora. Je potrebné si všimnúť, že v tomto motore sú použité dva elektromagnety v tvare podkovy, ktoré vytvárali konštantné a rotačné magnetické pole a na tomto základe mohol byť neskôr vyrobený jednosmerný motor s paralelným vinutím (budením).



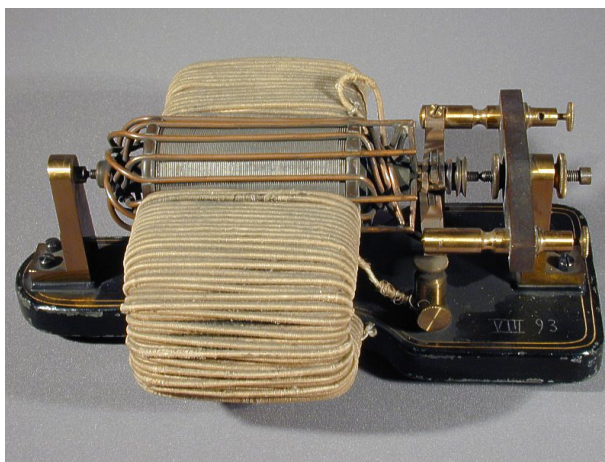
Obr. 11: Schematické zobrazenie Sturgeonovho DC motora s komutátorom

V r. 1832 Sturgeon prednášal v „Adelaide Gallery of Practical Science“ v Londýne, kde prvý krát predviedol svoj jednosmerný elektromotor s komutátorom.

V roku 1833 Viliam Ritchie, pravdepodobne nevediac o Sturgeonovom motore, publikuje svoj plynulo otáčajúci sa elektromagnet využívajúci jednoduchý ortuťový komutátor (podrobnejšie je to popísané v kap 2).

Prvý patent na elektromotor v Amerike bol podaný v r. 1837. Podnikateľ Daniel Davis z Bostonu, výrobca učebných pomôcok v Spojených štátoch, už v r. 1838 ponúka „Rotačný magnet“. Je to v podstate Ritchie-ho stroj s klasickým komutátorom, ako ho poznáme dnes. Potom Daniel Davis vo svojom katalógu z r. 1848 ponúka na predaj podobný stroj pod názvom „Točivý elektromagnet“ a túto vylepšenú verziu Ritchie-ho stroja (kap. 2, Obr. 5). pripisoval Charles G. Page-mu.

Vývoj a výroba jednosmerného motora a jeho zavádzanie do priemyslu, ako pohonného motora, je v Európe bezprostredne spojená s menom Werner von Siemens. V r. 1856 Siemens vynášiel tzv. „H-kotvu“. Prvá elektrická železnica bola predvedená na berlínskom veľtrhu už v r. 1879 a prvá električka na svete bola predstavená firmou Siemens v r. 1881. Pre veľmi jednoduchú reguláciu rýchlosti sa jednosmerné motory začali používať na regulované pohony v textilnej výrobe.



Obr. 12: Model jednosmerného motora podľa Siemensa

Menej známym konštruktérom jednosmerného motora (Obr. 13) je aj puškár a mechanik Johann Kravogl (*1823 Lana - Ansitz Rosengarten – južné Tirolsko; † Brixen) [7].



Obr. 13: Model Kravogl-ovho elektromotora



Obr. 14: Model Gramm-ovho elektromotora

Na tomto mieste sa patrí pripomenúť si aj takého vynálezcu, akým bol belgický modelár a konštruktér Zenobe Theophil Gram (*1826, Lutych; †1901, Boios-Colombes). Gram, mimo iného, že v r. 1869 zostrojil jednosmerné dymano, tak v roku 1873 náhodne objavil prvý prakticky použiteľný jednosmerný motor, keď prišiel na to, že z jednosmerného dynama sa veľmi jednoduchým spôsobom dá urobiť pohonný jednosmerný motor. Pri jednom pokuse vodivo spojil roztočené dynamo s druhým stojacim dynamom, z ktorého sa takto stal jednosmerný motor. Model grammovho jednosmerného motora [8] je na obr. 14.

Keď sme spomínali, že v Európe sa firma Siemens veľmi veľkou mierou pričínala o to, že sa v priemysle ako pohonný stroj začal používať jednosmerný motor, tak v Amerike to bola firma TECO-Westinghouse [9]. Spoločnosť TECO-Westinghouse Motor má dlhú históriu v prípade dodávky jednosmerných motorov na severoamerický trh. História tejto firmy je spätá s Geogre Westinghousom, ktorý v r. 1888 predstavil prvý komerčný jednosmerný motor.

Úspechy tejto firmy v zdokonaľovaní konštrukcie, vo výrobe a inštalácii jednosmerných motorov boli viditeľné hlavne v oceliarskom a banskom priemysle. V r. 1891 Westinghouse inštaloval prvý jednosmerný elektromotor v americkej oceliarni. Ďalším úspechom bol v r. 1905 inštalovaný prvý reverzujúci elektrický pohon valcovacej stolice (Obr. 14). Táto firma nainštalovala aj prvý reverzačný mlynský pohon a potom aj prvý veľký zdvojený motor, tiež pre reverzačný mlynský pohon.

Dalej si uvedieme, okrem niekoľko ďalších, aspoň dva veľmi významné úspechov tejto firmy v banskom priemysle:

- prvé použitie cudzo budeného jednosmerného motora,
- prvé použitie Ward-Leonardovho sústrojenstva.

Neustále zdokonaľovanie jednosmerného motora malo za následok to, že motory boli stále kvalitnejšie a týmto si firma zabezpečila vedúce postavenie v rámci trhu nielen doma, ale i v zahraničí. Motory, vyrábané v rozsahu výkonov od niekoľko watov až do niekoľko 100 kW, boli používané na pohon ventilátorov, kompresorov, valcovacích stolíc, brúsiek, drvičov a v množstve iných náročných aplikáciách. Boli využívané v ropnom, chemickom, mlynárskom, papierienskom, banskom, lodiarskom, oceliarskom a iných priemyselných odvetviach po celom svete.

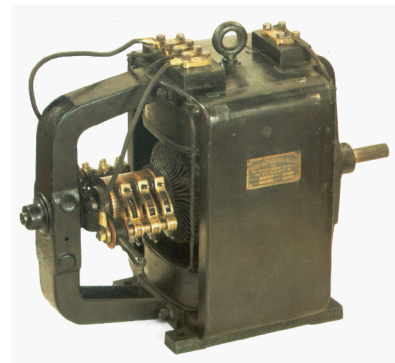
V Európe už v r. 1898 talianska firma S.E.I. ("Società Elettrotecnica Italiana", jedna z prvých v Taliansku sa zaoberala konštrukciou elektrických strojov) z Torina [10] uviedla na trh jednosmerný motor na napätie 110 V a 1100 ot./min. (Obr. 15).

Ďalší vývoj a zdokonaľovanie jednosmerného motora je už pomerne známe a prebiehal súbežne s vývojom striedavého asynchrónneho motora, ktorý bol vynútený striedavým rozvodom elektrickej energie.

Jednosmerný motor bol pomerne rýchlo vylepšený a do konca 19. storočia našiel veľmi široké využitie. Výrobou jednosmerného motora sa zaoberalo podstatne viac firiem, ktoré pre rozsah tohto príspevku neboli vymenované. Ale toto nebolo ani mojím cieľom. Časom však, ako bolo spomenuté vyššie, sa ale rozšíril



Obr. 14: Prvý reverzujúci motor pre valcovňu plechu



Obr. 14: DC motor od firmy. S.E.I

striedavý systém napájania a tým popularita a využitie jednosmerného motora poklesli. A je známe aj to, že striedavý indukčný motor bol oveľa lacnejší a menej nákladný na údržbu. Ale ani tento fakt neovplyvnil skutočnosť, aby sa úplne prestalo z vývojom a využitím jednosmerného motora.

3 Jednosmerný motor a súčasnosť

V súčasnosti, okrem hromadného nasadzovania regulovaných pohonov s asynchrónnymi motormi, ktoré sú riadené meničmi, majú veľmi široké uplatnenie aj pohony s jednosmernými motormi. Je ešte veľa oblastí priemyslu, kde sú pohony s jednosmernými motormi nenahraditeľné a sú stále využívané. V poslednom čase sa jednosmerné motory pre ich zvlášť vysoký rozbegový moment a jednoduchú reguláciu otáčok začali využívať v pohonoch, kde je požadované presné riadenie rýchlosti a polohy. Tomuto procesu veľmi pomohol aj vývoj nových počítačových riadiacich systémov.

3.1 Konštrukčné odlišnosti súčasných jednosmerných motorov

Z konštrukčného hľadiska môžeme súčasné jednosmerné motory rozdeliť do dvoch základných skupín:

- klasické jednosmerné motory,
- diskové jednosmerné motory.

Pre porovnanie, klasický rotor a diskový rotor jednosmerných motorov sú zobrazené na obrázku 15.

Podľa spôsobu komutácie prúdu delíme jednosmerné motory na:

- kefové jednosmerné motory s klasickým mechanickým komutátorom,
- bezkefové jednosmerné motory s elektronickou komutáciou.

Podľa spôsobu budenia môžeme rozdeliť jednosmerné motory na:

- jednosmerné motory s budiacim vinutím,
- jednosmerné motory s buđením permanentným magnetom.

Je veľa aplikácií, kde nám na pohon postačuje klasický komutátorový jednosmerný motor a v prípade, ak je požiadavka na nízke otáčky, tak výrobcovia majú v ponuke tieto motory aj priamo z prevodovkou. V prevažnej väčšine sa tieto motorčeky vyrábajú pre napájanie zníženým napätím a s výkonom od jednotiek wattov do niekoľko kW. Ďalšiu významnú skupinu tvoria jednosmerné sériové motory s veľkým výkonom, ktoré majú široké uplatnenie v trakkii.

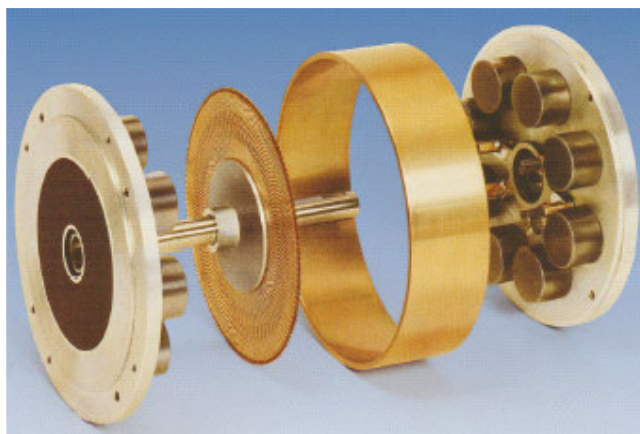
V súčasnosti sa v pohonoch náročných na dynamiku rotora využíva celá skupina strojov, ktoré majú tú vlastnosť, že vzduchová medzera je kolmo na os rotora, čiže sú to stroje, v ktorých magnetický tok pôsobí axiálnym smerom. Môžeme ich nazvať stroje s axiálnym magnetickým tokom. Rotor týchto strojov sa vyrába v tvare disku. Z tohoto dôvodu sa v technickej praxi zaviedol pojem "diskové motory". Spravidla pre zväčšení momentu majú obojstranný stator, čím sa vzduchová medzera delí na dve časti, čo zvyšuje konštrukčnú náročnosť aj z hľadiska presnosti jeho výroby a uloženia rotora (Obr. 16). Na tieto motory je veľmi často kladená požiadavka, aby poloha rotora bola s čo najväčšou presnosťou definovaná a aby ju rotor mohol zaujať s čo najväčšou rýchlosťou. Táto požiadavka kladie vysoké nároky na riadenie týchto motorov a preto sa ich vývoj začal až s rozvojom elektronického riadenia

Jedným z predstaviteľov tejto skupiny je jednosmerný motor SERVALCO firmy Société d'Electronique et d'Automatisme (S.E.A), Courbevoie (Francúzsko) [11] Tieto motory boli vyvinuté pre výkony 12 až 2500 W a majú otáčky od 2000 až do 6000 ot./min. Firma BBC vyrába diskové motory s výkonom od 400 W do 9000 W a nominálne otáčky sú 3000 ot./min [12].

Motory s diskovou drôtovou kotvou vyrába firma INFRANOR [13] (Švajčiarsko, Španielsko, Nemecko). Výkony týchto motorov dosahujú až 13000 W pri nominálnych otáčkach 3000 ot./min. Maximálny impulzný moment dosahuje až 340 N.m. Maximálna rýchlosť týchto motorov môže byť až 9000 ot./min. Vysoký pomer



Obr. 15: Klasický a diskový rotor JS motora



Obr. 16: Jednosmerný diskový motor

krútiaceho momentu k momentu zotrvačnosti a široká plynulá regulácia rýchlosti predurčuje MAVILOR motor na jeho použitie i pre náročné aplikácie. Rad MAVILOR DC motorov série MS (Obr. 17) je dodávaný v celku spolu so snímačom rýchlosti a poruchovou bezpečnostnou brzdou, pričom jeho dĺžka je polovičná v porovnaní s ekvivalentným klasickým pohonom tých istých menovitých parametrov a zloženého zo samostatných častí.

Špeciálna, drôtová medená kotva majúca tvar disku, je zaliata v epoxide čo zaručuje jej vysokú spoľahlivosť a dobrú tepelnú odolnosť. Disková kotva tohoto motora vyhovuje najmä pre veľmi dynamické servopohony. Motor sa môže dodávať podľa želania zákazníka aj s pevne namontovanou prevodovkou.

Firma Infranor vyvinula nový MAVILOR DC Servomotor so zlepšenými vlastnosťami [14]. Tento motor sa vyznačuje 20% zvýšením pomeru výkonu k hmotnosti a objemu a 20% zvýšením výkonu a akceleračnej schopnosti voči predchádzajúcim motorom. Tieto motory sa používajú pre servopohony s vysokou reakčnou schopnosťou pri zachovaní vyššie uvedených vlastností.

Príkladom výhod diskových motorov je Kollmorgen ServoDisc™ motor [15]. Ten obsahuje neželezný kompaktný plochý diskový rotor, na rozdiel od bežnej valcovej kotvy, ktorá je zložená z elektrotechnických plechov. Výsledkom toho je, že diskový rotor tohoto motora má nízku indukčnosť a oveľa lepšie elektromagnetické charakteristiky. ServoDisc™ motor má oveľa nižšiu zotrvačnosť ako bežný DC motor.

V súčasnosti jednosmerné motory menších výkonov majú na statore, na vytvorenie budiaceho toku, permanentný magnet (PM) a rotor má vinutie s komutátorom (klasická komutácia). Budenie permanentným magnetom sa využíva tak pri klasickom prevedení motora (Obr. 18), ako aj pri prevedení s diskovou kotvou (Obr. 16).

V bezkefovom jednosmernom motore (Obr. 19), rotor obsahuje permanentné magnety a vinutie je na statore. V tomto prípade, komutácia je zrealizovaná elektronicky, v napájacom zdroji, ktorý používa polovodičové spínače k zmene elektrického prúdu vo vinutiach, pričom sa využíva informácia o polohe rotora získavaná pomocou spätnej väzby zo snímača polohy, ktorý je súčasťou motora.



Obr. 17: Mavilor DC kefový servo motor typ MS



Obr. 18: JS motor s PM na statore, komutátorom a držiakom kef.



Obr. 19: JS motor s PM na rotore, vinutým statorom a snímačom pre polohovú spätnú väzbu

3.2 Bezkefové jednosmerné motory

Bezkefové jednosmerné (BLDC) motory sa za posledných niekoľko rokov začali používať v mnohých aplikáciách. Zdokonalenia v technológii výroby, zlepšenia vlastností magnetov a pokrok a vylepšenia v riadiacej elektronike, spolu s investíciami výrobcov do výroby bezkefových motorov, znížili ich ceny. Výsledkom toho je, že BLDC motory sú použité v širokom okruhu cenovo citlivých aplikáciách, ako sú napr. automobily, prístroje, tlačiarne, súradnicové zapisovače, počítačové periférne zariadenia, šijacie stroje a pod.

Elektronická komutácia (EC) bezkefových motorov eliminuje jeden z hlavných nedostatkov kefových motorov, ktorým je údržba a náhrada opotrebovaných kef a komutátora. Odstránenie kef tiež znižuje hluk a motory majú vyššiu spoľahlivosť, čím sa znížia náklady na ich údržbu. Ďalšou výhodou týchto motorov je lepší odvod stratového tepla, pretože vinutia sú umiestnené na statore a tiež rotor s PM má zníženú zotrvačnosť oproti komutátorovej kotve z elektrotechnických plechov. Nakoniec, bezkefové motory môžu vytvárať väčší špičkový výkon, pretože nemajú komutáciu, ktorá je obmedzovaná mechanickým spínaním (kefa/komutátor), ktorého výsledkom je nadmerné iskrenie pri komutácii na komutátore. Výhodou je teda stroj s ľahším rozbehom

a veľkým zrýchlením. Klasické DC motory na druhej strane sú lacnejšie, ale často majú menší krútiaci moment a pri nízkych otáčkach aj nepravidelný chod.

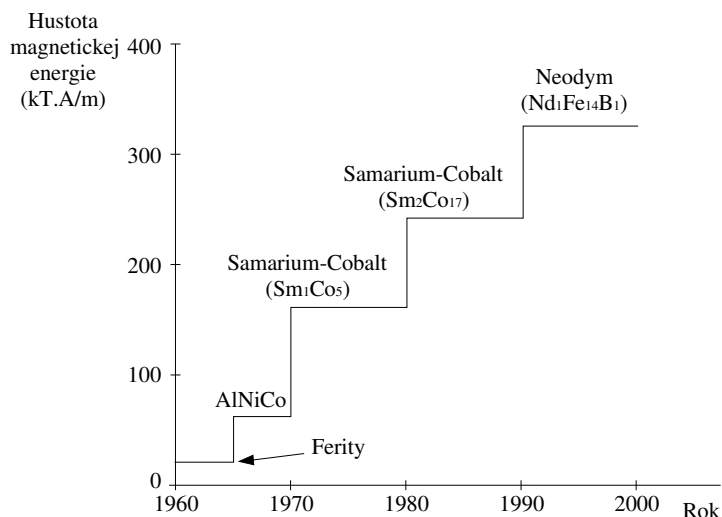
Keď porovnáваме kefovú a BLDC motory, je dôležité zväziť výstupný výkon a krútiaci moment. Pre nízke výkony je vhodné použiť BLDC motory. V skutočnosti, pod 50 watt je cena BLDC pohonov (motor plus elektronika) často rovnaká alebo nižšia než cena pohonov s motormi s kefami. Toto pomáha vysvetliť fakt, prečo BLDC motory sú tak široko využívané v cenovo citlivých aplikáciách malého výkonu (ventilátory a pohony diskových mechaník v počítačoch, tlačiarne, plotre a pod.). Nad 50 wattov je už porovnanie ťažšie. Pokiaľ je sám BLDC motor lacnejší, tak jeho riadenie môže byť drahšie (zložitejšia elektronická komutácia). V jednoduchom porovnaní materiálových nákladov pre pohony väčších výkonov sú motory z kefami zatiaľ vo výhode.

Ako už bolo uvedené skôr, je niekoľko faktorov ktoré vplývajú na širšie použitie bezkefových jednosmerných (BLDC) motorov. Tieto faktory zahŕňajú najmä pokrok v technológii výroby magnetov, v riadení týchto motorov a v znižovaní výrobných nákladov. Všetky tieto faktory veľmi priaznivo vplývajú na použitie BLDC motorov. V skutočnosti prognózy v priemysle predpokladajú, že v nasledujúcich rokoch BLDC motory

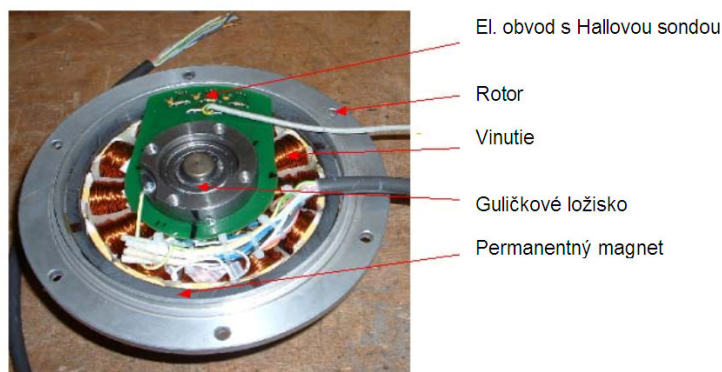
výrazne zvýšia svoj podiel na trhu na úkor ostatných jednosmerných motorov. Jednou z príčin je pokrok v technológii výroby magnetov zo vzácnych zemín. Zlepšená technológia výroby magnetu vplýva najmä na cenu BLDC motorov, pretože cena magnetu má najväčší podiel vo vlastných nákladoch pri výrobe týchto motorov. Najviac radikálnym zlepšením v technológii výroby magnetov je zvýšenie ich hustoty magnetickej energie. Dnešné neodým-železo-bór (NdFeB) magnety majú niekoľko krát vyššiu hustotu magnetickej energie ako keramické (feritové) magnety. Obr. 6.20 ukazuje zvýšenie hustoty magnetickej energie počas minulých troch desaťročí [16]. Zatiaľ je však cena magnetov zo vzácnych zemín stále vyššia, ako je cena feritových magnetov. Ale NdFeB magnety môžu značne zmenšiť rozmery motora a preto jeho konečná cena je redukovaná nižšou spotrebou železa a medi, aj keď zatiaľ je cena kvalitnejších magnetickej materiálov stúpajúca. Aj preto sa motory s magnetmi so vzácnych zemín používajú v tak cenovo citlivých zariadeniach, ako sú počítače (ventilátory, pohony diskov, CD mechanik) a ich pracovné periférie (tlačiarne, plotre a pod.). Sú známe aj ďalšie významné výhody NdFeB magnetov, ktoré je potrebné brať do úvahy. Je to hlavne vyššia odolnosť proti korózii a vyššia maximálna teplota použitia týchto magnetov (motory s vyšším výkonom môžu mať vyššia pracovnú teplotu).

Ďalším pokrokom je výroba prstencových magnetov, ktoré sú cenovo efektívnejšie. Dnes sú BLDC motory prevažne vyrábané so segmentovými magnetmi, čo vedie k vysokým výrobným nákladom kvôli zložitosti výroby rotora. Prstencový magnet, ktorý je jednodielny, nahrádza vysoký počet segmentov a tým sa znižuje zložitost výroby rotora. V súčasnosti už veľa výrobcov ponúka NdFeB magnety v prstencovom tvare, napr. Hitachi, Crucible, Diado, Magnet Application Ltd, TDK, Magnequench a Sumitomo. Ale ich cena je dnes ešte vyššia ako je cena ekvivalentných segmentových magnetov využitých pre danú aplikáciu, hoci môže byť kompenzovaná zníženými výrobnými nákladmi rotora. Ale výrobcovia predpokladajú, že už skoro nastane deň, keď výrobné náklady na výrobu motora s prstencovým magnetom budú ekvivalentné alebo dokonca aj menšie, ako sú výrobné náklady na výrobu motora so segmentovými magnetmi.

Ľahšie riadenie pohonov s BLDC motormi má tiež podstatný vplyv na rozšírenie ich použitia. Motorola, LSI (Melville, USA), Unitrode (Merrimack, USA) a iné spoločnosti vyvinuli IC čipy, ktoré môžu riadiť BLDC motory len s niekoľkými externými súčiastkami. Navyše, „inteligentné“ regulátory, neriadia len otáčky, ale aj polohu, moment motora, dráhu a pod.



Obr. 20: Pokroky vo zvyšovaní hustoty magnetickej energie magnetov



Obr. 21: Ventilátorový BLDC motor

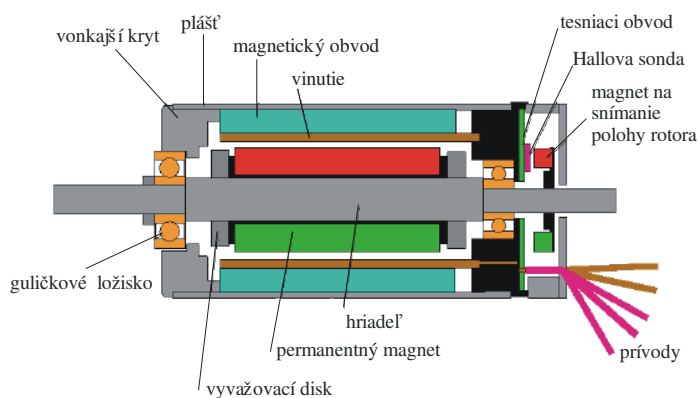
Niekoľko spoločností, (včítane Hewlett Packard a PMD, Chelmsford USA) ponúkajú riadiace jednotky, ktoré obsahujú aj logiku komutácie. To zjednoduší riadiacu jednotku motora a tak významne zredukuje aj cenu riadenia BLDC motora. Takto jednoducho riadené motory sa dajú využiť v klimatizačnej technike (Obr. 21) a sú napr. vhodné na hospodárne odsávanie jednotlivých miestností vo veľkej budove pri ich jednotlivom riadení pomocou BUS systému a riadiaceho počítača.

Ak chceme poukázať na prednosti BLDC motorov v porovnaní s asynchrónnym motorom, tak nesmieme zabudnúť na vysokú účinnosť, menšie oteplenie, nezávislosť od sieťovej frekvencie, plynulá regulácia otáčok, nadsynchrónne otáčky, nízka hladina hluku a dlhá životnosť bez údržby.

Nezanedbateľná je aj úspora nákladov pri použití BLDC motorov. Výpočty ktoré boli vykonané na základe účinnosti, relatívneho zníženia elektrického výkonu a motorových strát ukázali, že ak porovnáme AC motor s kotvou nakrátko s výkonom 3 kW napájaného z meniča a BLDC motor s rovnakými parametrami, tak dostaneme približne 25%-né zníženie prevádzkových nákladov.

Lekárske aplikácie doplnia veľkú skupinu možných používateľov bezkefových motorov. Mnoho centrifúg už pracuje s týmito motormi z dôvodu zníženia hluku a odstránenia odpadu z kief. Všeobecne nízka hlučnosť („zvuková aj elektrická“), charakteristická pre bezkefové motory, predurčuje ich pre použitie v tichých prostrediach (laboratóriá, kancelárie a pod.). Tak, ako sa bude znižovať cena BLDC motorov, tak sa bude zvyšovať rozsah ich použitia.

Podľa rozboru vyhodnotenia svetového trhu s elektromotormi, malé motory tvoria asi 83% všetkých motorov v priemysle. Na jeden výkonný elektromotor pripadajú aj 3 až 4 malé motory. Medzi svetových výrobcov, ktorý malé jednosmerné motory majú v svojej ponuke patrí aj švajčiarska firma MAXON [17]. Na obr. 22 je uvedená typická konštrukcia EC valcového BLDC motora



Obr. 22: Konštrukcia valcového BLDC motora



Obr. 23: Diskový BLDC motor

Okrem valcových motorov MAXON vyrába aj diskové motory s integrovanou riadiacou elektronikou, alebo sa dodávajú objednať aj vo variantoch bez snímačov, tj. bez hallových sond. Na obr.23 je zobrazený z diskový motor. Tento diskový motor má plochý tvar vhodný pre rozmerovo obmedzené aplikácie. Permanentné magnety rotora sú umiestnené na prstenci. Rotor má viacero pólov než rotor valcových motorov a preto je rýchlosť diskových motorov 4x resp. 8x nižšia a mechanický moment vyšší. Preto motor môže pracovať často aj bez prevodovky.

V súčasnosti mimo vyššie spomenutej firmy Maxon je ešte veľa známych aj menej známych výrobcov bezkefových DC motorov [18], z ktorých spomeniem aspoň tieto: Portescap (Danaher Motion), Berger Lahr (Schneider electric), Oriental Motor, Johnson motor & Saia motor (Johnson Electric Group), Alcatel Dunkermotoren, ASTRO Motorengesellschaft, Bühler Motor, Hurst Manufacturing (Emerson Motor Technologies), Danaher motion, Micropump (Corporatioi Health & Science group), Telco Intercontinental Corp., Premotec, BEI Kimco Magnetics (BEI Technologies), Globe Motors a pod.

Je tiež veľmi dobre známe, že okrem jednosmerných a asynchrónnych motorov sa v súčasnosti využívajú aj iné typy motorov (synchronne, krokové, reluktančné a pod.), ktoré majú špeciálne prevedenie a konštrukciu prispôbenú vlastnému pohonu. Ale ich použitie prináša zase iné problémy, ktoré bolo a je potrebné riešiť [19].

4 Záver

Čo dodať na záver. Jednosmerný motor od svojho vzniku až po súčasnosť prešiel výrazným vývojom a aj v dnešnej dobe vznikajú stále nové konštrukčné riešenia, ktoré sa od klasického jednosmerného motora odlišujú buď tvarom a prevedením magnetického obvodu alebo usporiadaním vinutia kotvy. Skoro vo všetkých prípadoch sú tieto nové konštrukčné riešenia patentovo chránené. Obmedzený rozsah tohto príspevku nedovoľuje, aby bol podrobne popísaný vývoj a všetky známe konštrukčné varianty a ani to nebolo cieľom. Je tu popísaná stručná história vývoja jednosmerného zameraná hlavne na 19 storočie, pretože vývoj v 20 storočí je nám už pomerne známy. Časť príspevku je venovaná aj súčasnosti jednosmerného stroja.

Takže môžeme povedať, že výroba jednosmerných motorov sa aj naďalej rozvíja. Vo veľkých množstvách sa aj naďalej vyrábajú jednosmerné motory pre elektrický výzbroj automobilov. Elektrický spúšťač spaľovacieho motora je ešte stále napájaný z batérie. V elektrickej trakcii sa aj dnes používajú jednosmerné motory pre svoje obzvlášť výhodné vlastnosti. Dieselové lokomotívy a veľké zaoceánske lode využívajú elektrický prenos výkonu. V tomto prípade dieselový motor poháňa jednosmerný generátor z ktorého sú napájané pohonné jednosmerné motory. Jednosmerný motor je však možné prispôsobiť najrôznejším požiadavkám. Boli vyrobené pomalobežné motory s výkonom až niekoľko tisíc kilowattov a naopak aj miniatúrne mikromotorčeky s výkonom len desiatiny wattu.

V súčasnosti je východiskom pre návrh nového typu jednosmerného motora jeho praktické využitie. Používajú sa hlavne tam, kde napr. regulácia rýchlosti otáčania sa nedá spoľahlivo a technicky zabezpečiť striedavými alebo inými elektromotormi, alebo ich použitie je z ekonomického hľadiska výhodnejšie (ide predovšetkým o motory malého výkonu).

Jednosmerný motor je najstarší elektrický stroj a bol, je a aj v budúcnosti bude strojom, ktorý má uplatnenie v mnohých pohonárskych aplikáciách.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na
základe zmluvy č. číslo APVV 0510-06

Literatúra

- [1] Henry, J.: On Some Modifications of the Electro-Magnetic Apparatus. Transactions of the Albany Institute, Vol. 1, pp. 22-24; reprinted in Scientific Writings of Joseph Henry, Vol. 1 (Washington: Smithsonian Institution, 1886), pp. 3-7.
- [2] Henry, J.: On a Reciprocating Motion Produced by Magnetic Attraction and Repulsion. American Journal of Science and Arts 20, July 1831, 340-343.
- [3] Ritchie, W.: Experimental Researches in Electro-Magnetism and Magneto-Electricity. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 123, 1833, pp. 313-321.
- [4] Davis, D.: Davis's Descriptive Catalogue of Apparatus and Experiments. Boston, 1838, pp. 27-30.
- [5] Page, Ch., G.: Experiments in Electro-Magnetism. American Journal of Science and Arts 33 (No. 1, January 1838): pp.118-120.
- [6] Dostupné na:<http://www.solarbotics.net/starting/200111_dcmotor/200111_dcmotor.html>
- [7] Technik geschichte Tirols, Heft1, ÖIAV, 1969, pp. 58-68.
- [8] Dostupné na:<<http://www.uibk.ac.at/exphys/museum/de/details/mag/gramme.html>>
- [9] Dostupné na:<<http://www.westinghousenuclear.com/index.shtm>>
- [10] Dostupné na:<http://www.ien.it/museum/txt/motore_cc_sei.i.html>
- [11] CEM, Gleichstrom-Scheibenläufen-Motoren, katalóg fy. Axem-Servalco, 2006
- [12] Gleichstrom-Scheibenläufen Motoren, Katalog fy. BBC, 2005.
- [13] Dostupné na:<<http://www.infranor.com>>
- [14] Dostupné na:<<http://www.infranor.com/pages/nr.htm>>
- [15] Dostupné na:<<http://www.motionvillage.com/products/motors/pancake/servodisc/index.html>>
- [16] Dostupné na:<<http://www.motionvillage.com/training/handbook/motor/magnettypes.html>>
- [17] Dostupné na: <<http://www.maxonmotor.com/ch/>>
- [18] Dostupné na: <<http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/brushless-dc-motor-72549.html>>
- [19] Maxim, V., Takáč, T., Milly, D.: Comparison of higher harmonics of large DC and synchronous drives, MicroCAD'99, International Computer Science Conference, February 24 - 25, 1999.

ELIMINACE HARMONICKÝCH VÍCEPULZNÍMI ZAPOJENÍMI USMĚRŇOVAČŮ

Stanislav KOCMAN

VŠB-TU Ostrava, FEI, Katedra obecné elektrotechniky, 17. listopadu 15, Ostrava-Poruba, 708 33, ČR,
stanislav.kocman@vsb.cz

Abstrakt: Uvedený článek se zabývá analýzou harmonických proudů generovaných do napájecí sítě střídavými regulovanými pohony s vícepulzními usměrňovači používanými jako přídavná zařízení pro jejich omezení. Byly použity dva typy těchto usměrňovačů, a sice dvanáctipulzní a osmnáctipulzní, oba v sériovém zapojení a jejich účinky z hlediska omezení jimi generovaných harmonických proudů analyzovány a srovnány. Na míru omezení harmonických má vliv kromě způsobu zapojení a velikosti zatížení vícepulzních usměrňovačů, respektive jejich napájecích speciálních transformátorů, také úroveň zkreslení napájecího napětí a jeho nesymetrie v místě připojení takového pohonu k napájecí síti. K těmto vlivům je přihlédnuto a pro jejich vybrané úrovně jsou pak vlastní analýzy provedeny a výsledky prezentovány.

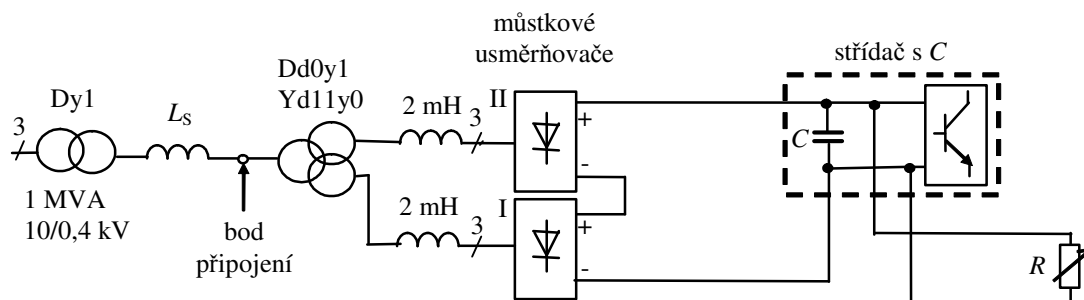
Klíčová slova: Dvanáctipulzní usměrňovač, osmnáctipulzní usměrňovač, celkové harmonické zkreslení proudu.

1. Měřené struktury vícepulzních usměrňovačů

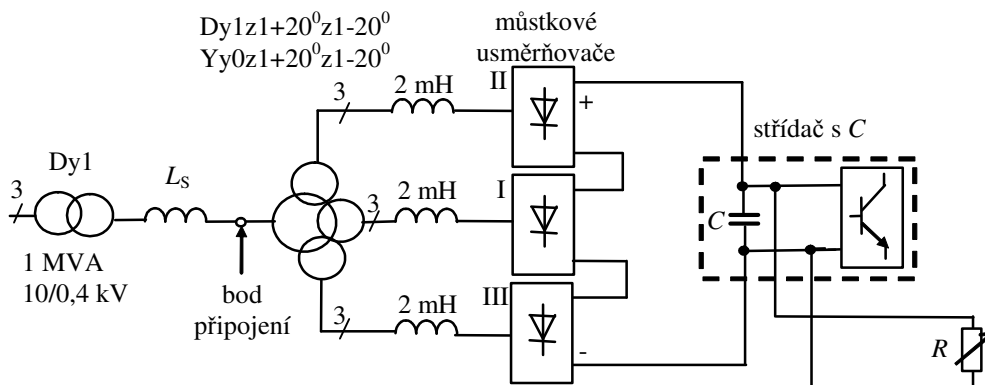
Použití vícepulzních usměrňovačů je jedním z efektivních způsobů, jak snížit vliv harmonických proudů generovaných střídavými regulovanými pohony do napájecí sítě. Je známa řada možností provedení a zapojení takovýchto typů usměrňovačů. Na katedře obecné elektrotechniky, VŠB-TU Ostrava, jsou pro výzkumné a výukové účely k dispozici jak dvanáctipulzní tak i osmnáctipulzní usměrňovače v různých variantách zapojení. Pro tento článek byly vybrány následující varianty jejich zapojení:

- Dvanáctipulzní usměrňovač: sériové zapojení Dd0y1 a Yd11y0, obr. 1
- Osmnáctipulzní usměrňovač: sériové zapojení Dy1z1+20⁰z1-20⁰ a Yy0z1+20⁰z1-20⁰, obr. 2

Ve strukturách obou typů usměrňovačů jsou použity speciální napájecí transformátory, třívinutový pro dvanáctipulzní, čtyřvinutový pro osmnáctipulzní usměrňovač. Vinutí těchto transformátorů musí být zkonstruováno tak, aby zajišťovalo mezi fázovými napětími sekundárních vinutí fázový posun 30⁰ u dvanáctipulzního, respektive 20⁰ u osmnáctipulzního.



Obr.1: Schéma zapojení pro měření dvanáctipulzního usměrňovače

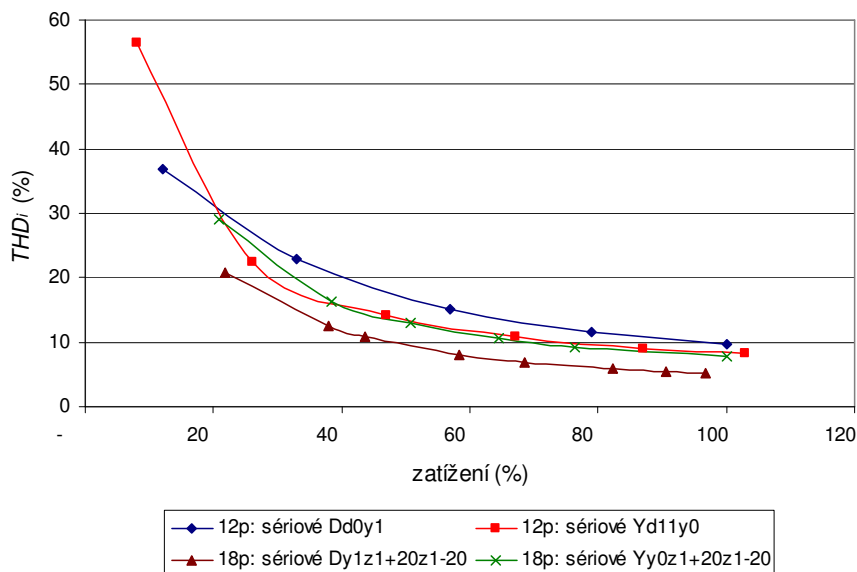


Obr.2: Schéma zapojení pro měření osmnáctipulzního usměrňovače

K sekundárním vinutím napájecího transformátoru jsou připojeny trojfázové neřízené můstkové tj. šestipulzní usměrňovače, které jsou spojeny do série a připojeny ke stejnosměrnému meziobvodu nepřímého měniče kmitočtu s napětovým střídačem. Usměrňovače byly zatěžovány odporovou zátěží.

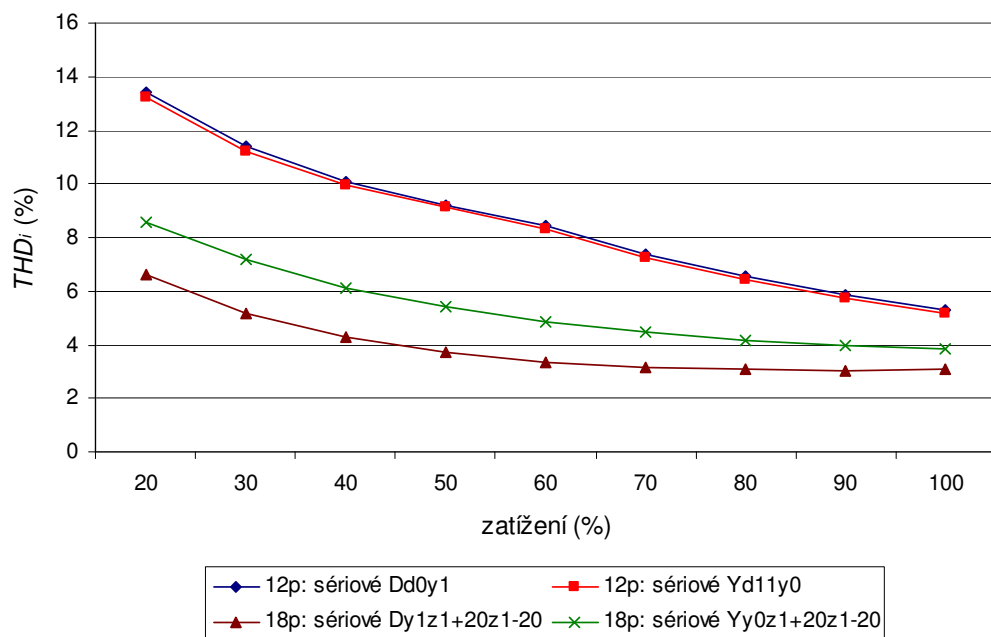
2. Analýza zpětných vlivů vícepulzních usměrňovačů

Měření a vyhodnocení bylo provedeno pomocí síťového analyzátoru BK-ELCOM pro dané zkresení napájecího napětí v napájecí síti. Vlastní experimentální měření byla prováděna v laboratoři F 328 na VŠB-TU Ostrava. V grafu na obrázku 3 je závislost celkového harmonického zkresení proudu THD_i odebíraného z napájecí sítě pro jednotlivá zapojení usměrňovačů v závislosti na jejich zatížení. Během měření hodnota celkového harmonického zkresení napětí THD_u v síti byla kolem 4%, napětová nesymetrie pak kolem 0,3%.

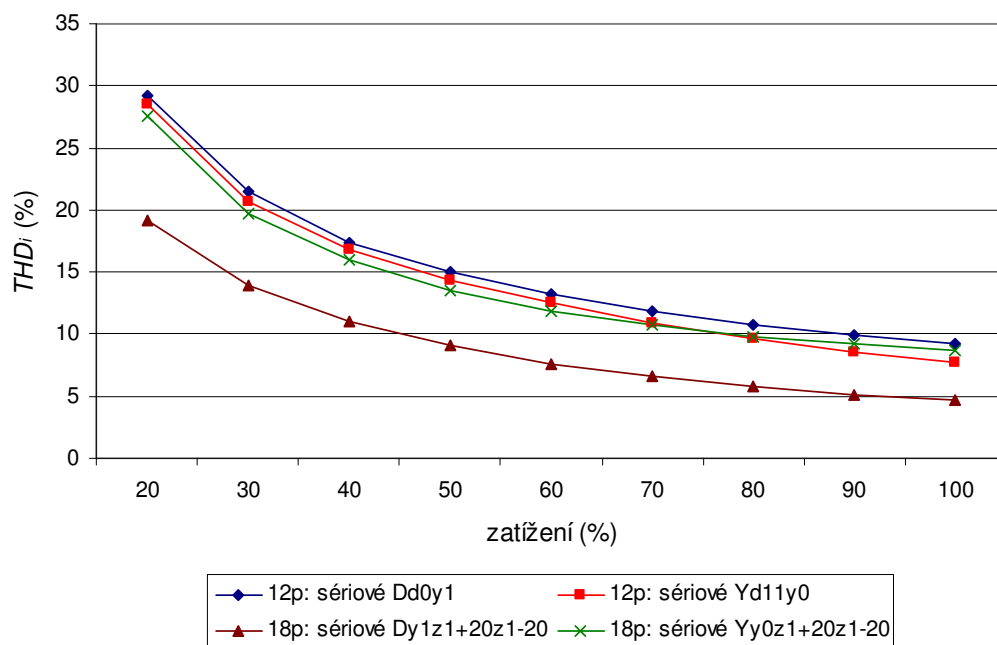


Obr.3: Závislost THD_i síťových proudů jednotlivých sledovaných variant vícepulzních usměrňovačů na jejich zatížení

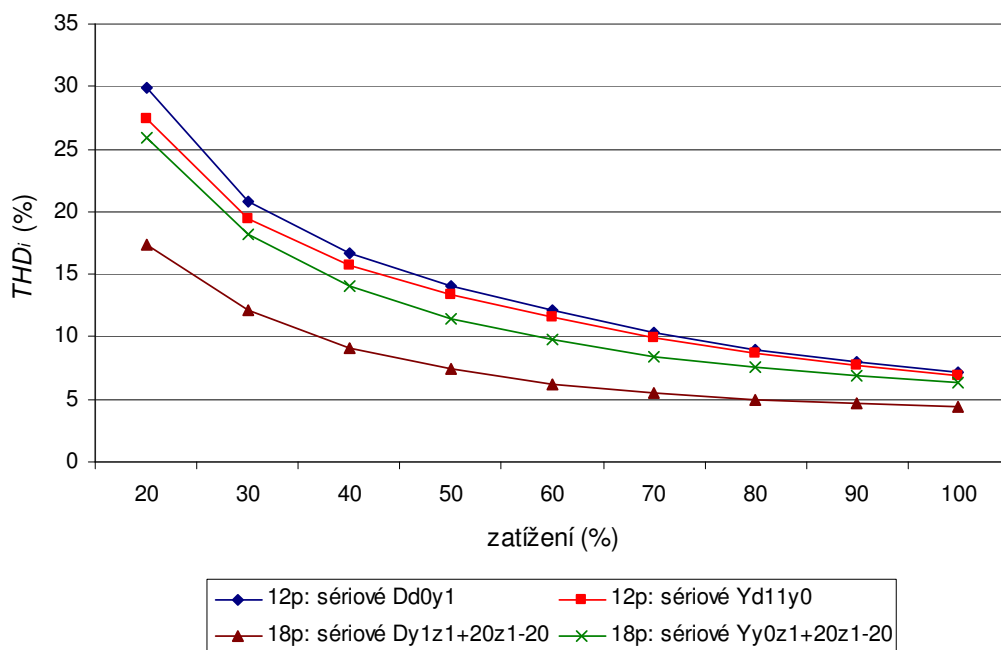
Vzhledem k tomu, že během pracovní doby se na VŠB-TU celkové harmonické zkresení napětí a napětová nesymetrie v napájecí síti obvykle nemění v nijak velkém rozsahu, byly provedeny simulace pomocí programu EMTP-ATP pro různé úrovně zkresení a nesymetrie napájecího napětí. Simulace umožňuje nejen nastavit potřebný rozsah těchto parametrů, nýbrž také zajistí jejich stálé hodnoty během jejího provádění, což v případě měření na reálné síti není zajištěno. Na dalších obrázcích jsou na ukázkou prezentovány některé výsledky chování dvanáctipulzního a osmnáctipulzního usměrňovače ve sledovaných zapojeních pro vybrané ukazatele kvality napájecího napětí. Ve všech případech jde o posouzení míry závislosti celkového harmonického zkresení proudu THD_i odebíraného z napájecí sítě na zatížení usměrňovačů, tj. střídavého regulovaného pohonu právě při těchto vybraných ukazatelích kvality napětí. Na obrázku 4 je to při ideálním stavu v napájecí síti, tj. při zkresení i nesymetrii napájecího napětí 0%, na obrázku 5 pro velikost zkresení napětí $THD_u=4\%$ a nesymetrii $\rho=0\%$ a konečně na obrázku 6 pro nezkresené, sinusové napětí s $THD_u=0\%$, ale s nesymetrií $\rho=3\%$.



Obr.4: Závislost THD_i síťových proudů jednotlivých sledovaných variant vícepulzních usměrňovačů na jejich zatížení při $THD_u = 0\%$ a $\rho = 0\%$



Obr.5: Závislost THD_i síťových proudů jednotlivých sledovaných variant vícepulzních usměrňovačů na jejich zatížení při $THD_u = 4\%$ a $\rho = 0\%$



Obr.6: Závislost THD_i síťových proudů jednotlivých sledovaných variant vícepulzních usměrňovačů na jejich zatížení při $THD_u = 0\%$ a $\rho = 3\%$

3. Závěr

Z naměřených a nasimulovaných průběhů lze vidět, že vícepulzní usměrňovače představují velice dobrá opatření pro omezení harmonických, a to jak v osmnáctipulzním tak i dvanáctipulzním zapojení. Úroveň celkového harmonického zkreslení THD_i odebíraného proudu ze sítě jsou pro oblast vyšších zatížení na velmi nízké úrovni a to i pro neharmonické napájecí napětí v síti s celkovým harmonickým zkreslením THD_u až 4%. Se snižující se úrovní zkreslení napětí pak samozřejmě účinek eliminace harmonických těmito usměrňovači vzrůstá, a to takovým způsobem, že při harmonickém napětí v síti klesá THD_i odebíraného proudu již poměrně výrazně, jak lze vidět z tabulky pro 100% zatížení usměrňovačů.

THD_u	THD_i 12 pulz Dd0y1	THD_i 12 pulz Yd11y0	THD_i 18 pulz Dy1z1+20 ⁰ z1-20 ⁰	THD_i 18 pulz Yy0z1+20 ⁰ z1-20 ⁰
0%	5,32	5,17	3,06	3,87
4%	9,18	7,69	4,66	8,69

Tab.1: THD_i jednotlivých variant zapojení vícepulzních usměrňovačů (100% zatížení)

Vlivem zvyšující se úrovně napěťové nesymetrie dochází rovněž ke zvyšování celkového harmonického zkreslení THD_i odebíraného proudu podobně jako v případě zkreslení, navíc se však ve spektru proudu objevují necharakteristické harmonické, zejména pak harmonická 3. řádu, která může dosahovat vůči ostatním harmonickým i výrazně vyšších hodnot.

Ze srovnání dvanáctipulzních a osmnáctipulzních vycházejí dle předpokladů lépe osmnáctipulzní usměrňovače, zejména pak ten v zapojení Dy1z1+20⁰z1-20⁰. Druhá varianta, tj. se zapojením primáru do hvězdy, pak vychází hůře, což je částečně ovlivněno tím, že na rozdíl od všech předchozích zapojení jej nelze na sekundární straně, vlivem jeho konstrukce vinutí, zatížit na jmenovitý proud.

