

STUDY OF TRANSIENT REGIME OF THE FLUORESCENT LAMP MOUNTINGS USING MAGNETIC STARTER

Dan IOACHIM, Mircea V. NEMESCU, Dorin D. LUCACHE

“Gh. Asachi” Technical University of Iassy, Romania

The paper purpose is to model and interpret the transient regime of the fluorescent lamp mountings that use magnetic starters. These are a combination by two coils with different characteristics and their use lead to some advantages. The analysed transient regime can be described by a Duffing-type equation that is proper to the chaos and resonant jump phenomenon. With its help, the resonant curves and the flux jumps in the magnetic starter are highlighted. The simulation and experimental results are compared. The phenomenon that leads to a quick and sure ignition of the fluorescent lamp is pointed out.

1. Introduction

The fluorescent lamps fed with industrial frequency voltages uses, as supplementary circuit elements, inductive or capacitive ballast and a classic bimetal starter. This kind of starter presents various drawbacks as intense wear of the filaments during start-period, relative long time of lamp ignition, uncertain ignition at low temperatures.

Different solutions exist in order to eliminate these limitations. One of them is to use a magnetic starter, composed by saturating inductances with ferromagnetic core. Their operation is possible only in tandem connection with capacitive ballast [1]. The paper analyses the conditions in that a resonant jump appears and leads to the lamp ignition.

2. Theoretical considerations

A mounting with fluorescent lamps, having the ignition based on magnetic starters, is showed in Figure 1. The magnetic starter consists in a saturating nonlinear inductance L_s .

The equivalent electric diagram is given in Figure 2. The Kirchhoff voltage equation could be written:

$$\frac{d\Psi_t}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e \quad (1)$$

where $\Psi_t = \Psi_s + \Psi_n$ is the total magnetic flux of both windings L_s and L_n , and $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$

is the instantaneous value of the supplying voltage.

The shape of the characteristic $i(\Psi)$ is given in Figure 3 and could be approximate by a third order polynomial

$$i = m\Psi_t + n\Psi_t^3 \quad (2)$$

In this case, using the reference variables E_{m0} and $\Psi_0 = \omega E_{m0}$, with the notations $x = \Psi/\Psi_0$ and $\mathfrak{x} = E_m/E_{m0}$ for the normalised flux and supplying-voltage amplitude, the equation (1) becomes [3], [4], [5]:

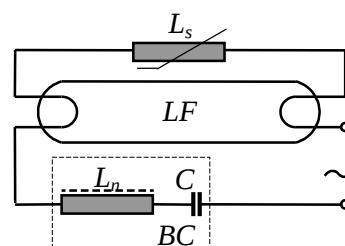


Figure 1 Mounting with magnetic starter

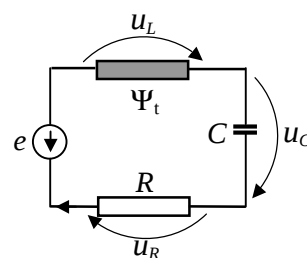


Figure 2 Equivalent circuit

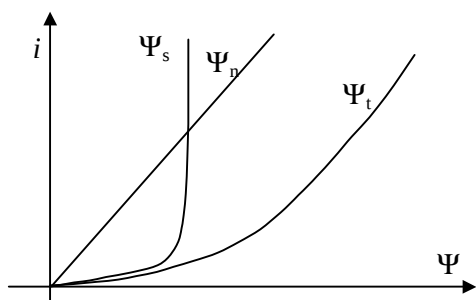


Figure 3 Magnetisation characteristics

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\alpha(1 + 3\beta x^2) \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(1 + \beta x^2) = \aleph \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

where $2\alpha = mR$ is called dumping coefficient, $\beta = n\Psi_0^2/m$ the nonlinear coefficient and $\omega_0 = \sqrt{m/C}$ the angular resonant frequency.