Literatura

- [1] Collombet, C., Lupin, J.-M., Schonek, J.: Harmonic Disturbances in Networks, and Their Treatment. Cahier Technique Merlin Gerin, No.152, 1999
- [2] Kús, V.: Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu. BEN, Praha 2002
- [3] Hink, K.M.: 18-pulse Drives and Voltage Unbalance. MTE Corporation Technical Articles

VYHODNOCOVÁNÍ KOEFICIENTŮ VNITŘNÍHO A VNĚJŠÍHO TŘENÍ SYPKÝCH HMOT POMOCÍ PC

Václav KOLÁŘ*, Robert BRÁZDA**

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

* Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky, vaclav.kolar@vsb.cz

** Fakulta strojní, Institut dopravy, robert.brazda@vsb.cz

Abstrakt: Příspěvek se zabývá popisem měření vnitřního tření sypkých hmot na speciálním Jenikeho smykovém stroji zkonstruovaném na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava. Jádrem příspěvku je softwarová aplikace pro toto měření vytvořená v prostředí LABView.

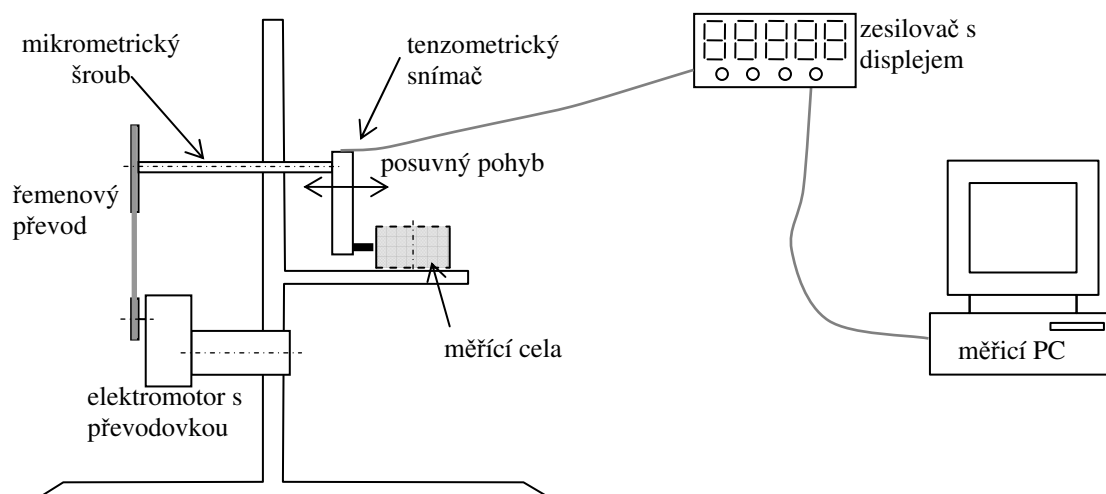
Klíčová slova: Sypká hmota, Koeficient vnitřního a vnějšího tření, Měřicí software, Harmonická analýza

1. Úvod

V různých oblastech průmyslu se často manipuluje s rozmanitými druhy sypkých hmot, například písek, cement, mouka a mnoho jiných. K jejich skladování a dopravě se používají různé typy zásobníků a dopravníků, ve kterých dochází ke tření. Pro správný návrh těchto zařízení je nutné znát koeficient vnitřní tření daného materiálu a koeficient vnějšího tření. Zjednodušeně se dá koeficient vnitřního tření definovat jako tření uvnitř vlastní sypké hmoty a koeficient vnějšího tření, je např. tření při pohybu sypké hmoty po stěně zásobníku.

2. Zařízení pro měření vnitřního tření sypkých hmot

Na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava bylo zkonstruováno zařízení k měření třecích parametrů sypkých hmot (takzvaný smykový stroj), na jehož vyhodnocovací části – elektrické i softwarové se podílela i Katedra elektrotechniky. Schéma tohoto zařízení je na Obr. 1. Při měření na smykovém stroji dochází k sunutí sypké hmoty, buď po podložce při měření koeficientu vnějšího tření nebo k sunutí mezi vlastní sypkou hmotou při měření koeficientu vnitřního tření. Sypká hmota je zatížena závažím pro vyvození normálového tlaku, což pro jednoduchost není na obrázku znázorněno.



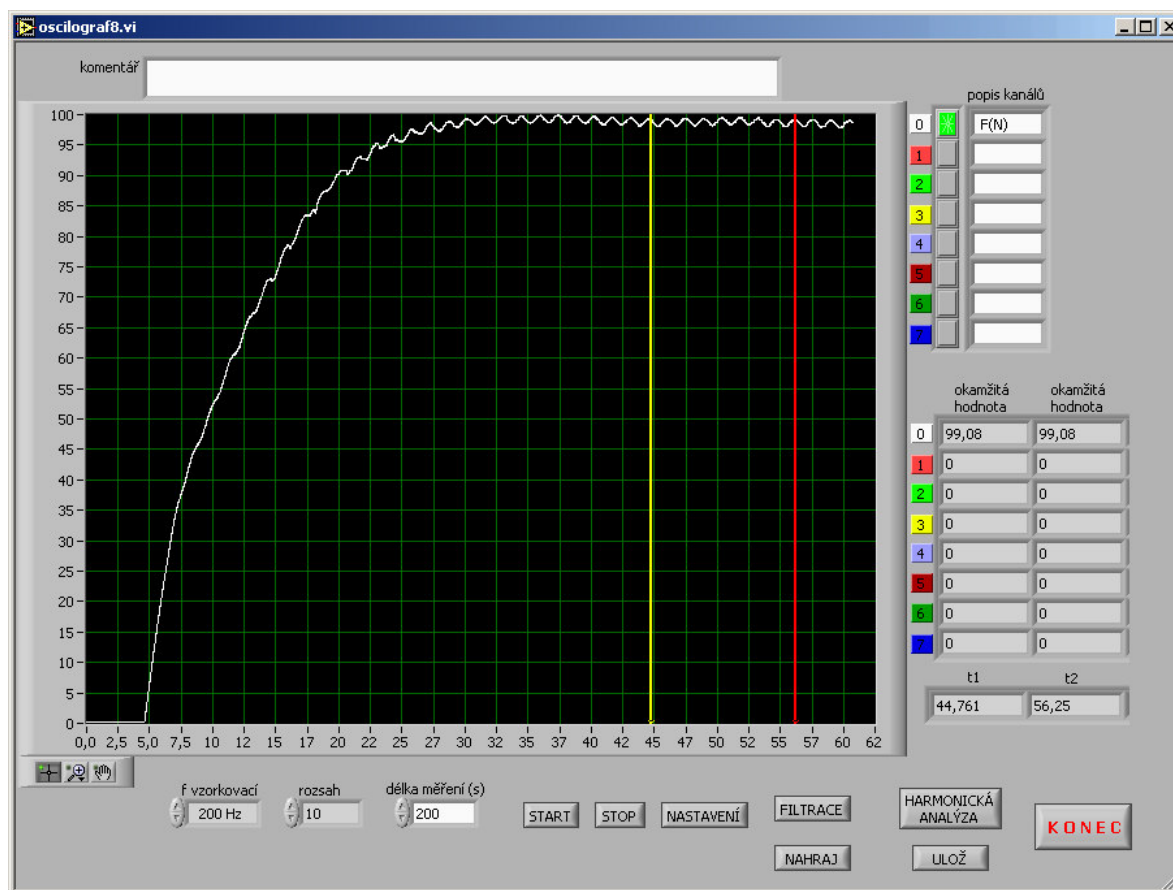
Obr. 1: Schéma smykového stroje

Třecí (tečná) síla je měřena tenzometrickým snímačem (obsahuje 4 tenzometry zapojené do můstku), signál z tenzometrů je zesílen zesilovačem MVD2555, na jehož displeji je možné odečítat hodnotu síly, ale pro další zpracování a záznam časového průběhu síly při celém měření je signál dále snímán měřicí kartou v PC.

Při základním vyhodnocování třecích parametrů stačí měřit pouze velikost síly, ale při podrobnějším zkoumání lze zjistit, že síla není v čase konstantní, ale vykazuje určité oscilace. Na jejich záznam a vyhodnocení je právě velmi výhodné použití osobního počítače. Tyto oscilace mohou v praxi způsobovat velké problémy u dopravníků, zásobníků a podobných zařízení – způsobovat mechanické kmitání.

3. Software pro záznam a vyhodnocení měření

Software pro záznam měření a jeho vyhodnocení byl vytvořen v prostředí LABView, hlavně z důvodu snadného programování a zkušeností autorů s tímto prostředím. Software umožňuje záznam síly v čase, uložení a opětné nahrání tohoto záznamu, různé druhy filtrace a hlavně harmonickou analýzu. Kvůli univerzálnosti a možnosti budoucího použití k jiným druhům měření byl software od začátku tvořen jako osmikanálový, i když při tomto měření se využívá pouze jeden kanál. Délka záznamu může být až 10000 sekund, maximální vzorkovací rychlost je 5000 vzorků za sekundu.

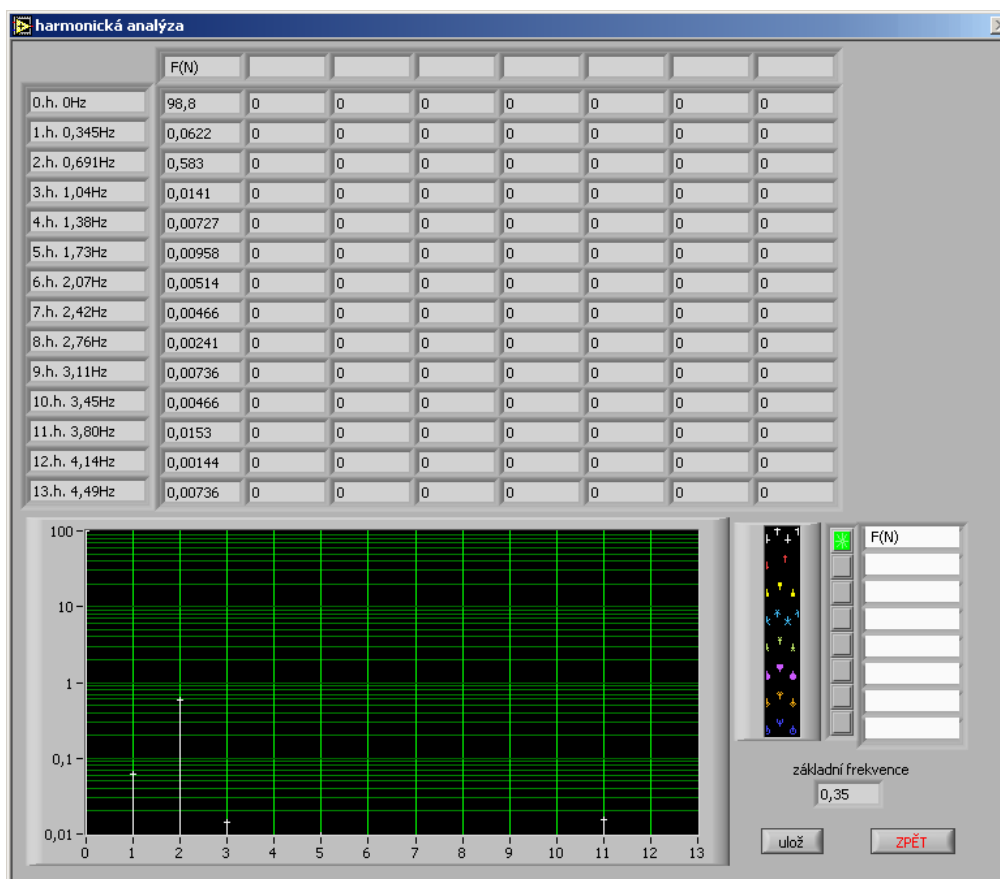


Obr. 2: Čelní panel programu pro měření sypkých hmot

Na Obr. 2 je čelní panel aplikace pro měření třecích parametrů sypkých hmot. V okamžiku, kdy je měření ukončeno (zastaveno), je možné pomocí kurzorů odečítat hodnoty z grafu, provést harmonickou analýzu naměřeného průběhu síly, nebo naměřený průběh filtrovat (pásmová propust, pásmová zádrž, klouzavý průměr, klouzavá efektivní hodnota).

4. Výsledky měření

Průběh na Obr. 2 je z měření vnitřního tření mletého vápence. Z průběhu je velmi dobře vidět, že v ustáleném stavu třecí síla pravidelně kmitá kolem určité ustálené hodnoty. Na Obr. 3 je výsledek harmonické analýzy průběhu síly. Dominantní kmitočet je zde 0,69 Hz, tedy doba periody zhruba 1,5 s. S velkou pravděpodobností jde o vlastní kmitočet tření mletého vápence. Tento kmitočet může při sypání tohoto materiálu způsobovat mechanické rozkmitání celého zařízení. Proto je nutné při konstrukci násypek, zásobníků a podobných zařízení na mletý vápenec dbát na to, aby jejich vlastní mechanický rezonanční kmitočet neležel v blízkosti 0,69 Hz.



Obr. 3: Okno harmonické analýzy programu pro měření sypkých hmot

5. Závěr

Po oživení a uvedení do provozu se ukázalo, že softwarová aplikace pro měření sypkých hmot v prostředí LABView je dobrou pomůckou při těchto měřeních, jejíž ovládání lze rychle zvládnout, např. použití studenty. Zejména díky snadné možnosti harmonické analýzy umožňuje mnohem lepší vyhodnocování naměřených dat než měření s použitím klasických měřicích přístrojů (v tomto případě odečítání hodnot z displeje měřicího zesilovače).

V dalším vývoji softwarových aplikací a pracovišť pro měření sypkých hmot dále pokračujeme.

Literatura

- [1] Kaminský, D., Žídek, J.: Automatizace měření, VŠB-TU Ostrava 1996.
- [2] Zegzulka, J. Mechanika sypkých hmot, VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2004, ISBN 80-248-0699-1.
- [3] Schwedes, J. Review in testers for measuring flow properties of bulk solids, Granular Matter a 5, 1-43, Springer-Verlag 2003, DOI 10-1007/s10035-002-0124-4.

INTERAKTÍVNE NÁSTROJE E - LEARNINGOVÉHO MODULU ELEKTRICKÉ STROJE

Michal KOSTELNÝ

Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita, Letná 9, 04200 Košice, Slovenská republika, *Michal.Kostelny@tuke.sk*

Abstrakt: Príspevok sa zaoberá metodikou tvorby e-learningových modulov z oblasti elektrických strojov. Prezentuje aplikáciu e-learningových nástrojov použitých pri tvorbe modulu s multifunkčnou štruktúrou pre bakalárske interné, externé a dištančné štúdium. Vychádza zo štandardného rozdelenia elektrických strojov: Transformátory, Asynchrónne stroje, Synchronne stroje a Jednosmerné stroje, ktoré tvoria samostatné subsystemy modulu. E - learningové nástroje predstavujú animácie, interaktívne grafy, diagramy, ktoré sú aplikované v konštrukcii, fyzikálnych princípoch a teórii striedavých i jednosmerných elektrických strojov.

KLúčové slová: elektrický stroj, E-learning, animácia, interaktívny graf, vzdelávací modul

1. Úvod

Súčasný trend informačných technológií vytvára nové komfortné prostredie i vo vzdelávacom procese, zasahuje do všetkých stupňov vzdelávania. Môžeme povedať, že významnou mierou prispieva k formovaniu tzv. informačnej spoločnosti. Štandardizuje sa e-vzdelávací proces v univerzitnom vzdelávaní a uplatňuje sa i v najzložitejších vedných disciplínach. Je preto logické, že e-vzdelávanie sa narastajúcou mierou podieľa v bakalárskom a inžinierskom štúdiu aj v technických odboroch.

E-vzdelávacie moduly pokrývajú stále väčšiu časť predmetov v študijných plánoch Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. S naštartovanou reformou štúdia a narastajúcim počtom študentov externého štúdia, je potreba „väčšej študijnej nezávislosti“ veľmi aktuálna. Projekty, ktoré vznikli v posledných rokoch zásadným spôsobom menia a zefektívňujú formu štúdia elektrotechnického inžinierstva.

Prostredníctvom projektu „Interactive and Unified E-Based Education and Training in Electrical Engineering“, INETELE, v rámci programu Leonardo da Vinci II, (č. projektu CZ/02/B/F/PP/134009), Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva Technickej Univerzity v Košiciach prispela k rozvoju e – vzdelávacích modulov pre odbor Elektrické pohony.

Moduly vytvorené v medzinárodnom projekte môžeme zoradiť do skupín :

1. Základy elektrotechniky
2. Elektrické stroje
3. Elektronika, Výkonová elektronika a jej aplikácie
4. Elektrické pohony, Regulované pohony, Mechatronika, Robotika
5. Simulácie Výkonovej elektroniky.

V rámci projektu bol vytvorený v roku 2005 ako pilotný modul Transformátory. Vzhľadom na požadovanú jednotnosť e – learningového prostredia, boli v nasledujúcich rokoch realizované aj ďalšie časti modulu s plnou kompatibilitou.. Moduly boli predstavené na medzinárodných konferenciách ICETA 2005 [5] a ICETA 2007 a sympóziách ISEM 2005 [4] a ISEM 2007 [6].

2. Architektúra modulu

Študijný text je univerzálny, je prezentovaný primárnymi a sekundárnymi obrazovkami. **Primárne obrazovky** majú prednáškový obsah, sú to tzv. hlavné obrazovky. Predstavujú základnú teóriu elektrických strojov s výslednými rovnicami a charakteristikami v najvyššej možnej interakcii. Obsahujú animácie, interaktívne grafy a diagramy, ktoré zvyrazňujú princípy a vlastnosti elektrických strojov. V striedavých strojoch vychádzajú z fázorovej teórie. Obsahujú základnú pojmovú bázu s priamou interakciou v texte. Kliknutím na prvýkrát v texte uvedený základný termín (modrá farba), sa objaví vysvetľujúci text v žltom poli. Opakovaný prístup a dĺžka čítania sú neobmedzené.

Primárne obrazovky sú bezprostredne zviazané so statickými **sekundárnymi obrazovkami**, ktoré majú textovú funkciu a sú predovšetkým nástrojom samostatného štúdia. Obsahujú prakticky všetky grafické časti, dopĺňujúcim textom rozširujú informáciu z hlavnej obrazovky.

Všetky moduly vytvorené na základe projektu INETELE majú jednotný grafický výstup s jednotným princípom voľby farieb :

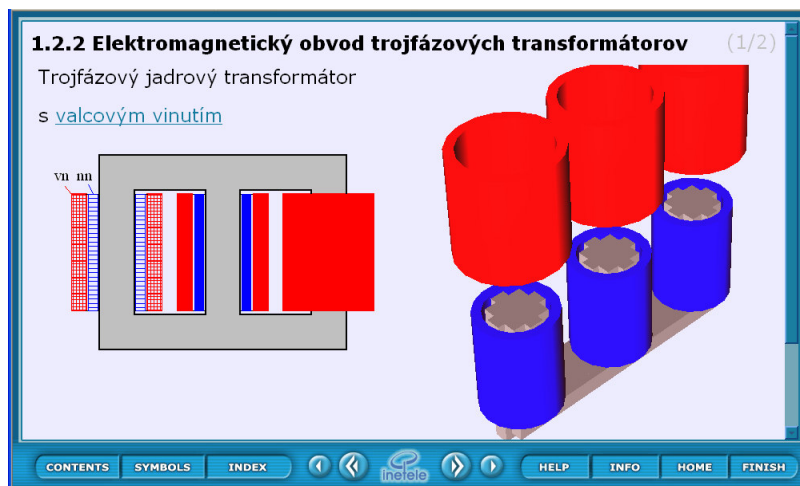
Červená – prúd, **čierna** – napätie, *moment, uhlová rýchlosť*, **modrá** – indukované napätie, **zelená** – magnetický tok, **oranžová** - akcia

Obrazovky sú v modrom ohraničení a majú štandardizovanú ovládaciu lištu pre všetky moduly s jednoduchou odkazovou logikou.

3. Animácie

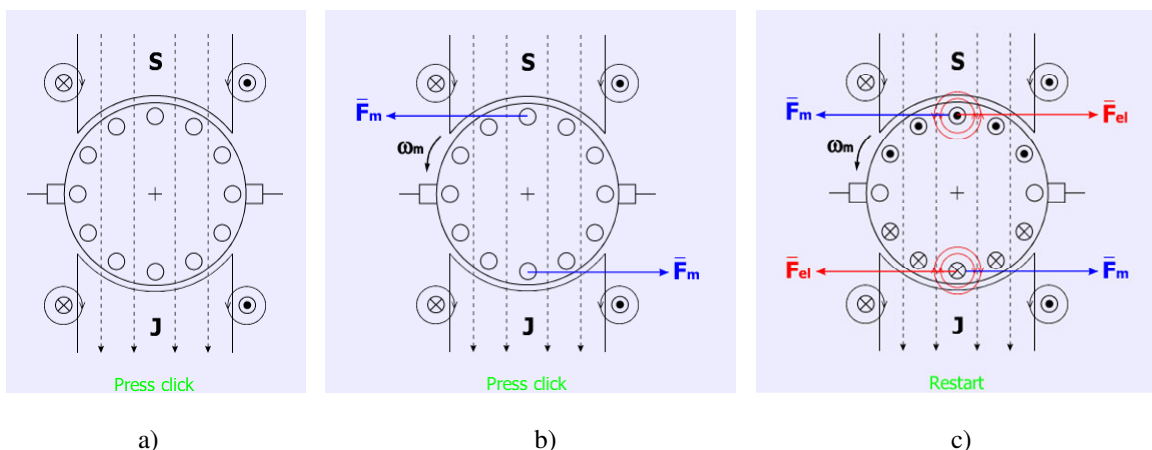
3.1 Konštrukcia a princíp

Konštrukčné modifikácie transformátora sú realizované pre jednofázové i trojfázové transformátory priestorovými animáciami na základe dvoch typov magnetického obvodu – jadrový a plášťový a dvoch princípov vinutí transformátora – valcové a vystriedané. Na obr.1 je najčastejšia konštrukcia trojfázového jadrového transformátora s valcovým vinutím.



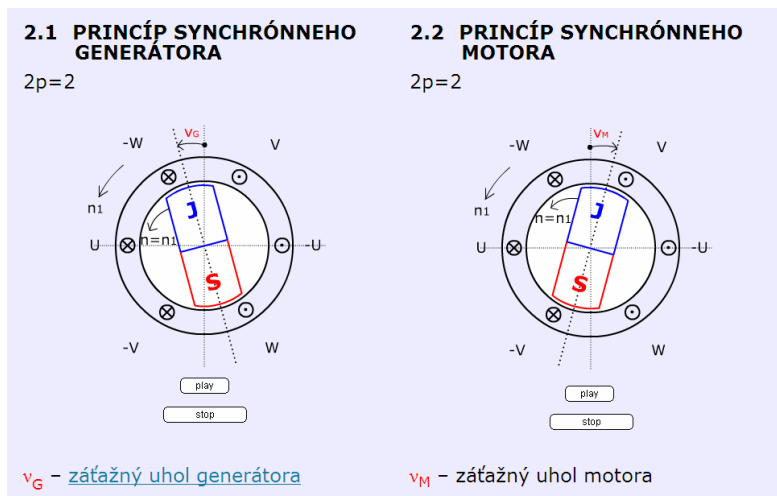
Obr. 1 Konštrukcia trojfázového jadrového transformátora s valcovým vinutím

Princípy elektrických strojov točivých sú vysvetlené na animáciách, ktorých postupnosť je prezentovaná na jednosmerných a asynchrónnych strojoch. Na obr. 2 je vysvetlený princíp jednosmerného dynama v troch fázach: a) – vytvorenie magnetického toku budiacim vinutím, b) – polarita prúdu kotvy, ktorý vzniká od indukovaného napätia pri otáčaní kotvy vľavo mechanickou uhlovou rýchlosťou ω_m , c) sily pôsobiacej na vodiče kotvy.



Obr.2 Princíp jednosmerného dynama

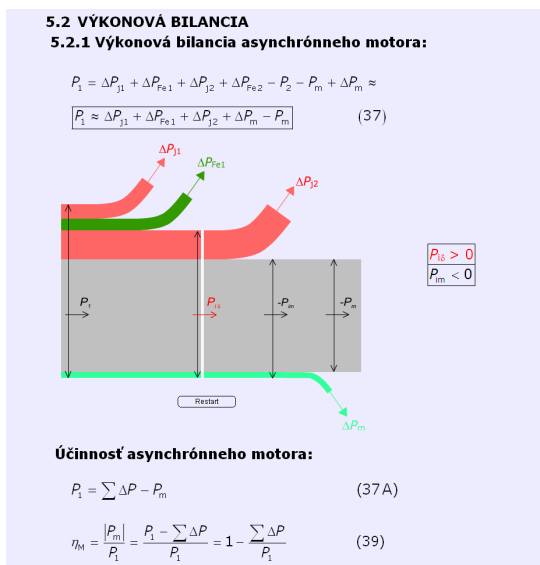
Princíp synchronného motora a generátora je na obr.3. Otáčavé magnetické pole statora je vytvorené trojfázovým vinutím – šesť drážok statora, v rotore je polarizovaný magnet. Pre synchronný generátor a pre synchronný motor je definovaný záťažný uhol ν_G resp. ν_M .



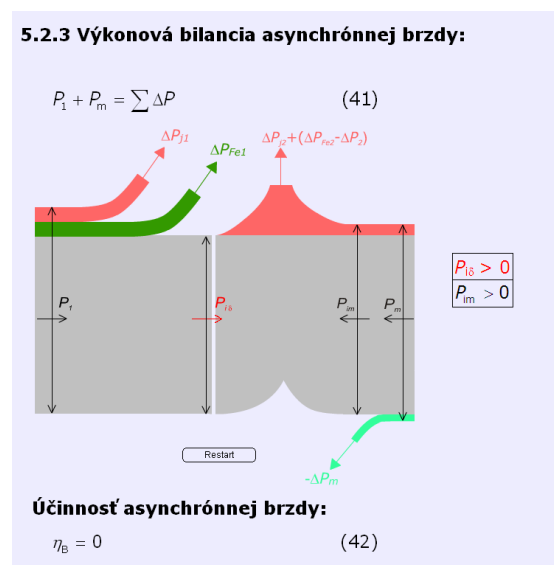
Obr.3 Princíp synchronného motora a generátora

3.2 Výkonová analýza

Výkonové rovnice sú zobrazované grafickými animáciami. Na obr. 4 je príklad pre asynchronný motor a na obr. 5 pre asynchronnú brzdú.



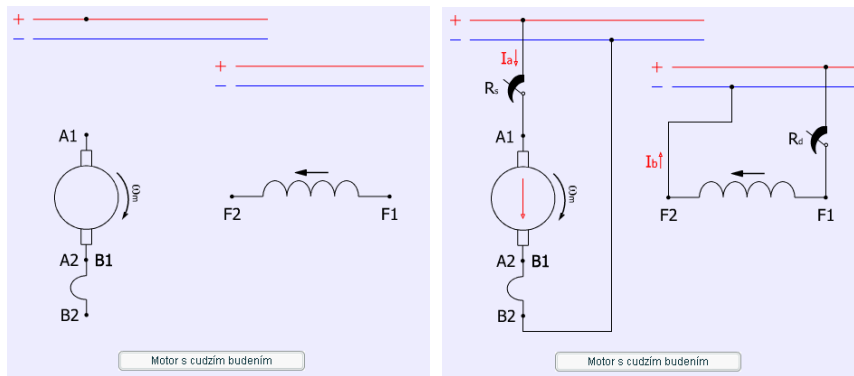
Obr. 4 Výkonová bilancia asynchronného motora



Obr. 5 Výkonová bilancia a asynchronnej brzdy

3.3 Elektrické schémy vinutí

Princíp tvorby zapojení jednosmerných strojov vychádza z medzinárodnej normy, platnej pre označovanie vinutí jednosmerného stroja. Na obr. 6 je schéma zapojenia jednosmerného motora s cudzím budením. Vytvára sa v troch fázach : a) rozloženie vinutí jednosmerného stroja – podľa normy, b) zapojenie obvodu kotvy, a zapojenie obvodu budenia. Smery prúdov rešpektujú základný smer otáčania u jednosmerného dynamu vľavo a u jednosmerného motora vpravo.



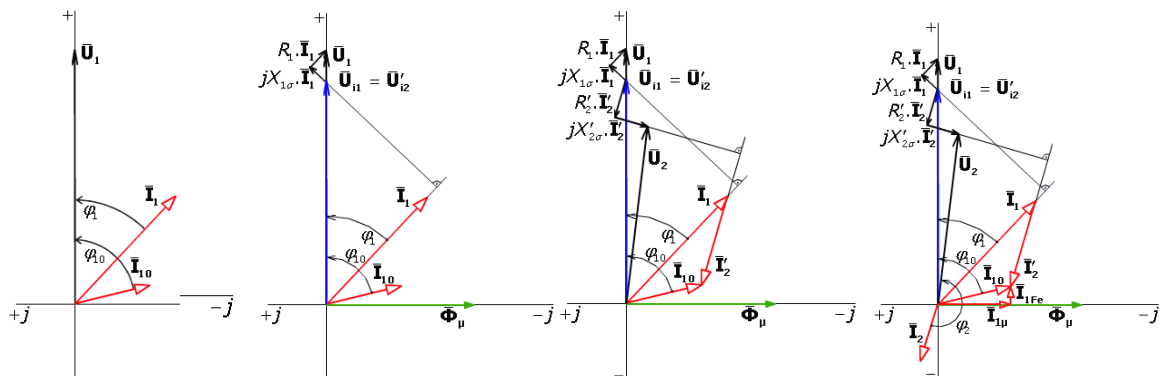
Obr.6 Princíp spájania vinutí jednosmerných strojov – jednosmerný motor s cudzím budením

4. Interaktívne grafy

4.1 Fázorové diagramy

Ťažiskom riešenia striedavých elektrických strojov je fázorová teória elektrických strojov. Vychádza z teórie elektromagnetického poľa a teórie striedavých elektrických obvodov pri harmonickom napájaní elektrických obvodov stroja. V princípe predstavuje sústavu napäťových rovníc a prúdovú rovnicu obvodu. Riešenie na základe fázorovej teórie umožňuje jednotný princíp zobrazovania v interaktívnych grafoch. Pre dané prúdové zaťaženie a pre známe parametre elektrických obvodov stroja – rezistancie a reaktancie vinutí, je aditívnym postupom konštruovaný napäťový a prúdový diagram. Tieto zásady sú realizované pre všetky striedavé elektrické stroje v chode naprázdno, v stave nakrátko a v zaťažení.

Na obr. 7 je parciálny fázorový diagram zaťaženého transformátora.



Obr. 7 Fázorový diagram zaťaženého transformátora – postup tvorby interaktívneho grafu

4.7 ASYNCHRÓNNY MOTOR V ZAŽAŽENÍ

Napäťové rovnice:

$$\mathbf{U}_1 = R_1 \mathbf{I}_1 + jX_{1\sigma} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_{11} \quad (19)$$

$$0 = \frac{R'_2}{s} \mathbf{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \mathbf{I}'_2 + \mathbf{U}_{11} \quad (22)$$

Prúdová rovnica:

$$\mathbf{I}_{10} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}'_2 = \mathbf{I}_{1Fe} + \mathbf{I}_{1\mu} \quad (23)$$

Náhradná schéma AM v zaťažení:

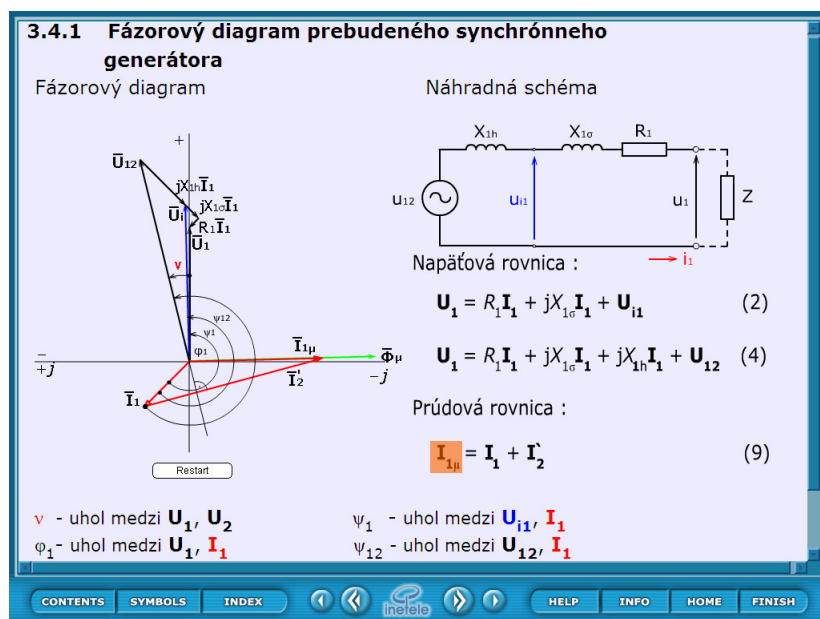
Fázorový diagram v zaťažení:

Press any key

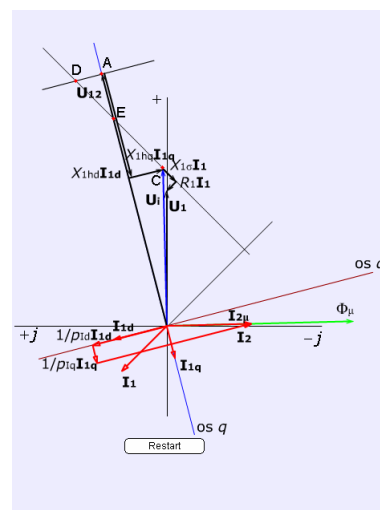
CONTENTS
SYMBOLS
INDEX
HELP
INFO
HOME
FINISH

Obr. 8 Fázorový diagram asynchrónneho motora nakrátko v zaťažení

Fázorový diagram pre asynchrónny stroj v zaťažení je na obr. 8, pre synchronné stroje s hladkým rotorom a s vyjadrenými pólmi na obr.9a. a obr.9b.



a)

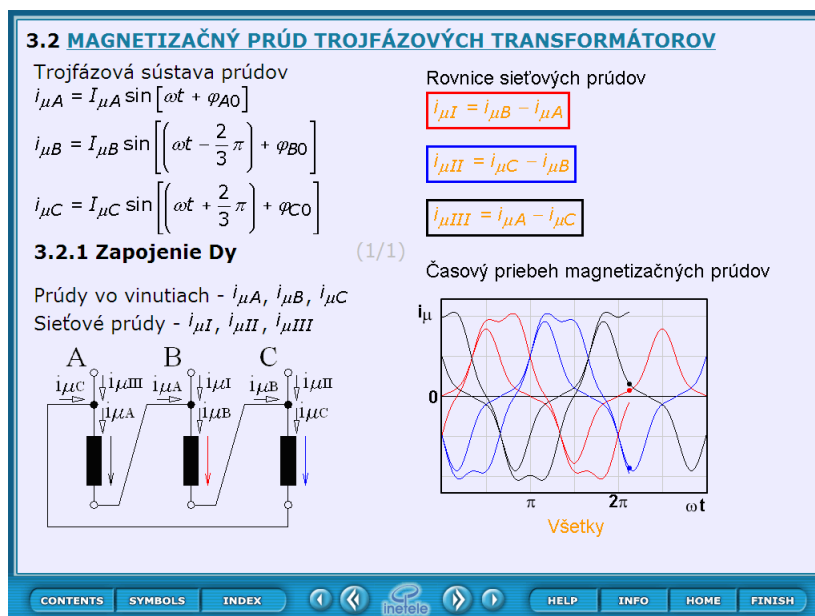


b)

Obr. 9 Fázorový diagram prebudeného synchronného generátora
a) synchronný stroj s hladkým rotorom, b) synchronný stroj s vyjadrenými pólmi

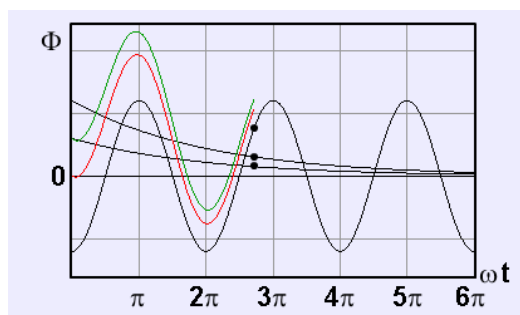
4.2 Časové priebehy, prechodné deje

Príkladom iného použitia interaktívneho grafu je riešenie časových priebehov magnetizačných prúdov trojfázových transformátorov. Na obr. 10 je priebeh prúdov trojfázového transformátora v zapojení Dy. Interaktívny graf umožňuje sledovať prúdy v jednotlivých fázach transformátora, ako aj súčasné sledovanie všetkých prúdov trojfázovej sústavy.



Obr. 10 Primárne magnetizačné prúdy trojfázového transformátora v zapojení Dy

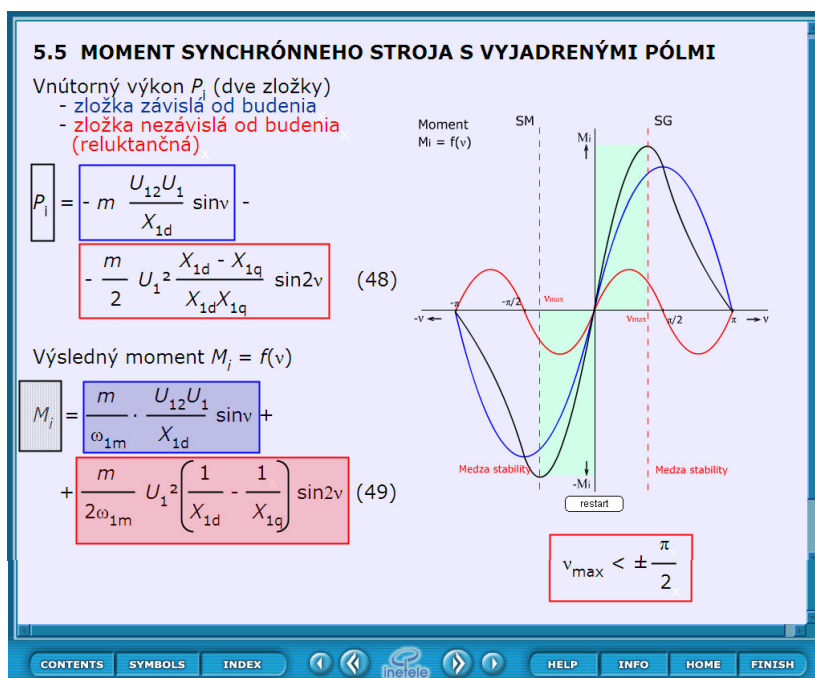
Na obr.11 je riešenie prechodného deja transformátora – pripojenie nezaťaženého transformátora na sieť. Výsledná rovnica je graficky interpretovaná na aditívnom princípe.



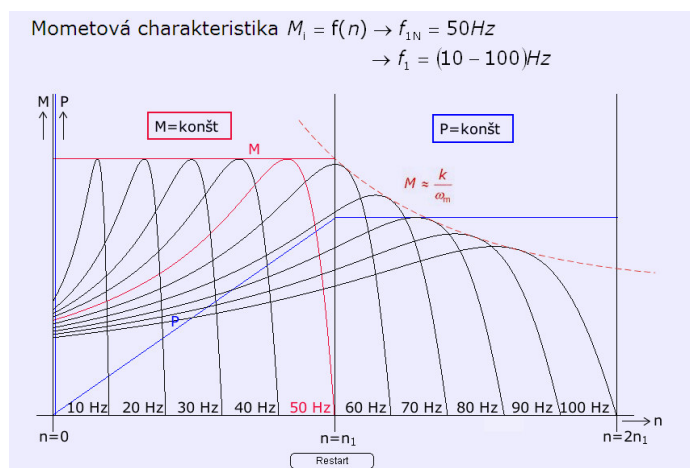
Obr. 11 Priebeh magnetického toku nezaťaženého transformátora

4.3 Charakteristiky strojov

Interaktívne grafy majú najväčší priestor pre interpretáciu charakteristík elektrických strojov. Jednak ako jednoparametrové grafy, ale umožňujú aj interpretácie pri zmene parametrov. Typickým priebehom je momentová charakteristika jednosmerných a striedavých elektrických strojov. Na obr. 12 je výsledný priebeh momentu M v závislosti od záťažného uhla $M = f(\nu)$ pre synchronný stroj s vyjadrenými pólmi. Na obr. 13 je dvojzónová regulácia asynchrónneho motora z napäťového meniča frekvencie.

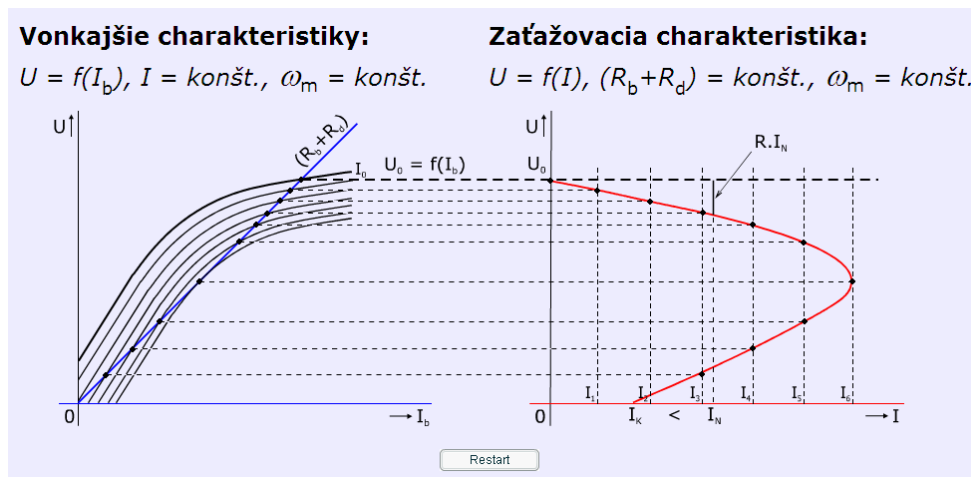


Obr.12 Momentová charakteristika synchronného stroja s vyjadrenými pólmi $M = f(\nu)$



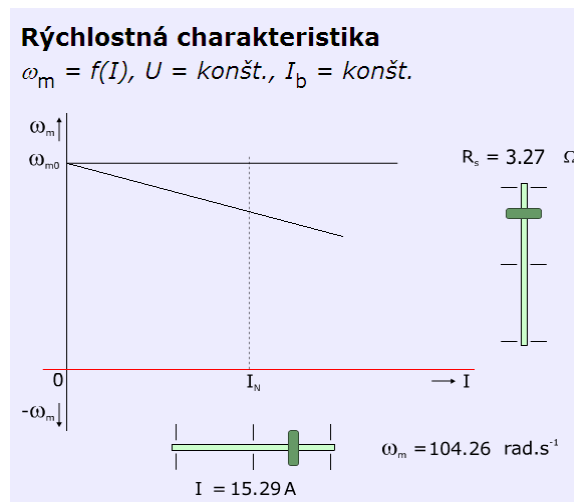
Obr.13 Dvojzónová regulácia asynchrónneho motora

Z jednosmerných strojov je príklad interaktívneho grafu uvedený na obr. 14 - odvozenie zaťažovacej charakteristiky $U = f(I)$ derivačného dynamu z vonkajších charakteristík $U = f(I_b)$.

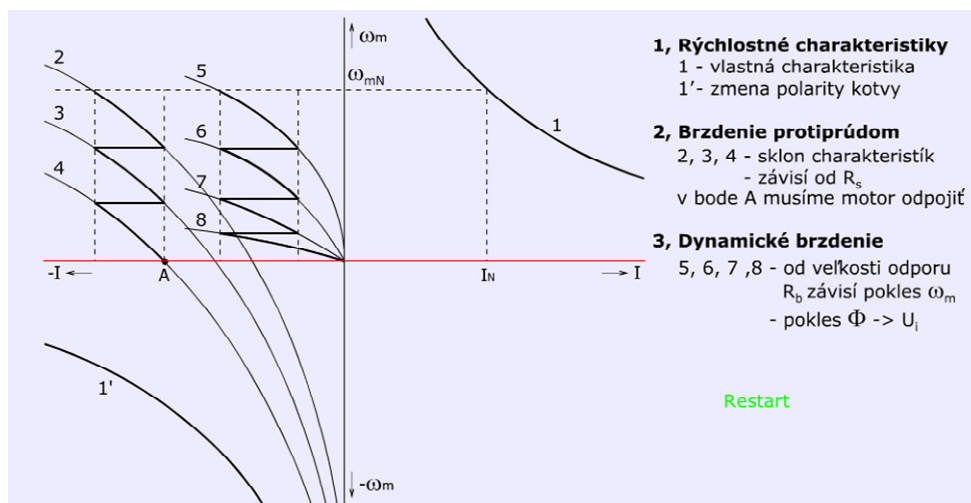


Obr. 14 Zaťažovacia charakteristika derivačného dynamu

Zaťažovanie motora s cudzím budením je ako ukážka tzv. dvojparametrického grafu na obr. 15. – zmena prúdu a odporu v kotve. Brzdenie jednosmerného sériového motora má výsledné charakteristiky na obr.16.



Obr. 15 Zaťažovanie motora s cudzím budením



Obr. 16 Brzdienie jednosmerného motora

5. Záver

Prostriedky e-learningového vzdelávania v module Elektrické stroje poskytujú komfortnú flexibilitu pri štúdiu. Textová zrozumiteľnosť a grafická jednoznačnosť pri viacnásobnom opakovaní zvyšujú faktor trvalých vedomostí. Modul umožňuje širokému spektru poslucháčov s veľmi rôznym vedomostným vstupom získať tzv. bázové vedomosti potrebné pre ďalšie štúdium v programoch Elektrotechnika a Mechatronika.

Literatúra

- [1] Interactive and Unified E-Based Education and Training in Electrical Engineering”, INETELE. Project No CZ/02/B/F/PP/134009, Leonardo da Vinci Programme 2005
- [2] Bauer, P., Fedák, V.: Educational Visualization of Different Aspects for Power Circuits and Electrical Drives. 11th Power Electronics and Motion Control Int. Conference, EPE-PEMC 2004. Riga, Latvia, Sept. 2004. ISBN 9984-32-010-3.
- [3] Fedák, V., Kostelný, M., Kaňuch, J.: E-Learning Course on Transformers – Animation and Visualisation of Operation. Joint Czech-Polish Conference on Low Voltage Electrical Machines, LVEM 2005, Brno – Šlapanice, Czech Republic, Nov. 2004, pp. 23-32. ISBN 80-214-2632-2
- [4] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, J.: Interactive E-learning Module on Transformers, Int. Symposium on Electrical Machines, ISEM 2005, Prague, Czech Republic
- [5] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, J.: Interactive e-Learning Tool for Electrical Machines, 4th International Conference on Emerging e-learning Technologies and Applications, ICETA 2005 Košice,
- [6] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, E.: Interactive WEB based module: “AC Machines – Synchronous Machines”, International Symposium on Electrical Machines, ISEM 2006, Prague, Czech Republic, pp.100-106, ISBN 80-0103548-4

PodĎakovanie

Uvedený príspevok vznikol za podpory projektu zo slovenskej Agentúry na podporu výskumu a vývoja: „Výskum vlastností malých elektrických strojov pri neharmonickom napájaní“, APVV-0510-66.

MODELY VIBRACÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Gunnar KÜNZEL

Technická fakulta ČZU v Praze, KEA, ČR
kunzel@tf.czu.cz

Abstrakt: Referát se věnuje metodice tvorby matematických modelů mechanických vibrací elektrických strojů. Přitom se vychází z fyzikální analogie mezi elektrickými a mechanickými systémy. Jsou uvažovány modely jedno-, dvou- a tříhmotových systémů, doplněných pružinami a tlumícími prvky. Jsou formulovány příslušné diferenciální rovnice těchto modelů a ukázány jejich analogická elektrická schémata.

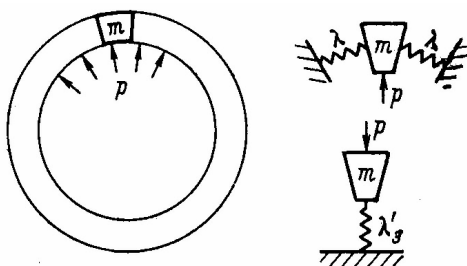
Klíčová slova: elektrický stroj, model, elektromechanická analogie

1. Metodika výpočtu mechanických vibrací elektrického stroje

Metodika výpočtu vibrací elektrického stroje závisí mimo jiné na charakteru a místě působení sil. Fyzikální model stroje závisí na tom, zda se vybudují vibrace nevyvážením rotoru, elektromagnetickými silami nebo např. chvěním ložiska. Kromě toho každý zdroj vibrací působí v určitém rozsahu frekvencí a existují charakteristické metody jejich tlumení ve zdroji a na cestách šíření vibrací. Tak např. příčinami nízkofrekvenční vibrace (1 - 100Hz) ve strojích s frekvencí otáčení do 3000ot/min mohou být nevyvážení rotoru, nesouosost hřídel jednotlivých agregátů, narušení geometrie, dvojitá tuhost rotoru.

Dynamický model stroje pro vyšetřování kmitů v tomto rozsahu kmitočtů je tvořen obvykle 2-3 soustředěnými hmotami, vázanými mezi sebou pružnými bezsetrvačnými prvky. Síly mají v těchto modelech obvykle soustředěný charakter. Celý stroj je uvažován jako jediný složený pružný systém a vyšetřování jeho vlastností probíhá metodami aplikované teorie kmitání. Kmity vybudené těmito silami určují dynamickou pevnost konstrukčních prvků stroje a nesou v sobě převažující část energie. Dobře se šíří na velkou vzdálenost při malém tlumení. To vše znamená, že uvedený rozsah je nejdůležitějším. V rozsahu středních a vysokých frekvencí je vibrace vybudována elektromagnetickými silami a chvěním ložisek.

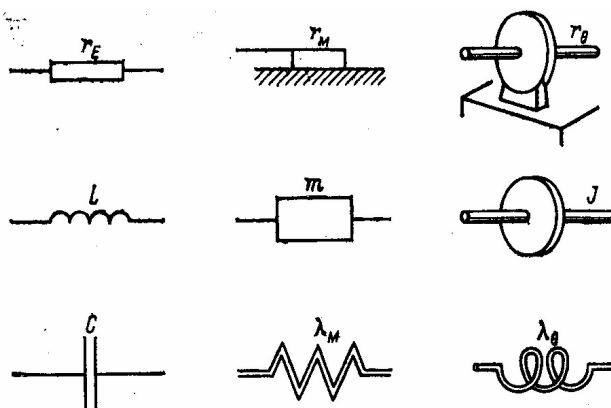
Dynamický model stroje při buzení elektromagnetickými silami může být tvořen řadou radiálních úseků, po kterých se kmity šíří od bodů působení sil k vybraným bodům pozorování. Konkrétní analýza dynamického chování stroje se provádí „rozřezáním“ systému statoru na řadu nezávislých podsystémů. Na obr.1 je ukázán příklad sestavení takového modelu pro stator elektrického stroje. Jak je vidět, válcový obal buzený systémem sil, rozložených po jeho vnitřním povrchu, vede ke kmitavému systému s jednou hmotou.



Obr.1 – Model kmitání statoru elektrického stroje

Popis vlastností podsystémů v bodech jejich spojení se sousedními elementy systému vede na použití zobecněných dynamických parametrů typu dynamické tuhosti (poddajnosti) nebo celkového odporu. Největší intenzitu mají vibrace, vybudené základní frekvencí rotujícího magnetického pole. Frekvence této vibrace je rovna dvojnásobné frekvenci napájecí sítě. Kmity vybudené chvěním ložisek v rozsahu středních a vysokých kmitočtů představují pružné vlny, které se šíří prvky konstrukce. Jejich výpočet je třeba opřít o akustické metody s ohledem na prostředí, složité geometricky i strukturálně. Takové výpočty jsou ovšem složité a z důvodu nízké přesnosti není vhodné je provádět. Kromě toho tyto kmity nesou pouze malou část energie kmitání celého spektra a při šíření konstrukčními prvky stroje jsou dobře tlumeny.

Působení vibrací jednotlivých prvků konstrukce elektrického stroje mohou být modelovány metodou elektromechanických analogií. Podstata této metody spočívá v tom, že libovolné mechanické kmitavé systémy mohou být nahrazeny ekvivalentními elektrickými obvody. Analogie mezi mechanickými a elektrickými systémy je popsána formálně stejnými diferenciálními rovnicemi kmitání. Základní prvky, ze kterých jsou složeny elektrické a mechanické kmitavé systémy, jsou na obr.2.



Obr.2 – Prvky elektrických obvodů a mechanických systémů

Základními prvky jsou:

Pro elektrický obvod – elektrický odpor r_E , indukčnost L a kapacita C

Pro mechanický obvod

s postupným pohybem – mechanický odpor r_M , hmota m a poddajnost pružiny λ_M

s rotačním pohybem – mechanický odpor (tření) r_θ , moment setrvačnosti J rotující

hmoty a poddajnost λ_θ rotačního pružného prvku

Z řešení diferenciálních rovnic, popisujících mechanické a elektrické systémy je vidět, že podobně jako hmota, poddajnost i odpor v mechanickém systému určují pohyb tělesa, tak indukčnost, kapacita i odpor určují proud v elektrickém obvodu. Způsob sestavení prvků mechanického systému určuje charakter rozložených sil a posunutí v systému. Z mnoha možných typů spojení prvků mechanického systému je možné uvažovat následující:

- Paralelní spojení elementů, při kterém rychlost každého prvku je rovna rychlosti celého systému a síla působící na celý systém je rovna součtu všech sil, působících na každý jednotlivý prvek.
- Sériové spojení elementů, při kterém rychlost systému je rovna součtu rychlostí jednotlivých elementů a síla působící na celý systém je rovna síle působící na každý jednotlivý prvek.
- Smíšené (kombinované) spojení obsahuje jak sériová, tak paralelní spojení prvků

Způsob spojení prvků v elektrických obvodech určuje charakter rozdělení napětí a proudu. Zde jsou též možné tři typy spojení:

- Sériové spojení prvků, při které proud v každém prvku je roven proudu celého obvodu a napětí je rovno součtu napětí na každém dílčím prvku.
- Paralelní spojení prvků, při kterém proud v obvodu je roven součtu dílčích proudů v prvcích a napětí celého obvodu je rovno napětí na každém prvku.
- Kombinované spojení zahrnuje jak sériové, tak paralelní spojení prvků.

Srovnání mechanických systémů a elektrických obvodů vede k závěru, že při použití analogie síla – elektrické napětí-na základě duality - paralelnímu spojení mechanických prvků odpovídá sériové zapojení prvků elektrického obvodu a sériovému spojení mechanických prvků odpovídá paralelní spojení elektrických prvků.

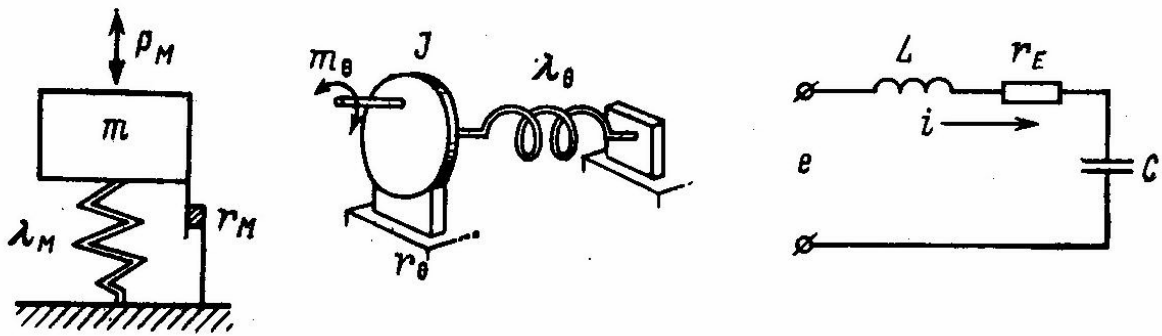
Výpočet magnetické vibrace se nemůže omezit pouze na určení spektra budících sil, ale musí být završen také určením spektra vibrací. Je to dáno tím, že elektromagnetické síly, působící ve vzduchové mezeře elektrického stroje, jsou obvykle silové vlny sinusového tvaru a každá z nich má svůj kmitočet i amplitudu. Jestliže takový systém sil vybudí vibrace elektrického stroje, pak dochází k tzv. selektivní rezonanci. Jestliže spektrum budících sil v elektrickém stroji je tvořeno množstvím harmonických složek, pak spektrum jeho vibrací je obvykle spojené s existencí velkého množství rezonancí. Pro jejich tlumení existují dvě různé metody: Jedna z nich spočívá ve změně hmotnosti nebo tuhosti prvků, druhá metoda spočívá ve zvýšeném tlumení systému použitím speciálních tlumících materiálů. Efektivnější je první metoda, avšak ne vždy ji lze použít.

2. Jednohmotový mechanický systém

Jednohmotový mechanický systém s postupným i rotačním pohybem a jeho elektrická analogie je ukázána na obr.3.

Ke kmitání systému s postupným pohybem vede:

- Vibrace amortizovaného elektrického stroje na základové desce nekonečné hmoty a tuhosti, vybuzené nevyvážeností rotoru.
- Vibrace jádra statoru, buzeného elektromagnetickými silami.



Obr.3 – Kmitavý systém s postupným, rotačním pohybem a jeho elektrická analogie

Ke kmitání rotačního systému vedou rotační kmity elektrického stroje spojeného s rotorem, majícím nekonečně velký moment setrvačnosti. Tyto kmity se vybudují při vnějším spojení nakrátko statorového vinutí.

V elektrickém obvodu r_E , L , C s napájecím napětím e platí rovnice rovnováhy na základě II. Kirchhoffova zákona

$$L \frac{di}{dt} + r_E i + \frac{q}{C} = E e^{j\omega t} \quad (1)$$

nebo

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + r_E \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E e^{j\omega t} \quad (2)$$

V mechanickém systému s postupným pohybem působí síla P_M na hmotu m spojenou s pružinou λ_M a ztrátovým prvkem (tlumičem) r_M , úměrným rychlosti. Platí rovnice silové rovnováhy na základě II. Newtonova zákona

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + r_M \frac{dy}{dt} + \frac{y}{\lambda_M} = P_M e^{j\omega t} \quad (3)$$

V mechanickém systému s rotačním pohybem působí kroutící moment M_θ na rotující těleso s momentem setrvačnosti J , spojeným s rotačním pružným prvkem λ_θ a rotačním tlumičem r_θ , úměrným úhlové rychlosti. Rovnice momentové rovnováhy je

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + r_\theta \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\varphi}{\lambda_\theta} = M_\theta e^{j\omega t} \quad (4)$$

Řešení rovnic 2-4 má tvar

$$\dot{q} = i = \frac{E e^{j\omega t}}{r_E + j\omega L - j/(\omega C)} = \frac{e}{z_E} \quad (5)$$

pro elektrický obvod,

$$\dot{y} = \frac{P_M e^{j\omega t}}{r_M + j\omega m - j/(\omega \lambda_M)} = \frac{P_M}{z_M} \quad (6)$$

pro mechanický systém s postupným pohybem,

$$\dot{\varphi} = \frac{M_\theta e^{j\omega t}}{r_\theta + j\omega J - j/(\omega \lambda_\theta)} = \frac{m_\theta}{z_\theta} \quad (7)$$

pro mechanický systém s rotačním pohybem.

Komplexní impedance jsou:

$$z_E = r_E + j\omega L - j/(\omega C) \quad (8)$$

$$z_M = r_M + j\omega m - j/(\omega \lambda_M) \quad (9)$$

$$z_\theta = r_\theta + j\omega J - j/(\omega \lambda_\theta) \quad (10)$$

Jednotka odporu pro mechanický systém s postupným pohybem $[r_M] = [\text{Nsm}^{-1}]$,

pro mechanický systém s rotačním pohybem $[r_\theta] = [\text{Nms} \cdot \text{rad}^{-1}]$

Při rezonančním kmitočtu $\omega = \omega_0$ je imaginární složka komplexní impedance rovna nule.. Přitom proud i v elektrickém obvodu, rychlost y' nebo $\dot{\varphi}'$ v mechanickém systému nabývá maximální hodnoty. Kromě toho proud i napětí, rychlost i síla, úhlová rychlost i kroutící moment jsou ve fázi. Rezananční kmitočet je v těchto případech roven

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (11)$$

pro elektrický systém,

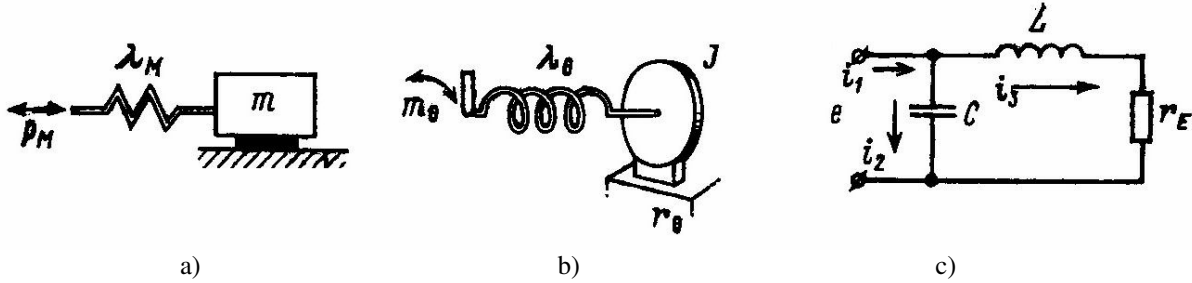
$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{m\lambda_M}) \quad (12)$$

pro mechanický systém s postupným pohybem,

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{J\lambda_\theta}) \quad (13)$$

pro mechanický systém s rotačním pohybem.

Na obr.4 je ukázán jiný příklad jednohmotového kmitavého systému a jeho elektrická analogie.



Obr.4 – Jednohmotový kmitavý systém a jeho elektrická analogie

Toto schéma odpovídá amortizovanému stroji, postavenému na vibrujícím základě (Obr.4a) a rotoru generátoru, přivedeného do jmenovitých otáček diesellového motoru (Obr.4b). V tomto případě proudy i a rychlost posunutí y' jsou rovny

- Pro elektrický obvod

$$i_3 = e/(r_E + j\omega L) \quad (14)$$

tj. proud, procházející indukčností L a odporem r_E ;

$$i_1 = \frac{e[r_E + j\omega L + 1/(j\omega C)]}{(r_E + j\omega L)1/(j\omega C)} \quad (15)$$

celkový proud;

$$i_2 = i_1 = i_3 = ej\omega C \quad (16)$$

proud, tekoucí přes kondenzátor C .

- Pro mechanický systém s postupným pohybem

$$\dot{y}_3 = P_M/(r_M + j\omega m) \quad (17)$$

lineární rychlost hmoty m ;

$$\dot{y}_1 = \frac{P_M[r_M + j\omega m + 1/(j\omega\lambda_M)]}{(r_M + j\omega m)1/(j\omega\lambda_M)} \quad (18)$$

lineární rychlost v bodě působení síly p_M ;

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_1 = \dot{y}_3 = P_M j\omega\lambda_M \quad (19)$$

rychlost y_2' , tj. rozdíl mezi lineární rychlostí dvou konců pružiny.

- Pro mechanický rotační systém

$$\dot{\phi}_3 = m_\theta/(r_\theta + j\omega J) \quad (20)$$

úhlová rychlost rotačního systému s momentem setrvačnosti J ;

$$\dot{\phi}_2 = \frac{m_\theta[r_\theta + j\omega J + 1/(j\omega\lambda_\theta)]}{(r_\theta + j\omega J)1/(j\omega\lambda_\theta)} \quad (21)$$

celková úhlová rychlost v bodě působení momentu;

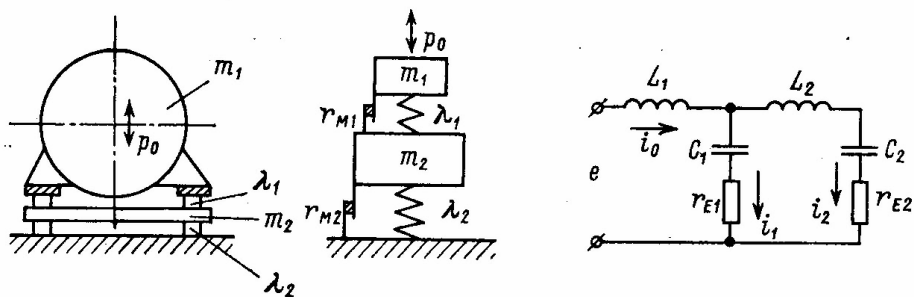
$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_3 = m_\theta j\omega\lambda_\theta \quad (22)$$

úhlová rychlost ϕ_2' , tj. rozdíl úhlových rychlostí ve dvou koncích rotační pružiny λ_θ .

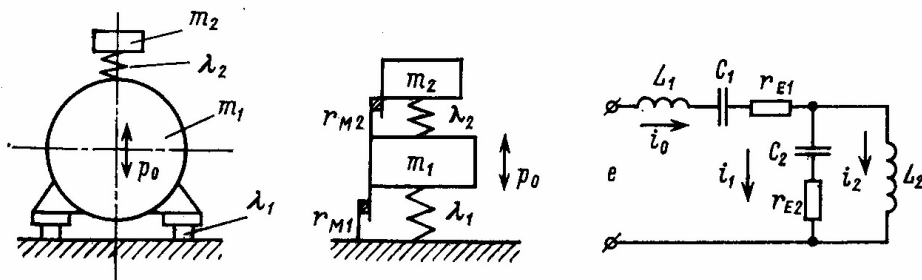
3. Dvuhmotový kmitavý systém

Na obr.5-7 jsou ukázány dvuhmotové kmitavé systémy a jejich elektrické analogie, ke kterým patří:

- stroj hmotnosti m_1 , postavený na dvojitou kaskádu amortizátorů, z nichž první má poddajnost λ_1 a druhý λ_2 s vloženou hmotností m_2 (Obr.5). Stroj je vybuzován silami p_0 .
- Stroj o hmotnosti m_1 , postavený na amortizátor λ_1 a s dynamickým absorbérem kmitů (m_2, λ_2). Stroj je buzen silami p_0 . (Obr.6)

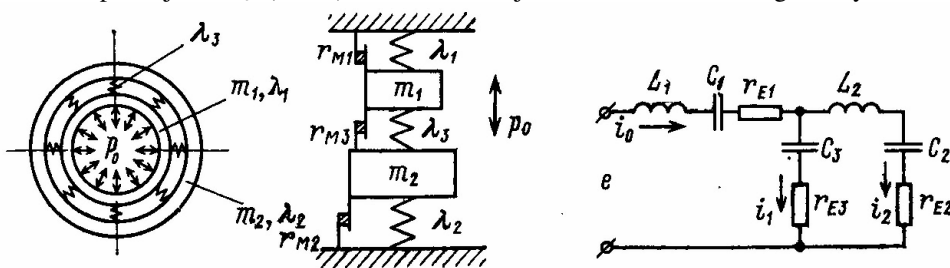


Obr.5 – Stroj, postavený na dvojité kaskádě amortizátorů a jeho elektrická analogie



Obr.6 – Amortizovaný stroj s dynamickým absorbérem kmitů a jeho elektrická analogie

- Železné těleso statoru o hmotnosti m_1 a poddajnosti λ_1 , pružně zavěšené v tělese m_2 s poddajností λ_2 na pružinách s poddajností λ_3 . (Obr.7). Těleso statoru je buzeno radiálními magnetickými silami p_0 .



Obr.7 – Stator s pružným zavěšením v tělese a jeho elektrická analogie.

Elektrické a mechanické odpory jednotlivých částí ekvivalentních systémů jsou rovny:

Pro obr.5

$$z_{E1} = j\omega L_1; \quad z_{E2} = r_{E1} + \frac{1}{j\omega C_1}; \quad z_{E3} = z_{E2} + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (23)$$

pro elektrický obvod,

$$z_{m1} = j\omega m_1; \quad z_{M2} = r_{M1} + \frac{1}{j\omega \lambda_1}; \quad z_{M3} = z_{M2} + j\omega m_2 + \frac{1}{j\omega \lambda_2} \quad (24)$$

pro mechanický systém.

Pro obr.6

$$z_{E1} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + r_{E1}; \quad z_{E2} = r_{E2} + \frac{1}{j\omega C_2}; \quad z_{E3} = j\omega L_2 \quad (25)$$

pro elektrický obvod,

$$z_{M1} = j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega \lambda_1} + r_{m1}; \quad z_{M2} = r_{M2} + \frac{1}{j\omega \lambda_2}; \quad z_{M3} = j\omega m_2 \quad (26)$$

pro mechanický systém.

Pro obr.7

$$z_{E1} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + r_{E1}; \quad z_{E2} = r_{E3} + \frac{1}{j\omega C_3}; \quad z_{E3} = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + r_{E2} \quad (27)$$

pro elektrický obvod,

$$z_{M1} = j\omega m_1 + \frac{1}{j\omega \lambda_1} + r_{m1}; \quad z_{M2} = r_{M3} + \frac{1}{j\omega \lambda_3}; \quad z_{M3} = j\omega m_2 + \frac{1}{j\omega \lambda_2} + r_{M2} \quad (28)$$

pro mechanický systém.

Proudy a kmitavé rychlosti pro všechny tři úlohy mají stejné řešení.

- Pro elektrický obvod

$$i_0 = e(z_{E2} + z_{E3}) / H_E \quad (29)$$

$$i_1 = \frac{e z_{E3}}{H_E} \quad (30)$$

$$i_2 = \frac{e z_{E2}}{H_E} \quad (31)$$

- Pro mechanický systém

$$\dot{y}_0 = p_0(z_{M2} + z_{M3}) / H_M \quad (32)$$

$$\dot{y}_1 = p_0 z_{M3} / H_M \quad (33)$$

$$\dot{y}_2 = p_0 z_{M2} / H_M \quad (34)$$

kde

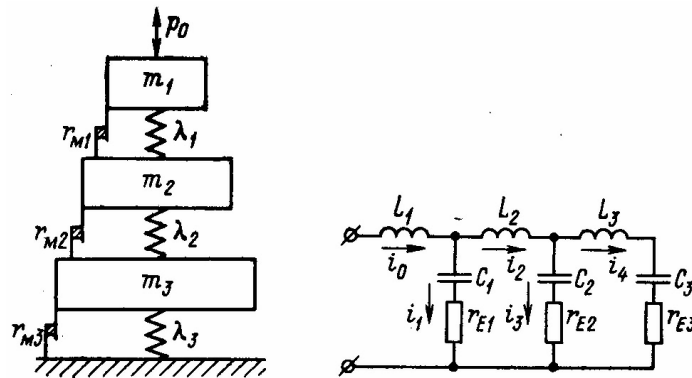
$$H_E = z_{E2} z_{E3} + z_{E2} z_{E1} + z_{E3} z_{E1} \quad (35)$$

$$H_M = z_{M2} z_{M3} + z_{M2} z_{M1} + z_{M3} z_{M1} \quad (36)$$

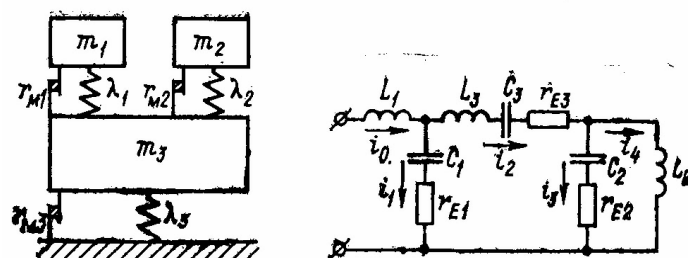
Hodnoty z_E a z_M v rovnicích 29-36 odpovídají pro každý jednotlivý systém.

4. Trojmotový kmitavý systém

Na obr.8 a 9 jsou uvedeny trojmotové kmitavé systémy a jejich elektrické analogie, se kterými se v poslední době nejčastěji setkáváme při řešení vibračních úloh.



Obr.8 – Trojmotový kmitavý systém I



Obr.9 - Trojmotový kmitavý systém II

Elektrické a mechanické odpory jednotlivých částí ekvivalentních systémů jsou:

Pro obr.8

$$\begin{aligned} z_{E1} &= j\omega L_1; & z_{E2} &= r_{E1} + \frac{1}{j\omega C_1}; & z_{E3} &= j\omega L_2; \\ z_{E4} &= r_{E2} + \frac{1}{j\omega C_2}; & z_{E5} &= j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3} + r_{E3} \end{aligned} \quad (37)$$

pro elektrický obvod,

$$\begin{aligned} z_{M1} &= j\omega L_1; & z_{M2} &= r_{M1} + \frac{1}{j\omega C_1}; & z_{M3} &= j\omega m_2; \\ z_{M4} &= r_{M2} + \frac{1}{j\omega \lambda_2}; & z_{M5} &= j\omega m_3 + \frac{1}{j\omega \lambda_3} + r_{M3} \end{aligned} \quad (38)$$

pro mechanický systém.

Pro obr.9

$$\begin{aligned} z_{E1} &= j\omega L_1; & z_{E2} &= r_{E1} + \frac{1}{j\omega C_1}; & z_{E3} &= r_{E3} = j\omega L_3 + 1/(j\omega C_3); \\ z_{E4} &= r_{E2} + \frac{1}{j\omega C_2}; & z_{E5} &= j\omega L_2 \end{aligned} \quad (39)$$

pro elektrický obvod,

$$\begin{aligned} z_{M1} &= j\omega m_1; & z_{M2} &= r_{M1} + \frac{1}{j\omega \lambda_1}; & z_{M3} &= r_{M3} + j\omega m_3 + 1/(j\omega \lambda_3); \\ z_{M4} &= r_{M2} + \frac{1}{j\omega \lambda_2}; & z_{M5} &= j\omega m_2; \end{aligned} \quad (40)$$

pro mechanický systém.

Proudy a kmitavé rychlosti pro uvedené případy mají stejné řešení a jsou rovny:

- Pro elektrický obvod

$$i_0 = e[z_{E2} + z_{E3} + z_{E4}z_{E5} / (z_{E4} + z_{E5})] / H_E \quad (41)$$

$$i_1 = e z_{E2} / H_E \quad (42)$$

$$i_2 = e[z_{E2}z_{E4} / (z_{E4} + z_{E5})] / H_E \quad (43)$$

- Pro mechanický systém

$$\dot{y}_0 = p_0[z_{M2} + z_{M3} + z_{M4}z_{M5} / (z_{M4} + z_{M5})] / H_M \quad (44)$$

$$\dot{y}_1 = p_0 z_{M2} / H_M \quad (45)$$

$$\dot{y}_2 = p_0[z_{M2}z_{M4} / (z_{M4} + z_{M5})] / H_M \quad (46)$$

kde

$$\begin{aligned} H_E &= z_{E1}z_{E2} + z_{E2}z_{E3} + z_{E3}z_{E1} / (z_{E4} + z_{E5})(z_{E1} + z_{E2}); \\ H_M &= z_{M2}z_{M3} + z_{M2}z_{M1} + z_{M3}z_{M1} + z_{M4}z_{M5} / (z_{M4} + z_{M5})(z_{M1} + z_{M2}) \end{aligned} \quad (47)$$

Hodnoty z_E a z_M ve výše uvedených rovnicích bereme odpovídají pro každý jednotlivý systém. Vyšetřované kmitý systému zahrnují nejčastější případy modelu vibrací konstrukčních prvků elektrických strojů. Tyto vztahy mohou být dále používány při výpočtech vibrací v oblasti dále od rezonanční frekvence, což dovozuje zanedbat tlumení, resp. tření r_M .

5. Závěr

Příspěvek poukazuje na výhodnost použití elektromechanické analogie a pomocí rovnic, popisujících dynamiku mechanických vibrací v elektrickém stroji jsou sestaveny elektrické obvodové struktury. Sestavené modely budou využity na TF ČZU v nově zavedeném předmětu magisterského studia – Počítačové modelování

dynamických soustav. Kvantifikace modelů ovšem předpokládá znalost příslušných mechanických parametrů nebo jim úměrných a odpovídajících elektrických parametrů. K tomu je obvykle třeba provést měření rychlostí, sil pomocí snímačů vibrací, měření impedancí, případně měření tzv. Blondelových funkcí u dílčích přenosových bloků. Tato problematika bude zpracována v některém z dalších autorových příspěvků.

6. Literatura

- [1] Urban, P.: Teorie a metody přenosu vibrací mechanickými díly, Academia, Praha, 1983
- [2] Roubíček, O.: Využití duálních liniových schemat v elektromechanice, Elektro, roč.57., 2002, č.8-9, str. 76-78
- [3] Migulin, V. V.: Osnovy teorii kolebanij, Nauka, Moskva, 1988
- [4] Šubov, I. G.: Vibracia električeskych mašin, Enërgoatomizdat, Leningrad, 1986

INTERAKTÍVNE NÁSTROJE E - LEARNINGOVÉHO MODULU ELEKTRICKÉ STROJE

Michal KOSTELNÝ

Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita, Letná 9, 04200 Košice, Slovenská republika, *Michal.Kostelny@tuke.sk*

Abstrakt: Príspevok sa zaoberá metodikou tvorby e-learningových modulov z oblasti elektrických strojov. Predstavuje aplikáciu e-learningových nástrojov použitých pri tvorbe modulu s multifunkčnou štruktúrou pre bakalárske interné, externé a dištančné štúdium. Vychádza zo štandardného rozdelenia elektrických strojov: Transformátory, Asynchrónne stroje, Synchronne stroje a Jednosmerné stroje, ktoré tvoria samostatné subsystemy modulu. E - learningové nástroje predstavujú animácie, interaktívne grafy, diagramy, ktoré sú aplikované v konštrukcii, fyzikálnych princípoch a teórii striedavých i jednosmerných elektrických strojov.

KLúčové slová: elektrický stroj, E-learning, animácia, interaktívny graf, vzdelávací modul

1. Úvod

Súčasný trend informačných technológií vytvára nové komfortné prostredie i vo vzdelávacom procese, zasahuje do všetkých stupňov vzdelávania. Môžeme povedať, že významnou mierou prispieva k formovaniu tzv. informačnej spoločnosti. Štandardizuje sa e-vzdelávací proces v univerzitnom vzdelávaní a uplatňuje sa i v najzložitejších vedných disciplínach. Je preto logické, že e-vzdelávanie sa narastajúcou mierou podieľa v bakalárskom a inžinierskom štúdiu aj v technických odboroch.

E-vzdelávacie moduly pokrývajú stále väčšiu časť predmetov v študijných plánoch Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. S naštartovanou reformou štúdia a narastajúcim počtom študentov externého štúdia, je potreba „väčšej študijnej nezávislosti“ veľmi aktuálna. Projekty, ktoré vznikli v posledných rokoch zásadným spôsobom menia a zefektívňujú formu štúdia elektrotechnického inžinierstva.

Prostredníctvom projektu „Interactive and Unified E-Based Education and Training in Electrical Engineering“, INETELE, v rámci programu Leonardo da Vinci II, (č. projektu CZ/02/B/F/PP/134009), Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva Technickej Univerzity v Košiciach prispela k rozvoju e – vzdelávacích modulov pre odbor Elektrické pohony.

Moduly vytvorené v medzinárodnom projekte môžeme zoradiť do skupín :

1. Základy elektrotechniky
2. Elektrické stroje
3. Elektronika, Výkonová elektronika a jej aplikácie
4. Elektrické pohony, Regulované pohony, Mechatronika, Robotika
5. Simulácie Výkonovej elektroniky.

V rámci projektu bol vytvorený v roku 2005 ako pilotný modul Transformátory. Vzhľadom na požadovanú jednotnosť e – learningového prostredia, boli v nasledujúcich rokoch realizované aj ďalšie časti modulu s plnou kompatibilitou.. Moduly boli predstavené na medzinárodných konferenciách ICETA 2005 [5] a ICETA 2007 a sympóziách ISEM 2005 [4] a ISEM 2007 [6].

2. Architektúra modulu

Študijný text je univerzálny, je prezentovaný primárnymi a sekundárnymi obrazovkami. **Primárne obrazovky** majú prednáškový obsah, sú to tzv. hlavné obrazovky. Predstavujú základnú teóriu elektrických strojov s výslednými rovnicami a charakteristikami v najvyššej možnej interakcii. Obsahujú animácie, interaktívne grafy a diagramy, ktoré zvyrazňujú princípy a vlastnosti elektrických strojov. V striedavých strojoch vychádzajú z fázorovej teórie. Obsahujú základnú pojmovú bázu s priamou interakciou v texte. Kliknutím na prvýkrát v texte uvedený základný termín (modrá farba), sa objaví vysvetľujúci text v žltom poli. Opakovaný prístup a dĺžka čítania sú neobmedzené.

Primárne obrazovky sú bezprostredne zviazané so statickými **sekundárnymi obrazovkami**, ktoré majú textovú funkciu a sú predovšetkým nástrojom samostatného štúdia. Obsahujú prakticky všetky grafické časti, dopĺňujúcim textom rozširujú informáciu z hlavnej obrazovky.

Všetky moduly vytvorené na základe projektu INETELE majú jednotný grafický výstup s jednotným princípom voľby farieb :

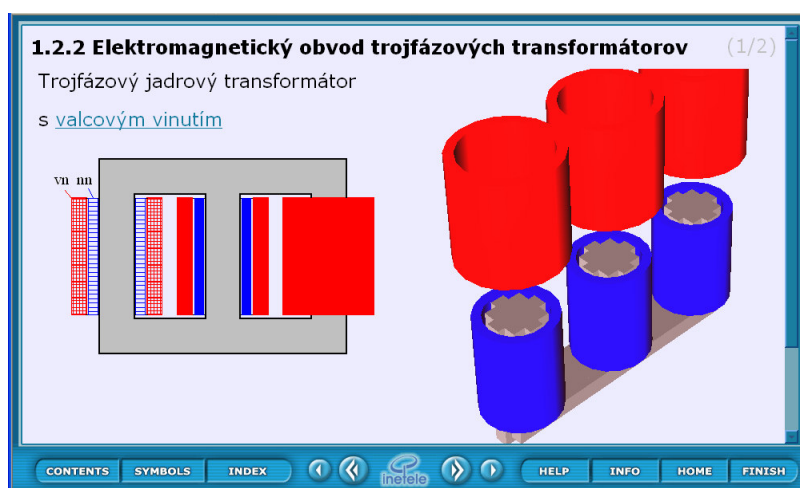
Červená – prúd, **čierna** – napätie, *moment, uhlová rýchlosť*, **modrá** – indukované napätie, **zelená** – magnetický tok, **oranžová** - akcia

Obrazovky sú v modrom ohraničení a majú štandardizovanú ovládaciu lištu pre všetky moduly s jednoduchou odkazovou logikou.

3. Animácie

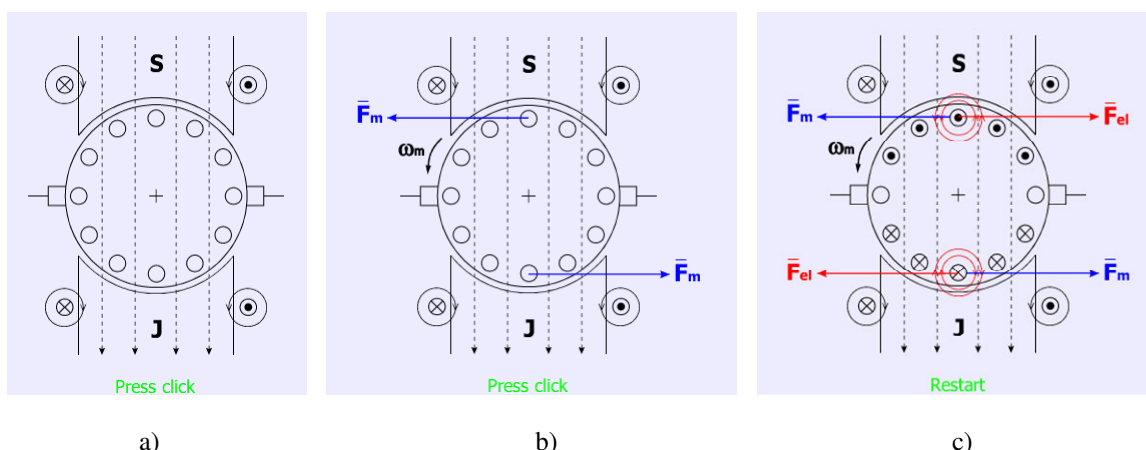
3.1 Konštrukcia a princíp

Konštrukčné modifikácie transformátora sú realizované pre jednofázové i trojfázové transformátory priestorovými animáciami na základe dvoch typov magnetického obvodu – jadrový a plášťový a dvoch princípov vinutí transformátora – valcové a vystriedané. Na obr.1 je najčastejšia konštrukcia trojfázového jadrového transformátora s valcovým vinutím.



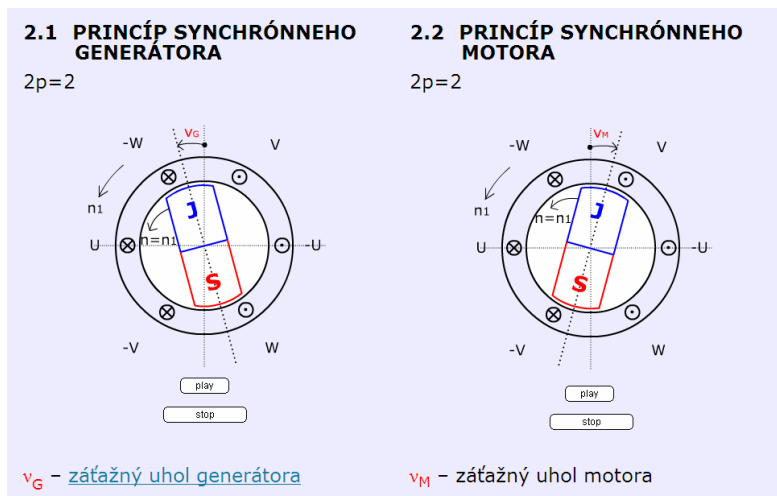
Obr. 1 Konštrukcia trojfázového jadrového transformátora s valcovým vinutím

Princípy elektrických strojov točivých sú vysvetlené na animáciách, ktorých postupnosť je prezentovaná na jednosmerných a asynchrónnych strojoch. Na obr. 2 je vysvetlený princíp jednosmerného dynama v troch fázach: a) – vytvorenie magnetického toku budiacim vinutím, b) – polarita prúdu kotvy, ktorý vzniká od indukovaného napätia pri otáčaní kotvy vľavo mechanickou uhlovou rýchlosťou ω_m , c) sily pôsobiacej na vodiče kotvy.



Obr.2 Princíp jednosmerného dynama

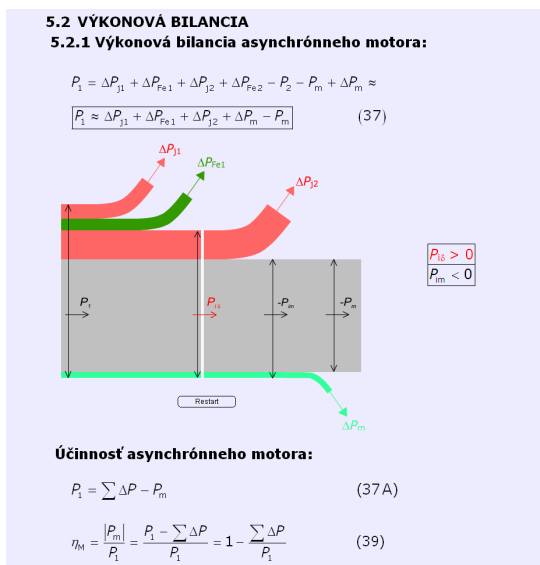
Princíp synchronného motora a generátora je na obr.3. Otáčavé magnetické pole statora je vytvorené trojfázovým vinutím – šesť drážok statora, v rotore je polarizovaný magnet. Pre synchronný generátor a pre synchronný motor je definovaný záťažný uhol ν_G resp. ν_M .



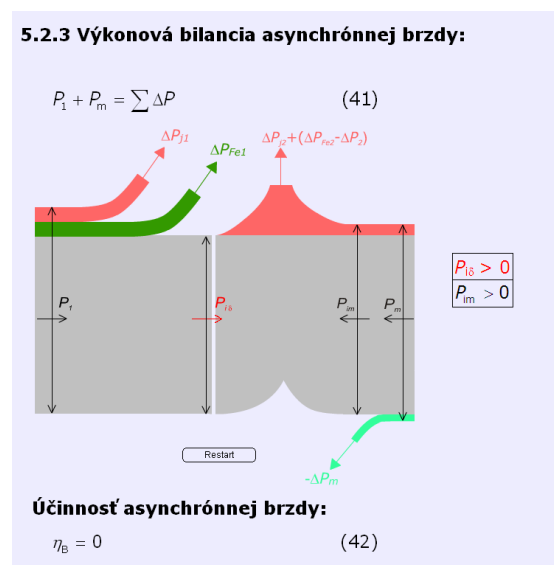
Obr.3 Princíp synchronného motora a generátora

3.2 Výkonová analýza

Výkonové rovnice sú zobrazované grafickými animáciami. Na obr. 4 je príklad pre asynchronný motor a na obr. 5 pre asynchronnú brzdú.



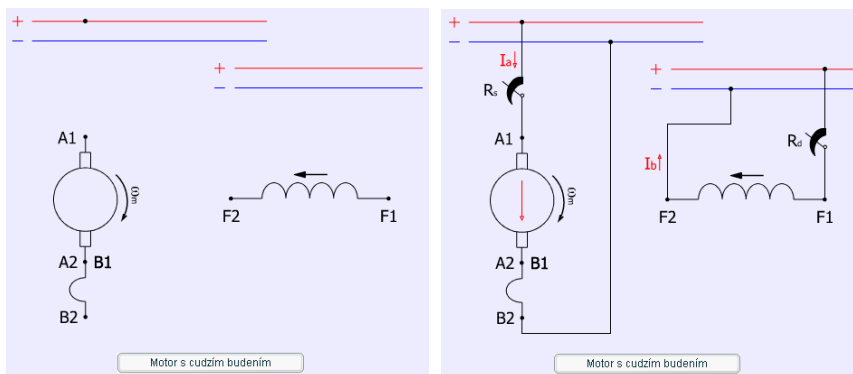
Obr. 4 Výkonová bilancia asynchronného motora



Obr. 5 Výkonová bilancia a asynchronnej brzdy

3.3 Elektrické schémy vinutí

Princíp tvorby zapojení jednosmerných strojov vychádza z medzinárodnej normy, platnej pre označovanie vinutí jednosmerného stroja. Na obr. 6 je schéma zapojenia jednosmerného motora s cudzím budením. Vytvára sa v troch fázach : a) rozloženie vinutí jednosmerného stroja – podľa normy, b) zapojenie obvodu kotvy, a zapojenie obvodu budenia. Smery prúdov rešpektujú základný smer otáčania u jednosmerného dynamu vľavo a u jednosmerného motora vpravo.



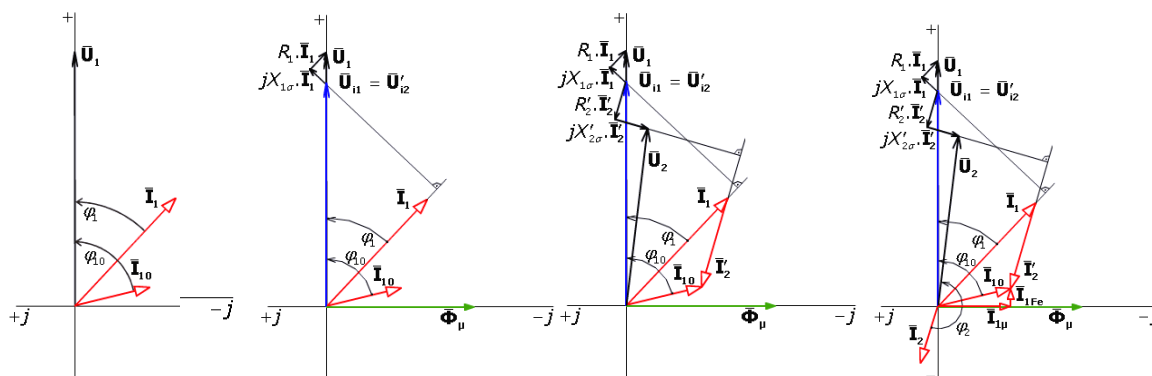
Obr.6 Princíp spájania vinutí jednosmerných strojov – jednosmerný motor s cudzím budením

4. Interaktívne grafy

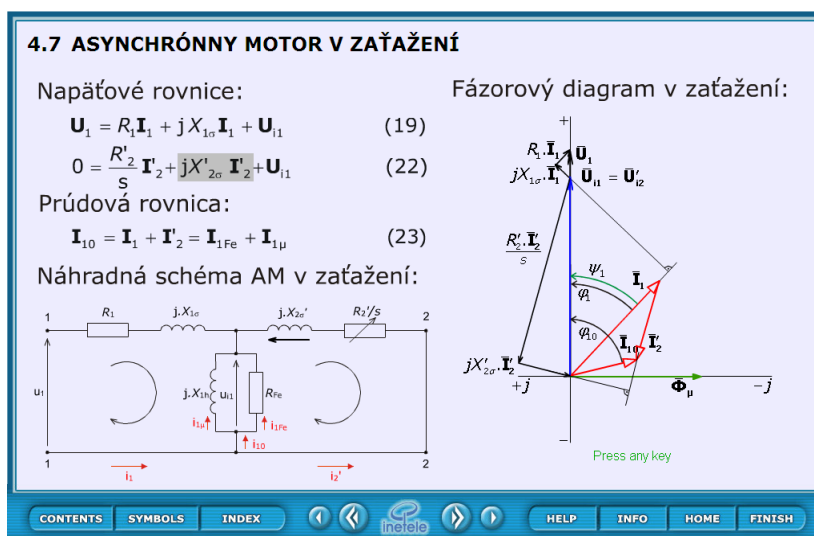
4.1 Fázorové diagramy

Ťažiskom riešenia striedavých elektrických strojov je fázorová teória elektrických strojov. Vychádza z teórie elektromagnetického poľa a teórie striedavých elektrických obvodov pri harmonickom napájaní elektrických obvodov stroja. V princípe predstavuje sústavu napäťových rovníc a prúdovú rovnicu obvodu. Riešenie na základe fázorovej teórie umožňuje jednotný princíp zobrazovania v interaktívnych grafoch. Pre dané prúdové zaťaženie a pre známe parametre elektrických obvodov stroja – rezistancie a reaktancie vinutí, je aditívnym postupom konštruovaný napäťový a prúdový diagram. Tieto zásady sú realizované pre všetky striedavé elektrické stroje v chode naprázdno, v stave nakrátko a v zaťažení.

Na obr. 7 je parciálny fázorový diagram zaťaženého transformátora.

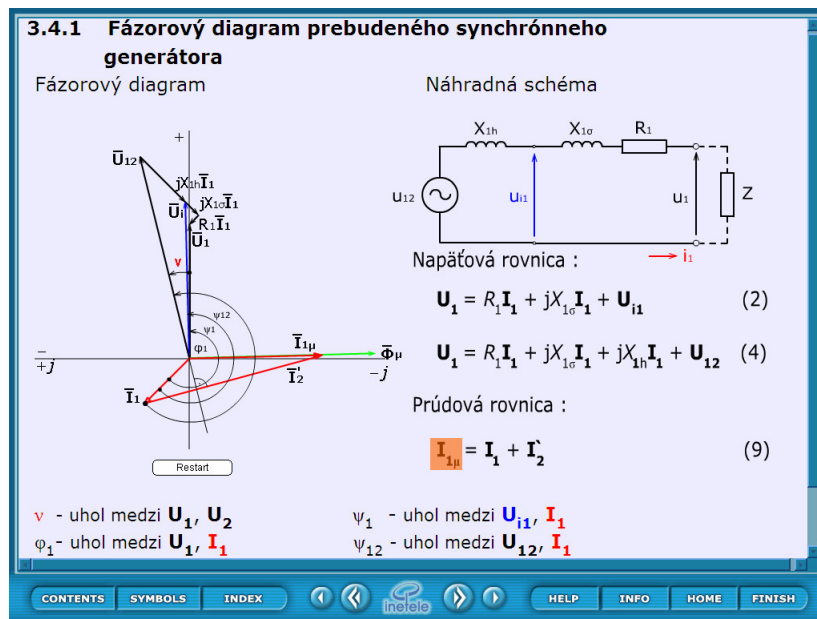


Obr. 7 Fázorový diagram zaťaženého transformátora – postup tvorby interaktívneho grafu

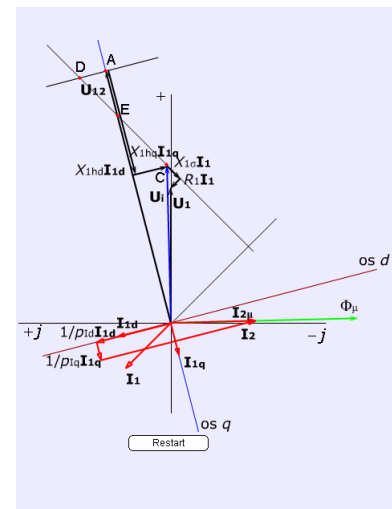


Obr. 8 Fázorový diagram asynchrónneho motora nakrátko v zaťažení

Fázorový diagram pre asynchrónny stroj v zaťažení je na obr. 8, pre synchronné stroje s hladkým rotorom a s vyjadrenými pólmi na obr.9a. a obr.9b.



a)

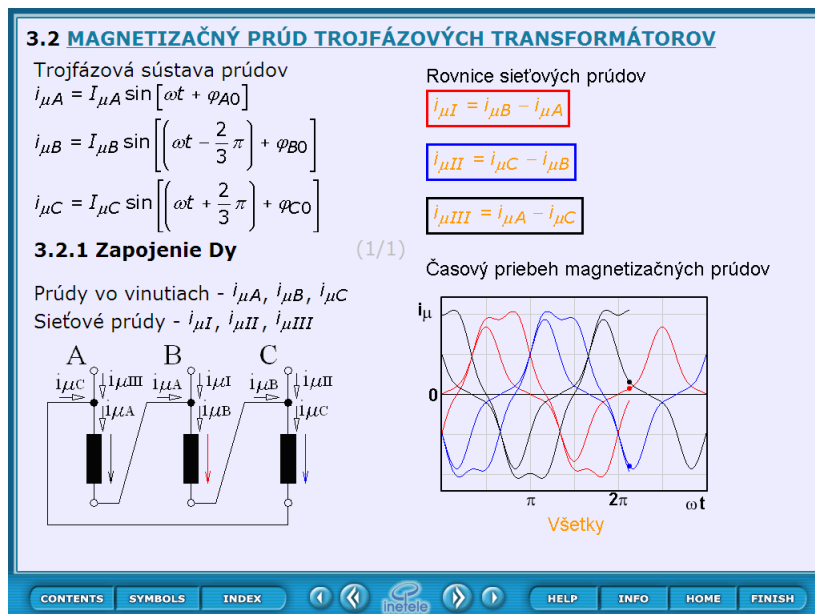


b)

Obr. 9 Fázorový diagram prebudeneho synchronného generátora
a) synchronný stroj s hladkým rotorom, b) synchronný stroj s vyjadrenými pólmi

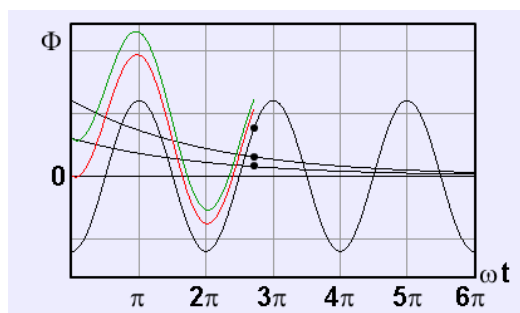
4.2 Časové priebehy, prechodné deje

Príkladom iného použitia interaktívneho grafu je riešenie časových priebehov magnetizačných prúdov trojfázových transformátorov. Na obr. 10 je priebeh prúdov trojfázového transformátora v zapojení Dy. Interaktívny graf umožňuje sledovať prúdy v jednotlivých fázach transformátora, ako aj súčasné sledovanie všetkých prúdov trojfázovej sústavy.