The generalisation of the results is done by neglecting the term $3\beta x^2$ [5], [6] and leads to:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\alpha \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(1 + \beta x^2) = \mathfrak{K} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

The last equality is a Duffing equation-type that has no exact analytic solutions. In order to solve it, the harmonic linearization method is applied. Supposing that the fundamental term of the permanent-regime solution is:

$$x(t) = a \cdot \cos \omega t \quad (5)$$

then (4) becomes:

$$\begin{aligned} & \left[(\omega_0^2 - \omega^2)a + \frac{3}{4}\beta\omega_0^2a^3 + \mathfrak{K} \cos \varphi \right] \cos \omega t - \\ & - 2(2\omega\alpha a + \mathfrak{K} \sin \varphi) \sin \omega t + \frac{1}{4}\beta\omega_0^2a^2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

that involves [2]

$$(\omega_0^2 - \omega^2)a + \frac{3}{4}\beta\omega_0^2a^3 + \mathfrak{K} \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

$$2\omega\alpha a + R \sin \gamma = 0$$

Removing φ between the equations (7) one obtains:

$$\left(\omega_0^2 - \omega^2 + \frac{3}{4}\beta\omega_0^2 a^2\right)^2 + 4\omega^2\alpha^2 = \frac{\mathfrak{K}^2}{a^2} \quad (8)$$

With new notations as $\mu = \omega/\omega_0$ and $\lambda = \alpha/\omega_0$, (8) can be transformed in:

$$\begin{aligned} & \frac{9}{16}\beta^2 a^6 - \frac{3}{2}\beta(\mu^2 - 1)a^4 + \left((\mu^2 - 1)^2 + 4\lambda^2\mu^2\right)a^2 - \\ & - \frac{\mathfrak{K}^2}{\omega_0^4} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

The graph of the function $\aleph = f(a)$ is called resonance curve. Having β as parameter and μ , λ and ω_0 as constants, this is presented in Figure 4.

If the supplying voltage is chosen so that $\mathfrak{N} \geq \mathfrak{N}_1$, then in the circuit it happens an increasing of the current through resonant jump (corresponding to the flux increasing from the point M to N). This current increasing causes an intense heating of the filaments. Because of the desaturation of the coil L_s , the operating point jump in an opposite sense from S to T and at the lamp's terminals an important overvoltage appears. This resonant jump phenomenon leads to a safe and quick ignition of the lamp.

After ignition, the lamp will be a short circuit for the nonlinear inductance and the magnetisation characteristic is

$$i = m\Psi_n \quad (10)$$

and, because in this case $\beta=0$, (9) becomes

$$\left((\mu^2 - 1)^2 + 4\lambda^2 \mu^2 \right) a^2 - \frac{\aleph^2}{\omega_0^4} = 0 \quad (11)$$

So, the stable operating point P will correspond to

$$A_3 = \frac{\aleph_1}{\omega_0^2} \left[(\mu^2 - 1)^2 + 4\lambda^2 \mu^2 \right]^{-0.5} \quad (11)$$

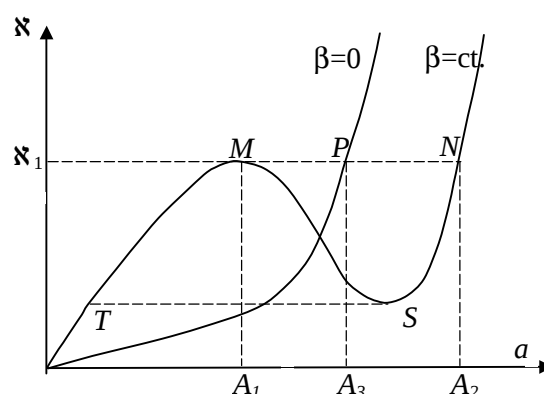


Figure 4 Magnetisation characteristics

Different values of β involve different values of a at which the resonant jump it happens (Figure 5). Considering the notations done for (3), a correlation between $\aleph$ and β can be deduced:

$$\beta \aleph^2 = \frac{n\omega^2 E_m^2}{m} \quad (12)$$

This hyperbole expressed in Figure 5 must be imposed as a superior limit for the normalised flux that corresponds to the resonance point.