Obr. 10 Primárne magnetizačné prúdy trojfázového transformátora v zapojení Dy

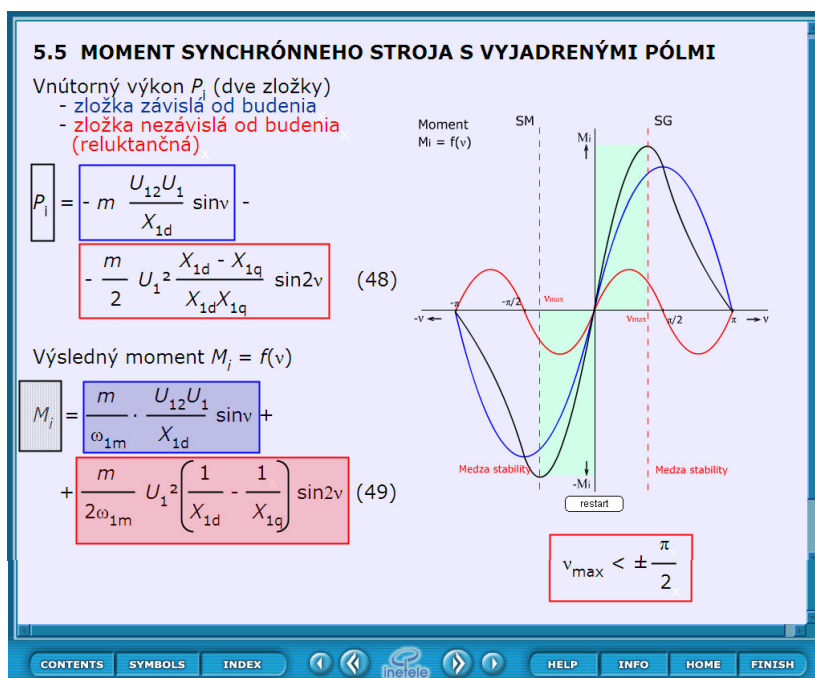
Na obr.11 je riešenie prechodného deja transformátora – pripojenie nezaťaženeho transformátora na sieť. Výsledná rovnica je graficky interpretovaná na aditívnom princípe.



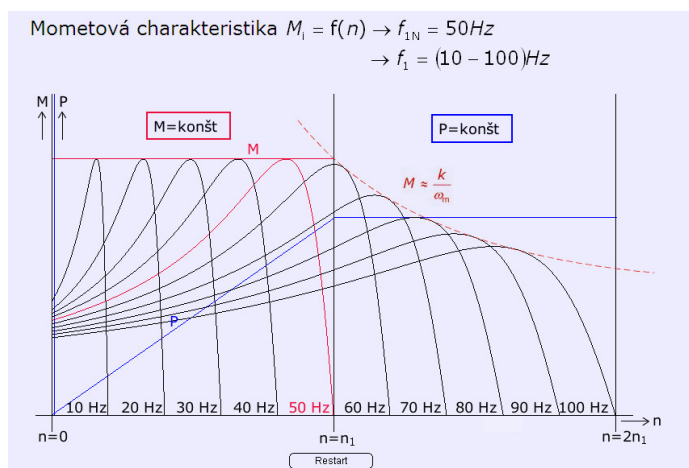
Obr. 11 Priebeh magnetického toku nezaťaženého transformátora

4.3 Charakteristiky strojov

Interaktívne grafy majú najväčší priestor pre interpretáciu charakteristík elektrických strojov. Jednak ako jednoparametrové grafy, ale umožňujú aj interpretácie pri zmene parametrov. Typickým priebehom je momentová charakteristika jednosmerných a striedavých elektrických strojov. Na obr. 12 je výsledný priebeh momentu M v závislosti od záťažného uhla $M = f(\nu)$ pre synchronný stroj s vyjadrenými pólmi. Na obr. 13 je dvojzónová regulácia asynchrónneho motora z napäťového meniča frekvencie.

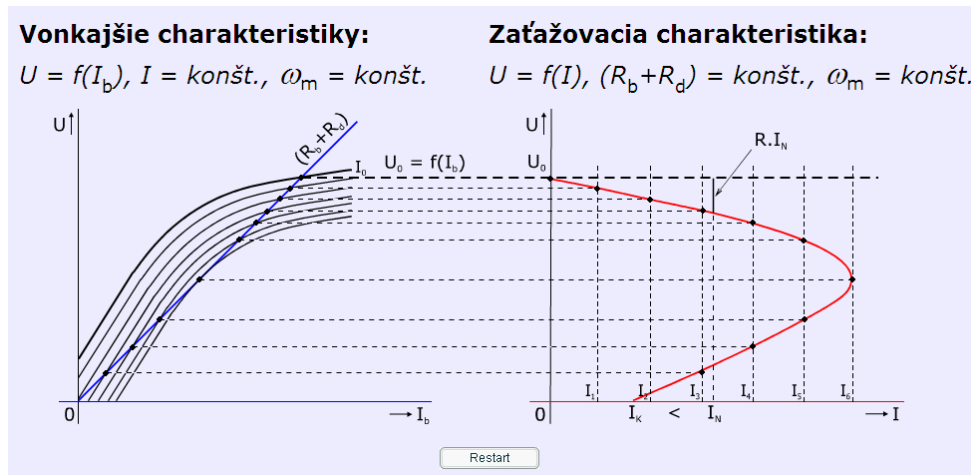


Obr.12 Momentová charakteristika synchronného stroja s vyjadrenými pólmi $M = f(\nu)$



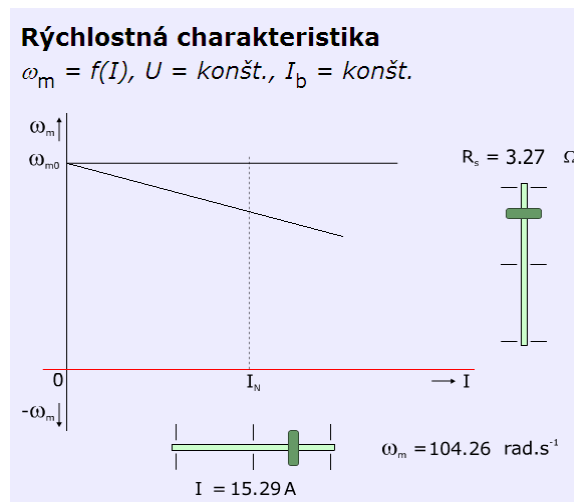
Obr.13 Dvojzónová regulácia asynchrónneho motora

Z jednosmerných strojov je príklad interaktívneho grafu uvedený na obr. 14 - odvozenie zaťažovacej charakteristiky $U = f(I)$ derivačného dynamu z vonkajších charakteristík $U = f(I_b)$.

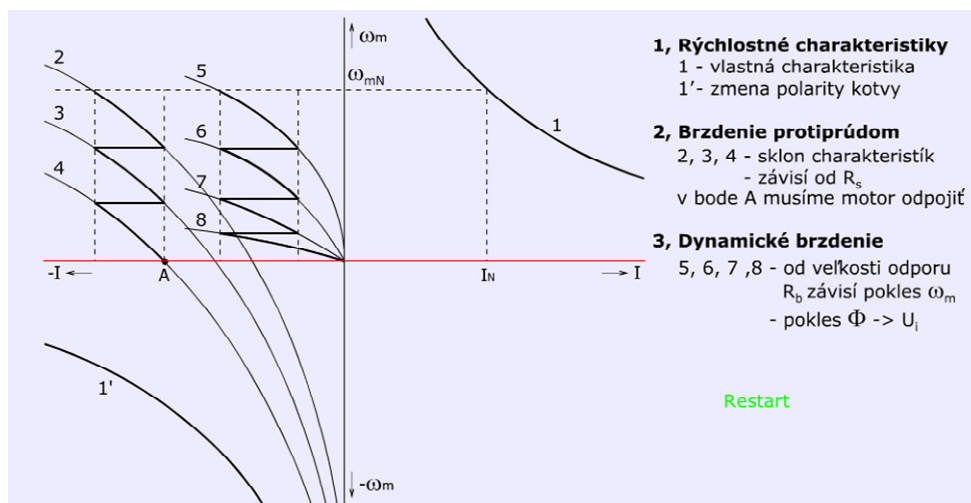


Obr. 14 Zaťažovacia charakteristika derivačného dynamu

Zaťažovanie motora s cudzím budením je ako ukážka tzv. dvojparametrického grafu na obr. 15. – zmena prúdu a odporu v kotve. Brzdenie jednosmerného sériového motora má výsledné charakteristiky na obr.16.



Obr. 15 Zaťažovanie motora s cudzím budením



Obr. 16 Brzdienie jednosmerného motora

5. Záver

Prostriedky e-learningového vzdelávania v module Elektrické stroje poskytujú komfortnú flexibilitu pri štúdiu. Textová zrozumiteľnosť a grafická jednoznačnosť pri viacnásobnom opakovaní zvyšujú faktor trvalých vedomostí. Modul umožňuje širokému spektru poslucháčov s veľmi rôznym vedomostným vstupom získať tzv. bázové vedomosti potrebné pre ďalšie štúdium v programoch Elektrotechnika a Mechatronika.

Literatúra

- [1] Interactive and Unified E-Based Education and Training in Electrical Engineering”, INETELE. Project No CZ/02/B/F/PP/134009, Leonardo da Vinci Programme 2005
- [2] Bauer, P., Fedák, V.: Educational Visualization of Different Aspects for Power Circuits and Electrical Drives. 11th Power Electronics and Motion Control Int. Conference, EPE-PEMC 2004. Riga, Latvia, Sept. 2004. ISBN 9984-32-010-3.
- [3] Fedák, V., Kostelný, M., Kaňuch, J.: E-Learning Course on Transformers – Animation and Visualisation of Operation. Joint Czech-Polish Conference on Low Voltage Electrical Machines, LVEM 2005, Brno – Šlapanice, Czech Republic, Nov. 2004, pp. 23-32. ISBN 80-214-2632-2
- [4] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, J.: Interactive E-learning Module on Transformers, Int. Symposium on Electrical Machines, ISEM 2005, Prague, Czech Republic
- [5] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, J.: Interactive e-Learning Tool for Electrical Machines, 4th International Conference on Emerging e-learning Technologies and Applications, ICETA 2005 Košice,
- [6] Kostelný, M., Fedák, V., Kaňuch, E.: Interactive WEB based module: “AC Machines – Synchronous Machines”, International Symposium on Electrical Machines, ISEM 2006, Prague, Czech Republic, pp.100-106, ISBN 80-0103548-4

PodĎakovanie

Uvedený príspevok vznikol za podpory projektu zo slovenskej Agentúry na podporu výskumu a vývoja: „Výskum vlastností malých elektrických strojov pri neharmonickom napájaní“, APVV-0510-66.

VOĽBA PERIÓDY VZORKOVANIA A METÓD APROXIMÁCIE INTEGRÁLU A DERIVÁCIE V ZÁVISLOSTI NA KVALITE RIADENIA PSD REGULÁTORA

Martin OLEJÁR, Dušan HRUBÝ, Ondrej LUKÁČ

Katedra elektrotechniky a automatizácie, MF SPU v Nitre, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, SR

e-mail: martin.olejar@uniag.sk, dusan.hruby@uniag.sk, ondrej.lukac@uniag.sk

Abstrakt: Hoci v súčasnej dobe sa ešte stále používajú spojité PI alebo PID regulátory (Lukáč, 2002), s nástupom výpočtovej techniky je už väčšina vyrábaných priemyslových regulátorov diskrétného typu, kde úlohu regulátora preberá mikrokontroler alebo priemyslový počítač. Aby diskrétny PSD regulátor dokázal regulovať výstupnú veličinu porovnateľne so spojitým PID regulátorom, je potrebné deriváciu a integrál, ktoré sú spojitými funkciami času, prostredníctvom aproximačných metód nahradiť diskretnými funkciami takým spôsobom, aby čo najvernejšie napodobňovali spojité funkcie. Článok poukazuje na najvhodnejšiu aproximáciu derivácie a integrálu tak, aby bola zabezpečená čo najlepšia kvalita riadenia v porovnaní so spojitým PID regulátorom.

Kľúčové slová: korelácia, aproximácia PSD, Matlab, kvalita riadenia

1. Úvod

Od číslicového PSD regulátora budeme očakávať rovnakú funkciu ako od spojitého PID regulátora a to je vstupujúcu regulačnú odchýlku zosilniť, integrovať a derivovať. Preto pri zostavovaní algoritmu pre číslicový PSD regulátor vychádzame z rovnice spojitého PID regulátora:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^{\infty} e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

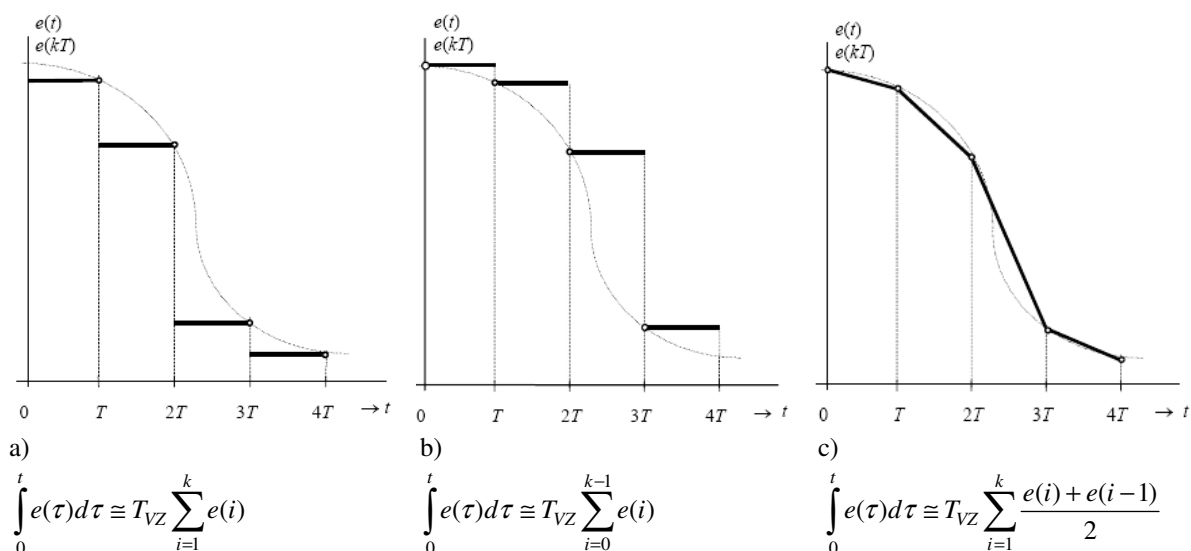
kde K je proporcionálne zosilnenie
 T_I je integračná konštanta
 T_D je derivačná konštanta
 $u(t)$ je akčná veličina
 $e(t)$ je regulačná odchýlka

Pri prevode rovnice PID regulátora (1) do diskretného tvaru je potrebné integrál a deriváciu nahradiť ich numerickou aproximáciou, t.j. integrál nahradzujeme sumačnou funkciou a deriváciu diferenciou. Pri vhodne zvolenej perióde vzorkovania použité numerické metódy aproximácie výrazne nezhoršujú priebeh regulačného procesu v porovnaní s reguláciou PID regulátorom.

2. Materiál a metódy

Aproximácia integrálu

Integrál môžeme transformovať do diskretného tvaru rôznymi metódami, ako je ukázané na obr. 1.



Obr. 1: Grafické znázornenie aproximácie integrálu: a) náhrada obdĺžnikmi zľava, b) náhrada obdĺžnikmi sprava, c) náhrada lichobežníkmi

Aproximácia derivácie

Deriváciu je možné aproximovať pomocou diferenciácie prvého rádu alebo priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky.

Pre diferenciáciu prvého rádu platí:

$$\frac{de}{dt} \cong \frac{e(k) - e(k-1)}{T_{VZ}}$$

kde $e(k)$ je k-tá vzorka regulačnej odchýlky
 T_{VZ} je perióda vzorkovania

Náhrada derivácie priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky má tvar (Niderlinsky, 1984):

$$\frac{de}{dt} \cong \frac{1}{6T_{VZ}} [e(k) + 2e(k-1) - 6e(k-2) + 2e(k-3) + e(k-4)]$$

Prostredníctvom týchto vzťahov už môžeme zostaviť rovnicu PSD regulátora, napr. diferenciou prvého rádu pre náhradu derivácie a s náhradou integrálu obdĺžnikmi zľava nasledovne:

$$u(k) = K \left\{ e(k) + \frac{T_{VZ}}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T_{VZ}} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2)$$

kde $u(k)$ je k-tá vzorka akčnej veličiny

Ako je vidieť zo vzťahu (2) aproximácia integrálu je daná sumou všetkých vzoriek od začiatku regulačného procesu do času $k \cdot T_{VZ}$. V praxi by to znamenalo sledovanie všetkých vzoriek regulačnej odchýlky, čo nie je veľmi žiadúce, preto sa tento problém rieši prírastkovým algoritmom PSD regulátora, pre ktorý platí:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3)$$

kde $\Delta u(k)$ je prírastok akčnej veličiny

Dosadením rovnice (2) do rovnice (3) dostaneme nasledujúcu rovnicu PSD regulátora v prírastkovom tvare:

$$\Delta u(k) = K \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T_{VZ}}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_{VZ}} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (4)$$

V prírastkovom tvare PSD regulátora (rovnica 4) je už suma všetkých vzoriek regulačnej odchýlky nahradená len jej k-tou vzorkou.

3. Výsledky a diskusia

Vplyv aproximačných metód na kvalitu riadenia PSD regulátora

Keďže v regulačnom obvode má PSD regulátor pri perióde vzorkovania limitne sa blížiacej k nule rovnakú funkciu ako PID, preto budeme vzájomne porovnávať výstupnú veličinu regulačného obvodu s PSD regulátorom pri perióde vzorkovania $T_{VZ} > 0$ a pre rôzne aproximácie derivácie a integrálu so spojitým PID regulátorom.

Na určenie vzájomnej podobnosti výstupnej veličiny regulačného obvodu pre jednotlivé regulátory budeme používať korelačný koeficient, ktorý je daný vzťahom:

$$R = \frac{\sum_n (A_n - \bar{A})(B_n - \bar{B})}{\sqrt{\left[\sum_n (A_n - \bar{A})^2 \right] \left[\sum_n (B_n - \bar{B})^2 \right]}}$$

kde R je korelačný koeficient, ktorý môže nadobúdať hodnoty od -1 až po $+1$
 A_n je n-tá vzorka výstupnej veličiny regulačného obvodu s PID regulátorom
 B_n je n-tá vzorka výstupnej veličiny regulačného obvodu s PSD regulátorom
 \bar{A} je aritmetický priemer výstupnej veličiny regulačného obvodu s PID regulátorom
 \bar{B} je aritmetický priemer výstupnej veličiny regulačného obvodu s PSD regulátorom

Ak je hodnota korelačného koeficientu $R = -1$ vyjadruje to nepriamu závislosť vektorov. Hodnota korelačného koeficientu $R = 1$ vyjadruje priamu závislosť vektorov a ak je korelačný koeficient rovný 0 , tak medzi vektormi nie je žiadna štatisticky zistiteľná závislosť.

Predpokladajme, že regulovaná sústava je opísaná prenosovou funkciou v tvare:

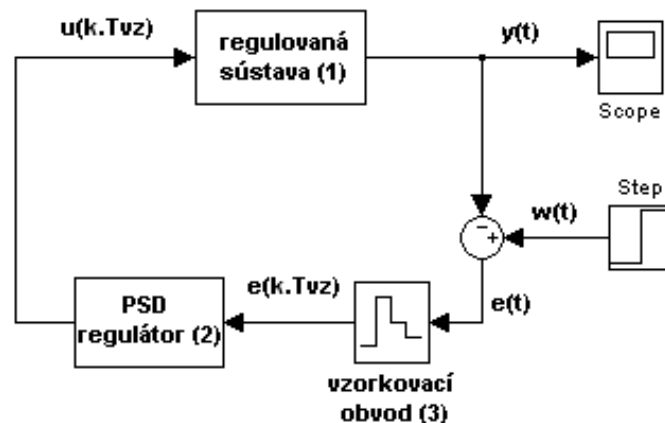
$$F(p) = \frac{1}{p^2 + 10p + 1} \quad (5)$$

kde $F(p)$ je prenosová funkcia regulovanej sústavy
 p je Laplaceov operátor

Pomocou Freuhaufovho algoritmu (Klán, 2000) boli vypočítané nasledujúce parametre PID regulátora pre sústavu (5):

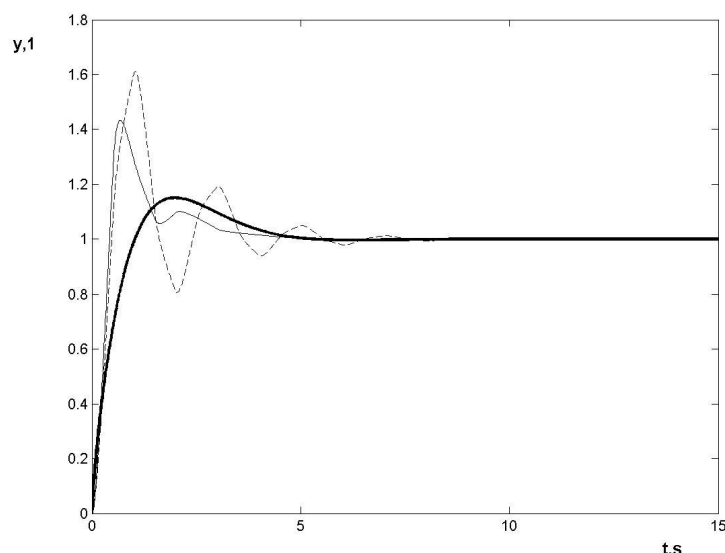
$K = 19,15$
 $T_I = 1,364$ s
 $T_D = 0,1364$ s

V prostredí Matlab Simulink bola vytvorená schéma regulačného obvodu podľa obrázku 2.



Obr. 2: Bloková schéma regulačného obvodu s PSD regulátorom

Vychádzajúc z predpokladu v úvode kapitoly dosadíme vypočítané parametre do rovnice PSD regulátora s aproximáciou integrálu obdĺžnikmi zľava a derivácie pomocou diferencie prvého rádu alebo priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky, čím dostaneme nasledujúce časové priebehy výstupnej veličiny regulačného obvodu a časové priebehy akčnej veličiny pre jednotlivé aproximácie derivácie.



Obr. 3: Časové priebehy výstupnej veličiny regulačného obvodu s PID regulátorom (hrubá plná čiara) a PSD regulátorom s aproximáciou integrálu obdĺžnikmi zľava a derivácie pomocou diferencie prvého rádu (tenká plná čiara) a priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky (čiarkovaná čiara) pri perióde vzorkovania TVZ = 0,5s.

Ako je vidieť na obr. 3 z hľadiska kvality riadenia výstupnej veličiny, lepšie ukazovatele má PSD regulátor s náhradou derivácie prostredníctvom diferencie prvého rádu, čo potvrdzujú aj korelačné koeficienty pre jednotlivé aproximácie derivácie PSD regulátora.

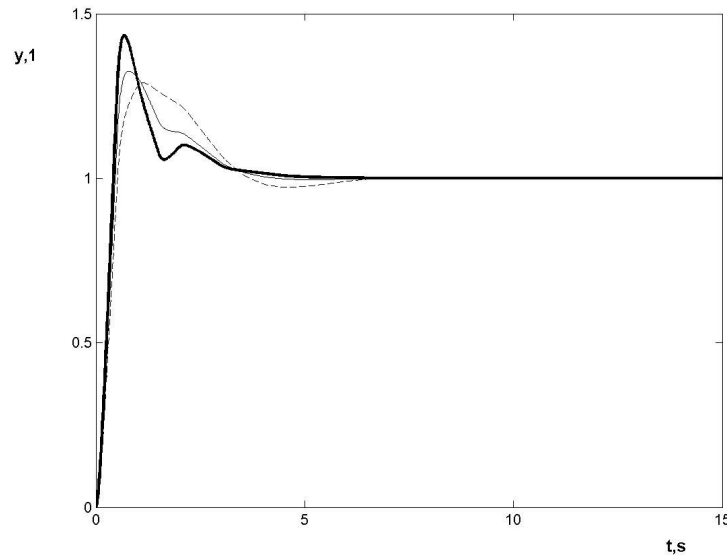
$R = 0,5712$ pre PSD s priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky

$R = 0,6516$ pre PSD s diferenciou prvého rádu

I napriek svojej nižšej kvalite riadenia má aproximácia derivácie priemernou hodnotou zo štyroch hodnôt regulačnej odchýlky výhody v tom, že riadiaca veličina nadobúda menšie a menej prudké zmeny.

Ďalšou z numerických aproximácií, ktoré by mohli ovplyvňovať kvalitu riadenia regulačného obvodu s PSD regulátorom je aproximácia integrálu. Preto opäť zobrazíme časové priebehy výstupnej veličiny pre jednotlivé

náhrady integrálu pričom derivácia bude nahradená diferenciou prvého rádu pre jej lepšie vlastnosti z hľadiska kvality regulácie.



Obr. 4: Časové priebehy výstupnej veličiny PSD regulátora s aproximáciou derivácie pomocou diferencie prvého rádu a integrálu obdĺžnikmi zľava (hrubá plná čiara), obdĺžnikmi sprava (čiarkovaná čiara), lichobežníkmi (tenká plná čiara) pri perióde vzorkovania $T_{VZ} = 0,5s$.

Určíme korelačné koeficienty jednotlivých náhrad integrálu PSD regulátora:

$R = 0,6516$ pre PSD s obdĺžnikmi zľava
 $R = 0,848$ pre PSD s obdĺžnikmi sprava
 $R = 0,763$ pre PSD s lichobežníkmi

Z týchto hodnôt jednoznačne vyplýva, že obdĺžniky sprava sú najvhodnejšou aproximáciou integrálu pre PSD regulátor.

Vplyv periódy vzorkovania

Ďalším z dôležitých parametrov vplývajúcich na kvalitu riadenia je perióda vzorkovania. Z predchádzajúcich výsledkov použijeme PSD regulátor s náhradou integrálu obdĺžnikmi sprava a derivácie diferenciou prvého rádu, kde budeme zisťovať zmenu korelačného koeficientu pri rôznych hodnotách periódy vzorkovania.

perióda vzorkovania $T_{VZ,s}$	0,1	0,5	1	1,5
korelačný koeficient $R,1$	0,9955	0,848	0,5573	0,3106

Tab. 1: Vplyv periódy vzorkovania na kvalitu regulácie

4. Záver

V súčasnej dobe existuje veľké množstvo algoritmov číslicovej regulácie. Je možné vytvárať rôzne varianty riadiacich algoritmov podľa zvoleného modelu sústavy, podľa kritérií kvality regulácie a podľa matematického odvodenia rovnice PSD regulátora. V článku je ukázaný vplyv aproximačných metód na kvalitu riadenia a taktiež poukazuje na najvhodnejšiu aproximáciu integrálu a derivácie tak, aby sa výstupná veličina regulačného obvodu s PSD regulátorom čo najviac približovala ku spojitému riadeniu aj bez podmienky nepretržitého sledovania výstupnej veličiny regulačného procesu. Preto je možné povedať že najvhodnejšia metóda aproximácie integrálu a deriváciu pre nami zvolenú sústavu druhého rádu je aproximácia derivácie pomocou diferencie prvého rádu a aproximácia integrálu obdĺžnikmi sprava

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol na základe riešenia projektu VEGA 1/4399/07 Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV.

Literatúra

- [1] LUKÁČ, O. - BRACHTÝR, B. - BYSTRIANSKY, P. Modelovanie a simulácia výmenníka tepla. In: Sekel 2002 : Zborník z medzinárodného odborného seminára Trenčianske Teplice 24.-26.9.2002, s. 77-81, ISBN 80-88914-73-6
- [2] NIEDERLINSKI, A. Číslicové systémy pro řízení technologických procesů. In: Praha 1984 : SNTL – Nakladatelství technické literatury, s. 223 – 226
- [3] KLÁN, P. Moderní metody nastavení PID regulátoru. In: Automa, č. 9, Praha, FCC Public s. r. o.

DREVO Z ASPEKTU ELEKTROTECHNICKÝCH MATERIÁLOV

Ivan MAKOVÍNÝ

Katedra drevárskych strojov a zariadení, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen, e-mail: makoviny@vsld.tuzvo.sk

Abstrakt: The aim of this work is to present wood from the point of view electrical properties of electrotechnical materials.

Kľúčové slová: drevo, elektrické vlastnosti, elektrotechnické materiály

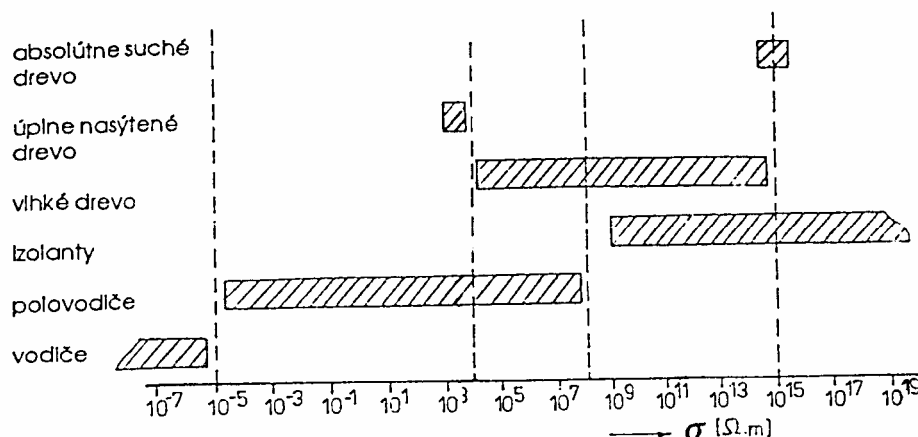
Key words: wood, electrical properties, electrotechnical materials

ÚVOD

Drevo je zložitý kompozitný materiál organického pôvodu, okrem hlavných zložiek – celulózy, hemicelulózy a lignínu obsahuje v závislosti od druhu dreva aj sprievodné látky – živice, triesloviny, minerálne látky a iné. Drevo sa vyznačuje nehomogénnosťou, anizotropiou a hygroskopičnosťou. Predstavuje polárne dielektrikum, pričom v závislosti od vlhkosti patrí medzi izolanty alebo polovodiče. Tieto vlastnosti spôsobujú, že elektrické charakteristiky v porovnaní s elektrotechnickými materiálmi sú variabilnejšie.

1. Charakteristika vlastností dreva vo vzťahu k elektrotechnickým materiálom

Drevo sa vyznačuje prirodzenou premenlivosťou svojich vlastností. Každý druh dreva má svoju charakteristickú makroštruktúru, mikroštruktúru a chemické zloženie. Premennivosť fyzikálnych vlastností sa takmer vždy prejavuje zmenou elektrických vlastností dreva.



Obr.1: Rozdelenie látok na vodiče, polovodiče a izolanty podľa ich rezistivity σ s vyznačením rozsahov, v ktorých môže ležať hodnota rezistivity dreva

Prírodné (natívne) drevo má z hľadiska používania v praxi na elektrotechnické aplikácie veľmi nepriaznivú vlastnosť spočívajúcu na jeho vzťahu k hygroskopicitate, t.j. vysokej nasiakavosti a navlhavosti. Čo spôsobuje zhoršenie jeho vlastností ako elektrického izolantu. Nepriaznivo sa prejavuje prítomnosť solí.

Na intervale vlhkosti od 0 % do cca 12 % môžeme drevo zaradiť medzi izolanty a na intervale vlhkosti nad 12 % až do úplného nasýtenia vodou, t.j. viac ako 100 %, medzi polovodiče.

Absolútne suché drevo je výborný izolant, jeho rezistivita je približne 10^{14} až 10^{15} ($\Omega.m$). So zvyšovaním vlhkosti elektrický odpor dreva prudko klesá. Ak sa zmení vlhkosť dreva z absolútne suchého stavu až po bod nasýtenia vlákien (BNV), odpor sa zníži približne o 10 rádov. pri vlhkosti okolo BNV má drevo rezistivitu v rozsahu 10^3 až 10^4 ($\Omega.m$). Pri zmene vlhkosti od BNV až po úplné nasýtenie sa odpor dreva zníži približne o 1 až 2 rády. Na intervale vlhkosti od 0 % do približne 7 % každé zníženie vlhkosti o 1 % zvýši odpor 5-násobne, na intervale 7 % až BNV 2 až 4-násobne.

Mechanizmus jednosmernej elektrickej vodivosti dreva je iónový. Preto so zvyšovaním teploty dreva, elektrická vodivosť dreva rastie. Táto závislosť má obecnú exponenciálny priebeh. Účinok teploty sa zvyšuje so zvyšovaním vlhkosti dreva.

Vplyvom vonkajších parametrov môže sa ovplyvniť konduktivita dreva tak, že nastáva zmena voľných nosičov náboja, alebo zmena ich pohyblivosti, resp. sa môžu tieto dva parametre meniť aj súčasne.

V dôsledku polárnosti celulózy a hemicelulózy už nepatrné množstvo vody zhoršuje elektrické vlastnosti dreva.

Polárnosť dreva spôsobujú najmä jeho hlavné zložky (celulóza, hemicelulózy a lignín svojimi polárnymi skupinami a to najmä $-\text{CH}_2\text{OH}$, $-\text{CHOH}$, $-\text{COOH}$), ale tiež aj sprievodné zložky (najmä anorganické zlúčeniny, ktoré sú disociovateľné na ióny).

Vzhľadom na chemické zloženie a anatomickú stavbu, drevo predstavuje zmiešané dielektrikum, v ktorom vplyvom striedavého elektrického poľa prebiehajú viaceré polarizačné mechanizmy. Doterajším výskumom sa potvrdilo, že vo vlhkom dreve sa silne uplatňuje dipólová relaxačná polarizácia, súčasne existuje elektrónová, deformačná polarizácia a pri nižších frekvenciách sa vyskytuje objemová, migračná polarizácia.

Dielektrické vlastnosti dreva sú v rôznej miere ovplyvňované celým radom faktorov a to najmä: frekvenciou elektrického poľa, vlhkosťou, teplotou, hustotou, anatomickými smermi dreva a druhom dreveniny.

Veličiny permitivita ϵ' , stratové číslo ϵ'' a stratový činiteľ $\text{tg}\delta$ závisia od frekvencie, ich frekvenčné charakteristiky sú podmienené mechanizmami polarizácií vyskytujúcich sa v dreve. Permitivita dreva pri konštantnej vlhkosti a teplote vplyvom rastúcej frekvencie postupne mierne klesá. Stratové číslo sa chová zložitejšie, jeho frekvenčné charakteristiky silne ovplyvňuje vlhkosť a teplota. Existuje určitá podobnosť týchto charakteristík s frekvenčnými charakteristikami celulózy.

Ako sa zvyšuje vlhkosť dreva, narastá celkový počet polárnych častíc s prijatými molekulami vody a taktiež sa vytvárajú lepšie podmienky pre natáčanie polárnych skupín. Následkom toho sa zväčšujú hodnoty dielektrických veličín.

Pri danej frekvencii a teplote sa permitivita dreva zväčšuje so zvyšovaním vlhkosti a to exponenciálne v hygroskopickom rozsahu.

Stratové číslo sa vo všeobecnosti zvyšuje vplyvom zvyšovania vlhkosti. Túto závislosť silne ovplyvňuje frekvencia a teplota, preto sa vyskytujú aj anomálie.

Zvyšovaním teploty dreva sa zväčšujú aj hodnoty dielektrických veličín. To je zapríčinené tým, že teplota ovplyvňuje pohyblivosť polárnych častíc nachádzajúcich sa v dreve.

Dôležitou charakteristikou všetkých izolantov je elektrická pevnosť. Elektrická pevnosť dreva v porovnaní s inými materiálmi – izolantmi patrí k najnižším, a to aj keď je drevo v absolútne suchom stave.

V prípade dreva sa dá dobre pozorovať elektrotepelný, stručne nazývaný aj tepelný prieraz, pričom miesta prierazu môžu byť zuhoľnatené alebo až vyparené.

Mechanizmus prierazu spočíva v tom, že v dôsledku dielektrických strát vzniká viac tepla ako sa za rovnaký čas stačí odvieť, teplota stúpa až nastane prieraz.

V dreve existuje určité množstvo voľných elektrických nábojov, ktoré spôsobujú elektrickú vodivosť. Po priložení jednosmerného elektrického napätia začne drevom tiecť elektrický prúd. Po priložení striedavého napätia sa k vodivostnej zložke prúdu ešte superponuje absorpčná zložka prúdu, ktorá je spôsobená polarizačnými procesmi.

Prechodom prúdu sa drevo zohrieva, s rastúcou teplotou rastie jeho elektrická vodivosť, tým sa zvyšuje elektrický prúd a množstvo tepla, ktoré sa v dreve vyvíja. Keď elektrické napätie dosiahne výšku, pri ktorej vzniká viac tepla ako sa stačí za rovnaký čas odvieť do okolia, teplota neobmedzene stúpa, až nastanú v dreve chemicko-fyzikálne zmeny.

Vplyvom tepla dochádza k degradácii dreva. Po vyparení vody nárastom teploty nad 300 °C nastáva destilácia dreva a rozvíja sa elektrotepelný prieraz. Cesta prierazu zuhoľnatie až nakoniec sa vyparí aj uhlík a v dreve sa vytvorí vypálený otvor,

Vplyvom rastúcej vlhkosti elektrická pevnosť klesá. Pri zmene vlhkosti dreva z 0 na 12 (%) poklesne elektrická pevnosť o 20 až 50 (%) t.j. až na polovičnú hodnotu.

Správanie sa dreva pri vlhkostiach približne nad 12 % je z hľadiska elektrickej pevnosti závislé najmä na čase pripojeného napätia. V dôsledku značnej vodivosti dreva prúd dosahuje už na začiatku zvyšovania napätia relatívne vysoké hodnoty, preto namiesto rozvíjania sa elektrotepelného prierazu dochádza v oblasti dreva medzi elektródami k sušeniu dreva a neskôr k elektrotepelnému prierazu alebo k prierazu plazivým výbojom. Ak vzorka dreva nemá väčšie rozmery, tak skôr ako vznikne prieraz nastane preskok po povrchu.

Preto sme toho názoru, že pri vlhkostiach nad 12 % nemožno hovoriť o typickom elektrotepelnom prieraze dreva, ale skôr o procese v dôsledku ktorého po uplynutí dostatočného času a lokálnom vysušení dreva takýto prieraz môže vzniknúť.

Drevo považujeme za homogénny ortogonálny anizotropný materiál. Rozlišujú sa tri základné anatomické smery – pozdĺžny (pozdĺž vlákién, resp. v smere osi kmeňa), radiálny a tangenciálny.

Hodnoty elektrických veličín dreva sú vždy vyššie v pozdĺžnom smere, a to napr. u elektrickej vodivosti až 2 až 4-násobne, hodnoty permitivity o 1,1 až 1,6 násobne, elektrickej pevnosti 2 až 3 násobne. V priečných smeroch (radiálny a tangenciálny) sa veľkosti elektrických veličín výrazne nelíšia, obvykle sa rozdiel v priereze pohybuje od 10 do 30 (%).

2. Vlastnosti prírodného dreva pri relatívnej vlhkosti prostredia 65 % a teplote 20 °C

Merný vnútorný objemový odpor, $\sigma = 10^{10} - 10^{11}$ [Ωm]

Merný povrchový odpor, $\sigma_p = 10^{11} - 10^{12}$ [Ω]

Relatívna permitivita pri frekvencii 1 MHz, $\epsilon' = 1,5 - 5$

Stratový činiteľ pri frekvencii 1 MHz, $\text{tg}\delta = 0,02$ až $0,07$

Elektrická pevnosť pri frekvencii 50Hz, $E_p = 1 - 2$ [$\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$]

Hustota, $\rho = 400 - 800$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ZÁVER

Rastlé, neimpregnované drevo má ako technický materiál elektrické vlastnosti závislé najmä od vlhkosti prostredia. Prijíma, resp. odvádza vodu do okolitého prostredia v závislosti od relatívnej vlhkosti a teploty prostredia. Jeho vlhkosť sa ustáli na tzv. rovnovážnej hodnote. V intervale relatívnej vlhkosti 40 – 80 (%) a teplote 20°C hodnoty vlhkosti dreva kolíšu od 9 % až do 18 %, t.j. drevo prechádza zo skupiny izolantov medzi polovodiče. To znamená, že tiež jeho elektrické vlastnosti sa silne menia. Merná rezistivita sa mení od 10^9 do 10^5 [Ωm]. Preto praktické využitie dreva ako izolantu je limitované na prostredie s málo kolísajúcou vlhkosťou.

Keď má rastlé drevo plniť funkciu izolantu je nevyhnutné ho impregnovat' látkami s vhodnými elektrickými vlastnosťami (napr. aromatickými uhlovodíkmi), aby sa zabránilo jeho navlhaniu.

Článok vznikol za finančnej podpory Ministerstva školstva SR v rámci riešenia grantu 1/3519/06 „Elektrická vodivosť dreva a jej vzťah k neelektrickým charakteristikám dreva“.

Literatúra

[1] Makovíny, I.: Elektrofyzikálne vlastnosti dreva (Vedecké a pedagogické aktuality). Vydalo Edičné stredisko VŠLD Zvolen, 1987, 109 s.

[2] Makovíny, I.: Elektrická pevnosť dreva. (VŠ 2/2002/B). Vydala Technická univerzita vo Zvolene , 2002, 51 s. ISBN 80-228-1216-1

[3] Makovíny, I.: Interaction of the electromagnetic field with wood and wood-based materials. (VŠ 2/1999/B). Vydala Technická univerzita vo Zvolene , 2000, 62 s. ISBN 80-228-08

DODÁVKA ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Tomáš Mlčák, Daniel Minařík

VŠB – TU Ostrava, FEI, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, Česká republika, tomas.mlcak@vsb.cz

Abstrakt: Příspěvek se zabývá řešením výroby elektrické energie z vodíku. Je zde nastíněna problematika výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, v tomto případě konkrétně pomocí palivového článku.

Klíčová slova: výroba elektrické energie, palivový článek.

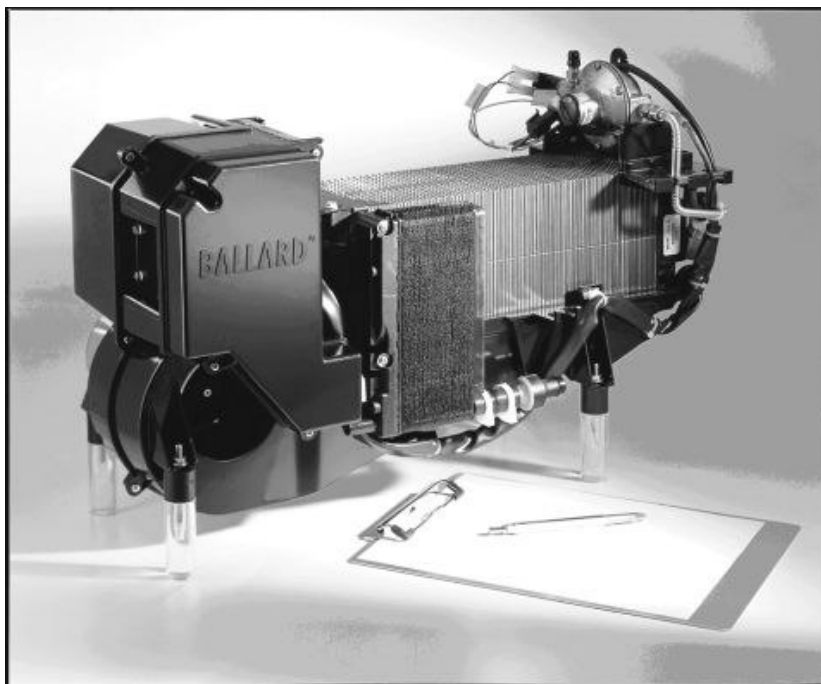
1. Úvod

V současné době se řeší důležitý úkol najít efektivní zdroj elektrické energie, který bude šetrný k životnímu prostředí a nebude zcela závislý na neobnovitelném vstupním zdroji energie. Mezi takové dnes patří zdroje, které získávají elektrickou energii ze slunce, jako například fotovoltaické panely, nebo různé systémy zrcadel soustřeďujících sluneční paprsky do jednoho místa, kde vzniká tepelná energie, ze které se následně vyrábí elektrická energie. Další ekologické zdroje elektrické energie jsou například vodní, větrné, přílivové elektrárny apod. Náš tým se zabývá řešením výroby elektrické energie z vodíku pomocí palivových článků.

2. Palivový článek

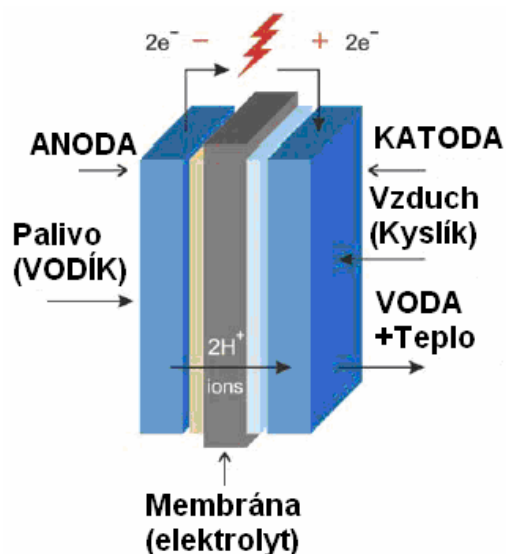
Palivový článek je elektrochemické zařízení, které umí přímo měnit energii chemickou obsaženou v palivu na energii elektrickou za vzniku tepla a vody. Tato přeměna energií je v podstatě založena na principu obrácené elektrolýzy vody.

Palivový článek typu PEM, kterým je laboratoř vybavena, používá jako palivo čistý plynný vodík a jako nezbytné okysličovadlo kyslík, který si sám odebírá ze vzduchu. Jedna cela palivového článku je principiálně složena ze tří základních částí a to: z protonové membrány, elektrod a desek s kanálky pro přívod reakčních plynů, mezi nimiž jsou membrána a elektrody uloženy.



Obr.1: Modul palivového článku NEXA.

Palivo (vodík) je přiváděn na anodovou stranu membrány, kde je štěpen na vodíkové protony a elektrony. Elektrony procházejí spotřebičem elektrické energie a produkují elektrický proud. Vodíkové protony zatím projdou přes protonově vodivou membránu na stranu katody, kde spolu s přiváděným kyslíkem a přivedenými elektrony na katodu reagují a vzniká tak voda. Vhodným pospojováním (např. do série) jednotlivých cel palivových článků dosáhneme potřebného výkonu a potřebných elektrických parametrů celého modulu palivového článku.



Obr.2: Princip palivového článku.

V současné době je zprovozněn systém dvou palivových článků typu PEM v součinnosti se střídači, které dodávají elektrickou energii do napájecí sítě.

3. Střídač

Modul palivového článku Nexa je postaven tak, že vyrábí stejnosměrnou elektrickou energii, která má malé napětí, řádově desítky voltů. Toto napětí se pohybuje podle zatížení přibližně od 20V do 45V. Proudový odběr je řádově v desítkách ampér. Jmenovitý proud článku je na hodnotě 54A. Abychom mohli tuto elektrickou energii generovat do napájecí sítě musíme parametry napětí vhodně upravit na hodnoty napájecí elektrické sítě, tedy na napětí 230V s frekvencí 50Hz.

Musíme tedy stejnosměrné napětí nejdříve rozstřídat, tzv. střídačem, který se skládá z vhodně zapojených polovodičové prvků tzv. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) tranzistorů. Následně musíme zvýšit efektivní hodnotu tohoto malého napětí na hodnotu vyšší než je v napájecí síti pomocí transformátoru. Tímto docílíme generování elektrické energie do napájecí sítě.

Jmenovitá účinnost samotného palivového článku je 42%. Při nižším zatížení se dosahuje i účinnosti vyšší. Účinnost střídače se pohybuje kolem 90%. Na celém zařízení dnes tedy dosahujeme jmenovité účinnosti cca 38%, což je vyšší účinnost než v klasických elektrárnách, kde se v tepelné nebo jaderné elektrárně dosahuje účinnosti kolem 30%.

4. Závěr

V současné době jsou zapojeny dva palivové články každý s výkonem 1,23 kW. Každý je schopen generovat do napájecí sítě příkon 1,1 kW. Tímto tedy dodáváme nepřetržitý výkon 2,2 kW, což za rok dělá 19,3 MWh vyrobené elektrické energie.

Celé zařízení běží momentálně ve zkušebním provozu, kdy jsou monitorovány veškeré jeho parametry a vyhodnocovány provozní stavy tak, aby do budoucna zařízení pracovalo spolehlivě a s nejvyšší možnou účinností.

Literatura

- [1] Uživatelský manuál palivového článku NEXA.
- [2] Uživatelský manuál střídače Sunny Boy

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VÍCEVRSTVÝCH SYSTÉMŮ ZAMĚŘENÉ NA REFLEKTANCI POVRCHŮ V MIKROVLNNÉ OBLASTI SPEKTRA PRO VOJENSKOU TECHNIKU

Milan NAVRÁTIL, Vojtěch KŘESÁLEK

Ústav elektrotechniky a měření, Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Nad Stráněmi 2052, Zlín 760 01, Česká Republika
Email: {navratil, kresalek}@fai.utb.cz

Abstrakt: Předpokládáme homogenní a izotropické prostředí s elektrickými vlastnostmi j -té vrstvy ϵ_j , μ_j (komplexní permitivita a permeabilita). Pro výpočet reflektance vrstevnatých kompozitních systémů byly použity Maxwellovy rovnice. Vypočítané hodnoty pak byly optimalizovány vzhledem k minimální maximální reflektanci na daném frekvenčním pásmu a vzhledem k minimální celkové tloušťce vícevrstvého systému. SOMA algoritmus (Self-Organizing Migrating Algorithm) byl použit pro hledání extrémů v mnohorozměrném prostoru (pro jednu vrstvu s adhezivem je rozměr rovný 6). Znalosti materiálových parametrů včetně tloušťek je zásadní pro fyzikální realizaci laboratorních vzorků. Snižování hodnot reflektance u vícevrstevných systémů je docíleno kombinací principu interference elektromagnetických vln ve vrstevnatém materiálu.

Klíčová slova: Reflektance, matematické modelování, SOMA algoritmus, Matlab.

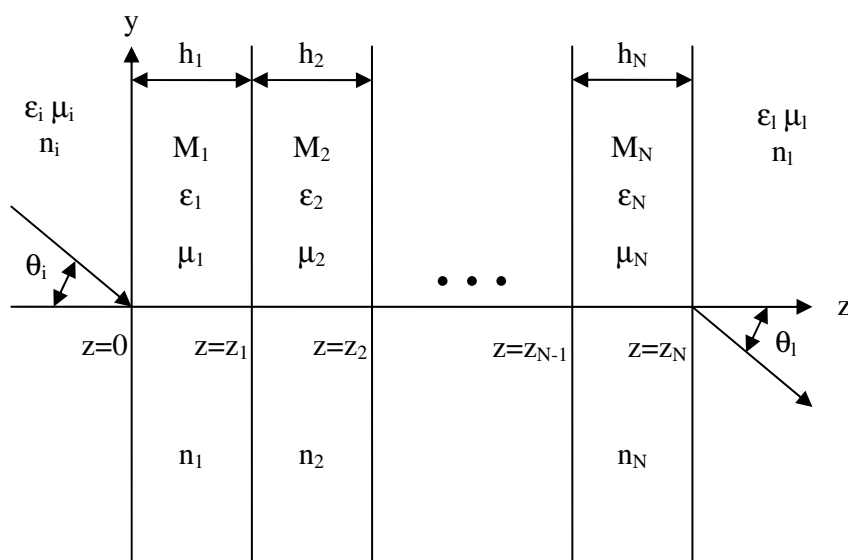
1. Úvod

Pokud chceme aplikovat materiály na vojenskou techniku, potom musí splňovat celou řadu vlastností, někdy protichůdných. Musí být dobře tvarovatelné, snadno se musí lepit na tvarově různorodé povrchy, musí být odolné proti pohonným hmotám a umožňovat speciální očistu, nesmí křehnout, musí být samozhášivé a snést pohyb osádky po povrchu. Vývoj takového materiálu je zdoluhavý a složitý. Navíc je nutno si uvědomit, že například pro jednovrstvý systém radioabsorbéru je nutno počítat i s vrstvou lepidla a nátěru a tedy počítáme se šesti proměnnými a to permitivita, vodivost a tloušťka každé vrstvy. Pro dvouvrstvý systém je to 9 proměnných. Kdybychom i lepené spoje zanedbali, tak nám zůstane 6 proměnných. Už tento velmi jednoduchý systém je obtížně řešitelný z hlediska návrhu a to neuvažujeme magnetické vlastnosti a předpokládáme kolmý dopad vlny. Dalším problémem je optimalizace takového systému. Pro popis výše uvedeného problému lze vyjít z klasické literatury [1], [2].