If the r.m.s. values for voltage and current are used, then the operating equation of the circuit in Figure 2 is

$$U_L = \frac{I}{\omega C} + \sqrt{E^2 - R^2 I^2} \quad (13)$$

which admits the graphic representation showed in Figure 6. Here, U_L represents the

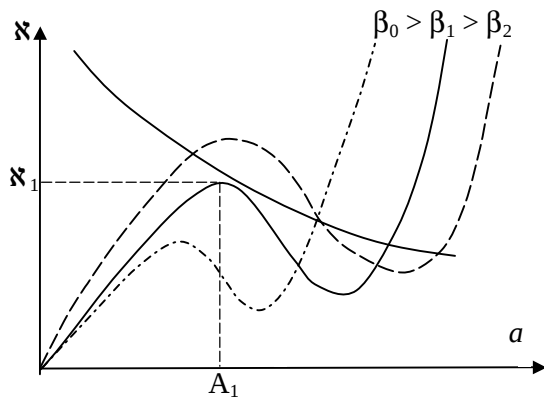


Figure 5 Correlation between $\aleph$ and β

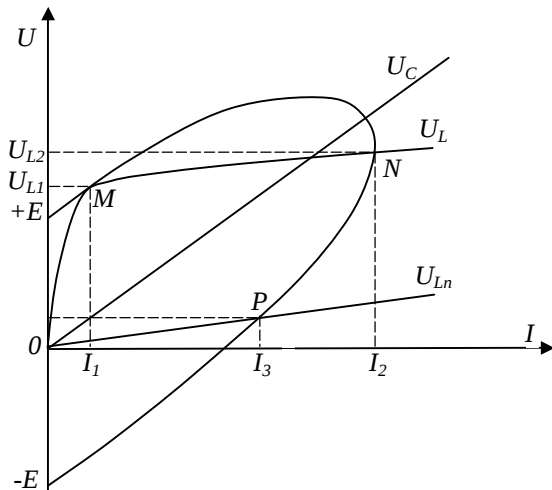


Figure 6 Operating characteristics in r.m.s. values

total voltage on the serried coils L_s and L_n , U_C represents the voltage drop across the capacitor and U_{Ln} represents the voltage after lamp ignition on the coil L_n .

At the resonance, the current jump from M in N is accompanied by a voltage jump, which consist in an increasing from U_{L1} to U_{L2} . The current in circuit keeps a capacitive character because of the used capacitive ballast, both after jump (point N in Figure 6) and in normal operating regime (point P in Figure 6).

3. Experimental results

The experimental setup consists in a mounting as the one in Figure 1 having a magnetic starter with $L_s=26.5$ H and $R_s=230 \Omega$ and a capacitive ballast with $L_n=1.4$ H, $R_n=28.4 \Omega$ and $C=3.75 \mu\text{F}$.

The measured magnetisation characteristics were approximated using the functions

$$i = 0.069\Psi_t + 0.133\Psi_t^3 \quad \text{- before ignition}$$

$$i = 0.455\Psi_n \quad \text{- after ignition}$$

A Levenberg-Marquardt algorithm found the function's coefficients and the results are compared in Figure 7.

In order to get the circuit behaviour, a simulating program in the Matlab-Simulink environment was performed. This program uses a fourth order Runge-Kutta algorithm to solve the Duffing equation.

The used simulation parameters are:

$$R=R_s+R_n=258 \Omega, \quad 2\alpha=17.83, \quad \omega_0=135.7 \text{ rad.s}^{-1}, \\ \beta=0.573, \quad E_{m0}=2.10^{-3}\text{V}, \quad \aleph=10^5, \quad \Psi_0=0.638 \text{ Wb}.$$