2. Matematický model

2.1 Maticový popis šíření elektromagnetického vlnění

Pro výpočet odrazivosti a propustnosti elektromagnetických vln jsme uvažovali dielektrikum, které je tvořeno N vrstvami a je umístěno mezi dvěma prostředími (viz. Obr. 1). Dále jsme předpokládali, že prostředí jsou homogenní a izotropní, s elektrickými konstantami j -té vrstvy ϵ_j , μ_j a σ_j . Osa z určuje směr vrstvení. Úhel dopadu vlny v j -té vrstvě je označován θ_j [3].



Obr.1: Souřadnicový systém pro výpočty podle maticové metody

Pro TE-vlny složky intenzity elektrického pole platí $E_y = E_z = 0$, pro TM-vlny intenzita magnetického pole je $H_y = H_z = 0$.

Charakteristická matice j-té vrstvy je dána

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\left(\frac{i}{p_j}\right) \cdot \sin \delta_j \\ -j \cdot p_j \cdot \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde

$$\delta_j = k_0 \cdot n_j \cdot h_j \cdot \cos \theta_j \quad (2)$$

$$p_j = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cdot \cos \theta_j & (TM - wave) \\ \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \cdot \cos \theta_j & (TE - wave), \end{cases} \quad (3)$$

- n_j : index lomu j-té vrstvy
- h_j : tloušťka j-té vrstvy
- ϵ_j : permitivita j-té vrstvy
- μ_j : permeabilita j-té vrstvy
- k_j : vlnové číslo ve volném prostoru

Pro dopad TE-vln hodnoty elektrického a magnetického pole odpovídají následujícímu vztahu:

$$\begin{bmatrix} E_x^{(i)} \\ H_y^{(i)} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} E_x^{(i+1)} \\ H_y^{(i+1)} \end{bmatrix}, \quad (i = 0, 1, \dots, N) \quad (4)$$

kde $E_x^{(i)}$ jsou x-ové složky elektrického pole a $H_y^{(i)}$ jsou y-ové složky magnetického pole při $z = z_i$.

Charakteristická matice pro $z = 0 \dots z_n$ je reprezentována součinem každé z matice, tak že:

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} \\ m_{2,1} & m_{2,2} \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_N \quad (5)$$

Reflektivita R a transmisivita T jsou definovány elementy matice celé vrstvy takto:

$$R = \left| \frac{(m_{11} + m_{12} \cdot p_l) p_i - (m_{21} + m_{22} \cdot p_l)}{(m_{11} + m_{12} \cdot p_l) p_i + (m_{21} + m_{22} \cdot p_l)} \right| \quad (6)$$

$$T = \frac{p_l}{p_i} \left| \frac{2 p_i}{(m_{11} + m_{12} \cdot p_l) p_i + (m_{21} + m_{22} \cdot p_l)} \right| \quad (7)$$

2.2 Samo-Organizující se Migrační Algoritmus (SOMA)

SOMA je algoritmus existující od roku 1999, jehož činnost je založena na geometrických principech [4]. Vzhledem k tomu, že pracuje s populacemi podobně jako např. genetické algoritmy a výsledek po jednom evolučním cyklu (migračním kole) je totožný s genetickými algoritmy či diferenciální evolucí, lze jej řadit např. mezi evoluční algoritmy navzdory faktu, že během jeho běhu nejsou vytvářeni noví potomci, jak je tomu u jiných evolučních algoritmů. Pokud by se hledala biologická analogie, pak by se dal tento algoritmus spíš přirovnat k harémové tvorbě potomků ve stádu (jelen a laně...) než ke klasickému výběru rodičů z populace. Mnohem přesnější je však řazení mezi algoritmy memetické, jak bude později vysvětleno.

Původní myšlenka, která vedla k jeho vytvoření, spočívá v napodobení chování skupiny inteligentních jedinců, kteří kooperují při řešení společného problému, jako je např. hledání zdroje potravy apod. SOMA od své základní verze doznal několik významných změn až do dnešní podoby, kdy se svou robustností ve smyslu nalezení globálního extrému vyrovná takovým algoritmům, jako je např. diferenciální evoluce.

Tento algoritmus, který pracuje stejně jako ostatní evoluční algoritmy s populací jedinců, byl vyvinut na principech, které lze odpozorovat v přírodě a kterými se v sociálně-biologickém prostředí řídí inteligentní jedinci, jež kooperují na řešení společného úkolu. Na rozdíl od ostatních evolučních algoritmů v něm totiž neprobíhá tvorba nových řešení (jedinců, potomků) filozofií křížení rodičů, ale je založena na kooperativním prohledávání (migraci) prostoru možných řešení daného problému. Vzhledem k tomu, že vlastní jádro SOMA nekopíruje již zmíněné evoluční principy, ale řídí se principy vycházejícími ze spolupráce inteligentních jedinců migrujících v prostoru možných řešení tak jako jejich biologické protějšky po krajině, byl pro evoluční cyklus známý jako "Generace" zvolen název "Migrační kolo". Příklady takového chování lze nalézt v reálném světě. Jsou to např. mravenci, včely, predátoři ve smečce hledající potravu apod.

Vzhledem k tomu, že hlavní myšlenka algoritmu SOMA není založena na principu evoluce jako takové, ale je založena na již zmíněných principech "smečky", není klasifikován jako algoritmus evoluční, ale tzv. memetický. Ve své čisté matematické podstatě je to vcelku jedno, protože smyslem jakéhokoliv "paralelního" algoritmu (tzn. algoritmu pracujícího s množinou řešení najednou) je nalezení nových lepších řešení - pozic na dané hyperploše. V případě, že je pro výpočet nových pozic použito evolučních principů na úrovni např. genomu, jsou tyto algoritmy nazývány jako "genetické" apod.

Vlastnost samoorganizace u SOMA algoritmu plyne z faktu, že se jedinci ovlivňují navzájem během hledání lepšího řešení, což mnohdy vede k tomu, že v prostoru možných řešení vznikají skupiny jedinců, které se rozpadají či spojují, putují přes prohledávaný prostor. Jinými slovy si skupina jedinců neboli populace sama organizuje vzájemný pohyb jedinců - odtud samoorganizace.

Běh algoritmu SOMA, stejně jako ostatní evoluční algoritmy, je ovlivňován speciální množinou parametrů, které se dělí na dva druhy parametrů a to na parametry řídicí a ukončovací. Řídicí parametry jsou ty, které mají vliv na kvalitu běhu algoritmu (z hlediska hodnoty účelové funkce) a ukončovací jsou ty, které za předem nadefinovaných podmínek běh algoritmu ukončují. Všechny tyto parametry musí být a priori zvoleny uživatelem ještě než započne běh algoritmu.

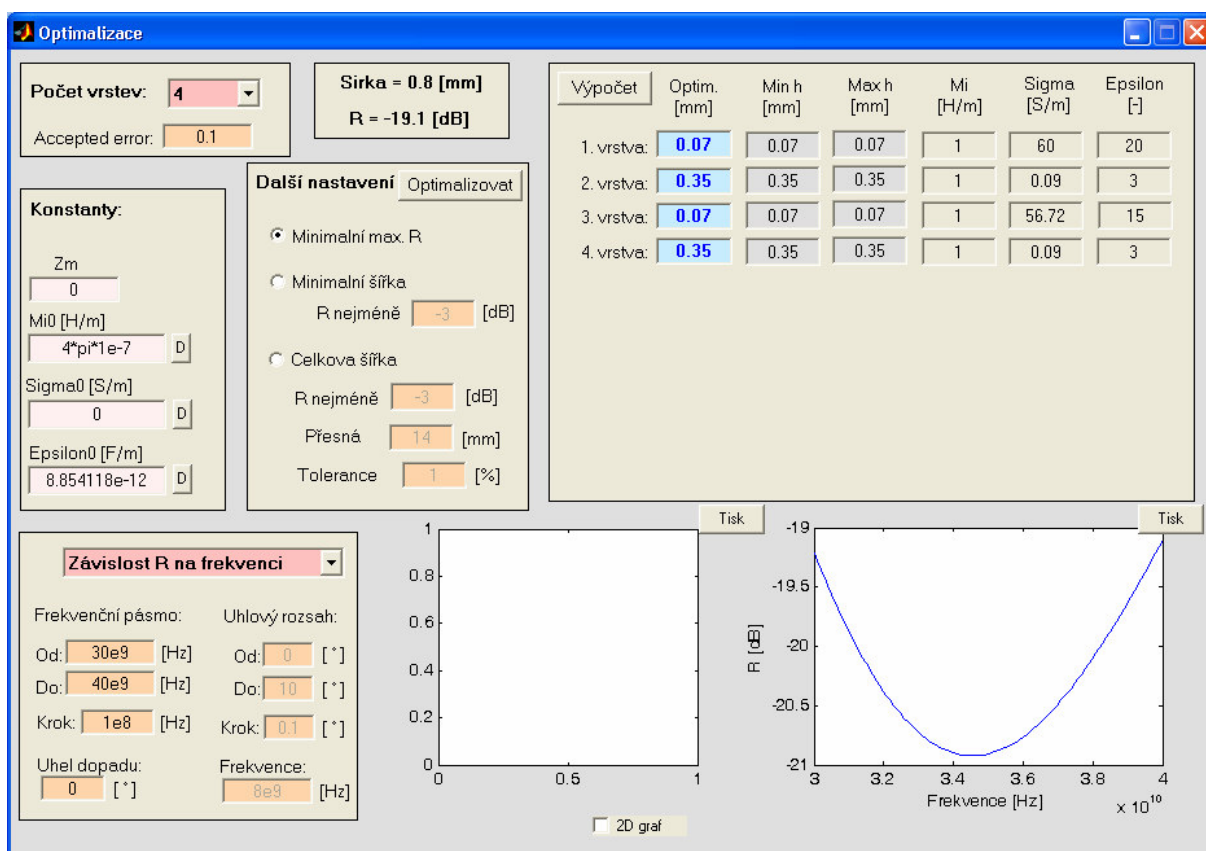
"Nevýhodou" SOMA, stejně jako u ostatních algoritmů, je závislost kvality běhu algoritmu na nastavení těchto parametrů. Během různých testů SOMA bylo zjištěno, že citlivost SOMA na nastavení parametrů se mění až po necitlivost. Závisí to na tom, v jakých konkrétních sub-intervalech jsou nastaveny. Doporučená nastavení nevyplývají jen z již zmíněných testů, ale také z jednoduché geometrické interpretace těchto parametrů.

3. Uživatelský program v prostředí Matlabu

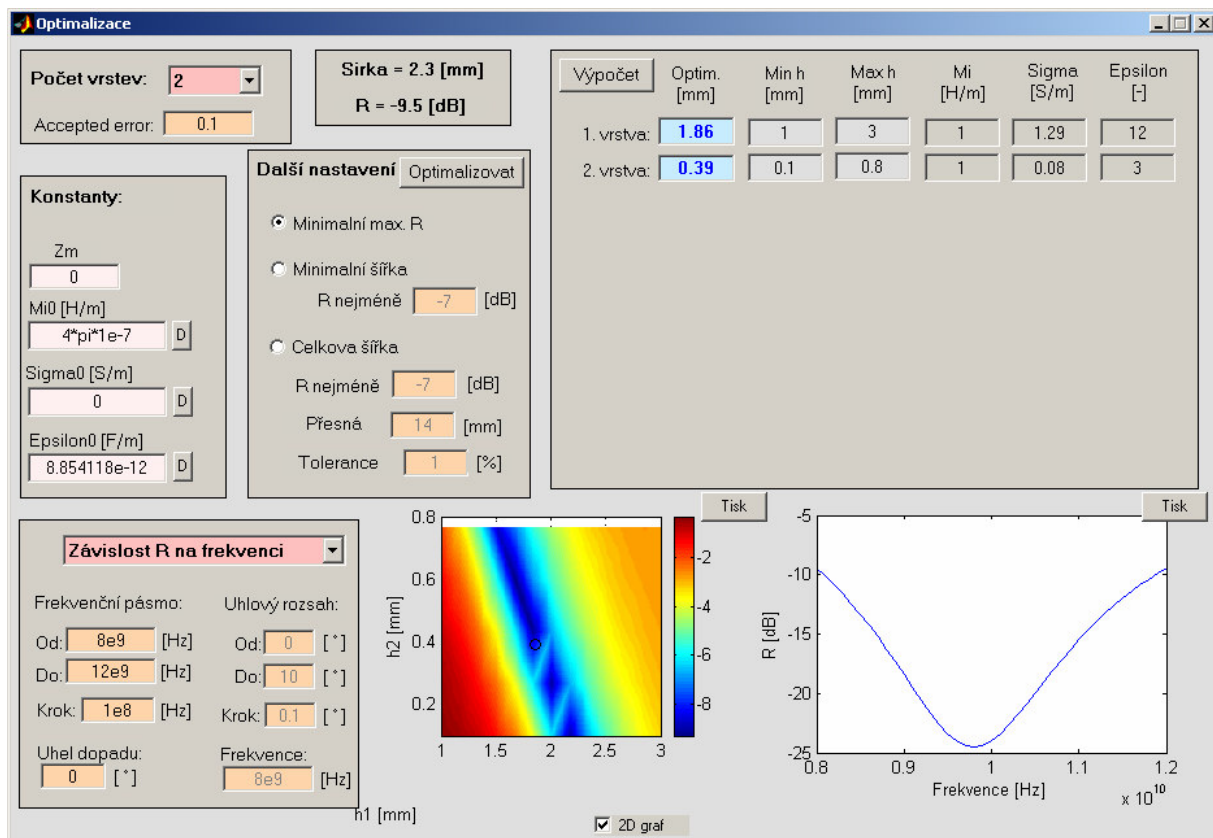
Pro přehlednější zadávání parametrů a interpretaci výsledků byl sestaven uživatelský program v grafickém rozhraní MATLABu. Program umožňuje uživateli zvolit si počet vrstev a pro každou vrstvu definovat materiálové konstanty (vodivost, permitivita, permeabilita), dále pak interval přípustných šířek dané vrstvy pro optimalizaci. Vlastní optimalizace má tři módy. V prvním módu (v programu označené „Minimalní max. R“), je jako kritérium použito nejmenší možné maximální R v daném frekvenčním pásmu s ohledem na minimální šířku systému. Druhý mód, (označený jako „Minimalní šířka“), umožňuje minimalizovat tloušťku celého systému tak, aby byla splněna podmínka minimálního, avšak daného R. Ve třetím módu (označeném jako „Celková šířka“), se šířky jednotlivých vrstev optimalizují tak, aby výsledná celková šířka systému byla ekvivalentní šířce zadané s danou tolerancí, opět za předpokladu splnění podmínky minimálního, daného R.

Program dále umožňuje počítat dva typy závislosti. Závislost R na frekvenci nebo na úhlu, pod jakým dopadá elektromagnetické vlnění na vrstevnatý systém. Frekvenční závislost R spočívá v definování intervalu frekvencí, předpokládá se dopad vlny pod daným úhlem. Analogicky při počítání úhlové závislosti se definuje interval úhlů dopadajícího elektromagnetického vlnění a předpokládáme vlnění o dané frekvenci.

V případě, kdy máme dvouvrstvý systém, je velmi zajímavé barevné zobrazení závislosti R na šířkách jednotlivých vrstev. Z tohoto obrázku je patrné, že optimalizační algoritmus pracuje spolehlivě. Jinými slovy, vždy najde místo s extrémní, popřípadě uživatelem zadanou hodnotou R.



Obr.2: Uživatelský program v grafickém prostředí MATLABu (4 vrstvy)



Obr.3: Uživatelský program v grafickém prostředí MATLABu (2 vrstvy)

4. Diskuze výsledků

Tento software je velmi užitečný při návrhu struktur a ověřování nastavení parametrů u frekvenčních průběhů reflektance. Vzhledem k tomu, že software je založen na obecném modelu, výsledky které podává, jsou srovnatelné s experimentálně naměřenými daty, získaných z jiných pracovišť [5].

Pro fyzickou realizaci navrženého systému je naprostou nutností znalost materiálových parametrů vrstev s dostatečnou přesností. Také geometrické vlastnosti vrstev (tloušťka) je podstatná pro návrh vrstevnatého systému. Je nutno připomenout, že se jedná o kombinaci absorpce elektromagnetického záření a interference elektromagnetického pole.

5. Závěr

Prostředí jsme předpokládali homogenní a izotropní s elektrickými charakteristikami ϵ_j μ_j po řadě komplexní permitivita a komplexní permeabilita. Pro takto složené vrstevnaté prostředí byly řešeny Maxwellovy rovnice za účelem výpočtu reflektance R celého systému. Vypočítané hodnoty byly podrobeny optimalizačnímu postupu. Jako kritérium bylo položeno nejmenší maximální R v daném intervalu frekvencí, čili minimalizováno maximální R nebo tloušťka celého systému. Pro hledání extrémní hodnoty v mnohorozměrném prostoru byl použit samo-organizující se migrační algoritmus SOMA.

Literatura

- [1] Born M., Wolf E. Principles of Optics. Pergamon Press, New York, 1989.
- [2] Staelin D. H. et al. Electromagnetic Waves. Prentice Hall, 1994. ISBN 0131768689
- [3] Miyazaki, Y., Tanoue K. Electromagnetic absorption and shield properties of lossy composite multilayers, Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1990, s. 370-374.
- [4] Zelinka I. Umělá inteligence v problémech globální optimalizace, BEN, Praha 2002
- [5] Perini J., Cohen L. S. Design of Broad-Band Radar-Absorbing Materials for Large Angles of Incidence. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, s. 223-230, ISSN 0018-9375.

LOKÁLNÍ ZASTAVOVÁNÍ KONTINUÁLNĚ SE POHYBUJÍCÍHO DOPRAVNÍKU

Lukáš NOVÁK

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, lukas.novak@fs.cvut.cz

Abstrakt: Příspěvek se zabývá realizací zastavování části dopravníku pásové výroby. Popisuje technické řešení provedení dopravníku a použití servopohonu pro docílení zastavení vybrané části dopravníku. Jsou diskutována vhodná čidla a způsoby řízení servopohonu. Popsaná metoda zastavování části dopravníku byla úspěšně použita na několika výrobních linkách řetězového dopravníku v potravinářském průmyslu. Neurčitost zastavení realizovaná uvedenou metodou se projevuje buď jako stabilní odchylka od požadované polohy, nebo jako mírný pohyb ve fázi zastavení dopravníku. Pohyb je způsoben momentovými rázy servomechanismu při vymezování vůlí v člancích řetězu a nepodařilo se jej úplně odstranit. Pro aplikace v potravinářském průmyslu na plnicích automatech, v nichž byla tato metoda použita, je dosažená neurčitost dostatečná.

Klíčová slova: Dopravník, servopohon, synchronní pohyb.

1. Úvod

Výrobní linky založené na produktivní pásové výrobě používají pro pohyb hlavního dopravníku obvykle krokové mechanismy, které dopravník zastavují ve stanicích na dobu nutnou k vykonání technologické operace. Pohyb po přítržích je náročný na akcelerační a decelerační momenty a použití takového pohybu je omezeno setrvačnými hmotami dopravníku, částmi s ním spojenými, včetně obráběných výrobků. Proto se u dlouhých dopravníků nebo u dopravníků s požadavkem na velkou rychlost pohybu používá kontinuální pohyb dopravníku a výrobek se ve stanici od dopravníku odpojí po dobu nutnou k provedení operace nebo je obráběcí stanice umístěna na pracovním pohybovém stole, který se pohybuje synchronně s dopravníkem a operace se vykonávají letmo.

V případech, kdy z různých důvodů nelze uvedené postupy použít, je možné použít zastavení části dopravníku, přičemž větší část dopravníku se pohybuje kontinuálně. Po vykonání operace musí zastavená část dopravníku dohonit zpoždění. Toto řešení není obvyklé, nicméně jeho realizace s dnešními prostředky řídicích PLC systémů a servopohonů není obtížná a přináší vynikající výsledky v přesnosti synchronizace polohy.

2. Řešení úlohy zastavování části kontinuálně se pohybujícího dopravníku

Na obr.1 je schematicky naznačeno provedení dopravníku, které umožňuje zastavení části dopravníku mezi řetězovými koly G,H. Řetězové kolo A je hnací. Řetězová kola A,B,C,D,G a H se pouze otáčejí ve svých osách. Řetězová kola E a F jsou vzájemně spojena a mohou se navíc pohybovat v ose x pomocí servomotoru s kuličkovým šroubem J. Pokud se dopravník otáčí v naznačeném směru ω a řetězová kola E a F se pohybují rychlostí v v záporném směru osy x , rychlosti se odčítají a výsledná rychlost v_{GH} části dopravníku mezi koly G a H je

$$v_{GH} = r\omega - 2v \quad (1)$$

kde r je poloměr řetězového kola a předpokládá se u všech kol stejný.

Pokud se budou řetězová kola pohybovat v kladném směru osy x , je výsledná rychlost v_{GH} části dopravníku mezi koly G a H

$$v_{GH} = r\omega + 2v \quad (2)$$

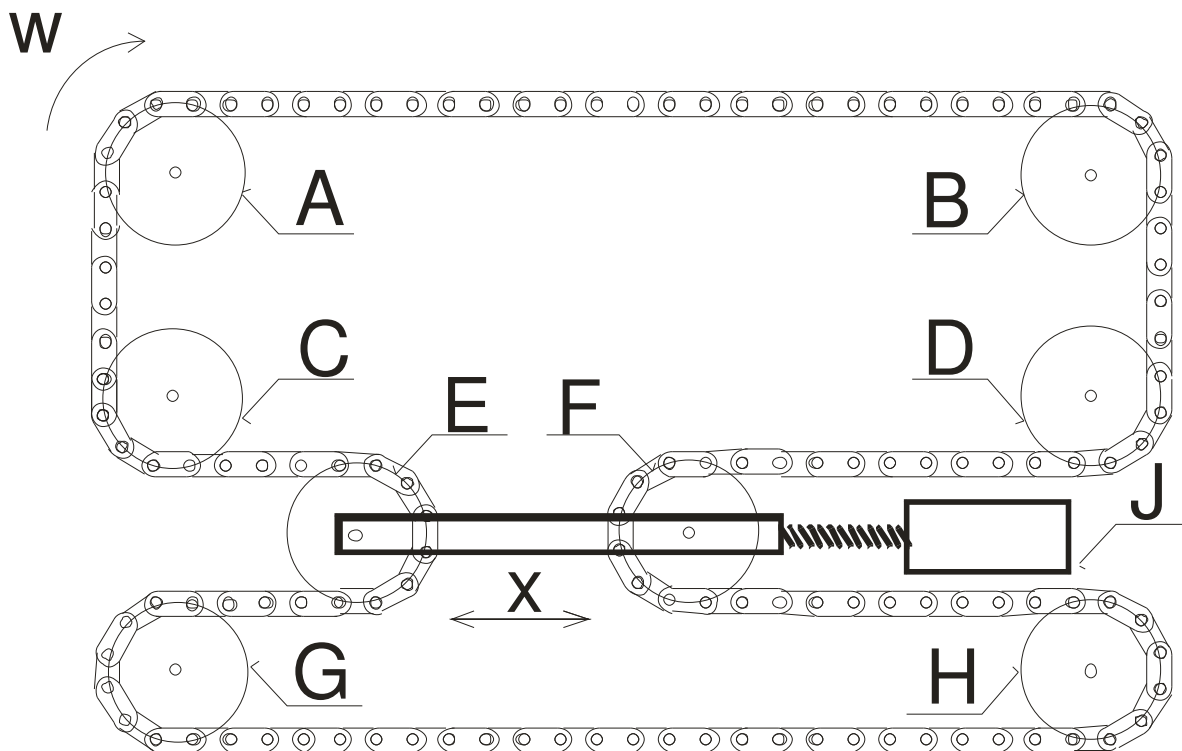
Podle rovnice (1) lze tedy vhodnou rychlostí pohybu v řetězových kol E a F zařídit, aby výsledná rychlost byla nulová. Při pohybu řetězových kol E,F zpět stejnou rychlostí se výsledná rychlost zdvojnásobí.

Pro vyřešení dané úlohy je třeba vyřešit následující dílčí úlohy:

- změřit rychlost pohybu dopravníku ω
- pohybovat koly G a H vypočtenou rychlostí
- pohyb nafázovat tak, aby zastavená část dopravníku byla v definované poloze

Pro určení rychlosti dopravníku je na řetězovém kole B umístěn snímač otáčení. Vzhledem k číslicovému zpracování signálu byl použit snímač inkrementální. Pulsy snímače jsou vedeny do rychlých čítačích

vstupů PLC. V čítačích jsou nastaveny komparační úrovně a měří se doba dosažení nastavené hodnoty v registrech čítačem s rozlišením 1 ms. Nastavitelné komparační hodnoty umožňují volit kompromis mezi přesností určení rychlosti a aktuálností změřené hodnoty, nezávisle na době programové smyčky PLC. To znamená, že při dlouhé periodě měření dosáhneme sice přesnějšího určení rychlosti, tato hodnota však bude určující pro celou následující periodu. Pokud se tedy bude rychlost dopravníku během měřicí periody významně měnit, hodnota nebude aktuální a periodu měření je třeba vhodně zkrátit. Naopak kolísání rychlosti lze delší periodou filtrovat.



Obr.1: Vedení dopravníku s řetězovými koly

Požadovaná rychlost pohybu v se vypočte pro $v_{GH} = 0$ pomocí rovnice (1) ze znalosti poloměru řetězového kola r a změřené rychlosti otáčení kola ω . Tuto rychlost pohybu řetězových kol E a F nejpřesněji získáme použitím servopohonu. Servopohony se v dnešní době konstruují s třífázovými střídavými motory s permanentními magnety na rotoru. Na hřídeli motoru je integrován snímač polohy buď optický inkrementální, optický absolutní nebo 2 pólový resolver. Řídící elektronika servodriveru má vlastní algoritmy řízení s regulačními smyčkami momentu, rychlosti a polohy. Sledování předepsané trajektorie pohonu je pak pouze otázkou správného nastavení PID regulátoru servodriveru. Některé servodrivery mají dokonce vlastní identifikaci motoru a adaptivní nastavování regulátoru.

Servodrivery servomotorů mají obvykle tři způsoby zadávání pohybu:

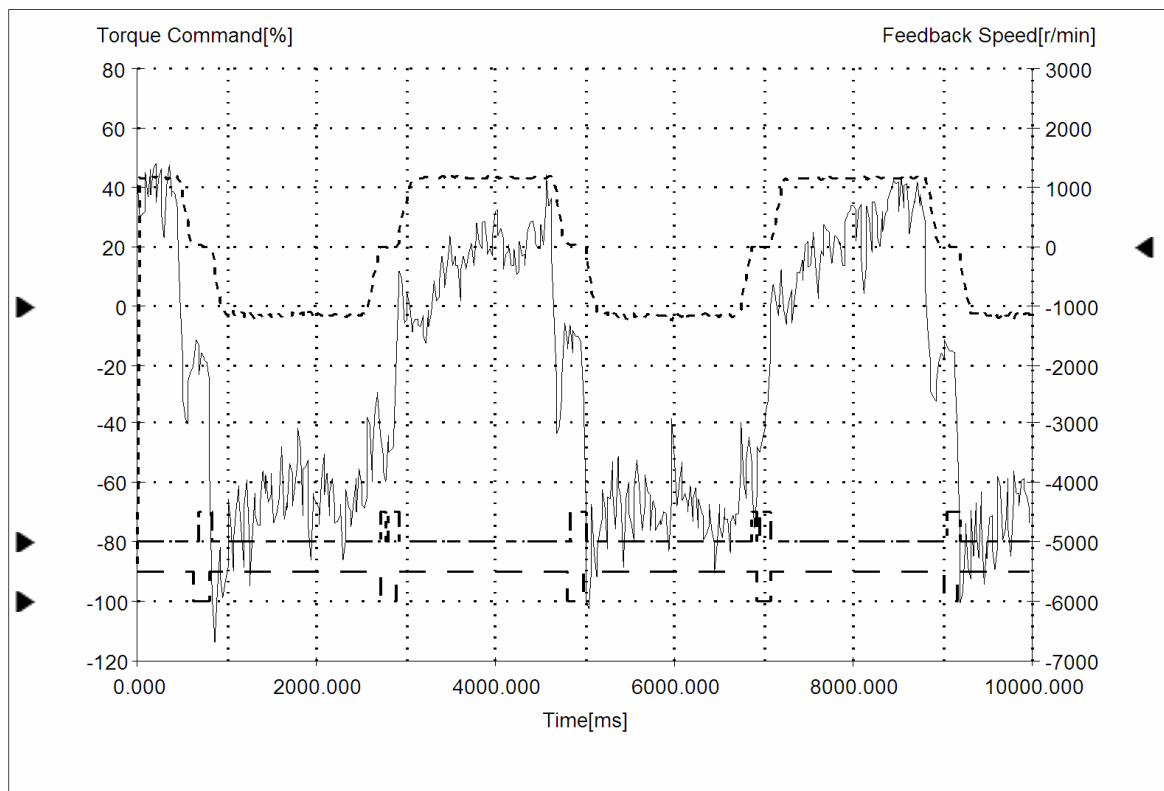
- analogovým signálem
- frekvenčním signálem
- příkazy zadávanými po sériové komunikační lince

Analogové řízení není dostatečně přesné a pro dosažení přesnosti vyžaduje použití dalšího zpětnovazebního snímače. Řízení přes sériovou linku představuje prostudování komunikačního protokolu a pokud není výrobce PLC a servodriveru shodný, může jeho zvládnutí znamenat velkou časovou náročnost. Tato investice se vyplatí při použití většího počtu servopohonů. Nejjednodušší řízení servopohonu je frekvenční. Frekvenční řízení je ve většině PLC podporováno v knihovních funkcích a k naprogramování pohybu z jednoho bodu do druhého stačí zapsat jedinou funkci. Tato funkce vyše na frekvenční výstup zadaný počet pulsů. Parametry této funkce jsou strmota nárůstu frekvence, ustálená frekvence a strmota poklesu frekvence pulsů. Pro trajektorii pohybu je možné kromě obdélníkového průběhu volit lichoběžníkovou nebo s-rampu a tím jednak omezit odstředivé síly působící na výrobky umístěné na dopravníku a zabránit tak jejich spadávání, jednak snížit rázy v pohonném mechanismu.

Kromě vlastního zastavení části dopravníku je obvykle třeba ještě zastavit tuto část dopravníku v přesné definované poloze. K určení přesné polohy je použit také inkrementální snímač. Nulová značka snímače určuje úhel natočení kola. Algoritmus řízení servopohonu je jednoduše vytvořen tak, že servopohon stojí ve výchozí pozici. Výchozí pozice je definována umístěním indukčního snímače vůči poloze řetězových kol E,F. V okamžiku, kdy se kolo hnané hlavním pohonem natočí na nastavený úhel, servopohon se rozjede ve směru $-x$

rychlostí v_{GH} . Po dosažení rychlosti v_{GH} se část dopravníku mezi koly G,H zastaví. Pokud je žádaná rychlost stálá, poloha zastavení je jednoznačná. Pokud se žádaná rychlost, tedy ustálená rychlost, kterou se musí servomechanismus pohybovat, proměnná a použije se lichoběžníkové nebo S-rampy, je nutné provést korekci výchozího okamžiku rozjezdu servomechanismu podle úhlu natočení hnacího řetězového kola tak, aby k ustálené rychlosti došlo vždy ve stejné poloze dopravníku. Jinou možností je měnit strmost nárůstu rychlosti podle konečné rychlosti. To je ale většinou nevýhodné, neboť se tím zvyšují akcelerační momenty.

Na obr.2 jsou čárkovaně zobrazeny průběhy rychlosti servopohonu a plnou čarou průběh momentu. Průběhy byly zaznamenány monitorovacím programem servodriveru. Velikost působícího momentu motoru je při pohybu na jednu stranu výrazně vyšší než na stranu druhou. Je to způsobeno tažnou silou působící v dopravníku od hlavního pohonu, kdy v jednom směru působí ve směru pohybu servopohonu a v druhém proti.



Obr.2: Průběh rychlosti a momentu pohonu ve dvou pracovních cyklech

Pro vyrovnání potřebného momentu na obě strany pohybu, byl v dalších realizacích použit pneumatický kompenzátor tahu řetězu dopravníku.

3. Závěr

Popsaná metoda zastavování části dopravníku byla úspěšně použita na několika výrobních linkách řetězového dopravníku v potravinářském průmyslu. Na délce zastavené části 2500 mm je neurčitost polohy maximálně do ± 4 mm. Tato neurčitost se projevuje buď jako stabilní odchylka od požadované polohy, nebo jako mírný pohyb ve fázi zastavení dopravníku. Pohyb je způsoben momentovými rázy servomechanismu při vymezování vůlí v člancích řetězu a nepodařilo se jej úplně odstranit. Projevuje se zde výkonová blízkost hlavního pohonu dopravníku (1,1 kW) a servopohonu (400 W). Zvyšování síly napínání řetězu tuto neurčitost sice snižuje, ale dochází tím k zvětšování opotřebování řetězových kol a vytahování řetězu. Pro aplikace v potravinářském průmyslu na plnicích automatech, v nichž byla tato metoda použita, je uvedena dosažená přesnost dostatečná.

Literatura

- [1] Dražen a kol.: Manipulace s materiálem. SNTL Praha, 1979.
- [2] Kule.,L.: *Technika elektrických pohonů*. SNTL Praha, 1983.
- [3] Firemní literatura Omron, Siemens.

POUŽITIE JEDNODUCHÝCH ZAPOJENÍ MENIČOV PRE MALÉ SOLÁRNE NABÍJAČKY

Jozef ONDERA

KEMPI, FEI TU v Košiciach, Slovenská republika, jozef.ondera@tuke.sk

Abstrakt: Mnohé prenosné zariadenia sú napájané z akumulátorov. Hoci väčšinou sú akumulátory takýchto zariadení nabíjané prostredníctvom sieťových nabíjačiek, vyskytujú sa situácie, kedy toto riešenie nie je možné použiť. K takým prípadom patrí napríklad nabíjanie akumulátorov v prípade dlhodobého pobytu mimo dosahu elektrickej siete. Využitie solárnych článkov na nabíjanie malých akumulátorov predstavuje jedno z možných riešení, ktoré môžu byť aplikované napríklad v prípade dobíjania zdrojov pri táborení, v expedičných podmienkach, prípadne iných špeciálnych aplikáciách. Použitie fotovoltaických článkov je vhodným riešením aj z pohľadu ekologických prístupov. Príspevok naznačuje niektoré možnosti využitia jednoduchých zapojení meničov pre nabíjačky napájané solárnymi článkami.

KLúčové slová: nabíjač, akumulátor, solárny článok, DC-DC menič

1. Akumulátory používané pre napájanie malých mobilných zariadení.

Sortiment malých spotrebičov napájaných z akumulátorov sa výrazne zväčšil. Súvisí to s rozmachom najrôznejších elektronických zariadení v oblasti spotrebnej aj priemyselnej elektroniky. Z mnohých príkladov je možné uviesť napájanie rôznych prenosných elektronických zariadení, fotoaparátov, kamier, mobilných telefónov, navigačných systémov, mobilných počítačov. Pomerne rozsiahlu skupinu zariadení využívajúcich akumulátory predstavuje aj napájanie rôznych typov prenosného elektrického náradia, alebo malých svetelných zdrojov.

Z hľadiska zariadení využívajúcich akumulátory môžeme definovať dve kategórie. Prvú kategóriu zariadení tvoria zariadenia pri ktorých sa predpokladá napájanie z primárnych chemických článkov s možnosťou použitia akumulátorov ekvivalentnej veľkosti. Obvykle sú používané NiCd, NiMH, alebo nabíjateľné alkalické RAM akumulátory. Druhú kategóriu zariadení napájaných z akumulátorov tvoria zariadenia napájané špeciálnymi akumulátormi. V tejto kategórii napájanie z primárnych chemických článkov nie je možné, akumulátory sú zapuzdrené podľa typu zariadenia tak aby umožňovali optimalizovať rozmery a výslednú hmotnosť. Pre napájanie moderných elektronických zariadení sú často používané lítium-iónové akumulátory vyznačujúce sa priaznivým pomerom výkonu a objemu akumulátora. Používajú sa však aj NiCd a NiMH akumulátory a v niektorých aplikáciách si zachovávajú svoje postavenie bezúdržbové olovené akumulátory.

2. Základné vlastnosti solárnych článkov

Vývoj solárnych článkov je v podstate datovaný od roku 1883 kedy vznikol selénový solárny článok s účinnosťou 1 až 2%. V roku 1918 bol vytvorený monokryštalický kremíkový článok. V roku 1954 články na báze kremíka mali účinnosť 4%, neskôr v Bellových laboratóriách dosiahli účinnosť 11%. V roku 1960 sa podarilo zvýšiť účinnosť na 14% (Hoffman Electronics). V roku 1976 bol v RCA Laboratories skonštruovaný prvý solárny článok na báze amorfného kremíka. Účinnosť dnešných komerčne využívaných článkov sa pohybuje okolo 20%. Vlastnosti a charakteristika solárnych článkov z rôznych materiálov sú uvedené v tab. 1.

V súčasnosti v rámci výskumných projektov je venované veľké úsilie na dosiahnutie výrazne vyššej účinnosti solárnych článkov. Konštrukcia tzv. viacpriechodových článkov využívajúcich jednotlivé zložky slnečného svetla vo viacerých vrstvách umožnila firme Spectrolab v roku 2006 dosiahnuť účinnosť 40,7%, pričom jednotkové náklady by mohli dosiahnuť 3 USD na jeden watt inštalovaného výkonu. Výskumníkom na univerzite v Delaware v rámci výskumu na projekte vysoko účinných solárnych článkov sa podarilo, podľa správ v roku 2007, prekonať účinnosť až 42,8% v štandardných teresteriálnych podmienkach.

Je samozrejmé, že pri úvahách o fotovoltaických článkoch je potrebné rozlišovať nielen výkon a účinnosť, ale aj ich mechanické vlastnosti vzhľadom na oblasť použitia. Relatívne veľké výkony a vysoká účinnosť článkov je cieľom predovšetkým pre aplikácie na stabilných zariadeniach ku ktorým môžeme priradiť ostrovné systémy výroby elektrickej energie na budovách, alebo projekty solárnych elektrární určených aj pre spoluprácu

s inými zdrojmi v energetických systémoch. Solárne panely pre tieto aplikácie dosahujú značné celkové rozmery a hmotnosti, ale aj vysokú cenu inštalovaného zariadenia.

Materiál	Účinnosť [%]	Výhody	Nevýhody	Charakteristika	Použitie
Monokryštalický kremík	15-18	Najvyššia účinnosť	Vysoká cena	Tmavomodrá farba bez viditeľnej kryštalickej štruktúry	Náročné aplikácie vyplývajúce z vysokej účinnosti
Multikryštalický kremík	14-16	Nízka cena	Straty vznikajúce na rozhraniach kryštálov	Sýta modrá farba s viditeľnými kryštálmi, výroba z taveniny	Vzhľadom na cenu všestranné využitie
Polykryštalický kremík	10	Cena rádovo nižšia ako monokryštalický	Menšia účinnosť	Modrá farba, menšie viditeľné kryštály	Zriedkavejšie použitie
Amorfny kremík	6-9	Cena, malé rozmery, tenké, flexibilita	Malá účinnosť, nestabilné pri silnom ožiarení	Premenlivá fialová farba, možnosť nanosenia v tenkých vrstvách	Energeticky nenáročné aplikácie (napr. kalkulačky)
Arzenid gália	18-30	Vysoká absorbtivita tenké, trvácne	Cena, veľmi krehký materiál	Sivá farba, vlastnosti nezávislé od teploty, odolné voči žiareniu	Vysoko účinné články, vesmírne aplikácie
Sulfid kademnatý	10-17	Veľmi tenké vrstvy, malá hmotnosť	Nestabilné, malý výkon článkov	Historicky najstarší	Pôvodne v kozmickej technike

Tab.1: Porovnanie vlastností základných druhov solárnych článkov

Inú oblasť použitia predstavujú solárne články používané pre napájanie malých prenosných zariadení, kde veľký význam zohráva okrem ceny článkov predovšetkým ich nízka hmotnosť, mechanická odolnosť, schopnosť článkov znášať deformácie, ohýbanie, nárazy a v mnohých prípadoch je dôležitá aj možnosť ich zloženia na malý rozmer z dôvodov transportu. Významnú úlohu v tejto oblasti zohrávajú flexibilné solárne moduly pri ktorých sú prvoradé ich mechanické vlastnosti a odolnosť aj za cenu nižšej účinnosti.

Zaujímavým príkladom riešenia takých modulov sú moduly PowerFilmSolar určené predovšetkým na nabíjanie akumulátorov v poľných podmienkach. Porovnanie veľkosti solárnych zdrojov s menovitým výkonom 5 W a 30 W v rozložení aj zložení stave spolu s príslušajúcimi káblami vybavenými konektormi veľkosti automobilového zapalovača cigariet je na obr. 1, príklady parametrov vybraných solárnych nabíjačiek malých výkonov pre akumulátory 12 V zachytáva tab. 2.

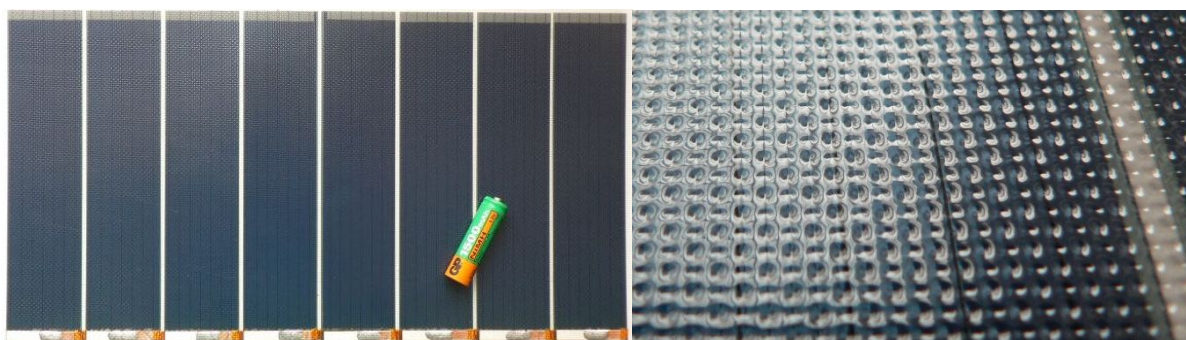


Obr.1: Príklady konštrukcie solárnych zdrojov PowerFilm F15-300 a F15-1800s flexibilnými solárnymi článkami

Ohybné solárne panely sú v súčasnosti dostupné aj na domácom trhu. Sú určené pre mobilné použitie v stanoch, karavanoch, člnoch, turistike. Dodávajú sa ako moduly pozostávajúce z jedného až 10 solárnych článkov s typovým označením 1SC1 až 10SC1. Počtom článkov je určená veľkosť napätia modulu a jeho plocha, pričom jeden rozmer modulu je stály a predlžuje sa len jeho druhý rozmer. Povrch modulu je pokrytý fóliou z lisovaného tvrdeného plastu. V plastovej fólii je vylišovaná štruktúra optických elementárnych buniek ktoré zlepšujú v oboch osiach vlastnosti modulu z hľadiska citlivosti pri zmene uhla dopadajúceho svetla, čo je pri mobilných zariadeniach veľmi dôležité. Prevedenie modulu 8SC1 (pre porovnanie rozmerov spolu s akumulátorom veľkosti tužkového článku) je zachytený na obr. 2, dolu je znázornený detail povrchovej štruktúry optických elementov solárneho panelu.

Typ	PowerFilm F15-300	PowerFilm F15-600	PowerFilm F15-1200	PowerFilm F15-1800
Maximálny výkon [W]	5	10	20	30
Menovité napätie pri P_{max} [V]	15,4	15,4	15,4	15,4
Menovitý prúd pri P_{max} [mA]	300	600	1200	1800
Hmotnosť [g]	170	250	430	600
Hmotnostný pomer výkonu [W/kg]	29	39	47	51
Rozmery v zloženom stave [mm]	140x114x19	261x89x35	267x165x15	267x235x19
Rozmery v prevádzke [mm]	648x279x1,5	521x584x1,5	762x775x1,5	1054x775x1,5

Tab.2: Porovnanie vlastností základných druhov solárnych nabíjačiek PowerFilm



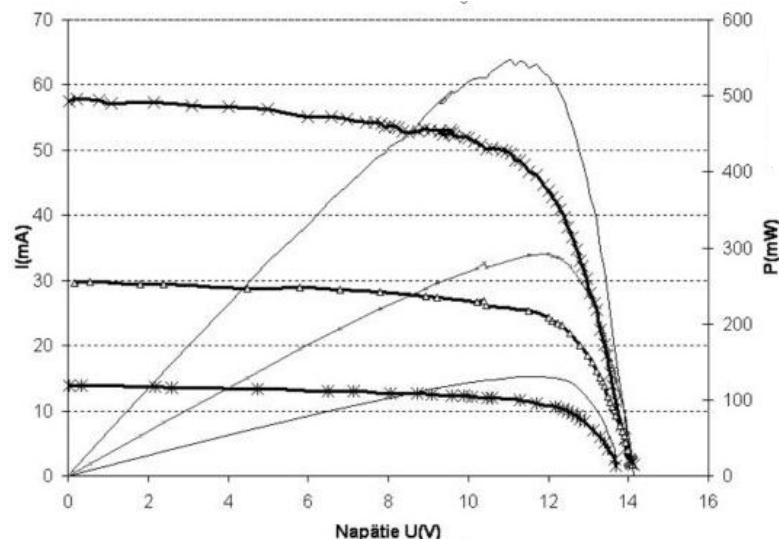
Obr.2: Solárny modul 8SC1, vpravo-detail optických elementov modulu

Základné parametre vybraných modulov (bez 3SC1 a 9SC1), vrátane cien skladovo dodávaných typov uvádza tabuľka 3. Parametre uvádzané v tabuľke sú platné pre teplotu 25°C. Porovnaním s tabuľkou modulov PowerFilm vidíme, že najväčší modul 10SC1 s výkonom 4,5 W sa výkonom veľmi približuje najmenšiemu modulu PowerFilm F15-300 s výkonom 5 W. Obidva majú zhodný menovitý prúd, rovnakú hmotnosť, porovnateľný hmotnostný pomer výkonu. Plocha modulu F15-300 v prevádzkovom stave je približne dvojnásobkom plochy modulu 10SC1. Z tohto pohľadu je zaujímavá nízka hmotnosť a plošná účinnosť modulov SC1 a na druhej strane nízka plošná hmotnosť modulu PowerSolar. Pri porovnávaní oboch typov modulov je potrebné pamätať na to, že parametre solárnych článkov sa obvykle testujú pri intenzite osvetlenia 1000W/m² svetlom zodpovedajúcim slnečnému spektru a pri teplote článku 25°C.

Typ	1SC1	2SC1	4SC1	6SC1	8SC1	10SC1
Napätie naprázdno [V]	2,5	4,97	9,94	14,94	19,8	24,85
Prúd nakrátko [mA]	430	430	430	430	430	430
Napätie pri P_{max} [V]	1,5	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0
Menovitý prúd pri P_{max} [mA]	300	300	300	300	300	300
Maximálny výkon [W]	0,45	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5
Hmotnosť [g]	20	38	74	108	140	170
Hmotnostný pomer výkonu [W/kg]	22,5	23,7	24,3	25,0	25,7	26,5
Rozmery [mm]	60x198x1,1	102x198x1,1	186x198x1,1	270x198x1,1	354x198x1,1	438x198x1,1
Cena (s DPH) [Sk]	386	649	-	-	2 332	-
Jednotková cena výkonu [Sk/W]	858	721	-	-	648	-

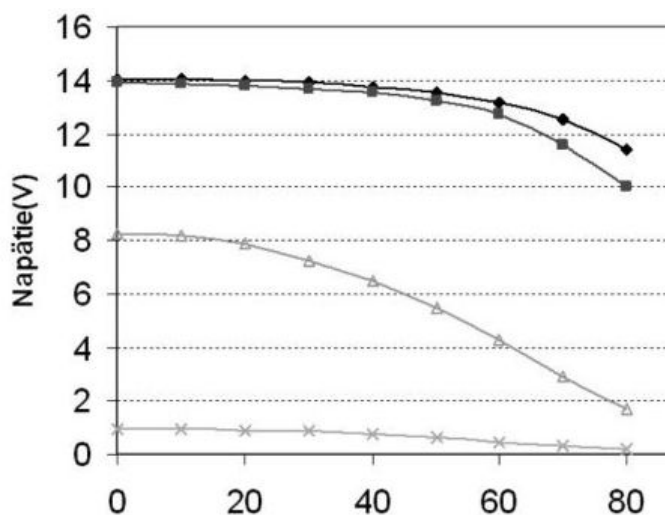
Tab.3: Porovnanie vlastností ohýbateľých modulov xSC1

Na overenie základných prevádzkových vlastností modulov SC1 boli vykonané merania na module typu 8SC1. Pri meraniach v laboratóriu sme dosiahli najvyššiu intenzitu osvetlenia 22 500 luxov osvetlením modulu 4 halogénovými reflektormi s celkovým príkonom 2 000 W. Toto osvetlenie predstavovalo približne štvrtinu intenzity osvetlenia pri jasnej oblohe vo februári v poľudňajších hodinách. Keďže merania potvrdili lineárnu závislosť maximálneho výkonu článku od jeho osvetlenia, zodpovedal by výkon pri osvetlení za uvedených podmienok v exteriéri hodnote približne 2,2 W, čo je približne 61% udávanej katalógovej hodnoty maximálneho výkonu. Namerané charakteristiky pre intenzitu osvetlenia 22500, 12100 a 5300 luxov znázorňuje obrázok 3.



Obr.3: Voltampérové a výkonové charakteristiky modulu 8SC1 pri intenzite osvetlenia 5300, 12100 a 22500 luxov

Aby bolo možné posúdiť smerové vlastnosti modulu bola zmeraná závislosť napätia od uhla odklonu dopadajúceho svetla od kolmého smeru. Meranie bolo uskutočnené pre 4 rôzne zaťažovacie odpory (obr. 4). Z nameraných charakteristík vyplynulo, že pokiaľ je modul v stave naprázdno, alebo je zaťažovaný malým prúdom, teda pracovný bod sa nachádza napravo od bodu maximálneho výkonu, je závislosť napätia od natočenia modulu veľmi malá v rozmedzí natočenia $\pm 60^\circ$ od normálovej polohy. Ak modul zaťažujeme menšími odpormi a teda pracujeme naľavo od miesta maxima dosiahnuteľného výkonu v oblasti prúdového obmedzenia je akceptovateľné natočenie modulu o uhol $\pm 45^\circ$.



Obr.4: Smerová charakteristika modulu 8SC1 pri pootočení o uhol 0 až 80° pre rôzne zaťažovacie odpory - zhora: nezaťažený - $R_z \geq 1\text{M}\Omega$, $R_z=12\text{k}\Omega$, $R_z=1200\Omega$, $R_z=120\Omega$

3. Možnosti použitia meničov pri nabíjaní akumulátorov zo solárnych článkov

Statická náhradná schéma a statické zaťažovacie charakteristiky solárneho článku ukazujú, že pri každej úrovni osvetlenia článku môže článok pracovať v optimálnom pracovnom bode pri ktorom je schopný dodať maximálny výkon pri danom osvetlení. Ak uvažujeme o použití solárneho modulu pre priame nabíjanie akumulátorov, nie je možné pracovať v bode maximálneho výkonu, pretože napätie akumulátora sa počas nabíjania mení. Smerom k menším napätiam od optimálneho pracovného bodu prúd článku len málo narastá

a dodávaný výkon výrazne klesá. Ešte výraznejšie sa prejaví neprispôsobenie v prípade ak by solárny článok mal slúžiť pre nabíjanie akumulátorov s rôznym napätím.

Pri nabíjaní akumulátorov je možné uvažovať o použití polovodičového meniča, ktorý by umožnil lepšie využiť výkonovú charakteristiku solárneho článku pri použitej záťaži, teda prispôobil nabíjací prúd akumulátora možnostiam solárneho článku. Z pohľadu výkonovej elektroniky pre túto úlohu sa jedná o použitie jednosmerného DC–DC meniča. Nakoľko výkon má vždy smerovať zo solárneho článku do akumulátora, postačí zapojenie meniča s jedným smerom toku výkonu, teda postačí menič schopný pracovať v prvom kvadrante. Akumulátor nemusí byť galvanicky oddelený od solárneho článku, preto je možné s výhodou použiť zapojenie priameho jednosmerného impulzového meniča. V zásade je možné uvažovať buď o znižovacom, alebo zvyšovacom impulzovom meniči, principiálne však nemôžeme vylúčiť ani použitie znižovaco-zvyšovacieho meniča, ktorý by mohol byť výhodný pri nabíjaní rôznych akumulátorov v širokom rozsahu napätí.

Ak by sme uvažovali o návrhu meniča pre nabíjačku akumulátorov s malým napätím (do 10 V), ide o typické prípady nabíjania 1 až 6 sériovo zapojených NiCd alebo NiMH článkov, nabíjačky akumulátorov pre mobilné telefóny, fotoaparáty, kamery, alebo akumulátory pre drobné elektrické náradie (napr. malé elektrické skrutkovače). Pre tieto napätia je vhodné uvažovať o zapojení znižovacieho impulzového meniča pri ktorom dosiahneme na výstupe vyššie stredné hodnoty prúdov ako sú prúdy odoberané zo solárnych článkov. V tomto prípade by bolo možné zabezpečiť veľkosť nabíjacieho prúdu do akumulátora podľa požadovaných nabíjacích charakteristík v prípade dostatočného výkonu solárneho článku. Ak výkon solárneho článku pri danej intenzite osvetlenia nepostačuje, menič môže byť zabezpečený len taký nabíjací prúd akumulátora pri ktorom sa pracovný bod solárneho článku nachádza v bode maximálneho výkonu pre danú intenzitu osvetlenia. Približné splnenie tejto podmienky z hľadiska riadenia je pomerne jednoduché, nakoľko napätie solárneho článku pri ktorom sa dosahuje oblasť maxima výkonu sa len málo mení. Vhodným riešením sa javí nastaviť menič do bodu maximálneho výkonu pre vysoké intenzity osvetlenia, pri nižších úrovniach osvetlenia sa pracovný bod dostane do oblasti v ktorej je výkon len o málo nižší ako maximálne dosiahnuteľný výkon pri danom osvetlení.

Iná situácia nastane ak budeme uvažovať o nabíjaní akumulátorov s vyšším napätím (cca 12 až 24 V), čomu napríklad zodpovedá nabíjanie akumulátorov pre elektrické vŕtačky. V tomto prípade je jednoduchšie a ekonomickejšie použiť solárne články na nižšie napätie s menším potrebným počtom elementárnych článkov a zvyšovacím meničom prispôbiť výstupné napätie potrebám akumulátora. Aj v tomto prípade je vhodné využiť riadenie meniča tak, aby sa nachádzal v pracovnom bode zodpovedajúcom maximu možného výkonu solárneho článku pri danom osvetlení.

Ak uvažujeme o nabíjaní akumulátorov s napätím pohybujúcim sa v širokom rozsahu, teda napríklad v rozsahu 1,2 až 30 V, čo je prípad riešenia univerzálnej nabíjačky pre 1 až 20 NiCd alebo NiMH akumulátorov, je možné uvažovať o použití solárneho modulu s napätím napr. 12 V a použitím niektorého zapojenia meniča umožňujúceho znižovací aj zvyšovací režim. Do úvahy prichádzajú nasledujúce alternatívy meničov:

- zvyšovaco - znižovací menič s kapacitným medziobvodom
- znižovaco – zvyšovací menič so spoločnou indukčnosťou
- Čukov menič
- Sepic menič
- Zeta menič

Vlastnosti jednoduchých a kaskádnych DC-DC meničov sú zachytené v tab. 4.

Zapojenie	Použitie	Počet polovodičov	Namáhanie polovodičov	Účinnosť	Cena
Znižovací menič	Akumulátory s malým napätím	1x VT, 1x VD	malé	vysoká	nízka
Zvyšovací menič	Akumulátory s vyšším napätím ako solárny modul	1x VT, 1x VD	malé	vysoká	nízka
Zvyšovaco-znižovací menič s kapacitným medziobvodom	Malé aj väčšie napätie akumulátorov	2x VT, 2x VD	malé	stredná	vysoká
Znižovaco-zvyšovací menič so spoločnou indukčnosťou	Malé aj väčšie napätie akumulátorov	2x VT, 2x VD	malé	vysoká (spína len 1 tranzistor)	stredná
Čukov menič	Malé aj väčšie napätie akumulátorov	1x VT, 1x VD	veľké	stredná	stredná
Sepic menič	Malé aj väčšie napätie akumulátorov	1x VT, 1x VD	veľké	nízka	stredná
Zeta menič	Malé aj väčšie napätie akumulátorov	1x VT, 1x VD	veľké	nízka	stredná

Tab.4: Porovnanie vlastností možných zapojení meničov pre solárnu nabíjačku

Kým zvyšovaco - znižovací menič a znižovaco – zvyšovací menič sú meniče obsahujúce dva tranzistorové spínače a dve diódy, Čukov, Sepic a Zeta menič obsahujú len jeden tranzistorový spínač a jednu diódu.

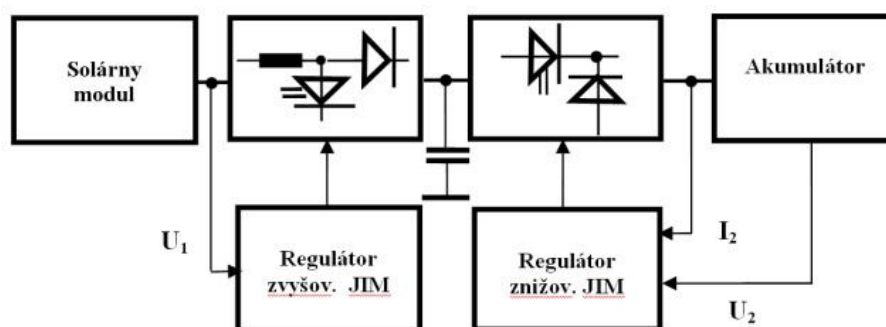
Z hľadiska počtu vinutých súčiastok je zaujímavý znižovaco – zvyšovací menič, pretože obsahuje len jednu indukčnosť, ostatné meniče potrebujú dve indukčnosti. Menič je zaujímavý aj z hľadiska režimu spínania tranzistorov, pretože vždy spína len jeden tranzistor. Problémom býva činnosť pri zmene vstupného napätia v okolí prepínania režim činnosti čo môže viesť k nestabilite zapojenia v tejto oblasti.

Z pohľadu účinnosti meniča pracujúceho s nízkymi napätiami sú z hľadiska strát meniča významné prípustné úbytky na polovodičových súčiastkach. Z tohto pohľadu je výhodné používať zapojenie s jediným výkonovým spínačom a jednou diódou. Z hľadiska úbytkov na tranzistore je možné uvažovať nízkonapäťové polom riadené tranzistory. Možno je tiež používať špeciálne bipolárne tranzistory s veľmi malým úbytkom napätia U_{CE} . Z pohľadu úbytkov na dióde, ale aj z pohľadu záverných zotavovacích vlastností je potrebné uvažovať s použitím Schotkyho diód, alebo využiť vlastnosti synchronných usmerňovačov.

Na rozdiel od sieťovo napájaných nabíjačiek pre zapojenia nabíjačiek spolupracujúcich so solárnym modulom malého výkonu nie je možné zabezpečiť riadenie, ktoré by mohlo splniť požiadavky nabíjacieho procesu z pohľadu akumulátora a zároveň rešpektovať možnosti prevádzky solárneho modulu v bode maximálneho výkonu. Ak nadradíme podmienku prevádzky solárneho modulu v bode maximálneho výkonu pri danom osvetlení je zrejme, že nabíjací prúd sa musí meniť v závislosti od zmeny napätia akumulátora pri nabíjaní, dosiahnuteľného výkonu solárneho modulu pri danom osvetlení a účinnosti meniča. V prípade, že disponibilný výkon solárneho modulu je vyšší ako výkon vyplývajúci z dovoleného nabíjacieho prúdu akumulátora, zabezpečí menič prevádzku podľa potreby akumulátora znížením odoberaného výkonu zo solárneho modulu.

Z uvedeného vyplýva, že vo väčšine prípadov sa nabíjací prúd akumulátora bude meniť podľa dosiahnuteľného výkonu solárneho modulu, čo vylučuje riadiť nabíjací proces prednastavením nabíjacieho času, ako je to obvyklé pri jednoduchých sieťových nabíjačkách. Meranie dodaného náboja do akumulátora integráciou hodnoty nabíjacieho prúdu by bolo pomerne zložité, hoci pri použití číslicových spôsobov riadenia použiteľné. Riadenie nabíjania by však nebolo správne pri dobíjaní čiastočne vybitých akumulátorov.

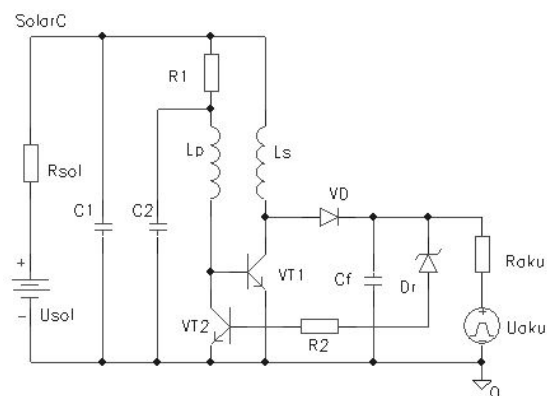
Do úvahy prichádza impulzný spôsob nabíjania akumulátora a vyhodnotenie zmeny napätia, prípadne druhej derivácie napätia. Pri snímaní napätia by bolo vhodné počítať aj s korekciou teploty akumulátora, ktorá v prípade solárnej nabíjačky má významný vplyv z pohľadu riadenia nabíjacieho procesu a životnosti akumulátora pri vyššej teplote okolia. Z pohľadu možnej konštrukcie meniča prináša impulzný spôsob nabíjania určitú komplikáciu z hľadiska potreby akumulácie výkonu, ktorý môže solárny modul dodať počas intervalu prerušenia nabíjacieho prúdu. Z tohto hľadiska by sa javila ako vhodná koncepcia kaskádneho meniča s napäťovým medziobvodom napriek tomu, že účinnosť kaskádneho zapojenia je nižšia a cena vyššia ako pri jednoduchom znižovacom, alebo zvyšovacom meniči. Blokové zapojenie takto riešeného meniča je na obr. 5.



Obr.5: Bloková schéma nabíjačky so zvyšovaco-znižovacím zapojením meniča s kapacitným medziobvodom

Z hľadiska riadenia meniča je potrebné pamätať na riadiace obvody s malou vlastnou spotrebou. Ak by sme napríklad predpokladali riešenie nabíjačky pre 4 akumulátorové články s kapacitou 2500 mAh, a nabíjaní prúdom 500 mA (0,2C), bol by potrebný výkon nabíjačky približne 3 W. Je teda zrejme, že riadiace a signalizačné obvody takej nabíjačky by nemali prekračovať odoberaný výkon desiatín wattu.

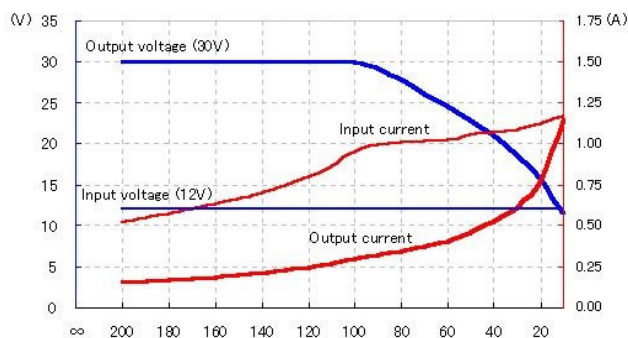
Pri riešení meničov pre solárne nabíjačky malého výkonu môže byť jednoduchou alternatívou riešenia samokmitajúce zapojenie zvyšovacieho meniča uvedeného na obr. 6. V zapojení je použitý ako spínač bipolárny tranzistor s veľmi nízkym saturačným napätím. Schéma znázorňuje podklad simulačnej schémy zapojenia v ktorej je možné simulovať správanie meniča pri náraste napätia akumulátora. Zastavenie činnosti meniča je dané voľbou napätia riadiacej diódy D_r v báze riadiaceho tranzistora VT_2 . Vlastnosti meniča boli overené aj na reálnom zapojení.



Obr.6: Principiálna simulácia schéma nabíjačky so samokmitajúcim zvyšovacím meničom

Pri návrhu jednoduchých zapojení jednosmerných meničov existujú viaceré integrované obvody, spravidla určených ako spínané zdroje malého napätia a výkonu. Ich výhodou je integrovaný výkonový spínač v spoločnom puzdre s radiaciami obvodmi. Ako príklad pre konštrukciu znižovacieho meniča malého výkonu možno uviesť obvod MAX 639 určený pre spínané zdroje napätia 5 V, ktorý je možné použiť pre výstupné prúdy 200 mA. Obvod je schopný pracovať v rozmedzí vstupných napätí 5,5 až 11,5 V a dosahuje účinnosť 90 až 95%. Pre konštrukciu jednoduchej solárnej nabíjačky určenej pre nabíjanie 1 až 4 články veľkosti AAA resp. AA by sa dalo uvažovať o spolupráci napr. so solárnym modulom 4SC1 resp.3SC1.

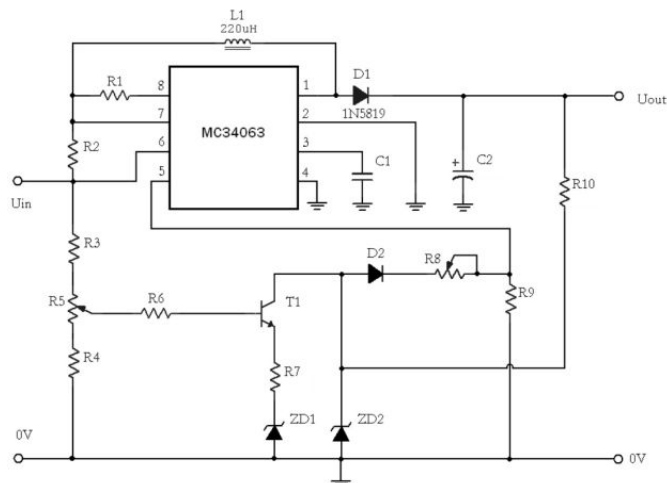
Iným príkladom veľmi jednoduchého riešenia malého meniča pre spoluprácu so solárnymi modulmi môže byť použitie obvodu MC 34063 firmy Motorola, ktorý je použiteľný pre zapojenia znižovacieho, zvyšovacieho aj polaritu invertujúceho znižovaco-zvyšovacieho meniča. Výkonový spínač obvodu je použiteľný do prúdov 1,5 A, pre vyššie prúdy je možné použiť externý výkonový tranzistor. Obvod je schopný pracovať so spínacou frekvenciou do 100 kHz a rozsahom vstupného napätia 3 až 40 V. V režime zvyšovacieho meniča sú na obr. 7 dokumentované jeho vlastnosti z hľadiska dosiahnuteľného výstupného prúdu pri výstupnom napätí 30V a vstupnom napätí 12V v závislosti od zmeny zaťažovacieho odporu na výstupe od 200 do 20 Ω .



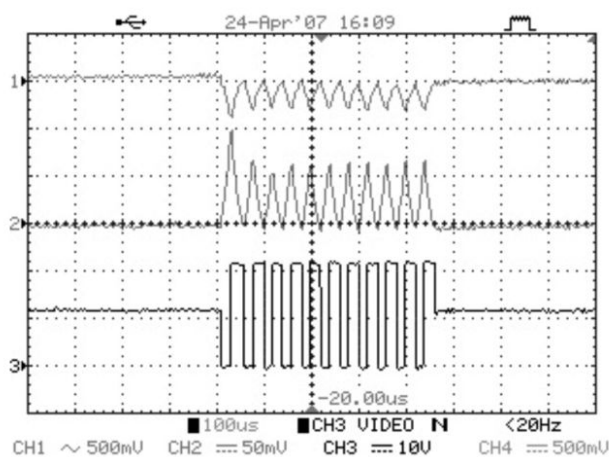
Obr.7: Vlastnosti obvodu MC 34063 v režime zvyšovacieho meniča

Hoci obvod je zapojením určený pre konštrukciu spínaného zdroja napätia, nebol by problém dosiahnuť charakter prúdového zdroja s napätovým obmedzením, ktorý by bol použiteľný ako nabíjací obvod akumulátora napájaný zo solárneho modulu. Naším cieľom však bolo overiť možnosť riadenia pri ktorom by obvod MC 34063 pracoval ako zvyšovací impulzový menič zaťažujúci solárny modul len v takej miere, aby pracoval v oblasti napätia zodpovedajúceho maximálnemu výkonu pri danom osvetlení, čo v prípade modulu 8SC1 predstavuje približne 11,5 V. Napriek tomu, že bol použitý jednoduchý invertujúci obvod snímaného napätia solárneho modulu, meranie potvrdilo, že obvod je možné prevádzkovať v požadovanom režime v pomerne širokom rozsahu zmien napätia na výstupe meniča (11,5 až 24V), čo by umožňovalo spoluprácu nabíjačky s rôznymi typmi akumulátorov v uvedenom rozsahu. Principiálna schéma meniča je na obr. 8.

Menič pracoval s variabilnou spínacou frekvenciou v rozsahu cca 10 - 40 kHz. Určitou nevýhodou použitia obvodu v danom zapojení bolo periodické striedanie úsekov činnosti meniča a úsekov bez kmitania, čo zodpovedá spôsobu riadenia meniča a dovolenému zvlneniu napätia udržiavaného na vstupnom kondenzátore meniča, ktorým bolo filtrované vstupné napätie meniča zodpovedajúce napätiu solárneho modulu. Nespojitý režim činnosti meniča znižoval strednú hodnotu výstupného prúdu meniča do akumulátora podľa dispozičných možností dodaného výkonu na vstupe meniča. Činnosť meniča pri napätí akumulátora 20,4 V dokumentuje oscilogram na obr. 9. Stopy pod sebou zobrazujú vľavo zložku zvlnenia napätia na vstupe meniča, priebeh prúdu indukčnosťou L1 a napätie na výkonovom tranzistore obvodu MC34063.



Obr.8: Použitie obvodu MC 34063 v režime zvyšovacieho meniča s riadením na konštantné napätie solárneho modulu



Obr.9: Oscilogram činnosti meniča pri napätí akumulátora 20,4 V

4. Záver

Riešenie solárnych nabíjačiek pre nabíjanie malých akumulátorov predstavuje zaujímavú aplikačnú oblasť pre jednoduché aj zložitejšie zapojenia jednosmerných meničov. Problematika zahŕňa v sebe komplex otázok súvisiacich s efektívnym využívaním solárnych článkov v spolupráci s rôznymi zapojeniami meničov. Rozšírenie možností ich riadenia môžu umožniť špeciálne integrované obvody určené pre nabíjanie akumulátorov, alebo riadiace obvody na báze DSP. Moderné prostriedky číslicového riadenia by umožnili lepšie sa prispôsobiť požiadavkám na nabíjanie akumulátorov aj so zohľadnením širokého teplotného rozsahu pri ktorom solárne nabíjačky a nabíjané akumulátory musia pracovať.

Literatúra

- [1] Buchman, I.: Battery University [online]. Aktualizované v auguste 2006. Dostupné na Internete: www.batteryuniversity.com
- [2] PowerFilmSolar: Foldable Solar Charger, Katalógové listy PowerFilm F15-300, F15-1800. Dostupné na Internete: www.powerfilmsolar.com
- [3] S.O.S. electronic: Elektronické súčiastky, obchodný katalóg 2007/2008. Dostupné na Internete: www.soselectronic.com
- [4] Benča, A.: Meniče pre malé solárne nabíjačky, DP 2007, KEMPI FEI TU Košice
- [5] ON Semiconductor: 1.5A, Step-Up/Down/Inverting Switching Regulators, Dostupné na Internete: www.onsemi.com

Príspevok bol publikovaný s podporou vedeckej grantovej agentúry v rámci projektov VEGA 1/2178/05 a APVV-20-203105

POUŽITIE AKUMULÁTOROV PRE NAPÁJANIE MALÝCH PRENOSNÝCH SPOTREBIČOV

Jozef ONDERA

KEMPI, FEI TU v Košiciach, Slovenská republika, jozef.ondera@tuke.sk

Abstrakt: *Mnohé prenosné zariadenia sú napájané z akumulátorov. Niektoré sú konštruované výlučne pre napájanie z predpísaného typu akumulátorov, iné umožňujú alternatívne napájanie z primárnych článkov, alebo akumulátorov. V súčasnosti sa pre malé prenosné zariadenia používajú často NiCd a NiMH akumulátory a čoraz významnejší podiel prislúcha aj lítium-iónovým akumulátorom. Vlastnosti a možnosti jednotlivých akumulátorov sa výrazne líšia. Dobré využitie akumulátorov a ich životnosť v značnej miere závisí od spôsobu nabíjania a používaných nabíjačiek.*

KLúčové slová: *akumulátor, nabíjačka, spôsoby nabíjania*

1. Akumulátory používané pre napájanie malých mobilných zariadení

Sortiment malých spotrebičov napájaných z akumulátorov sa výrazne zväčšil. Súvisí to s rozmachom najrôznejších elektronických zariadení v oblasti spotrebnej aj priemyselnej elektroniky. Z mnohých príkladov je možné uviesť napájanie mnohých prenosných elektronických zariadení, fotoaparátov, kamier, mobilných telefónov, navigačných systémov, mobilných počítačov. Pomerne rozsiahlu skupinu zariadení využívajúcich akumulátory predstavuje aj napájanie rôznych typov prenosného elektrického náradia, alebo malých svetelných zdrojov. Z pohľadu používaných typov akumulátorov je možné hovoriť o dvoch hlavných kategóriách zariadení - zariadeniach napájaných z chemických článkov s možnosťou používania akumulátorov, alebo zariadeniach napájaných výlučne z akumulátorov.

1.1 Zariadenia napájané primárnymi článkami alebo ekvivalentnými akumulátormi

Prvú kategóriu zariadení tvoria zariadenia pri ktorých sa predpokladá napájanie z primárnych chemických článkov s možnosťou použitia akumulátorov ekvivalentnej veľkosti. Akumulátory sa vyrábajú vo väčšine prevedení rozmerovo zodpovedajúcich primárnym článkom. Často používanými typmi sú rôzne veľkosti monočlánkov, ktorá sú pri batériách označované AAA, AA, C, D. V súčasnosti sú v malých spotrebičoch najviac rozšírené veľkosti AAA (mikrotužka) a AA (tužkový článok). Obvykle používanými akumulátormi nahradzujúcimi primárne články sú niklokadmiové (NiCd), alebo nikel-metal-hydridové (NiMH) akumulátory, menej rozšírené sú alkalické akumulátory.

Akumulátory na báze niklu sú veľmi rozšírené. V súčasnosti najmä z ekologických dôvodov ustupuje výroba NiCd článkov vzhľadom na použitie kadmia. Niklokadmiové články neumožňujú dosiahnuť také vysoké kapacity pri danom objeme ako NiMH akumulátory, je však vhodné pripomenúť, že NiCd akumulátory majú menší vnútorný odpor, lepšie znášajú zaťažovanie vysokými prúdmi a ich samovybíjanie je menšie. Dôležitou výhodou je schopnosť práce pri nízkych teplotách, akumulátor je schopný pracovať až do -40°C . K nevýhodám NiCd akumulátora sa pripisuje pamäťový jav, ktorý je síce vysvetlený z hľadiska elektrochemických pochodov, ale treba podotknúť že jeho účinok je z hľadiska zníženia kapacity akumulátora čiastočne preceňovaný. Je potrebné zdôrazniť, že k pamäťovému javu pri NiCd akumulátoroch dochádza len po viacerých cykloch čiastočného vybíjania a ide o jav vratný, ktorý je odstrániteľný vykonaním niekoľkých cyklov úplného vybitia. Z hľadiska životnosti akumulátora je oveľa nebezpečnejšie hlboké vybíjanie akumulátora. V prípade NiCd akumulátorov je vybíjanie akumulátora pod 0,8 V na článok neprípustné. Hlboké vybíjanie akumulátorov je tým nebezpečnejšie, čím viac článkov je zapojené do série. V takom prípade môže dôjsť veľmi ľahko k poklesu napätia najslabšieho článku a spôsobiť hlavne pri zariadenia s veľkým odberom jeho „rýchlu smrť“.

Nástup NiMH v súčasnosti v podstatnej miere nahradil používanie NiCd akumulátorov nielen z pohľadu ekologických aspektov, ale hlavne z hľadiska možnosti výroby akumulátorov s väčšou kapacitou, ktorá je asi o 40% vyššia. Tvrdenie že pri NiMH akumulátore sa pamäťový jav nevyskytuje je potrebné brať s určitou rezervou, pretože pri NiMH akumulátore síce nedochádza nabíjaním po neúplnom vybití k poklesu kapacity, ale akumulátor vykazuje mierne zníženie napätia, takže množstvo energie ktorú možno v akumulátore uskladniť sa zníži. Podobne ako pri NiCd akumulátoroch aj pri NiMH akumulátoroch sa odporúča po dlhšom používaní

v režime čiastočného vybíjania vykonať niekoľko cyklov úplného vybitia. Zároveň je potrebné aj v tomto prípade pripomenúť, že z hľadiska dosiahnuteľného počtu nabíjajúcich cyklov počas životnosti akumulátora je možné dosiahnuť výrazne väčší počet cyklov pri používaní akumulátorov s neúplným vybíjaním.

Pri náhrade primárnych článkov akumulátormi NiCd, alebo NiMH je potrebné pamätať na to, že napätie akumulátora je na článok len 1,25 V v porovnaní s 1,5 V pri chemických článkoch. Výnimkou z hľadiska napätia sú nabíjateľné alkalické akumulátory RAM (Rechargeable Alkaline Manganese), ktorých napätie 1,5 V je zhodné s napätím primárnych článkov. Ich výhodou je aj veľmi nízke samovybíjanie. K nevýhodám patrí ich nižšia životnosť (typicky 200 nabíjajúcich cyklov) a nevhodnosť pre napájanie zariadení s väčším odberom. Z hľadiska nákladov je síce obstarávacia cena o niečo nižšia ako pri NiMH akumulátoroch, ale vzhľadom na výrazne nižší počet nabíjajúcich cyklov sú náklady na jeden pracovný cyklus vyššie. Pri väčšom odbere ich životnosť z hľadiska dosiahnuteľného počtu nabíjajúcich cyklov dramaticky klesá až na 25 cyklov.

Dnes sú dostupné nové typy RAM akumulátorov, ktoré majú nižší vnútorný odpor a schopnosť dodávať krátkodobu väčšie prúdy, čo pre veľkú skupinu spotrebičov úplne postačuje. Uvedme ako príklad akumulátory firmy Accucell, pri ktorých sa uvádza že typ AC1800 Mignon (tužkový článok) s kapacitou 1800 mAh je schopný dodávať prúd 500mA, typ AC6000 Mono (veľký monočlánok) s kapacitou 6000 mAh dodáva prúd až 4A. Je potrebné poznamenať, že na rozdiel od NiCd a NiMH akumulátorov sú RAM akumulátory dodávané v nabitom stave a sú teda schopné okamžite po rozbalení poskytnúť svoju energiu podobne ako primárne články. Majú výbornú skladovateľnosť a zachovávajú si uskladnený náboj 5 až 10 rokov.

Pre úplnosť dodajme, že v súčasnosti boli vyvinuté aj nové typy NiMH akumulátorov s výrazne nižším samovybíjaním, nedosahujú však z hľadiska samovybíjania RAM akumulátory. Ich cena je vyššia a nedosahujú zatiaľ také kapacity ako klasické NiMH akumulátory. Porovnanie vonkajšieho prevedenia NiCd, NiMH a RAM akumulátorov veľkosti R3 až R20 je znázornené na obr.1.



Obr.1: Porovnanie rôznych veľkostí akumulátorov – zľava: 1. AAA-300mAh NiCd, 2. AAA-1100mAh NiMH, 3. AA-700mAh NiCd, 4. AA-2100mAh NiMH, 5. AA-1600mAh RAM, 6. C-1800mAh NiCd, 7. D-4000mAh NiMH

Z hľadiska komerčne dosiahnuteľnej kapacity akumulátorov sú pri NiMH akumulátoroch veľkosti R6 (ekvivalent AA tzv. tužkový článok) bežne dodávané akumulátory s kapacitou do 2700 mAh, kapacity mikrotužkových akumulátorov sú bežné do 1100 mAh. Z hľadiska rozmerov sú články veľkosti C v nůdzi nahraditeľné veľkosťou AA, nakoľko ich dĺžka je zhodná.

Pri prevádzkovaní zariadení z akumulátorov sa postupuje podobne ako pri používaní primárnych článkov. Vybité akumulátory je potrebné zo zariadenia vybrať a nabiť v externej nabíjačke. Počas nabíjania je nutné zariadenie napájať z náhradnej sady článkov.

Riešenie s možnosťou kombinovaného napájania zariadení z primárnych článkov alebo akumulátorov, je výhodné pre výrobcu aj užívateľa. Výrobca šetrí náklady za nabíjačku a akumulátory, čo sa pozitívne prejaví v cene zariadenia a tým jeho predajnosti. V návode zariadenia je obvykle len upozornenie na vhodnosť používať primárne články s vyššou zaťažiteľnosťou a možnosť používať akumulátory. Ako príklad môžeme uviesť niektoré digitálne fotoaparáty alebo externé fotografické blesky pre amatérske použitie. Príklady základných vlastností akumulátorov sú porovnané v tab. 1.

Pre užívateľa je zakúpenie sady akumulátorových článkov menej nákladné a pri pravidelnej prevádzke sú prevádzkové náklady neporovnateľne nižšie ako pri napájaní z primárnych článkov. Cena nabíjačky nie je zásadným problémom, pretože nabíjačku je obvykle možné používať pre niekoľko veľkostí akumulátorov a pre rôzne zariadenia. Z hľadiska typu nabíjačky je situácia pomerne jednoduchá pokiaľ užívateľ potrebuje nabíjať NiCd a NiMH akumulátory.

	NiCd	NiMH	Alkalický akumulátor RAM
Energetická hustota (Wh/kg)	45 - 80	60 - 120	cca 80
Vnútorý odpor (mΩ)	15 - 35	35 - 50	35 - 330
Životnosť (počet cyklov)	1500	300-800	50 (pri kapacite 50%)
Čas nabitia pri rýchlonabíjaní (h)	1	2 - 4	2 - 3
Odolnosť voči prebíjaniu	stredná	nízka	stredná
Pamäťový efekt	áno	pokles napätia	nie
Samovybíjanie (20°C) (% / mesiac)	20	30	0,2 až 0,3
Nominálne napätie (V)	1,25	1,25	1,5
Nabíjací prúd: maximálny optimálny	20C 1C	5C 0,5C alebo menej	0,5C <0,2C
Nabíjacie napätie (V)	1,45	1,45	1,65
Minimálne vybíjacie napätie (V)	0,9 – 1	0,9 – 1	1
Pracovná teplota (°C)	- 40 až 60	- 20 až 60	0 až 60
Komerčne používaný od roku	1950	1990	1992
Toxicita	značná, ohrozuje životné prostredie	relatívne nízka	nízka

Tab. 1: Porovnanie vlastností rôznych druhov akumulátorov

Obvykle pre nabíjanie NiCd a NiMH je odporúčaný rovnaký typ nabíjačky napriek tomu, že krivka napätia pri nabíjaní NiCd akumulátora dosahuje maximálnu hodnotu 1,6V a pri NiMH akumulátoroch je krivka plochšia, maximum dosahuje 1,55 V (pri impulznom nabíjaní prúdom rovným veľkosti kapacity akumulátora).

Pre nabíjanie RAM akumulátorov sú však požiadavky na nabíjanie výrazne odlišné a preto je nutné používať špeciálnu nabíjačku, nabíjanie RAM akumulátorov v nabíjačke pre NiCd alebo NiMH akumulátory by viedlo k ich zničeniu. Zvláštnym prípadom sú niektoré inteligentné nabíjačky schopné rozpoznať typ akumulátora a prispôsobiť mu nabíjací režim. Ako príklad je možné uviesť ultra-rýchlu inteligentnú nabíjačku ACCUMANAGER 20, ktorá je schopná rozpoznať typ akumulátora a súčasne nabíjať rôzne typy akumulátorov s rôznymi kapacitami. Nabíjačka je riadená dvomi mikroprocesormi, obsahuje viaceré ochranné funkcie, jej cena je však 4 až 5 násobne vyššia s porovnateľnou nabíjačkou NiCd a NiMH akumulátorov.

Niekedy môže byť problémom získanie nabíjačky pokiaľ pre zariadenie potrebujeme nabíjať viac ako 4 články, pretože univerzálne nabíjačky sú spravidla navrhnuté pre nabíjanie maximálne 4 kusov článkov rovnakého typu. Niektoré nabíjačky umožňujú nabíjať len párny počet článkov, čím nastáva problém pri nabíjaní akumulátorov pre zariadenia používajúce 1 alebo 3 články (napr. MP3 prehrávače, LED svietidlá).

1.2 Zariadenia napájané špeciálnymi akumulátorovými blokmi

Druhú kategóriu zariadení napájaných z akumulátorov tvoria prístroje napájané špeciálnymi akumulátormi. V tejto kategórii zariadení napájanie z primárnych chemických článkov nie je možné. Akumulátory sú zapuzdrené podľa typu zariadenia tak, aby umožňovali optimalizovať jeho rozmery a výslednú hmotnosť. Pre napájanie moderných elektronických zariadení sú často používané lítium-iónové akumulátory vyznačujúce sa priaznivým pomerom výkonu a objemu akumulátora. Používajú sa však aj NiCd a NiMH akumulátory. Typickým príkladom spotrebičov používajúcich lítium-iónové akumulátory môžu byť napríklad mobilné telefóny, digitálne fotoaparáty strednej a vyššej triedy, kamery, prenosné počítače, ale aj akumulátory pre elektrické náradie v profesionálnej oblasti. Kým v oblasti akumulátorov na báze niklu je situácia z hľadiska napätia jednoznačná, u lítiových akumulátorov podľa použitých prísadových prvkov (Co, Mn, Co, Ni, fosforečnany) sa napätie pohybuje v rozmedzí 3,2 až 3,8 V na článok. Z hľadiska kompatibility s akumulátorovými blokmi zloženými z NiCd alebo NiMH článkov sú za perspektívne považované lítium-iónové články s napätím 3,6 V. To kategórie článkov s takým napätím patria lítium-iónové články využívajúce kobalt. Energetická hustota týchto článkov sa pohybuje v oblasti 110 až 190 Wh/kg, nabíjací a vybíjací prúd je

limitovaný hodnotou 1C, teda prúdom číselne rovným kapacite akumulátora. Typickými akumulátormi v tejto kategórii sú akumulátory pre mobilné telefóny, fotoaparáty, prenosné počítače.

Príkladom porovnania prevádzkových vlastností rôznych typov akumulátorov porovnateľnej kapacity (cca 500 mAh) pre mobilné telefóny môžu byť údaje v tab. 2. Okrem vnútorného odporu článkov sú udané časy prevádzky akumulátorov pri impulznom teste vybíjania, ktorý sa podobá činnosti akumulátora v telefóne. Z testu je zrejmé, že pri veľkých hodnotách vybíjajúcich prúdov sa nízky vnútorný odpor NiCd akumulátora pozitívne prejavuje aj na prevádzkovej dobe zariadenia. Ak zohľadníme skutočnosť, že NiCd akumulátor má kapacitu o 10% vyššiu ako porovnávané akumulátory môžeme konštatovať, že NiMH akumulátor dosiahol pri cyklickom vybíjaní prúdmi 2C približne 67% a Li-ion akumulátor 73% prevádzkovej doby NiCd akumulátora.

Typ akumulátora	C [mAh]	Vnútorný odpor [mΩ]	Impulzné vybíjanie prúdmi	
			1C Doba vybíjania [min]	2C Doba vybíjania [min]
NiCd	550	155	146	115
NiMH	500	778	129	69
Li-ion	500	320	108	76

Tab. 2: Porovnanie vlastností akumulátorov pre mobilné telefóny

Lítium-iónové akumulátory využívajúce v štruktúre mangán sa vyznačujú o niečo vyšším napätím 3,7 až 3,8V na článok a schopnosťou pracovať s výrazne vyššími dovolenými vybíjacími a nabíjacími prúdmi (10C trvalé vybíjanie a až 40C impulzne). Sú určené pre výkonové aplikácie a použitie v prenosných medicínskych zariadeniach.

K zariadeniam pracujúcim s väčšími akumulátormi patrí aj prenosné elektrické náradie napájané z akumulátorov. Z hľadiska výkonového namáhania a pracovného zaťaženia rozlišujeme kategóriu pre domáce a profesionálne použitie. Snáď najrozšírenejšiu skupinu v oblasti akumulátorového náradia predstavujú vŕtačky. Na domácom trhu sa objavuje veľký počet výrobkov málo známych výrobcov pre domáce použitie, ale aj svetovo známych výrobcov s výrobkami určenými aj pre profesionálnu oblasť. Pre vytvorenie určitej predstavy o používaných akumulátoroch sú v tabuľke 3 zachytené niektoré referenčné príklady vŕtačiek. Vo všeobecnosti možno povedať, že rozsah napätí akumulátorov používaných v akumulátorových vŕtačkách sa pohybuje v rozmedzí 7,2 až 24 V, elektrické skrutkovače pre menšie zaťaženie používajú aj akumulátory s napätím od 2,4 V. Príklad prevedenia akumulátorových blokov pre vŕtačky je na obr. 2. Vľavo je staršie prevedenie bloku 7,2 V s demontovanými akumulátormi, vpravo v súčasnosti obvyklé mechanické prevedenie, s napätím 9,6 V.

Výrobca	Typ vŕtačky	Maximálne otáčky [min ⁻¹]	Napätie akumulátora [V]	Kapacita akumulátora [Ah]	Nabíjací čas akumulátora [h]
Black&Decker	HP96KD	700	9,6	1,2	3
	HP12KD	700	12	1,2	3
	CD18CA	850	18	1,2	3
Bosch	PSR 12	700	12	1,2	3
	PSR 14,4	700	14,4	1,2	3
	PSR 18	700	18	1,2	3
Metabo	BSZ 12	400/1350	12	2	1
	BSZ 14,4	400/1400	14,4	2	1
	BSP 18	40/1400	18	2,4	1
DeWalt	DC750KA	300/1100	9,6	1,3	1
	DC728KA	0-400/1400	14,4	1,3	1
	DC759KA	0-400/1400	18	2	1
Narex	ASV12E	0-400/1350	12	1,5	1
	ASV14E	0-400/1500	14,4	1,5	1
Ryobi	CCD 1201	0-600	12	1,3	1
	CMD 1442	0-350/1250	14,4	2	1
	CMI 1802	0-390/1350	18	1,7	1

Tab.3: Príklady vlastností akumulátorových vŕtačiek a ich akumulátorov



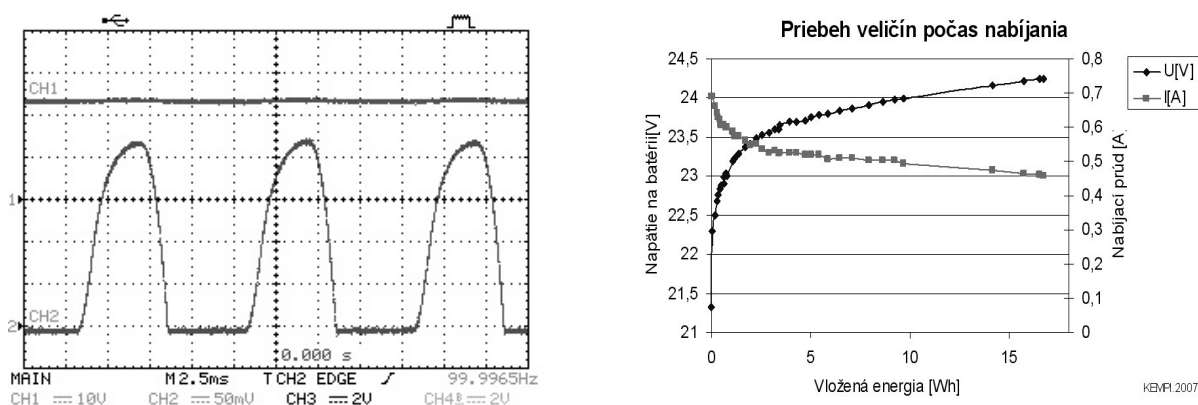
Obr.2: Usporiadanie akumulátorových blokov vŕtačiek - vľavo starší 7,2 V, vpravo 9.6 V

2. Vlastnosti nabíjačiek akumulátorov

Z hľadiska typu nabíjačky podľa spôsobu nabíjania akumulátorov môžeme definovať dve hlavné skupiny nabíjačiek, konvenčné nabíjačky bez monitorovania stavu akumulátora a nabíjačky sledujúce stav akumulátora počas nabíjania.

Konvenčné nabíjačky nabíjajú akumulátory približne konštantným prúdom. Pokiaľ je nabíjací prúd 10% menovitého vybíjacieho prúdu ($0,1C$) je predpísaný nabíjací čas akumulátorov cca 14 až 16 hodín. Moderné články taký nabíjací prúd znášajú bez ohrozenia, aj keď je článok prebýjaný dlhšiu dobu. Najlacnejšie prevedenia nabíjačiek nie sú vybavené žiadnym prostriedkom na ukončenie nabíjania a dobu nabíjania musí ukončiť užívateľ po uplynutí doby vyplývajúcej z kapacity používaných článkov. Takýto spôsob nabíjania je používaný pri lacných univerzálnych nabíjačkách, ktoré sú často vybavené len jednoduchým jednoimpulzovým usmerňovačom.

Podobne aj nabíjačky pre lacnejšie vŕtačky a náradie pre domáce použitie neobsahujú nijaký časovací obvod a výrobcom odporúčaná doba nabíjania býva 5 až 10 hodín. Oscilogram nabíjacieho prúdu a závislosť strednej hodnoty napätia a prúdu jednoduchej nabíjačky akumulátora pre vŕtačku je na obr. 3. Nabíjaný akumulátorový blok s menovitým napätím 20,4 V tvorí 17 NiCd článkov. Priebeh nabíjania je zobrazený ako závislosť zmeny napätia a prúdu akumulátora od dodanej energie do akumulátora.

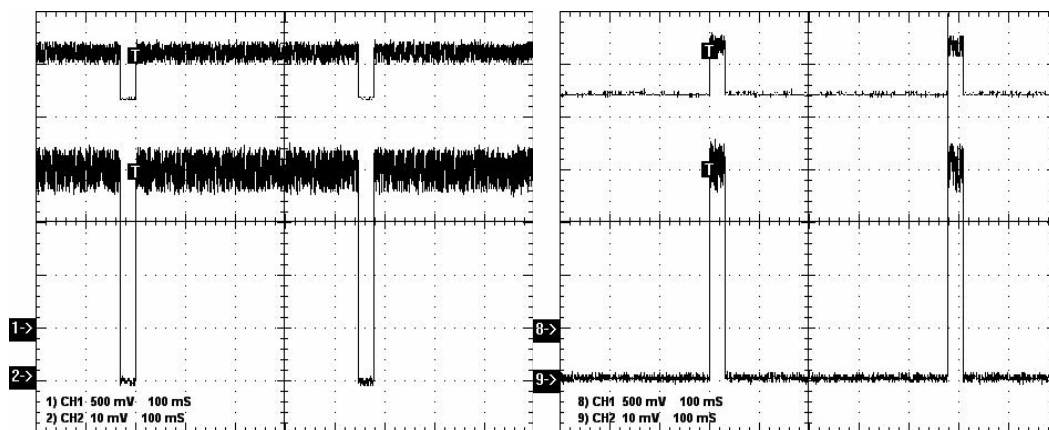


Obr.3: Nabíjací prúd NiCd akumulátora vŕtačky – vľavo oscilogram a priebeh nabíjania vpravo

Drahšie typy konvenčných nabíjačiek sú vybavené časovačom, ktorý po uplynutí doby nastavenej výrobcom prepína nabíjačku do udržiavacieho režimu. Taký typ nabíjačky je vhodný predovšetkým pre stanovenú kapacitu článkov, akumulátory s vyššou kapacitou sa počas cyklu časovača nenabijú úplne, akumulátory s menšou kapacitou sú prebýjané, čo skracuje ich životnosť.

Druhú kategóriu nabíjačiek tvoria impulzné nabíjačky. Impulzné nabíjačky boli vyvinuté s cieľom presnejšie kontrolovať nabíjací proces, umožniť nabíjanie väčšími prúdmi a skrátiť tak dobu nabíjania. Počas nabíjania je periodicky prerušované nabíjanie (napr. prerušenie 0,1s po 0,5 s nabíjania) a počas intervalu

nulového prúdu je merané dosiahnuté napätie článku. Za príznak nabitia článku je považovaný stav keď namerané hodnoty napätia prestanú narastať, alebo je zaregistrovaný pokles napätia, prípadne zmena druhej derivácie napätia. Inou, alebo doplnkovou informáciou môže byť sledovanie teploty akumulátora. Použitie niektorého z uvedených príznakov signalizuje, že nabíjanie možno ukončiť, pretože dlhšie nabíjanie vedie k poškodzovaniu akumulátora a dodaná energia z nabíjačky sa v akumulátore neúčinne mení len na teplo. Po dosiahnutí nabitého stavu sa pomer nabíjacieho a nulového intervalu obráti a nabíjačka tým zotrúva v udržiavacom režime. Typické oscilogramy impulznej nabíjačky s detekciou $-\Delta U$ pre nabíjací a udržiavací režim sú na obr.4.



Obr.4: Nabíjací režim impulznej nabíjačky – vľavo nabíjanie, vpravo udržiavací režim

Univerzálne nabíjačky pre nabíjanie akumulátorov rozmerovo kompatibilných s primárnymi článkami sú obvykle riešené pre nabíjanie rozmerovo najrozšírejších článkov veľkosti AAA, AA, alebo všetkých bežne používaných veľkostí vrátane blokov kompatibilných s primárnymi batériami s napätím 9V. Na obr. 5 vľavo je prevedenie konvenčnej nabíjačky s časovačom pre akumulátory prevedenia mikrožukový a tužkový článok, uprostred pre rovnaké veľkosti článkov nabíjačka s detekciou ΔU s možnosťou napájania pomocou adaptéru zo siete 230 V, alebo automobilovej zásuvky 12 V pre zapaľovač. Zaujímavosťou tohto riešenia nabíjačky je možnosť konzervačného dobíjania druhej sady akumulátorov v samostatnom boxe. Vpravo je zobrazená univerzálna nabíjačka pre všetky veľkosti akumulátorov s detekciou ΔU .



Obr.5: Porovnanie mechanického prevedenia univerzálnych nabíjačiek

Z dôvodov zníženia hmotnosti a zvýšenia účinnosti sú pri moderných riešeniach zdrojov nabíjačiek používané spínané zdroje namiesto konvenčných transformátorov s usmerňovačom. Príklad porovnania veľkostí moderného a konvenčného zdroja pre mobilné telefóny je na obr.6. Hoci výstupný prúd moderne riešeného zdroja nabíjačky je o 40% vyšší je jej hmotnosť cca 28g v porovnaní s hmotnosťou cca 140g konvenčného prevedenia (bez hmotnosti pripojovacích vodičov). Významná je aj vyššia prevádzková účinnosť. Vypnutie nabíjačky po dobíí akumulátora je v prevádzke ľahko overiteľné tým, že teplota zdroja poklesne prakticky na teplotu okolia, kým konvenčné zapojenie sa ohrieva vplyvom strát v jadre transformátora.



Obr.6: Nabíjačky mobilných telefónov – vľavo so spínaným zdrojom 5V/420mA, vpravo konvenčná 5V/300mA

Na rozdiel od nabíjania akumulátorov v mobilných telefónoch sú nabíjačky akumulátorov pre elektrické vŕtačky riešené ako samostatné jednotky ktoré umožňujú znížiť hmotnosť vŕtačky a v prípade používania dvojice akumulátorov umožniť prácu aj počas nabíjania. Pri malých elektrických skrutkovačoch sa však výmena akumulátora pri prevádzke nepoužíva a náradie sa pri nabíjaní pripája priamo. Porovnanie riešenia zdroja 3 V/300mA pre ľahký elektrický skrutkovač s akumulátorom 2,4 V a zdroja 12 V/450mA s nabíjacou jednotkou pre vŕtačku s akumulátorom 9,6 V je na obr. 7.