The Figure 8 shows the simulation and

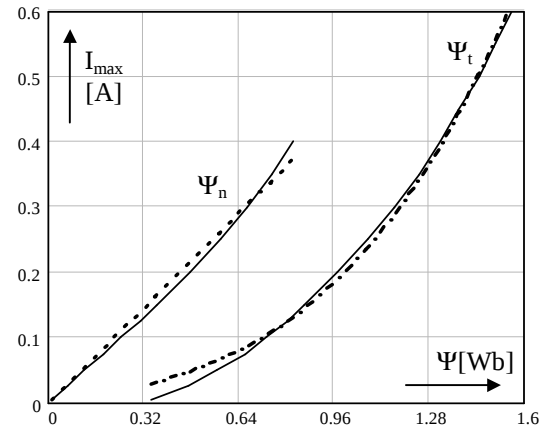
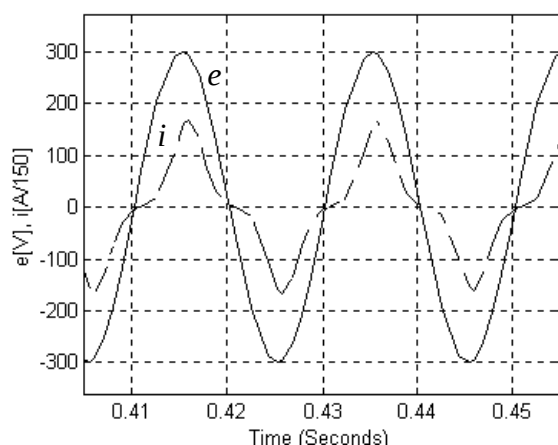
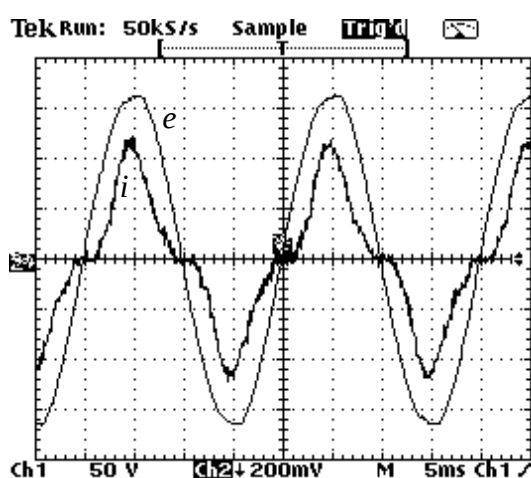


Figure 7 Experimental (solid line) and fitting (dashed line) magnetisation characteristics



(a)



(b)

Figure 8 Simulated (a) and experimental (b) excitation e and current i in the jump moment

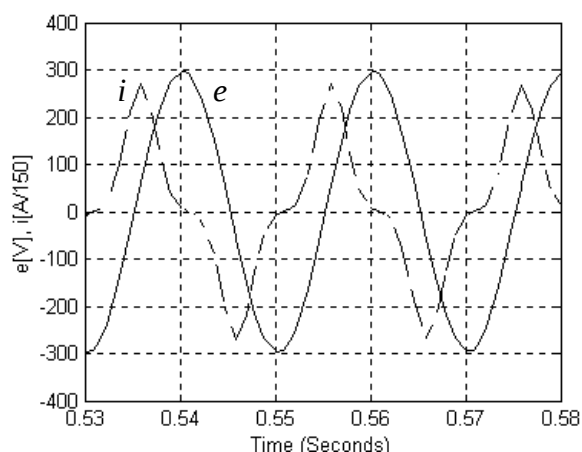
experimental results in a moment before but very close to the resonant jump moment. The operation point slides between M and N of the characteristic U_L given in Figure 6.

The Figure 9 presents the simulation and experimental results in a moment after the resonant jump moment. The operation point corresponds to N in Figure 6 and the capacitive character is obvious, but the lamp is still non-ignited.

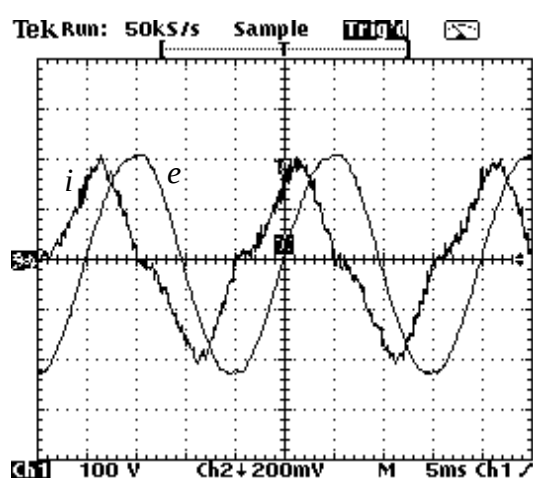
Can be noticed the similitude in shape and values between the simulated and experimental current characteristics.

4. Conclusions

The paper emphasised the possibility to model the operating of the circuits with fluorescent lamps having capacitive ballast and magnetic



(a)



(b)

Figure 9 Simulated (a) and experimental (b) excitation e and current i after the jump moment

starter, using the Duffing-type differential equation. In these cases, the lamp ignition is the outcome of a resonance-jump phenomenon of the current, followed by a voltage increasing.