Obr.7: Riešenia zdrojov pre nabíjanie elektrického náradia – vľavo skrutkovača, vpravo vŕtačky

3. Záver

Používanie akumulátorov v malých zariadeniach umožňuje využívať ich vlastnosti bez závislosti na napájacej sieti alebo finančne a ekologicky nevýhodného napájania z primárnych chemických článkov. Efektívnosť používania prenosných zariadení závisí nielen od zlepšujúcich sa vlastností akumulátorov, ale aj používaných nabíjačiek, ktorých vlastností v značnej miere závisia od použitého meničového a riadiaceho systému.

Literatúra

- [1] Buchman, I.: Battery University [online]. Aktualizované v auguste 2006. Dostupné na Internete: www.batteryuniversity.com
- [2] S.O.S. electronic: Elektronické súčiastky, obchodný katalóg 2007/2008. Dostupné na Internete: www.soselectronic.com
- [3] Benča, A.: Meniče pre malé solárne nabíjačky, DP 2007, KEMPI FEI TU Košice

NIEKTORÉ SKÚSENOSTI Z VÝUČBY ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY NA FVT TUKE

Ján PITEĽ

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky, ul. Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovenská republika, email: jan.pitel@tuke.sk

Abstrakt: V príspevku sú popísané niektoré skúsenosti autora s výučbou elektrotechniky a elektroniky na Fakulte výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove (FVT TUKE). V dobiehajúcej koncepcii päťročného inžinierskeho štúdia bola výučba elektrotechniky a elektroniky realizovaná v dvoch predmetoch, a to v predmete Elektrotechnika a predmete Elektronika a mikroelektronika. V súvislosti s prechodom na trojstupňové štúdium došlo na fakulte výrobných technológií k zlúčeniu týchto dvoch predmetov do jedného predmetu Elektrotechnika a elektronika, čo vyžaduje nové prístupy a technológie výučby, ako napr. tzv. Blended learning (kombinované a zmiešané štúdium). Zmiešaním a integráciou prezenčných učebných metód a foriem s novými koncepciami učenia (napr. s využitím multimédií, hypertextových e-návodov a pod.) je možné dosiahnuť vyššiu efektívnosť vzdelávania pri menších časových dotáciách predmetov.

KLúčové slová: elektrotechnika, elektronika, trojstupňové štúdium.

1. Úvod

Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove (FVT TUKE) patrí medzi technologicky a výrobkovo orientované fakulty v Slovenskej republike. Je jedinou fakultou z deviatich fakúlt Technickej univerzity v Košiciach sídliacou mimo sídla univerzity a jedinou technicky orientovanou fakultou so sídlom na území Prešovského kraja. Na fakulte je možné študovať v akreditovaných študijných programoch študijného odboru Výrobné technológie vo všetkých troch stupňoch (bakalárske, inžinierske, doktorandské) a v oboch formách (denné, externé) štúdia. Výučbu elektrotechniky a elektroniky na fakulte garantuje a zabezpečuje Katedra matematiky, informatiky a kybernetiky. Je to jedna zo šiestich katedrií fakulty a jej hlavným poslaním je garantovať a zabezpečovať výučbu predmetov prírodovedného základu, informatiky, merania, automatického riadenia a mechatroniky vo všetkých študijných programoch fakulty.

2. Výučba elektrotechniky a elektroniky v dobiehajúcej koncepcii štúdia

V dobiehajúcej koncepcii päťročného inžinierskeho štúdia v študijnom odbore Výrobné inžinierstvo je na FVT TUKE výučba elektrotechniky a elektroniky realizovaná v 3. ročníku štúdia, a to v predmete Elektrotechnika a predmete Elektronika a mikroelektronika.

Predmet Elektrotechnika vyučovaný v zimnom semestri 3. ročníka je povinným predmetom končiacim skúškou s počtom kreditov 4 a rozsahom výučby 2 hod prednášky/týždeň a 2 hod cvičenia/týždeň. Predmet má na cvičeniach teoreticko-praktický charakter. Cieľom predmetu je, aby študenti pochopili a získali vedomosti o základných zákonoch elektrotechniky a ich aplikácii v elektrických prvkoch, obvodoch a zariadeniach. Na cca dvoch tretinách cvičení je riešením príkladov precvičované odprednášané učivo z týchto tematických oblastí:

- elektrostatické pole (silové pôsobenie elektrického poľa, kapacita, kondenzátory),
- jednosmerný elektrický prúd (Ohmov zákon, odpor vodiča, rezistory, výkon a práca jednosmerného elektrického prúdu, Kirchhoffove zákony),
- elektromagnetizmus (silové pôsobenie magnetického poľa, magnetické obvody, elektromagnetická indukcia, indukčnosť),
- striedavý elektrický prúd (hodnoty striedavých veličín, jednoduché obvody so striedavým prúdom, výkon a práca striedavého elektrického prúdu).

Na laboratórnych cvičeniach, ktoré tvoria cca jednu tretinu cvičení z celkového počtu cvičení, si študenti overujú získané teoretické vedomosti na reálnych zapojeniach a meraniach elektrických prvkov a zariadení. Na týchto meraniach si študenti prakticky vyskúšajú meranie jednotlivých elektrických veličín rôznymi typmi meracích prístrojov. Výsledkom cvičení sú protokoly z jednotlivých meraní, pričom študent je povinný absolvovať a odovzdať protokoly z minimálne štyroch meraní, ktoré sú napr. na tému:

- meranie V-A charakteristiky rezistora,
- meranie charakteristiky potenciometra,

- meranie na odporovom deliči napätia,
- meranie charakteristiky nastaviteľného kondenzátora,
- paralelný RLC obvod,
- meranie na jednofázovom transformátore.

Predmet Elektronika a mikroelektronika vyučovaný v letnom semestri 3. ročníka je povinne voliteľným predmetom končiacim klasifikovaným zápočtom s počtom kreditov 4 a rozsahom výučby 2 hod prednášky/týždeň a 2 hod cvičenia/týždeň. Predmet má na cvičeniach praktický charakter a cieľom je, aby sa študenti oboznámili s jednotlivými elektronickými súčiastkami a prvkami a aby si ich prakticky vyskúšali v jednoduchých elektronických zapojeniach, ako napr.:

- meranie V-A charakteristiky diódy,
- meranie výstupných charakteristík tranzistora,
- tranzistor ako zosilňovač,
- jednocestný a dvojcestný neriadený usmerňovač,
- riadený usmerňovač na báze tyristora,
- stabilizátor napätia,
- operačný zosilňovač ako invertujúci a neinvertujúci zosilňovač, sumátor, integrátor,
- preklápacie obvody,
- počítačadla.

Elektrotechnika aj elektronika všeobecne vzhľadom na svoj obrovský rozsah, vysoký stupeň abstraktného myslenia a náročný matematický aparát nepatrí na fakulte výrobných technológií medzi najobľúbenejšie disciplíny. Snaha vyučujúcich motivovať študentov k zvýšenému záujmu o tieto disciplíny viedla k zostaveniu takej osnovy predmetu Elektronika a mikroelektronika, ktorá umožňuje, aby si študenti v rámci každého cvičenia pomocou praktických zapojení overili odprednášané učivo. V úvode cvičenia sa preberú teoretické základy súvisiace s témou cvičenia. Potom študenti dostanú potrebné súčiastky, katalógy, meracie prístroje, zapoja meraný obvod podľa schémy a overia jeho činnosť. Študenti pracujú v malých skupinkách a výsledkom ich práce je kompletne zapojenie, ktoré vyučujúci skontroluje a povolí pripojenie napájacieho napätia. Používajú sa pritom rozoberateľné stavebnice, takže študent je nútený nebyť pasívnym, neprípája iba meracie prístroje k hotovému obvodu, ale aktívne pristupuje k cvičeniu od zapojenia schémy až po vyhodnotenie cvičenia. Tento spôsob výučby sa osvedčil, niekoľkoročné skúsenosti autora ukazujú, že takto vedené cvičenie je pre študentov zaujímavejšie a ľahšie pochopia náročnú problematiku. Takéto praktické cvičenia však kladú značné časové nároky na vyučujúceho v súvislosti s ich prípravou. Nutná je pomoc technického pracovníka, ktorý by pomohol nachystať všetko potrebné na cvičenie, udržiaval by prístroje v dobrom technickom stave, kontroloval by funkčnosť súčiastok a zariadení.

3. Výučba elektrotechniky a elektroniky v podmienkach trojstupňového štúdia

S prechodom na trojstupňové vysokoškolské štúdium sa v školskej praxi objavujú nové fenomény, ktoré ovplyvňujú celý proces vysokoškolskej prípravy budúcich bakalárov a inžinierov. Jedným z nich je aj klesajúca vedomostná úroveň. Pokles vedomostnej úrovne z prírodovedných predmetov všeobecne zaznamenaný na všetkých typoch univerzít je pravdepodobne priamym dôsledkom poklesu vedomostnej úrovne na predošlých stupňoch našej vzdelávacej sústavy. Prejavuje sa to aj vo výučbe predmetov z oblasti elektrotechniky a elektroniky, a to aj v dôsledku zníženia počtu vyučovacích hodín matematiky a fyziky v bakalárskom stupni štúdia.

V súvislosti s prechodom na trojstupňové štúdium došlo na FVT TUKE k zlúčeniu dvoch predmetov zo starej koncepcie (Elektrotechnika, Elektronika a mikroelektronika) do jedného predmetu Elektrotechnika a elektronika (povinný predmet ukončený skúškou s počtom kreditov 5), ktorý sa vyučuje v letnom semestri 2. ročníka bakalárskeho štúdia. V tomto semestri študenti absolujú v rámci vyučovania aj dvojtýždňovú prax, čo ešte viac znižuje časovú dotáciu predmetu, ktorá je 2 hod prednášky/týždeň a 2 hod cvičenia/týždeň. Týmto faktormi sa značne obmedzil časový priestor na odprednášanie aj precvičenie učiva, čo značne skomplikovalo situáciu pri tvorbe osnovy predmetu najmä pre cvičenia. Bolo nutné urobiť kompromis medzi rozsahom a pomerom učiva z elektrotechniky a elektroniky, pričom na základe výsledkov diskusií sa v prvom priblížení stanovila približne táto učebná osnova pre teoretické a laboratórne cvičenia:

- Bezpečnosť pri práci na elektrických zariadeniach. Elektrostatika – náboj, elektrický potenciál, kapacita, zapojovanie kondenzátorov.
- Jednosmerný prúd – elektrický odpor, Ohmov zákon, zapojovanie odporov, zdroje jednosmerného prúdu, výkon jednosmerného prúdu.
- Obvody jednosmerného prúdu – Kirchhoffove zákony.
- Laboratórne cvičenie – praktické meranie napätia, prúdu a elektrického odporu (V-A charakteristika rezistora, charakteristika potenciometra, delič napätia).
- Elektromagnetizmus - silové pôsobenie magnetického poľa, magnetické obvody, elektromagnetická indukcia, indukčnosť.
- Striedavý prúd – reaktancia, impedancia, výkon striedavého prúdu, účinník.

- Jednoduché obvody striedavého prúdu.
- Laboratórne cvičenie – praktické meranie striedavého výkonu (meranie na jednofázovom transformátore).
- Elektronické súčiastky – praktické ukážky, parametre.
- Laboratórne cvičenie – praktické meranie na polovodičových súčiastkach (V-A charakteristika diódy, výstupné charakteristiky tranzistora, usmerňovače a stabilizátory napätia).

Z uvedenej osnovy je vidieť, že ťažisko výučby na cvičeniach je založené na tematických úlohách zo všeobecnej elektrotechniky, pričom úlohy z oblasti elektroniky sú len doplnkom učiva. Súvisí to aj cieľom predmetu podľa informačného listu, ktorým je štúdium základných poznatkov z elektrotechniky a elektroniky od teórie elektrostatických javov cez teóriu jednosmerných a striedavých obvodov až po teóriu elektrických strojov a spoznanie základných princípov a zapojení elektroniky. V dnešnej dobe mohutného rozvoja elektroniky a mikroelektroniky a jej prieniku prakticky do všetkých oborov ľudskej činnosti by však bolo potrebné na fakulte technického zamerania venovať tejto disciplíne väčšiu pozornosť buď rozšírením počtu hodín v existujúcom predmete, alebo novým predmetom v inžinierskom stupni štúdia najmä v technologicky zameraných študijných programoch.

Situáciu komplikuje aj fakt, že predmet Elektrotechnika a elektronika sa na fakulte vyučuje s rovnakou osnovou v rôznych študijných programoch bakalárskeho stupňa štúdia, v ktorých je rôzna úroveň vedomostí študentov z predmetov prírodovedného základu daná najmä typom strednej školy, ktorú študenti absolvovali.

Okrem iného aj z týchto dôvodov je nutné pristúpiť k novým formám výučby aj v oblasti elektrotechniky a elektroniky na technologických fakultách. V tradičnom pohľade na vzdelávanie je silno zakotvené, že informácia je odovzdávaná v rámci priameho ľudského kontaktu medzi osobou vyučujúcou a vyučovanou. Vzhľadom na nedostatok času v rámci prednášok a cvičení je však nutné vo väčšej miere využívať samoštúdium študentov. Vyžaduje to prípravu nových samoinštrukčných študijných materiálov, ktoré by mali byť schopné nahradiť učiteľa a jeho organizovanie a riadenia učebného procesu študentov. Pod pojmom samostatná práca študentov treba rozumieť ich teoretickú, alebo praktickú činnosť, ktorá je relatívne nezávislá na priamom riadení učiteľom, ktorá je prevažne aktivizovaná vnútornými činiteľmi a smeruje na základe vlastného úsilia k cieľom. Avšak jednou z najdôležitejších podmienok úspešnej riadenej samostatnej práce študentov je uvedomelá aktivita študentov a ich silná motivácia vzdelávať sa. Študent musí urobiť sám rozhodnutie, sám musí pre získanie vedomostí vyvinúť určité úsilie. Táto forma vzdelávania podporuje aj sebadisciplínu, pracovitosť, spôsobilosť organizovať si čas, spôsobilosť organizovať si poznatky vlastným štúdiom a pod.

4. Záver

V dobe prudkého rozvoja informačno-komunikačných technológií a ich implementácie do rôznych sfér nášho života je nevyhnutné aj v oblasti výučby elektrotechniky a elektroniky na technologických fakultách, najmä v súvislosti s prechodom na trojstupňové štúdium, implementovať nové prístupy a technológie, ako napr. tzv. Blended learning (kombinované a zmiešané štúdium). Zmiešaním a integráciou prezenčných učebných metód a foriem s novými koncepciami učenia (napr. s využitím multimédií, hypertextových e-návodov a pod.) je možné dosiahnuť vyššiu efektívnosť vzdelávania pri menších časových dotáciách predmetov. Zohľadnením rôznych štýlov učenia sa je možné aj v trojstupňovom vysokoškolskom štúdiu vychovať nielen logicky rozmýšľajúceho inžiniera, ale i bakalára.

Príspevok bol vypracovaný s grantovou podporou KEGA 3/3156/05 a VEGA 1/4077/07.

Literatúra

- [1] Balara, M.: Elektronika a mikroelektronika. FVT TU v Košiciach, Prešov, 2005.
- [2] Balara, M., Motaj, M.: Elektrotechnika. FVT TU v Košiciach, Prešov, 2004.
- [3] Balara, M., Piteľ, J.: Elektrotechnika a elektronika. FVT TU v Košiciach, Prešov, 2006.
- [4] Mihalíková, J., Ferencová, J., Líška, O.: Zvýšenie úrovne vzdelávania v 3. stupni vysokoškolského štúdia. Acta Mechanica Slovaca. roč. 11, 2007, č. 1-a, str. 277-280.
- [5] Mihalíková, J., Líška, O.: Využitie virtuálnej reality vo vzdelávacom procese. Transfer inovácií. roč. 8, 2007, č. 9, str. 83-85.
- [6] Perečinská, V.: Skúsenosti z pedagogického procesu v zameraní Automatizačná technika. Acta Mechanica Slovaca. roč. 6, 2002, č. 2, str. 109-112.
- [7] Ožvoldová, M. a kol.: e – Fyzika. [online]. [cit. 2007-08-10] <http://kf-lin.elf.stuba.sk/~ballo/STU_online/>
- [8] Stachová, D., Stacho, M.: Dôsledky reforiem základných a stredných škôl na výučbu geometrie na vysokých školách. In: XXV. mezinárodní kolokvium o řízení vzdělávacího procesu, 17.5.2007, Brno, Česká republika.
- [9] Vragaš, S., Kostelník, J.: Použitie hypertextových e-návodov vo vyučovaní elektrotechniky na MTF STU. In: SCHOLA 2006 7. medzinárodná vedecká konferencia KIPP: Kvalita výchovy a vzdelávania, str. 450-454, 11.-12.5.2006, Bratislava, Slovensko.

INOVACE ELEKTROTECHNICKÉ LABORATOŘE

INOVATION LABORATORY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Čestmír SERAFÍN, ČR

Jiří KROPÁČ, ČR

Abstrakt

Příspěvek pojednává o realizaci projektu „Inovace laboratoře elektrotechniky“, který je řešen v rámci podpory Fondu rozvoje vysokých škol České republiky. Řešení projektu je organickou součástí inovace fakulty, která připravuje především učitele; svým obsahovým zaměřením tento projekt je zacílen na učitele technické a informační výchovy a směřuje do sféry výuky aplikační, praktické a experimentální části výuky elektrotechniky s přesahem do oborové didaktiky (1).

Bezprostředním podnětem pro realizaci projektu se stala úspěšná akreditace strukturovaného studijního programu učitelství technické a informační výchovy pro základní a střední školy (v podobě bakalářské a navazující magisterské formě) a z toho plynoucí zvýšené nároky na vybavení, nevhodnost dalšího využívání některých zastaralých zařízení laboratoře - tato situace vyžaduje jejich výměnu a doplnění o nová zařízení.

ÚVOD

Elektrotechnika, elektronika a zejména mikroelektronika patří k perspektivním technickým oborům, tvořící svorník mezi profilujícími obory přípravy učitelů technické a informační výchovy – technologie, materiály, strojírenství, elektrotechnika, výpočetní technika. Proto se tito studenti teoreticky i na základě laboratorní činnosti seznamují s principy a zákonitostmi elektrotechniky a elektroniky (počínaje základními elektrickými obvody, přes elektrické stroje, přístroje a pohony až k elektroenergetice, kybernetice a mechatronice, nevyjímaje oblast elektroniky).

Laboratorní výuka je na Pedagogické fakultě zaměřena prioritně na přípravu učitelů pro výuku obecně zaměřených technických předmětů. Jde zejména o učitele technické a informační výchovy, ale také na základě požadavků školské praxe, v menší míře i o učitele pro 1. stupeň ZŠ a v neposlední řadě i učitele v oboru Speciální pedagogika.

CÍLE REALIZOVANÉHO PROJEKTU

Významným cílem projektu bylo vytvoření podmínek pro zpřístupňování nových technologií v mezioborových souvislostech; jde o výuku elektronických obvodů pomocí počítače, sběr a zpracování dat z čidel, řízení procesů počítačem apod. Tomu má napomoci vybavení modulárního systému, který je uvažován jako součást nové výbavy pracovišť laboratoře včetně interface k PC s příslušnými řídicími a vyhodnocovacími programy pro měření a řízení měřících procesů.

Přínos k rozvoji lze spatřovat v těchto bodech:

- Projekt předpokládá vytvoření 8 unifikovaných pracovišť laboratoře (včetně řídicího pultu), které budou sloužit pro měření od základních elektrických veličin až po diagnostiku elektrických a elektronických obvodů.

- Vytvoření podmínek pro skupinovou i individuální práci se studenty s možností realizace mikrovyučování.
- Zvýší se bezpečnost práce, zkvalitní se bezpečnostní jištění pracovních pultů alepší se tak laboratorní práce studentů i možnosti učitele.
- Zvýší se motivace studentů, využívání mezioborových vztahů a přispěje se k lepšímu zvládnutí probíraného učiva elektroniky a elektrotechniky a zvýšení atraktivnosti studijního oboru.
- Podstatnou zvýší se úroveň diplomových prací a motivaci při jejich praktickém tematickém zaměření.
- Vytvoří se základní podmínky pro další vědeckou práci pedagogů i studentů v běžném i postgraduálním studiu.
- Nabízí se možnost realizace nových úloh v praktických cvičeních s využitím modulárního systému pro praktickou výuku studentů.

Inovaci technického zařízení elektrotechnické laboratoře se vytváří technické a materiální zabezpečení pro konání experimentální činnosti studentů s cílem zajistit jim názornou možnost chápání obsahu studia. Důraz je kladen na vybrané struktury poznatků z oblasti elektrotechniky pro budoucí praxi, tedy osvojení souboru praktických dovedností a návyků z oblasti laboratorní činnosti. K tomu jsou vymezeny tyto cíle:

- Výrazným zohledněním univerzálnosti systému vybavení laboratoře je umožnit, aby úlohy řešené v laboratoři byly jak charakteru obecně elektrotechnického (měření základních veličin a parametrů obvodu), tak elektronického (parametry polovodičových součástek a logických obvodů, realizace logických členů), tak také z oblasti základů automatizace a mechatronických systémů (řízení motorků, ovládání jednoduchých školních modelů manipulátorů apod.).
- Kromě základních úloh musí umožnit i lepší využití pracovišť pro bakalářské a diplomové práce a pro ověřování metodických postupů výzkumného charakteru pro doktorská studia.
- Využít moderního a kvalitního stavebnicového systému μ Lab, se kterým se budou absolventi setkávat ve své praxi na středních školách, zejména elektrotechnického charakteru. Studentům se tak nabízí moderní příprava a to i v oblastech, které dosud nemohly být realizovány (např. měření na trojfázových obvodech).
- Zohledňují se i mezioborové souvislosti moderní elektrotechniky, zejména ve vazbě na mechatroniku a materiálové inženýrství.

V návrhu byla jednotlivá pracoviště koncipovaná pro dva studenty při zajištění metodicky didaktického vedení výuky. Tato může být navíc doplněna výkladem z řídicího pultu vyučujícího, připojeného na dataprojektor (ten je již součástí vybavy laboratoře).

Projekt měl pomoci:

- inovovat pracoviště pro laboratorní výuku bezpečnými systémy laboratorních stolů, které jsou na úrovni současné doby,
- rozšíření variability měřených úloh,
- vybudování specializovaného pracoviště pro měření pohonů, neelektrických čidel a mechatronických systémů,
- uplatnit stavebnicový systém propojený s výpočetní technikou jak při měření úloh z oblasti logických členů, tak i z automatizace (přístroje a zařízení pro sběr, měření, záznam a zpracování snímaných neelektrických veličin a čidel, realizace akčních členů pro ovládání mechanických soustav a způsoby jejich řízení),
- umožnit zkoumat některé materiálové vlastnosti elektrotechnických materiálů.

SOUČASNÝ STAV LABORATOŘE

K základnímu vybavení laboratoře patří v současnosti měřicí pulty (obr. 1), které byly vyrobeny v 80. letech minulého století. Jejich zabezpečení proti úrazu elektrickým proudem odpovídá době jejich výroby a i když je z pohledu revizního technika dosud bezpečné, je podle nás nutné je nahradit novými, které odpovídají i současným požadavkům na moderní vzdělávání. Právě zhoršující se a již nepostačující technický stav přístrojového vybavení laboratorních stolů byl základním podnětem pro realizaci projektu.



Obr. 1 Původní vybavení laboratoře

ZPŮSOB REALIZACE

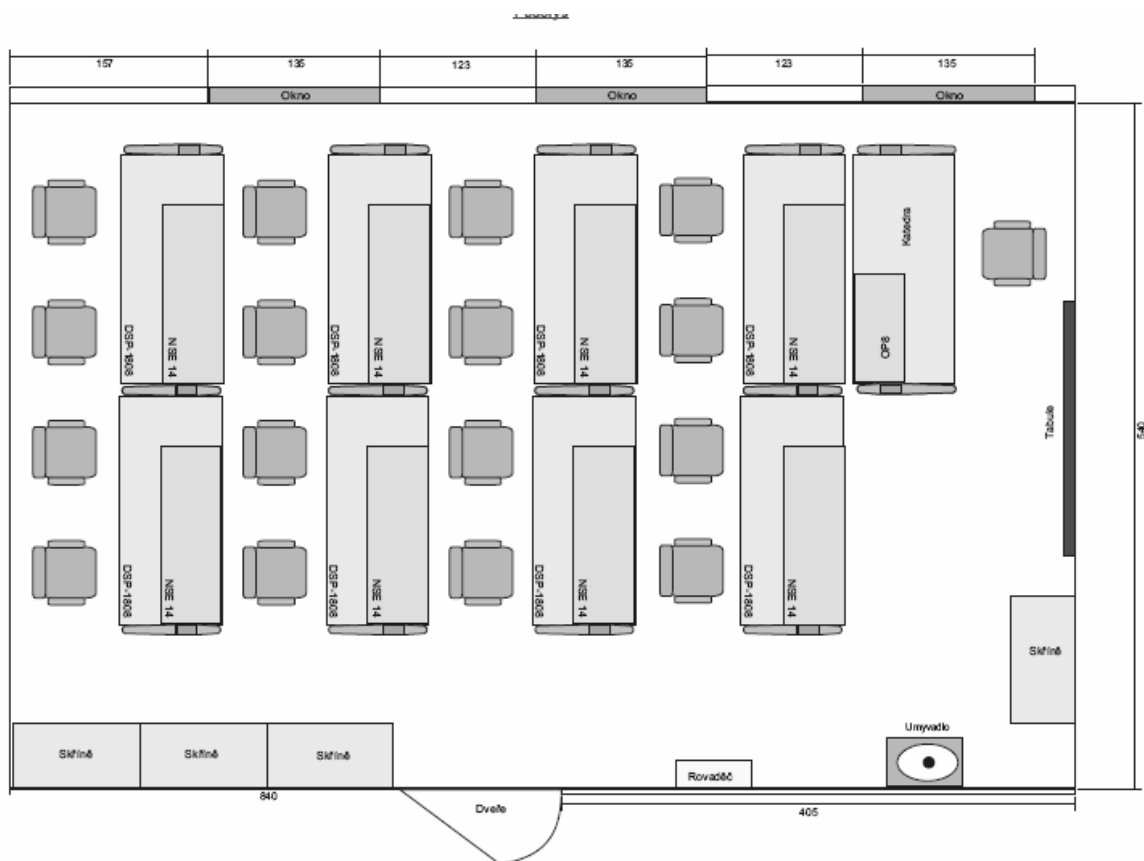
Realizace projektu je založena na požadavcích aktuální pedagogické praxe, pro kterou připravujeme naše absolventy. Současně je zohledněna i perspektiva dalšího rozvoje oboru.

Celkové dispoziční řešení pultů je uvedeno na obr. 2. Jejich rozmístění v laboratoři bude přibližně odpovídat současnému prostorovému řešení.

Modernizace laboratoře spočívala i ve vybudování jednotlivých měřicích pracovišť při názornosti zapojení jednotlivých obvodů a modulů a optimální využití přístrojů:

- Laboratorní stoly s přístrojovými nástavkami (9 stolů – fy DIAMETRAL (2)). Nábytková část těchto stolů je pořízena z prostředků fakulty, pouze přístrojové vybavení je součástí řešení projektu. Pro realizaci byla zvolena firma, která má dlouhodobé zkušenosti z výrobou takto atypizovaných dílů a je zárukou kvality a spolehlivosti.
- Počítače pro měření a řízení pokusů - budou pořízeny z prostředků fakulty a nejsou tedy součástí tohoto projektu, proto zde ani neuvádím jejich bližší specifikacei.

- μ LAB (5 pracovišť – fy RC (3)) - modulární výukový systém se skládá z jednotlivých vzájemně kompatibilních velmi kvalitně provedených modulů, které obsahují základní prvky (např. operační zesilovač, tranzistor, odporová a kapacitní dekáda, indukčnost, univerzální modul 74xxx a moduly regulace) a dále logickou sondu časovou základnu, funkční generátor. To vše je doplněno programovatelným DC zdrojem a Voltmetr. Pro připojení k počítači slouží ADDU - měřící jednotka s programem RC2000. Výhodou tohoto systému je vysoká spolehlivost a přesnost modulů, která je zajištěna kvalitními spojovacími kontakty. Rovněž je výhodou a systémem elektronických ochran proti nesprávnému zapojení. Výrobce garantuje vysokou přesnost a soulad teoretických výpočtů s experimentálními výsledky, která je dána výběrem kvalitních součástek. Tento systém je svým způsobem jedinečný v rámci ČR a navíc svou kvalitou předčí i obdobně řešené systémy zahraniční.



Obr. 2 Navrhované řešení technické dispozice laboratoře

Navržená technika spolu se stávajícím vybavením laboratoře se bude využívat zejména pro následující experimentální práci (4), (5):

- *Základních elektrotechnických zákonů* (Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony, děliče napětí, obvody s odporovou sítí), *obvodů s RLC prvky* (v obvodech SS a ST napětí), *nelineárních odporů* (závislých na teplotě a světle), *polovodičových prvků* (dioda jako usměrňovač, omezovač, tranzistor jako zesilovač, spínač).

- *Číslicová technika* - kombinační obvody (návrh a realizace kombinačního obvodu, dekodéru), sekvenční obvody (realizace čítače), mikroprocesorová technika (model procesorové jednotky).
- *Analogová technika* - operační zesilovač (invertující, neinvertující, rozdílový a součtový zesilovač, obvody pro zpracování čidel fyzikálních veličin...).
- *Počítačová technika* - PC interface, umožňující obousměrné propojení systémů s počítačem v modech: záznamu analogových nebo digitálních dat, generování dat pomocí počítače při řízení experimentu.
- *Automatizace a regulace (v rámci mechatroniky)*- základní prvky regulátoru PID a čidla fyzikálních veličin.

ZÁVĚR

Vybudování inovované výukové experimentální elektrotechnické laboratoře určené pro experimentální a praktickou část přípravy studentů, je v souladu s plánem rozvoje Univerzity Palackého i se základními požadavky evropské vzdělanosti. Problematika projektu je organickou součástí inovace fakulty připravující především učitele. U budoucích učitelů, jejichž profilace není přímo technická, realizovaná inovace přispívá ke zkvalitnění jejich pregraduální přípravy ve sféře technické gramotnosti a informační gramotnosti. V obou případech je posíleno vytváření specifických kompetencí pro realizaci Rámcových vzdělávacích programů.

LITERATURA

- (1) KROPÁČ, J. a kol. *Didaktika technických předmětů – vybrané kapitoly*. 1. vyd. Olomouc : VUP, 2004. ISBN 80-244-0848-1
- (2) Diametral spol. s r.o. – výrobce laboratorního nábytku, laboratorních stolů a technického nábytku VarioLab+. Praha, - [cit. 2007-05-10]. Dostupné z: <<http://www.diametral.cz/>>
- (3) RC společnost s r.o. - přístroje pro vědu a vzdělání. Výrobce Systému μ LAB. Praha, - [cit. 2007-05-10]. Dostupné z: <<http://www.rcdidactic.cz/cz/>>
- (4) SERAFÍN, Č. *Role elektrotechnických stavebnic v obecně technickém vzdělávání*. 1. vyd. Olomouc : VUP, 2005, 108 s. ISBN 80-244-1231-4
- (5) HAVELKA, M.; SERAFÍN, Č. *Konstrukční a elektrotechnické stavebnice ve výuce obecně technického předmětu*. 1. vyd. Olomouc : VUP, 2003, 172 s. ISBN 80-244-0692-6

LEKTOROVAL:

Kontaktná adresa:

Ing. Čestmír Serafín, Dr.

Katedra technické a informační výchovy, Pedagogická fakulta Univerzity Palackého

Žižkovo nám. 5, 771 40 Olomouc, ČR

E-mail: cestmir.serafin@upol.cz

Telefon: + 420 585 635 801

Doc. PaedDr. Jiří Kropáč, CSc.

Katedra technické a informační výchovy, Pedagogická fakulta Univerzity Palackého

Žižkovo nám. 5, 771 40 Olomouc, ČR

E-mail: jiri.kropac@upol.cz

Telefon: + 420 585 635 805

HUMAN REHABILITATION WITH ROBOTIC HELP

Stanislav BARTOŠ, Vladislav SINGULE

Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika
email: singule@fme.vutbr.cz, standabartos@yahoo.ca

Abstrakt: Tento příspěvek popisuje možnosti použití robotu k rehabilitaci pohybových ústrojí pacienta (zápěstí, kotníku) v domácím prostředí bez nutnosti přítomnosti lékaře. Náš výzkum je zaměřen na vývoj modelu rehabilitačního robotu, jeho pohonů a v budoucnu také senzorky pro analýzu pohybových schopností pacienta. Tento model bude řízen standardním PC přes rozhraní RS232 redukováným na USB. Malá část příspěvku je zaměřena na problematiku komunikace mezi PC a modelem.

Klíčová slova: rehabilitace, vývoj, řízení,

1. Představení

Vývoj nových robotických zařízení pro rehabilitaci je nutný. Stávající konvenční robotická zařízení je velmi obtížné přizpůsobit pro rehabilitaci pacientů, druhou částí problematiky je také nedostatečná bezpečnost pro přímé zdravotnické použití.

Robotické zařízení pro rehabilitaci by mělo pracovat ve dvou základních režimech:

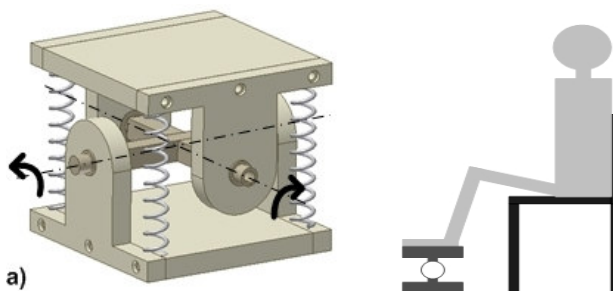
- Postupné natáčení plošiny a současně tenzometrické měření silového odporu, který vytváří pacientova končetina proti pohybu motorů pohybujících plošinou. Takto dojde k vymezení možností natočení pacientovy končetiny ve všech osách.
- Následně, budou počítačem určeny zvětšené úhly natáčení pacientovy končetiny podle předem určených parametrů a pomocí servomechanizmu bude pacientova končetina rozcvičována. Cílem bude dosažení standardních možností pohybu končetiny zdravého pacienta.

2. Analýza lidského pohybu v lékařské rehabilitaci

Výzkum je orientován na možnosti pohybu lidského těla při rehabilitaci. Nyní je řešena podpurná databáze možnosti pohybů a rehabilitace člověka. Dalším návrhem bude sběr a analýza těchto dat.

- Metody a typy rehabilitace
- Cvičení vybraných kloubů
- Postupné zvětšování zátěže
- Rozvrh (čas cvičení, perioda, délka jednotlivých cyklů)
- Vyhodnocení jednotlivých pohybů (v průběhu cvičení a po jeho skončení)
- Počítačová analýza, modelování, simulace a následné řízení zařízení.

3. Příklad návrhu a řízení zdravotnického rehabilitačního zařízení

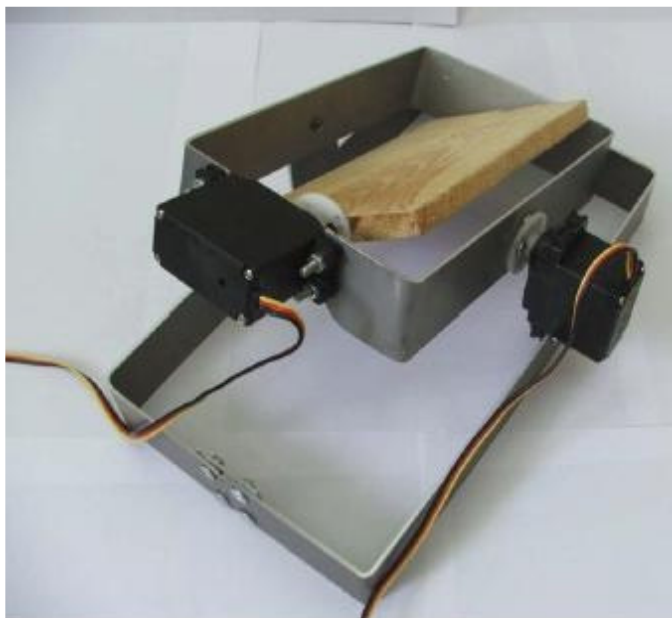


Obr. 1: Koncept dvousého rehabilitačního zařízení

Úkolem tohoto výzkumu je navrhnout a vyrobit jednoduchý a finančně nenáročný model zdravotnického rehabilitačního zařízení. Projekt dvouosého zařízení viz Obr. 1.

Díky sensorům, které budou umístěny mezi horní plošinou a pacientovou končetinou bude možné měřit kinematické a dynamické veličiny. Pro přesné měření těchto veličin se předpokládá použití tenzometrů.

První Model (Obr. 2.) byl vytvořen pro otestování komunikace mezi PC a modelem. V průběhu tohoto testu se ukázalo jako nezbytné použití redukce rozhraní RS 232 na USB. Při používání systému XP docházelo ke konfliktům na sériových portech PC a nebylo možné přímé adresování jednotlivých pinů. Redukci USB se také vyřeší problém při použití modelu s typem PC notebook, které většinou rozhraní RS232 nemá.



Obr. 2: Model dvouosého rehabilitačního zařízení

4. Závěr

Po budoucí pokračování práce bude nezbytné navrhnout napájecí zdroj, který svou proudovou zatížitelností plně pokryje energetické požadavky servomechanizmů HS-985MG. Typ servomechanizmu HS 301 krouticím momentem pro potřeby modelu není dostačující.

Výsledky této práce mohou pomoci jako základní zdroj informací ve vývoji nového typu robotu pro medicínskou rehabilitaci a nových algoritmů pro jeho ovládání.

5. Poděkování

Tato práce byla vytvořena díky: Research plan of Ministry of Education, Youth and Sports of Czech Republic number MSM 0021630518 "Simulation Modelling of Mechatronic Systems".

Literatura

- [1] Bartos, S., Singule, V., Havlík, P., Belohoubek P. :Reengineering in humanoid robotics and human medical rehabilitation. In.: Sborník konference RAAD 2007. Slovinsko.
- [2] M. Špaček, P. Bělohoubek, M. Nádhera, J. Pavlas, and P. Havlík (2005). Scientific Approach to the Modelling of Multi-axes Robots and Human Body and the Medical Rehabilitation. In.: Sborník mezinárodní konference Mendel 2005, Brno.

SENZORY V LABORATOŘÍCH TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ AUTOMATIZACE NA FAI

Petr SKOČÍK, František HRUŠKA

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav elektrotechniky a měření,
Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín, Česká republika
e-mail: skocik@fai.utb.cz, hruska@fai.utb.cz

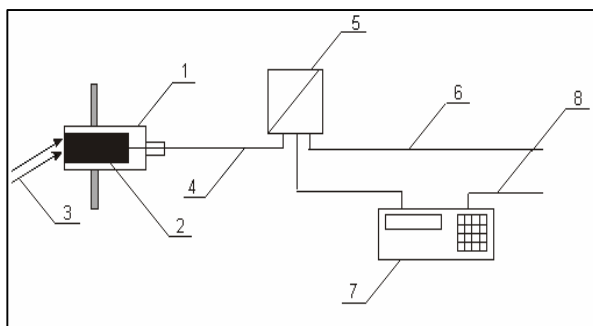
Abstrakt: Úvodem pro výuku technických prostředků automatizace a informatiky je výuka senzorů a souvisejících metod. Na Fakultě aplikované informatiky (FAI) Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně (UTB) se jedná o samostatný předmět. Celá oblast sensoriky je rozsáhlá a náročná na obor aplikované fyziky. Pro usnadnění a zefektivnění studia je postaveno a prováděno celkem 12 laboratorních úloh, které doplňují přednášky. Aktuálnost a vývoj tohoto oboru ve světě ovlivnily volbu typu úloh. Jsou to úlohy o senzorech s metodou změny elektrického odporu, kapacity, indukčnosti, elektromagnetického záření, senzory indukční, emisní, ionizační, polovodičové, termočláňkové, s Hallovým prvkem, pyroelektrické, piezoelektrické, fotoelektrické, potenciometrické a ampérometrické. Dosavadní zkušenosti a diskuse nad poznatky z výuky jsou obsahem nabízeného příspěvku.

Klíčová slova: senzor, laboratorní výuka, automatizace, měření.

1. Úvod

Systémy integrované automatizace se uplatňují ve stále větší míře a ve stále větším rozsahu jak v průmyslu, ve zdravotnictví tak i v domácnosti. Tento neobvyklý rozvoj je dán především novými možnostmi moderní mikroelektroniky. Všechny tyto systémy vyžadují ovšem kvalitní vstupní informace o stavu řízené soustavy, tj. kvalitní podsystém měření. Takový měřicí řetězec je naznačen na obr.1. V obecném pohledu jej tvoří snímač – převodník – popř. vyhodnocovací jednotka (HRUŠKA,F., 2005).

Základním prvkem snímače (1), dle obr.1, je senzor (2), kde se uskutečňuje indikace nebo převod vnějšího fyzikálního podnětu (3) na měronosný signál (4). Senzor tvoří vlastně primární rozhraní mezi vnějším podnětem sledovaného objektu a obvody dalšího zpracování informace. Je tedy klíčovým elementem určující vlastnosti a činnost měřicího okruhu a jeho výsledky. Další částí snímače je mechanická a dnes také častěji elektronická konstrukce. Převodník (5) zpracovává primární signál senzoru na unifikovaný signál (6) měřené veličiny. V případě dalšího zpracování jednoho nebo více signálů měřené veličiny, např. při vyhodnocení množství energie, se používá vyhodnocovací jednotka (7) s výstupem (8).



Obr. 1: Zobecněný měřicí řetězec v systému měření

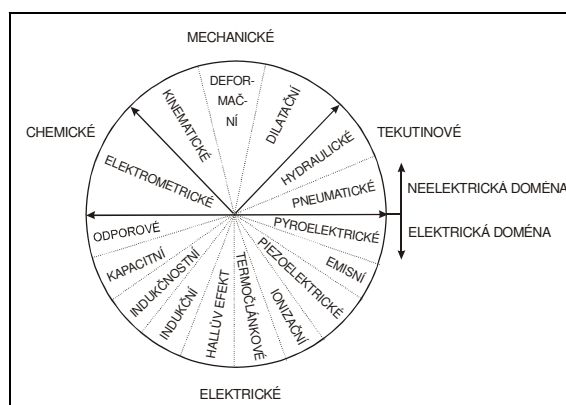
Tento technický obvod je podstatě obdoba smyslových čidel u živých tvorů, kteří jako snímače využívají oči, uši, nos atd., jejichž buňky pak slouží jako senzory citlivé na světlo, zvuk, vůně a vyhodnocovací jednotkou je mozek.

Uvedený měřicí řetězec se v technické praxi obvykle člení do mnohem složitějšího měřicího a kontrolního systému automatizace.

Senzory pracují na základě různých mechanických, fyzikálních nebo fyzikálně-chemických principů. Z metod používaných při snímání a převodu vnějších podnětů na výstupní signály senzorů se dnes v převážné

většinou jedná o elektrické principy. Elektronika totiž umožňuje zajistit miniaturizaci senzorů, velkou přesnost, citlivost, malé časové konstanty měření, dálkový přenos signálu aj. Jen malá oblast senzorů využívá mechanické jevy (např. tepelnou roztažnost látek) nebo tekutinové principy (pneumatické, hydraulické). Třídění senzorů je pak prováděno z mnoha hledisek. Mezi základní hledisko řadíme dělení senzorů dle využívaného fyzikálního principu (HRUŠKA, F., 2005), které je nastíněno na obr. 2 dle (Pallas, R., Areny / Webster, J. G., 2001). Obr. 2 současně poskytuje obecný přehled o oborech senzorů probíraných na FAI.

Senzory jsou používány v mnoha oblastech vědy a techniky. Jsou součástí konstrukce snímače všech technických nebo technologických veličin u systému automatizace. Konstrukce moderních zařízení pro snímání dat, jako jsou scannery, čtečky čárových kódů, magnetických nebo čipových karet, snímače biometrických zařízení (otisky prstů, struktury duhovky apod.) mají také zabudovány velké množství senzorů a jsou základem vstupů u informačních systémů.



Obr. 2: Obecná klasifikace senzorů dle fyzikálního principu.

Vývoj těchto oborů ve světě ovlivnily i volbu typu laboratorních úloh technických prostředků automatizace (TPA), resp. senzorů, které slouží pro usnadnění a zefektivnění studia celé oblasti sensoriky náročné na obor aplikované fyziky.

2. Typy laboratorních úloh TPA

Celkem je sestaveno a měření realizováno na 12 laboratorních úlohách využívajících senzorů těchto typů:

- senzory teploty – Pt100, NTC termistor a termo-článek
- senzory indukčnostní s malou vzduchovou mezerou
- senzory indukčnostní s posuvným jádrem
- senzory kapacitní
- senzory tenzometrické v můstkovém zapojení
- senzory termistorové
- senzory fotoelektrické – fotorezistor, fotočlánek, fototranzistor a fotodioda
- senzory spektrometrické
- senzory thermopile
- senzory výšky hladiny se změnou elektrické vodivosti
- senzory potenciometrické (úhlového natočení)
- senzory indukční elektromagnetické (senzory otáčení)

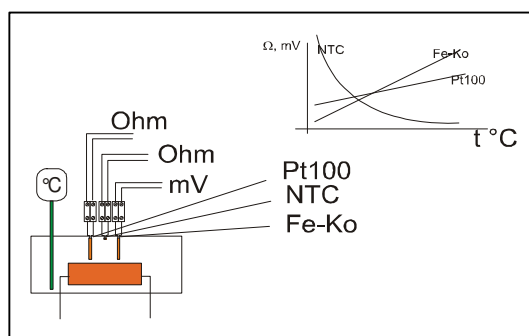
3. Popis jednotlivých úloh

1.1 Statická charakteristika senzorů teploty

Cílem úlohy je měření a vyhodnocení statické charakteristiky pro teplotní senzor Pt100, termistor NTC a termočlánek.

Těleso vyhřívané na teplotu o rozsahu 30 až 90 °C pomocí proměnného napětí má zabudované senzory teploty: Pt100, termistor NTC a termočlánek. Teplota vyhřívajícího tělesa změnou napájecího napětí ohřívacího prvku se udržuje nejméně v 6 bodech daného rozsahu teploty a to vždy v ustáleném stavu. V tomto stavu se měří nejméně 10-krát teplota vyhřívajícího tělesa v intervalu cca 30s. Měření je realizováno elektronickým teploměrem, který slouží jako referenční a současně všemi třemi typy senzorů. Jejich výstupy se měří pomocí multimetrů.

Výsledky měření se statisticky vyhodnotí včetně průměrných hodnot, směrodatných odchylek, minima a maxima. Dále se vyhodnotí statické charakteristiky pro jednotlivé senzory.



Obr. 3: Obecné schéma úlohy 1 – senzory teploty

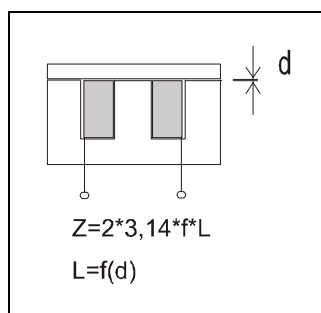
Z naměřených statických charakteristik použitých senzorů teploty může student usuzovat, že závislost odporu senzoru Pt100 na teplotě je v malém rozsahu teplot lineární a s teplotou roste. U termistorového senzoru NTC je tato závislost nelineární – exponenciální. V případě termočlánku je zkoumaná závislost lineární rostoucí. U termočlánekového senzoru je důležité dbát na oddělení šumu od měřených hodnot, protože generované termoelektrické napětí je v rozsahu mV.

1.2 Měření indukčností senzorů s malou vzduchovou mezerou

Cílem je měření a vyhodnocení statické charakteristiky indukčností senzoru s malou vzduchovou mezerou.

U indukčností senzoru s jádrem ve tvaru E-I změna mezery způsobuje i změnu magnetického toku jádrem a následně změny indukčnosti. Či-li senzor s malou vzduchovou mezerou mění indukčnost cívky podle změn této mezery. Změny lze provést posuvem částí magnetického obvodu, tj. části E vůči části I nebo změnou při vkládání např. tenkých papírků. Indukčnost se měří pro 10 bodů rozsahu 0 až 1 mm mezery, tj. tloušťky vkládaného materiálu. Měření se vždy opakuje 10-krát a provádí se pomocí LRC měřidla.

Z naměřené statické charakteristiky indukčností senzoru lze usuzovat, že závislost indukčnosti na velikosti mezery v jádru magnetického obvodu EI je ne-lineární a klesající s rostoucí velikostí vzduchové mezery.

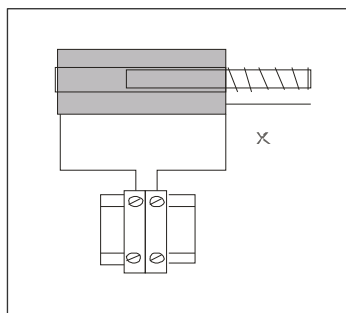


Obr. 4: Obecné schéma úlohy 2 – senzory indukčností s malou vzduchovou mezerou

1.3 Měření indukčností senzorů s jádrem

Cílem je opět vyhodnotit statickou charakteristiku indukčností senzoru, ale tentokrát se jedná o senzor s posuvným jádrem.

Indukčností senzor s výsuvným jádrem mění indukčnost cívky podle změny polohy jádra v cívice. Změnu zasunutí lze provést vložením materiálu mezi jádro a doraz. Indukčnost se jako předešlém případě měří pro 10 bodů rozsahu 0 až 20 mm mezery (tloušťky materiálu) a vždy po 10-ti měření pomocí LRC měřidla.



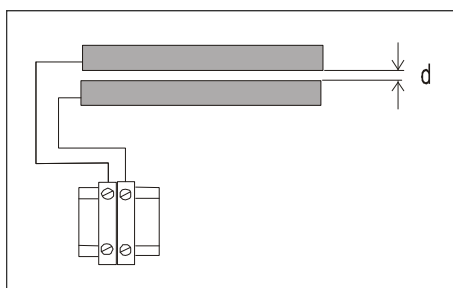
Obr. 5: Obecné schéma úlohy 3 – senzory indukč-nostní s posuvným jádrem

Z naměřené statické charakteristiky indukčního tohoto senzoru lze usuzovat, že závislost indukčnosti na zasouvání jádra do cívky senzoru roste a to v určité části lineárně. Od určité pozice se charakteristika stává konstantní a přechází její tendence do poklesu. Tento stav nastává v oblasti, kdy je jádro zcela zasunuto resp. vysouvá se na druhou stranu cívky.