The conditions necessary for jump producing and for starting of discharge are determined.

The simulation and experimental results show a good similitude and confirm the theoretical approach.

5. References

- 1 D. Ioachim, Starter magnetic pentru amorsarea lămpilor fluorescente cu vapori de mercur de joasă presiune. Brevet România nr. 73143
- 2 M. Nemescu and D.D. Lucache, "Self-Modulation in SISO Nonlinear Systems With Inertial Damping Described by Duffing Equation", 9th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and

- Systems, ICECS 2002, vol. III, pp. 979-983, September 15-18, 2002, Dubrovnik, Croatia
- 3 E. Philippow, Nichtlineare Elektrotechnik, Akademische Verlagsgesellschaft Gset und Portig, Leipzig, 1971
 - 4 Gh. Savin and H. Rosman, Circuite electrice nelineare și parametrice, Ed.Tehnică, București, 1973
 - 5 N.N. Bogoliubov et. al., Asimptoticheskie metodî v teorii nelineinîh kolebanii, Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoe literaturî, Moskva, 1958
 - 6 F. Dincă, C. Teodosiu, Vibrații neliniare și aleatoare, Ed. Academiei, București, 1969

Dan IOACHIM



Assoc. Prof., Ph.D.
Department of Industrial
Utilizations, Drives and
Automation
Electrical Engineering Faculty
"Gh. Asachi" Technical
University of Iassy
53 D. Mangeron Blvd.
700050 IASSY, Romania
Tel.: +40-232-212483
dioachim@eth-d.tuiasi.ro

Mircea V. NEMESCU



Professor, Ph.D.
Department of Industrial
Utilizations, Drives and
Automation
Electrical Engineering Faculty
"Gh. Asachi" Technical
University of Iassy
53 D. Mangeron Blvd.
700050 IASSY, Romania
Tel.: +40-232-212483
vnemescu@eth-d.tuiasi.ro

Dorin D. LUCACHE



Assoc. Prof., Ph.D.
Department of Industrial
Utilizations, Drives and
Automation
Electrical Engineering Faculty
"Gh. Asachi" Technical
University of Iassy
53 D. Mangeron Blvd.
700050 IASSY, Romania
Tel.: +40-232-212483
dlucache@net89mail.dntis.ro

STUDIUL REGIMULUI TRANZITORIU AL MONTAJELOR CU LĂMPI FLUORESCENTE CARE UTILIZEAZĂ STARTERE MAGNETICE

Lucrarea își propune să modeleze și interpreteze regimul tranzitoriu al montajelor cu lămpi fluorescente care folosesc startere magnetice. Acestea se realizează prin combinația a două bobine cu proprietăți diferite și utilizarea lor aduce unele avantaje. Regimul tranzitoriu analizat poate fi descris printr-o ecuație diferențială de tip Duffing, caracteristică fenomenelor de haos și salt rezonant. Cu ajutorul ei sunt trasate curbele de rezonanță și sunt puse în evidență salturile fluxului din starterul magnetic. Rezultatele obținute prin simulare au fost comparate cu cele experimentale. Se pune în evidență fenomenul care conduce la amorsarea rapidă și sigură a lămpilor fluorescente.

1. Introducere

Lămpile fluorescente alimentate cu tensiuni de frecvență industrială folosesc ca elemente suplimentare de circuit un balast inductiv sau capacitiv și un starter clasic cu bimetal. Acest tip de starter prezintă diverse dezavantaje precum uzura intensă a filamentelor pe durata pornirii, aprinderea lămpii durează relativ mult, amorsări nesigure la temperaturi scăzute.

Există mai multe soluții de eliminare a acestor dezavantaje. Una dintre acestea este folosirea unui starter magnetic, care se compune din inductanțe saturabile cu miez feromagnetic. Funcționarea acestuia este posibilă doar în conexiune tandem cu un balast capacitiv [1]. Lucrarea analizează condițiile în care apar salturile rezonante care conduc la aprinderea lămpii.

2. Considerente teoretice

În Figura 1 se arată un montaj cu lămpi fluorescente în care aprinderea este bazată pe startere magnetice. Starterul magnetic se compune dintr-o inductanță neliniară saturabilă L_s . Schema circuitului electric echivalent este dată în Figura 2. Ecuația de tensiuni a lui Kirchhoff poate scrisă (1) unde $\Psi_t = \Psi_s + \Psi_n$ este fluxul magnetic total al ambelor înfășurări L_s și L_n , iar $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ este valoarea instantanee a tensiunii de alimentare.