1.4 Měření kapacitních senzorů s proměnnou tloušťkou dielektrika

Jedná se o měření a vyhodnocení statické charakteristiky kapacitního senzoru s proměnnou tloušťkou dielektrika. U senzoru se mění kapacita při změně tloušťky dielektrika vkládáním nevodivého materiálu.

Z naměřené statické charakteristiky kapacitního senzoru lze usuzovat, že závislost kapacity na změně tloušťky dielektrika u senzoru nelineárně klesá.

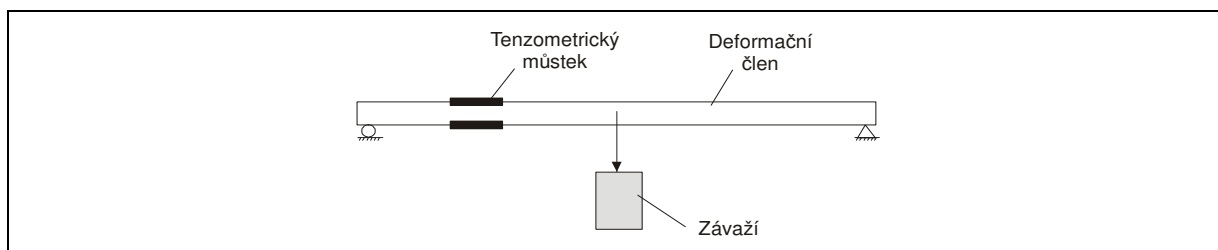


Obr. 6: Obecné schéma úlohy 4 – senzory kapacitní

1.5 Měření tenzometrických senzorů

Cíl je změřit a vyhodnotit mechanické napětí na nosníku od zatížení hmotností pomocí tenzometrických senzorů v můstkovém zapojení.

Na nosníku se dvěma podpěrami jsou aplikovány tenzometry, které vytváří plný stejnosměrný můstek. Výsledné napětí můstku je zesíleno operačním zesilovačem. Výstupní signál je tedy mírou napětí vznikajícího od zatížení na nosníku. Zatížení je měněno změnou hmotnosti závaží pro 8 bodů v rozsahu zátěže 0 až 400g. Měření je opakováno 10krát pro každý bod měření. Vyhodnocení závislosti změny je nutné provést pro směr zvyšování i snižování zátěže, abychom mohli vyhodnotit hysterezi, tj. rozdíl obou směrů.

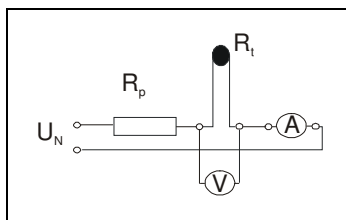


Obr. 7: Obecné schéma úlohy 5 – senzory tenzometrické

1.6 Měření voltampérové charakteristiky termistorů

Úkolem je měření a vyhodnocení voltampérové charakteristiky žhaveného termistoru.

Měření a vyhodnocení voltampérové charakteristiky žhaveného termistoru je základem poznání jeho vlastností a možností použití pro měření rychlosti proudění tekutin jako termoelektrický anemometr.



Obr. 8: Obecné schéma úlohy 6 – termistor

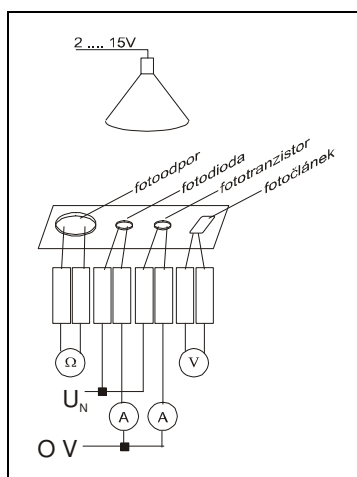
U senzoru je měněno napájení žhavení v rozsahu 0 až 30V DC, měří se úbytek napětí na termistoru a proud procházející termistorem. Měření se opakuje vždy 10krát pro 10 bodů daného rozsahu napájecího napětí.

Z naměřených a statisticky vyhodnocených údajů se sestrojí voltampérová charakteristika termistoru, která poukazuje v počáteční fázi lineární závislost, kde platí Ohmův zákon. V důsledku vznikající tepelné energie a poměrů jejího přenosu do okolí se charakteristika nelineárně mění.

1.7 Měření fotoelektrických senzorů

Měří se a vyhodnocují základní typy senzorů pro elektromagnetické záření viditelné oblasti, tj. fotorezistor, fotočlánek, fototranzistor a fotodioda.

Senzory jsou osvětleny zdrojem světla v rozsahu na-pájecího napětí 2 až 15 V DC; měří se změny odporu na fotorezistoru, změny napětí na fotočlátku, změny vodivosti na fototranzistoru a fotodiodě. Výstupy všech senzorů se měří pro 10 hodnot intenzity osvětlení, tj. dle změny napájecího napětí v daném rozsahu a opakuje se 10krát.



Obr. 9: Obecné schéma úlohy 7 – senzory fotoelektrické

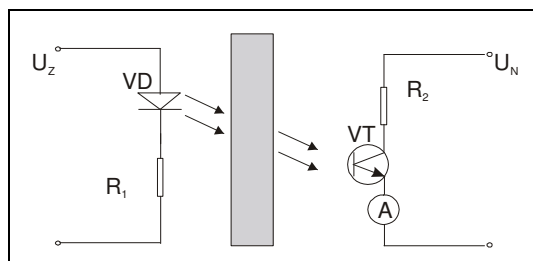
Z naměřených a statisticky vyhodnocených údajů se sestrojí vstupně-výstupní charakteristiky fotoelektrických senzorů. Ty poukazují na funkci senzorů a na reálné možnosti použití těchto elementů. V úloze se jako vstup uvažuje napájecí napětí zdroje světla a přepočít se pak provede dle údajů uvedeným výrobcem zdroje světla.

1.8 Měření absorpce světelného záření

Cílem je měření a vyhodnocení absorpce elektromagnetického záření ve viditelné oblasti v barevném roztoku s různou koncentrací barvicí látky.

Barevný roztok s odstupňovanou koncentrací barvicí látky je umístěn ve zkumavkách. Zdroj světla – LED dioda VD svítící barevně prosvěcuje objem roztoku tak, že na protější straně se měří změny intenzity záření pomocí fototranzistoru VT. Absorpce je závislá na koncentraci barvicí látky.

Zdroj světla je napájen napětím $U_z = 24V$ DC a předřadný odpor R_1 (cca $22\text{ k}\Omega$) v tomto obvodu nastaví proud přes LED diodu na velikost dostatečné intenzity svitu přes roztok. Senzorem procházejícím elektromagnetické záření je fototranzistor, který ovlivňuje tok proudu přes odpor R_2 (cca $12\text{ k}/1\text{ k}\Omega$). Obvod vytváří napájecí zdroj $U_n = 24V/5V$ DC.



Obr. 10: Obecné schéma úlohy 8 – senzory spektrometrické

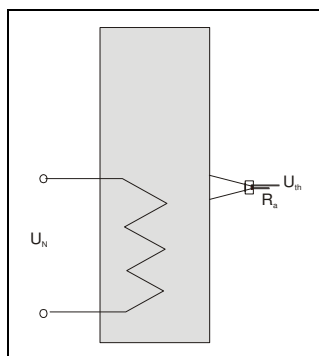
Měření se provádí 10krát pro 7 vzorků roztoku. Při tomto měření se pootáčí zkumavkou, aby se měnila její poloha vůči toku záření.

Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat se sestrojí vstupně-výstupní charakteristika závislosti proudu fototranzistoru na koncentraci roztoků. Ta poukazuje na funkci senzoru a na reálné možnosti použití těchto elementů jako spektrometr. Je také vyhodnocena citlivost měření a matematický vztah závislosti.

1.9 Měření senzorů thermopile

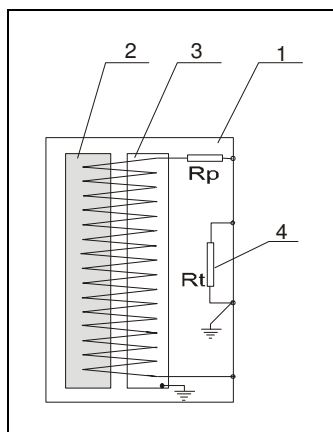
Úkolem měření je vyhodnocení senzoru thermopile při vystavení působení elektromagnetického záření oblasti vlnové délky od $7 \mu\text{m}$.

Elektromagnetické záření v infračervené oblasti tj. o vlnové délce od $7 \mu\text{m}$ získáme ohřátím kovového tělesa. Těleso vysílá elektromagnetické záření úměrné září podle své povrchové teploty. Při změně povrchové teploty měníme působení IR záření na senzor, který tento podnět snímá a mění na elektrický výstupní signál.



Obr. 11: Obecné schéma úlohy 9 – thermopile

Senzor termopile je moderní senzor vyráběný polovodičovými technologiemi. Obsahuje přes 80 sériově zapojených termočlánků z polovodičových materiálů a termistor. Na tělísku (1) jsou termočlánky umístěny tak, že měřicí konce jsou tepelně vodivě a elektricky nevodivě spojeny s plochou (2), která je vystavena elektromagnetickému záření a srovnávací konce jsou napojeny na plochu (3) umístěnou mimo dosah záření. Přes odpor R_p je vyvedeno výstupní napětí (úroveň mV). Termistor obsahuje pro měření teploty srovnávacích konců termistor R_t označený pozicí (4).



Obr. 12: Obecné schéma senzoru thermopile

Měří se pro 10 bodů ohřátí tělesa v rozsahu 0 až 90 °C. Měření se opakuje 10krát vždy v ustáleném stavu. Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat se sestojí vstupně-výstupní charakteristika závislosti výstupu termopile senzoru na intenzitě elektromagnetického záření vytvářeného zářením ohřívajícího tělesa. Poukazuje na funkci senzoru a na reálné možnosti použití těchto elementů jako měřidla pro povrchovou teplotu bezdotykovým způsobem nebo jako měřidla intenzity elektromagnetického záření těles. Je také vyhodnocena citlivost měření a matematický vztah závislosti.

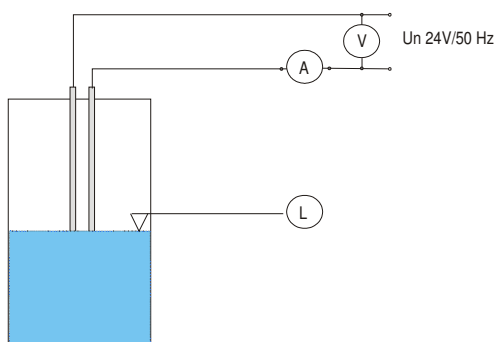
1.10 Měření výšky hladiny

Měření se vyhodnocuje senzor výšky hladiny pomocí metody měření změn elektrické vodivosti při změnách výšky hladiny v nádobce.

Změnou výšky hladiny v nádobce se mění elektrická vodivost určovaná dvěma ponořenými elektrodami. Elektrickou vodivost měříme v obvodu se střídavým napájením AC pro zabránění polarizace. Měří se napětí na elektrodách a proud tekoucí ze zdroje.

Měří se pro 10 bodů výšky hladiny v rozsahu 0 až 100 %. Měří se vždy 10krát.

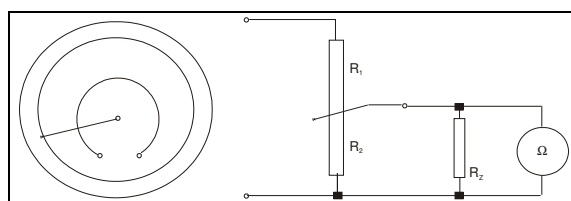
Z naměřených a statisticky vyhodnocených údajů se sestojí vstupně-výstupní charakteristika závislosti výstupu senzoru na výšce hladiny. Poukazuje na funkci senzoru a možnosti použití jako měřidla. Je také vyhodnocena citlivost měření a matematický vztah závislosti.



Obr. 13: Obecné schéma úlohy 10 – senzory výšky hladiny (elektrická vodivost)

1.11 Měření charakteristika potenciometrického senzoru

Cílem je vyhodnotit se charakteristika potenciometrického senzoru polohy nebo úhlového natočení. Změnou natočení běžce potenciometru se mění elektrický odpor na části potenciometru.



Obr. 14: Obecné schéma úlohy 11 – senzory potenciometrické

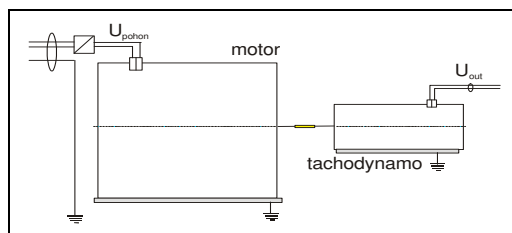
Měří se pro 3 série dle zátěžného odporu R_z ($1M\Omega$, $1k\Omega$ a $0,1k\Omega$). Pro každou sérii měření se mění 10 bodů natočení potenciometru v rozsahu 0 až 100 % natočení a měření se opakuje vždy 10krát. Změnu elektrického odporu mezi středním a prvním vývodem, tj. hodnota R_2 se měří ohmmetrem.

Z naměřených údajů a statisticky vyhodnocených dat se sestojí vstupně-výstupní charakteristika závislosti výstupu senzoru na natočení a použité zátěži. Charakteristika poukazuje na funkci senzoru a využití v praxi. Je také vyhodnocena citlivost měření a matematický vztah závislosti.

1.12 Měření charakteristiky indukčního senzoru

Cílem měření je vyhodnocení charakteristiky indukčního elektrodynamického senzoru otáčení. Změnou rychlosti otáčení rotoru indukčního elektrodynamického senzoru se mění indukované elektrické napětí na výstupních svorkách senzoru.

Měří se pro 3 série dle zátěžného odporu R_z ($1M\Omega$, $1k\Omega$ a $0,1k\Omega$). Pro každou sérii měření se mění 10 bodů nastavení otáček motoru pohonu v rozsahu 0 až 100 %. Měření se opakuje vždy 10krát. Změnu elektrického napětí na výstupu tachodynamu se měří voltmetrem.



Obr. 15. Obecné schéma úlohy 12 – senzory indukční

Z naměřených a statisticky vyhodnocených dat se sestrojí vstupně-výstupní charakteristika závislosti výstupu senzoru na otáčkách. Poukazuje na funkci senzoru a reálné možnosti použití těchto elementů jako měřidla. Je také vyhodnocena citlivost měření a matematický vztah závislosti.

4. Vyhodnocení a způsob výuky TPA

Prioritním cílem uvedených laboratorních cvičení, resp. volbou jednotlivých typů úloh je dosáhnout nejen kvalitního a snadnějšího studia daného předmětu, ale také zefektivnit orientaci a přehled studentů ve všech oblastech sensoriky aplikované v dnešní moderní praxi. Student, tak získává přehled od základních informací jako je obecná klasifikace senzorů, fyzikální principy, statické a dynamické vlastnosti senzorů až po jejich reálné využití a technická provedení jednotlivých typů v praxi. Aby cvičení splňovalo zmíněné požadavky jsou způsob výuky a nároky na studenty patřičně přizpůsobeny a to:

- cvičení probíhá 1x týdně po 2 vyučovacích hodinách
- student měří danou úlohu výhradně a pouze sám
- student během semestru odměří postupně všech 12 úloh
- před samotným měřením danou úlohu student nastuduje v příložených laboratorních návodech a postupech, popř. i manuálech
- provede zapojení dle uvedených schémat
- ověří s vyučujícím správnost zapojení úlohy a následně konzultuje své poznatky a jednotlivé cíle měření
- správnost měření konzultuje na konci cvičení vždy s vyučujícím
- z provedeného měření student zpracovává tech-nickou zprávu (protokol), kterou odevzdává v elektronické podobě
- protokol obsahuje 2 soubory a to samotný pro-tokol vypracovaný textovým editorem MS Word a statistické data zpracovaná v MS Excel
- v protokolu se student soustředí na jednotlivé cíle úlohy, ze svého pohledu popisuje měřenou úlohu, prezentuje tabulkově i grafiky výsledky z měření, které následně vyhodnocuje a závěrem hodnotí celou úlohu
- po semestru měření a uznání všech odevzdaných protokolů student získává nárok na započítání z daného předmětu.

Během měření si student ověřuje své teoretické poznatky týkající se reakce jednotlivých senzorů na vnější vstupní podnět. Zjišťuje také vliv parazitních podnětů, které mohou ovlivnit i měřený výstupní signál. Proto je nezbytné, aby se měření několikrát opakovalo a zajistilo se tak vyšší pravděpodobnosti správnosti měření. Parazitní podněty mohou být dány jednak vlastními systematickými a náhodnými procesy jednotlivých senzorů nebo jejich vnitřním rušením. V tom případě mluvíme o vnitřních chybách zapříčiněných samotným senzorem. V případě vnějších vlivů se jedná o vazby na měřený proces a vazby výstupu na další obvody určené pro vyhodnocování.

Vstupní vazba senzoru na proces je dána kvalitou přenosu měřeného podnětu na senzor a případnou zpětnou vazbou působení senzoru na proces. Např. senzor pro měření teploty musí mít zajištěn co nejdokonalejší přestup tepla do senzoru z měřeného prostředí. Zpětná vazba senzoru na proces může být tepelné působení senzoru na snímanou plochu při snímání elektromagnetického záření. Vliv výstupních vazeb lze nejčastěji pozorovat u parametru zátěžného odporu výstupní jednotky a nebo u rušení na spojovacím vedení. Zpětným působením vyhodnocovací jednotky může být např. ohřev teplotního odporového senzoru od měřícího proudu. V praxi jsou pak používány různé metody pro zmenšení vzniku chyb snímání senzorů (HRUŠKA,F., 2005). Mezi nejznámější metody patří např.:

- kompenzační zapojení senzorů
- diferenční zapojení senzorů
- zpětnovazební zapojení senzorů
- linearizační zapojení
- automatická kalibrace
- filtrace
- korekce dynamických chyb aj.

5. Vyhodnocení a způsob výuky TPA

Vedle výše uvedených senzorů je možno sledovat velký rozvoj polovodičových technologií a velmi úzce související i aplikace těchto technologií do výroby senzorů. Základem je tzv. křemíková technologie využívající postupy jako jsou: oxidace povrchů, metalizace apod. Tenkovrstvá technologie zajišťuje vrstvy látek (polovodičů, kovů, izolantů) o tloušťce až 1nm. Takto vyrobené senzory jsou malých rozměrů s malou hmotností, jsou přesnější a vykazují vysokou reprodukovatelnost. Jsou i levnější pro svou velkosériovost.

Tyto tenkovrstvé a polovodičové technologie umožňují i vyrábět tzv. integrované senzory obsahující kombinaci senzorů a aktivních polovodičových prvků, včetně zesilovačů, mikrokontrolerů, procesorů pro zpracování signálů apod. Zajistí se tak snížení parazitních šumů, impedancí a zvýší se rychlost zpracování signálů (HRUŠKA,F., 2005).

Rozvoj senzorů v následujícím období bude pokračovat tímto rostoucím trendem. Můžeme tedy předpovídat, že v nejbližším období se budou rozvíjet hlavně:

- inteligentní senzory s možností programovat vyhodnocování
- polovodičové integrované obvody CCD, PSD atd.
- biosenzory
- obvodová komunikace pro vyhodnocování: ASI apod.

V naší výzkumné činnosti na UTB se již zabýváme aplikovaným výzkumem této oblasti senzorů, jako jsou např.:

- thermopile pro bezdotykové měření střední radiační teploty při řešení problému vyhodnocování a řízení tepelné pohody člověka v prostředí
- integrovaných polovodičových senzorů pro měření elektrických výkonů
- polovodičových tenzometrických senzorů pro měření rychlosti a směru proudění vzduchu
- senzorů pro tepelný management
- elektrochemických senzorů pro sledování životního prostředí

Výzkumná činnost této oblasti sensoriky je současně i podnětem pro návrh a vznik nových úloh, které po začlenění do laboratoří TPA umožní reálné sledování tohoto trendu rozvoje i ve výuce.

6. Závěr

Výuka senzorů a souvisejících metod dle fyzikálních zákonů se osvědčuje jako její významná část. Studenti mají možnost se seznámit a ověřit si rozsah a náročnost ve vazbě na aplikovanou fyziku. Těchto celkem 12 laboratorních úloh usnadňuje a zefektivňuje studium.

Literatura

- [1] Hruška, F.: Technické prostředky automatizace III. Senzory, jejich principy a funkce. Učební texty. 2.vydání Zlín: UTB ve Zlíně, 2005, ISBN 80-7318-315-3
- [2] A Pallas, R., Areny / Webster, J. G.: Senzore and Signal Conditioning. Sec.edit. John Wiley & Sons.Autor, 2001
- [3] Skočík, P., Hruška, F.: Výuka senzorů v laboratorním cvičení na FAI. Proceedings 2007 (CD: ISBN 978-80-227-2677-1), 11-14.6.2007, Štrbské Pleso, Vysoké Tatry, Slovenská republika.

PERSPEKTIVA VÝUKY ELEKTROTECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ NA TECHNICKÝCH FAKULTÁCH VŠB-TUO

Vítězslav STÝSKALA

Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava,
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava–Poruba, Česká republika,
vitezslav.styskala@vsb.cz

***Abstrakt:** Cílem předkládaného příspěvku je informování jednak o současném stavu výuky elektrotechnických předmětů, kterou zajišťuje Katedra obecné elektrotechniky a dále i o blízkých perspektivách spojených se slučováním kateder obecné a teoretické elektrotechniky. Jsou zde uvedeny základní informace o zařazení předmětů v osnovách jednotlivých technických fakult VŠB-TUO, jejich časové dotace a forma pro kterou jsou vyučovány.*

***Klíčová slova:** Studium; studijní obor; dislokované pracoviště; forma studia.*

Úvod

Stávající Katedra obecné elektrotechniky FEI je tradičně a dlouhodobě pověřována výukou elektrotechnických předmětů na technických fakultách VŠB-TU Ostrava. Z původních víceméně obecných elektrotechnických předmětů, vznikly především prací pedagogů nové specifické předměty, vyhovující současným potřebám jednotlivých oborů různých technických fakult univerzity. V současnosti zajišťuje tuto výuku 9 pracovníků na plný pracovní úvazek a 3 na úvazek zkrácený. Přehledný výčet výukových aktivit je uveden níže.

1. Výuka předmětů obecné a aplikované elektrotechniky v prezenční formě

1.1 Fakulta strojní (FS)

Pro potřeby všech stávajících akreditovaných i nově akreditovaných studijních oborů zajišťuje katedra i do budoucna z hlediska počtu studentů 3 stěžejní předměty a to:

- předměty 452371 Elektrotechnika I. /2+2/ a 452352 Elektrotechnika II. /2+2/ v závěrečném ročníku bakalářského studia
- a předmět 452331 Elektronika /2+2/ pro 1. ročník magisterského studia.

U těchto předmětů se jedná každoročně o velmi významný počet studentů cca 270/ročně. Některé vybrané studijní obory nabízejí v LS 1. semestru navazujícího studia i další povinný předmět 452332 Elektrické pohony /2+2/. Pro užší okruh studentů bakalářského speciálního oboru (bez navazujícího), poskytuje katedra výuku předmětu 452353 Základy elektroniky /2+4/.

1.2 Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství (FMMI)

Výuka na elektrotechniky na této fakultě patří dlouhodobě ke tradiční a stabilní. Katedra zajišťuje každoročně výuku ve 2. ročníku bakalářského studia v předmětu 452702 Elektrotechnika /2+2/ pro všechny stávající studijní obory (cca 120 studentů/rok).

Od ZS 2007/08 je tento předmět obsahem nově akreditovaného oboru s ekologickou tematikou.

1.3 Fakulta bezpečnostního inženýrství (FBI)

Pedagogická spolupráce s nejmladší technickou fakultou VŠB-TUO spočívá především ve výuce všeoborového předmětu ve 2. ročníku bakalářského studia – 452081 Elektrotechnika /2+2/, kde se každoročně jedná o více jak 100 studentů. Dále pak předmětu 452 062 Prevence elektrických zařízení.

1.4 Fakulta stavení (FAST)

Specifické požadavky fakulty se odrážejí ve společné výuce těchto předmětů:

- 452201 Stavební elektrotechnika /2+1/ a 452 251 Technická zařízení budov III. /2+2/ v bakalářských programech
- 452205 Technická zařízení budov /2+2/ pro magisterskou formu
- 452252 Základy systémové techniky budov /2+2/.

1.5 Fakulta hornicko-geologická (HGF)

Na této tradiční fakultě je v současnosti katedrou zajišťována výuka v prezenční bakalářské formě v předmětu 452550 Elektrotechnika /2+2/ a pro magisterské studium pak předmět 452087 Rozvody elektrické energie v lomech /2+1/.

1.6 Fakulta elektrotechniky a informatiky (FEI)

Vzhledem k potřebám mateřské fakulty je výuka rozdělena v zásadě do dvou oblastí dle požadavků studijních oborů na:

- ✓ předměty s bezpečnostní a právně preventivně informační tematikou v převážně bakalářské formě
 - 452431 Předpisy a nařízení v elektrotechnice /2+2/
 - 452437 Bezpečnost v elektrotechnice /1+0/
 - 452438 Prevence elektrických zařízení /2+2/
 - 452452 Předpisy a normy v elektroenergetice /2+2/
 - 452456 Bezpečnost práce v laboratořích FEI /1+0/
 - 452460 Základní elektrotechnické předpisy /2+2/
 - 452438 Prevence elektrických zařízení /2+2/
- ✓ předměty s tematicky odborným zaměřením pro navazující magisterskou formu
 - 452432 Informační systémy v silnoproudé elektrotechnice /1+5/
 - 452433 Elektrická zařízení pracovních strojů /2+4/
 - 452434 Bezpečnostní technika strojů /2+2/
 - 452435 Elektrická zařízení a rozvody v budovách /1+2/
 - 452436 Systémová technika vybavení budov /1+2/
- ✓ pro doktorské studium je v nabídce předmět 452901 Navrhování elektrických pohonů /30+0/

2. Výuka v kombinované formě studia

Všechny výše uvedené technické fakulty VŠB-TU nabízejí vedle prezenční formy také formou kombinovanou s různou organizací studia.

Také zde katedra zajišťuje kompletní paralelní souběh v předchozím uváděných předmětů a to z části formou prezenčních přednášek v Ostravě, případně v jiném konzultačním středisku a zčásti samostudiem s podporou studijních opor a dalších studijních materiálů vytvořených katedrou a umístěných na přístupném webu.

Příznivý je v současnosti i výhled do budoucna s tím, že stále roste zájem a tím i počet studentů této formy a u jednotlivých fakult již činí 1/4 až 1/6 podílu počtu studentů v prezenční formě.

3. Výuka na dislokovaných pracovištích VŠB-TUO

Velký zájem o studium a poptávka po možnostech studia i mimo sídlo naší technické univerzity, vedl její vedení i vedení jednotlivých fakult ke zřízení konzultačních středisek i v jiných městech ČR. V některých již byla výuka i v minulosti a rozšířila se, avšak během posledních 6 let vznikala střediska zcela nová. Jsou umístěna v centrech zájmu, které se zpravidla kryjí i se sídly větších průmyslových firem, které konzultační střediska zpočátku pomohly v regionu propagovat a vybudovat.

Naše katedra z tohoto důvodu kromě předchozích aktivit zajišťuje plnohodnotně i výuku v těchto střediscích a to pro kombinovanou formu v Mostě, Praze, Uherském Brodě a Třinci; kombinovanou i prezenční pak také v městě Šumperku.

Dle našich zjištění je i do blízkého budoucna tato výuka pro katedru perspektivní i když přináší nová specifika jak v oblasti pedagogické, didaktické a materiální, tak i v oblasti personální a organizační.

4. Závěr

Z výčtu pedagogických aktivit naší katedry je zřejmé, že je jednak velmi pestrá a zajímavá, současně však velmi náročná na přípravu, organizaci i personální obsazení.

I přes odlišnost časových dotací na výuku jednotlivých předmětů danou jednotlivými fakultami, je snahou vyučujících udržet vysokou kvalitu výuky. S tím je počítáno i při podávání rozvojových projektů katedry na rok 2008 a také při nové přípravě pedagogické dokumentace, studijních opor a pomůcek.

Od 1. října 2007 je Katedra obecné elektrotechniky organizačně spojena s Katedrou teoretické elektrotechniky v jeden subjekt – Katedru elektrotechniky. Spojením dojde mimo jiné i k očekávanému rovnoměrnějšímu rozvržení pracovní vytíženosti jednotlivých vyučujících a tím i ke zefektivnění pedagogické i vědecko výzkumné práce celého pracoviště. Technické vybavení pracovišť je v současnosti na dobré úrovni, je však neustále rozvíjeno různými formami i mimo vlastní rozpočtové prostředky kateder.

Nově vzniklá nástupnická katedra bude od svého vzniku garantovat a realizovat kromě jednoho z největších počtů předmětů s největším objemem výuky i zcela nový čtyřletý bakalářský studijní obor Projektování elektrických zařízení. Ten je v současnosti akreditován jako jediný v ČR a jeho vznik je pružnou reakcí katedry na zvýšené potřeby firem z technické praxe. Více informací k tomuto oboru lze nalézt na www.vsb.cz.

K naplnění stanovených cílů bude jistě nutná nejenom odpovědná práce všech pracovníků Katedry elektrotechniky, ale i podpora mateřské fakulty FEI i ostatních spolupracujících fakult VŠB-TU Ostrava.

Literatura

- [1] Studijní programy fakult VŠB-TU Ostrava 2007-2008. Ediční středisko VŠB-TUO.
 - [2] <http://www.fei.vsb.cz/kat452>
-

VÝPOČET PRIEBEHU PRÚDU ASYNCHRÓNNEHO MOTORA PRI ROZBEHU CEZ STRIEDAVÝ MENIČ

Mária ZÁSKALICKÁ, Pavel ZÁSKALICKÝ*

Katedra aplikovanej matematiky
Strojnícka fakulta

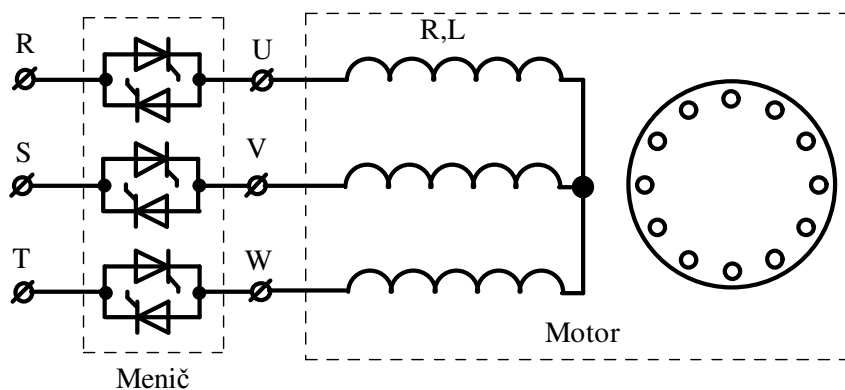
*Katedra elektrotechniky, mechatroniky a priemyselného inžinierstva
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Letná 9, 04200 Košice, Slovensko.

Abstrakt: Predkladaný článok ukazuje možnosť výpočtu okamžitých hodnôt prúdu a momentu asynchrónneho motora počas rozbehu pri napájaní motora cez striedavý polovodičový menič. Zjednodušený model motora prostredníctvom náhradnej schémy je prepočítaný na ekvivalentnú ohmicko-iduktívnu záťaž meniča, s premenlivým odporom v závislosti od rýchlosti motora. Pribeh napájacieho napätia je vyjadrený Fourierovým rozvojom. Z pribehu rotorového prúdu je následne vypočítaný pribeh elektromagnetického momentu motora.

Kľúčové slová: Asynchrónny motor, rozbeh, Fourierove rady, zvlnenie prúdu, výpočet prúdov

1. Úvod

Asynchrónne motory s výkonom nad 3kW je možné rozbiehať len prostredníctvom zariadení, ktoré zaručia obmedzenie záberového prúdu. Záberový prúd bežných motorov s kotvou nakrátko pri priamom pripojení na sieť dosahuje 5–7 násobok nominálneho prúdu motora, čo je neprípustné tak pre motor, ako aj pre napájaciu sieť. Pri spúšťaní asynchrónnych motorov je potrebné obmedziť nárazové prúdy na mieru prijateľnú tak pre elektrárne, ako aj pre spotrebiteľa. Jednou z možností obmedzenia záberového prúdu motora je použitie striedavého meniča tak, ako je to uvedené na obrázku 1.



Obr.1: Asynchrónny motor napájaný zo striedavého meniča.

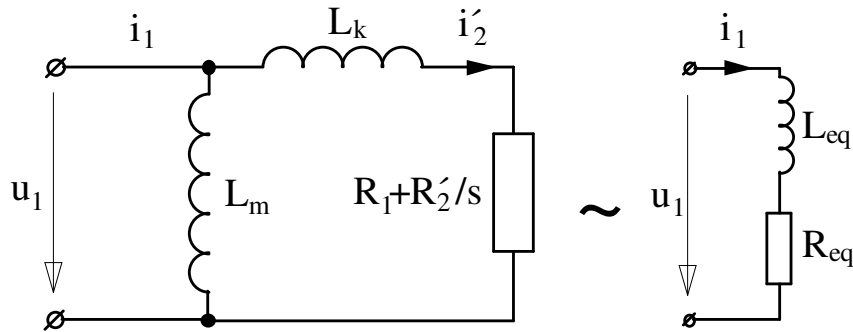
Riadenie napájacieho napätia sa deje prostredníctvom uhla fázového riadenia tyristorov danej fázy. Napájacím napätím je regulovaný prúd motora, ktorý počas rozbehu nesmie prekročiť maximálnu dovolenú hodnotu.

V prvom okamihu pripojenia napätia na motor sú jeho otáčky nulové. Motor pracuje v stave nakrátko, keď je prúd motora obmedzený len ohmickými odporami a rozptylovými reaktanciami vinutí. Motor sa začne rozbiehať a so vzrastajúcou rýchlosťou sa prúd znižuje, až sa napokon ustáli na hodnote záťažového prúdu.

2. Matematický model

1.1 Matematický model motora

Pre praktické výpočty priebehu prúdu a momentu motora počas rozbehu nám postačí vychádzať zo zjednodušenej náhradnej schémy podľa obrázku 2. V tejto schéme sú zanedbané straty v železe a takisto je zanedbaný vplyv satorového odporu a rozptylovej indukčnosti na veľkosť magnetizačného prúdu motora.



Obr.2: Zjednodušená náhradná schéma.

Pre každý pracovný bod motora (daný rýchlosťou stroja) je možné náhradnú schému motora zjednodušiť na sériové zapojenie ekvivalentnej indukčnosti a odporu.

Fázor ekvivalentnej impedancie obvodu náhradnej schémy je daný rovnicou:

$$\mathbf{Z}_{eq} = \frac{jX_m (R_1 + R_2'/s + jX_k)}{j(X_m + X_k) + R_1 + R_2'/s} \quad (1)$$

Pre prvky ekvivalentnej náhradnej schéma platia vzťahy:

$$L_{eq} = \frac{1}{\omega} \text{Im}(\mathbf{Z}_{eq}) \quad (2)$$

$$R_{eq} = \text{Re}(\mathbf{Z}_{eq})$$

Pre okamžitú hodnotu satorového prúdu platí diferenciálna rovnica:

$$u_1 = i_1 R_{eq} + L_{eq} \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

1.2 Matematický model meniča

Predpokladáme, že napájacie napätie siete má harmonický priebeh a že okamžitú hodnotu napätia je možné vyjadriť rovnicou:

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t = \sqrt{2}U \sin \theta \quad (4)$$

Kde: $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvencia napájacieho napätia.

θ uhlová miera časovej funkcie.

Okamih zopnutia tyristora v kladnej resp. zápornej polperióde je vyjadrený uhlom fázového riadenia α .

Uhol fázového riadenia sa mení v intervale $\alpha \in \langle 0, 180^\circ \rangle$.

Pre uhol $\alpha = 0$ je tyristor úplne otvorený, pre uhol $\alpha = 180^\circ$ je tyristor úplne uzavretý. Napätie na záťaži je nulové.

Priebeh napätia na záťaži je možné vyjadriť pomocou Fourierovho radu v tvare:

$$u = \sqrt{2}U \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)] \quad (5)$$

Kde a_k, b_k sú koeficienty Fourierovho radu:

$$a_1 = \frac{1}{\pi} (\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha)$$

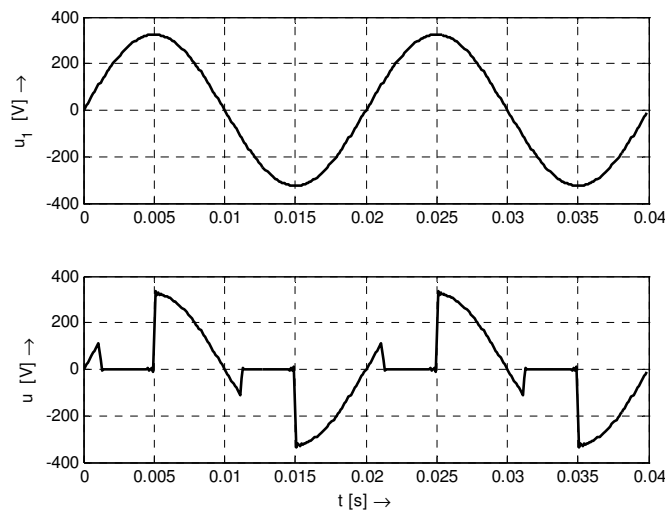
$$b_1 = \frac{1}{\pi} (\beta - \alpha - \sin \beta \cos \beta + \sin \alpha \cos \alpha)$$

$$a_k = \frac{1+(-1)^{k+1}}{2\pi} \left\{ \frac{1}{1-k} [\cos(1-k)\alpha - \cos(1-k)\beta] + \frac{1}{1+k} [\cos(1+k)\alpha - \cos(1+k)\beta] \right\}$$

$$b_k = \frac{1+(-1)^{k+1}}{2\pi} \left\{ \frac{1}{1-k} [\sin(1-k)\beta - \sin(1-k)\alpha] - \frac{1}{1+k} [\sin(1+k)\beta - \sin(1+k)\alpha] \right\}$$

Kde $k = 2, 3, 4, \dots$ sú celé čísla,
 β je uhol vypnutia tyristora

Uhol vypnutia sa pre jednotlivé stavy motora určí pomocou nomogramov dostupných v literatúre, prípadne graficky.



Obr. 3: Priebeh napájacieho a výstupného napätia meniča.

3. Výpočet statorových prúdov.

Okamžitú hodnotu prúdu môžeme vypočítať z diferenciálnej rovnice (3). Po dosadení vzťahu (5) do (3) dostávame diferenciálnu rovnicu:

$$\sqrt{2}U \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)] \right\} = R_{eq} \cdot i + \omega L_{eq} \frac{di}{d\theta} \quad (6)$$

Rovnica (6) predstavuje lineárnu diferenciálnu rovnicu prvého stupňa, ktorá má analytické riešenie. Všeobecné riešenie pre prúd:

$$i = \sqrt{2}U \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2} [a_k (R_{eq} \cos k\theta + k\omega L_{eq} \sin k\theta) + b_k (R_{eq} \sin k\theta - k\omega L_{eq} \cos k\theta)] \right\} + C \cdot e^{-\frac{R_{eq}}{\omega L_{eq}} \theta} \quad (7)$$

V prípade zanedbania prechodových dejov:

$$C \cdot e^{-\frac{R_{eq}}{\omega L_{eq}} \theta} = 0 \quad (8)$$

4. Výsledky výpočtov.

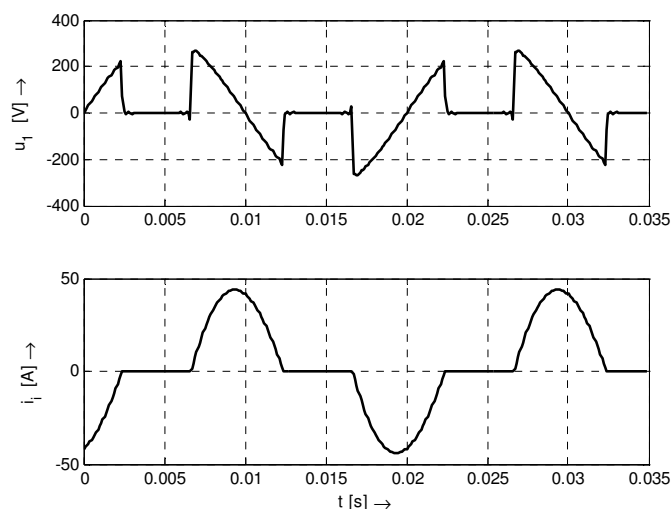
Pre výpočty priebehu prúdu boli použité parametre bežného trojfázového asynchrónneho motora nasledovných štítkových údajov:

$$P_N = 4,4kW; \quad 2p = 4; \quad U_{1N} = 380V, (Y); \quad n_N = 1380ot / min;$$

Z merania naprázdno a nakrátko boli vypočítané nasledovné parametre:

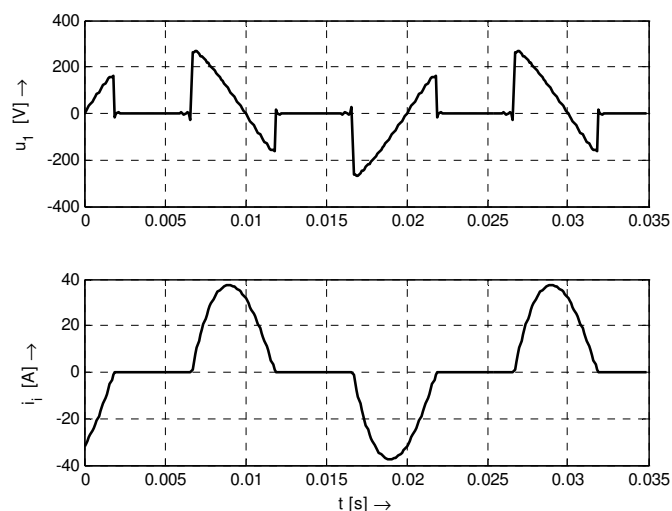
$$X_m = 47,2\Omega; \quad R_1 = 1\Omega; \quad R_2' = 0,56\Omega; \quad X_k = 3,11\Omega;$$

Na obrázku 4 sú uvedené priebehy záberového prúdu a napájacieho napätia pre uhol fázového riadenia tyristorov $\alpha = 120^\circ$.



Obr.4: Záberový prúd motora.

Na obrázku 5 je uvedený priebeh prúdu pri otáčkach $n = 1000 \text{ ot/min}$, čo odpovedá sklzu $s = 0,33$.



Obr.5: Prúd motora pri otáčkach $n = 1000 \text{ ot/min}$

5. Záver.

V príspevku je uvedený jednoduchý postup pri stanovení priebehu statorového prúdu asynchrónneho motora pri rozbehu cez striedavý tyristorový menič. Uvedeným postupom je možné stanoviť žiadanú hodnotu uhla fázového riadenia meniča pre dosiahnutie požadovanej hodnoty statorového prúdu.

PodĎakovanie

Príspevok vznikol za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja Slovenskej republiky, na základe projektu APVV 0510-06.

Literatúra

- [1] Lander, C.V: *Power electronics*; McGraw-Hill Book Company, 3 edition, 1993, London, England.
- [2] Doboš, J., Záskalická, M.: *Zbierka príkladov z matematiky III.*; Vydavateľstvo Technickej univerzity Košice, 2002, Slovensko.
- [3] Záskalická, M., Záskalický P.: Calculation of a current waveform of an AC converter by a Fourier series; XIII. International Symposium on Electric Machinery in Prague, ISEM 2005, pp. 194-199, 4-8. September 2005, Praha Česká republika.

ANOTACE PŘÍSPĚVKŮ

POSTEROVÉ
SEKCE

ELIMINACE HARMONICKÝCH VÍCEPULZNÍMI ZAPOJENÍMI USMĚRŇOVAČŮ

Stanislav KOCMAN

VŠB-TU Ostrava, FEI, Katedra obecné elektrotechniky, 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, 708 33, ČR,
stanislav.kocman@vsb.cz

1. Měřené struktury vícepulzních usměrňovačů

Použití vícepulzních usměrňovačů je jedním z efektivních způsobů, jak snížit vliv harmonických proudů generovaných střídavými regulovanými pohony do napájecí sítě. Je známa řada možností provedení a zapojení takovýchto typů usměrňovačů. Na katedře obecné elektrotechniky, VŠB-TU Ostrava, jsou pro výzkumné a výukové účely k dispozici jak dvanáctipulzní tak i osmnáctipulzní usměrňovače v různých variantách zapojení. Pro tento článek byly vybrány následující varianty jejich zapojení:

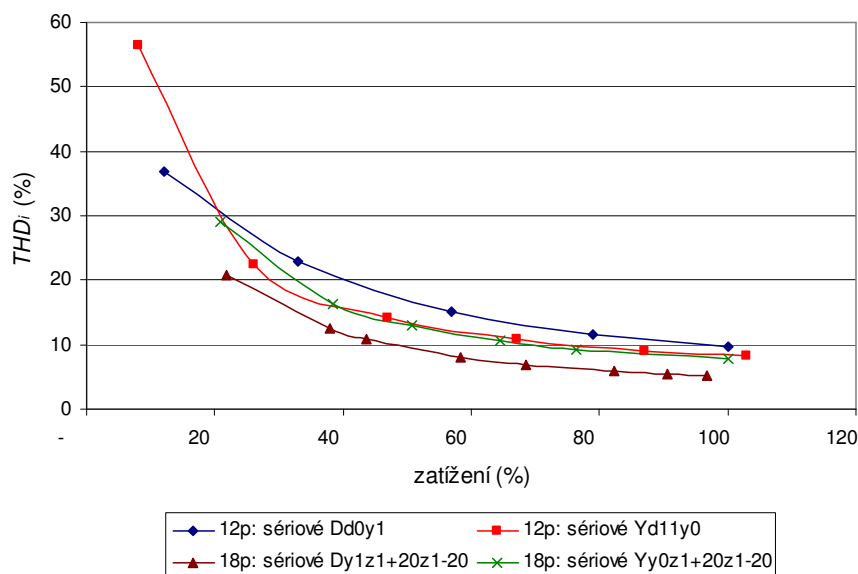
- Dvanáctipulzní usměrňovač: sériové zapojení Dd0y1 a Yd11y0
- Osmnáctipulzní usměrňovač: sériové zapojení Dy1z1+20⁰z1-20⁰ a Yy0z1+20⁰z1-20⁰

Ve strukturách obou typů usměrňovačů jsou použity speciální napájecí transformátory, třívinitý pro dvanáctipulzní, čtyřvinitý pro osmnáctipulzní usměrňovač. Vinutí těchto transformátorů musí být zkonstruováno tak, aby zajišťovalo mezi fázovými napětími sekundárních vinutí fázový posun 30⁰ u dvanáctipulzního, respektive 20⁰ u osmnáctipulzního.

K sekundárním vinutím napájecího transformátoru jsou připojeny trojfázové neřízené můstkové tj. šestipulzní usměrňovače, které jsou spojeny do série a připojeny ke stejnosměrnému meziobvodu nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým střídačem. Usměrňovače byly zatěžovány odporovou zátěží.

2. Analýza zpětných vlivů vícepulzních usměrňovačů

Měření a vyhodnocení bylo provedeno pomocí síťového analyzátoru BK-ELCOM pro dané zkresení napájecího napětí v napájecí síti. Vlastní experimentální měření byla prováděna v laboratoři F 328 na VŠB-TU Ostrava. V grafu na obrázku 1 je závislost celkového harmonického zkresení proudu THD_i odebíraného z napájecí sítě pro jednotlivá zapojení usměrňovačů v závislosti na jejich zatížení. Během měření hodnota celkového harmonického zkresení napětí THD_u v síti byla kolem 4%, napěťová nesymetrie pak kolem 0,3%.



Obr.1: Závislost THD_i síťových proudů jednotlivých sledovaných variant vícepulzních usměrňovačů na jejich zatížení

OVĚŘENÍ POUŽITÍ BARKHAUSENOVA ŠUMU K HODNOCENÍ HOMOGENITY MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ

Vladislav OCHODEK*, Vítězslav STÝSKALA**

* Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní,
** Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
VŠB-TU Ostrava,
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava–Poruba, Česká republika,
vladislav.ochodek@vsb.cz, vitezslav.styskala@vsb.cz

Anotace

Komponenty magnetických obvodů elektronových mikroskopů - pólové nadstavce jsou vyráběny poměrně složitým technologickým postupem obsahujícím řadu operací obrábění, několik druhů tepelné zpracování atd. Základní podmínkou pro správnou funkci pólového nadstavce v mikroskopu je homogenita magnetických vlastností po obvodu součásti. Odchyšky od homogenního rozložení jsou zdrojem vad jako astigmatismus, případně mohou nepříznivě ovlivnit dosažení požadovaných parametrů zařízení. Článek se zabývá možností využití BNT (Barkhausen Noise Testing) při hodnocení kvality součástí magnetických obvodů elektronických zařízení. Daná metoda byla ověřována na komponentech elektronových mikroskopů z materiálů 12014.9 behanit - o složení $0 \div 0,06\% \text{ C}$, $0 \div 0,45\% \text{ Mn}$, $0 \div 0,15\% \text{ Si}$, $0 \div 0,02\% \text{ P}$, $0 \div 0,02\% \text{ S}$, zbytkové Fe).

Druhým testovaným materiálem byla slitina FeNi 48-12Hc 150 HV o složení $0 \div 0,01\% \text{ C}$, $0 \div 0,5\% \text{ Co}$, $0 \div 0,1\% \text{ Cr}$, $0 \div 0,3\% \text{ Cu}$, $50 \div 52\% \text{ Fe}$, $0 \div 0,45\% \text{ Mn}$, $0 \div 0,3\% \text{ Si}$, $0 \div 0,3\% \text{ Mo}$, $48,25\% \text{ Ni}$, $0 \div 0,03\% \text{ P}$, $0 \div 0,01\% \text{ S}$.

Speciální elektronickou aparaturou lze snímat BNT informaci o velikosti a hustotě výskytu poruch homogenity a na základě měření sestavené profilogramy umožňují získat přehled o amplitudovém rozdělení a hustotě jím odpovídajících Barkhausenových impulsů. Dá se takto určit např. i profilogram mechanického napětí nebo zbytkového mechanického napětí po tepelném zpracování magnetického materiálu, apod.

Pro dané komponenty elektronového mikroskopu byla stanovena metodika měření a určené mezní hodnoty pro stanovení vyhovujících a nevyhovujících součástí.



Obr. 1: Ověřování vnějšího pólu měřením