Received 10 June 2003
Reviewer Prof. Florin POP

Forma caracteristicii $i(\Psi)$ este dată în Figura 3 și ar putea fi aproximată cu un polinom de ordinul trei, (2). În acest caz, utilizând ca variabile de referință E_{m0} și $\Psi_0 = \omega E_{m0}$ și folosind notațiile $x = \Psi/\Psi_0$ și $\mathfrak{X} = E_m/E_{m0}$ pentru mărimile normate ale fluxului și amplitudinii tensiunii de alimentare, ecuația (1) devine [3], [4], [5]: (3), unde $2\alpha = mR$ este coeficientul de amortizare, $\beta = n\Psi_0^2/m$ coeficientul de nelinearitate și $\omega_0 = \sqrt{m/C}$ pulsația proprie.

Generalizarea rezultatelor se obține neglijând termenul $3\beta x^2$ [5], [6] ceea ce conduce la (4).

Ultima relație este o ecuație de tip Duffing care nu are soluții analitice exacte. Pentru rezolvarea ei se aplică metode de linearizare armonică. Presupunând că termenul fundamental al soluției de regim permanent este (5) atunci (4) devine (6) ceea ce implică relațiile (7), [2].

Eliminând pe φ între ecuațiile (7) se obține (8). Cu noile notații $\mu = \omega/\omega_0$ și $\lambda = \alpha/\omega_0$, (8) se poate transforma în (9).

Graficul funcției $\mathfrak{X} = f(a)$ se numește curbă de rezonanță. Considerându-l pe β ca parametru și μ , λ , ω_0 constante, acesta se prezintă în Figura 4.

Dacă tensiunea de alimentare este aleasă astfel încât $\mathfrak{X} \geq \mathfrak{X}_1$, atunci în circuit are loc o creștere a curentului prin salt rezonant (ce corespunde creșterii fluxului de la M la N). Această creștere a curentului cauzează o puternică încălzire a filamentelor. Datorită desaturării bobinei L_s punctul de funcționare sare în sens opus din S în T și la terminalele lămpii apare o supratensiune importantă. Acest fenomen de salt rezonant conduce la aprinderea rapidă și sigură a lămpii.

După aprindere, lampa devine un scurt circuit pentru inductanța neliniară și caracteristica de magnetizare este (10). Deoarece în acest caz $\beta=0$, (9) devine (11). Astfel, punctul stabil de funcționare P va corespunde ecuației (12). Valori diferite ale lui β implică valori diferite ale lui a pentru care apare saltul rezonant (Figura 5). Considerând notațiile făcute în (3), se poate deduce o corelație între $\mathfrak{X}$ și β (13).

Această hiperbolă care este reprezentată în Figura 5 trebuie să fie impusă ca limită superioară pentru fluxul normat în punctul de rezonanță.

Dacă se utilizează valorile efective ale tensiunii și curentului, atunci ecuația de funcționare a circuitului din Figura 2 este (14), care admite reprezentarea grafică din Figura 6. Aici, U_L reprezintă căderea de tensiune totală pe bobinele înseriate L_s și L_n , U_C reprezintă căderea de tensiune pe condensator și U_{Ln} reprezintă căderea de tensiune pe bobina L_n după ce lampa s-a aprins.

La rezonanță, saltul de curent din M în N este însoțit de un salt de tensiune de la U_{L1} la U_{L2} . Datorită balastului capacitiv utilizat, curentul din circuit păstrează un caracter capacitiv atât după salt (punctul N în Figura 6) cât și în regim normal de funcționare (punctul P din Figura 6).

3. Validare experimentală

Bancul experimental constă dintr-un montaj precum cel din Figura 1, starterul magnetic având $L_s=26,5$ H și $R_s=230$ Ω , iar balastul capacitiv $L_n=1,4$ H, $R_n=28,4$ Ω și $C=3,75$ μ F.

Caracteristicile de magnetizare măsurate s-au aproximat printr-o funcție polinomială (înainte de salt) și una liniară (după salt). S-a folosit un algoritm Levenberg-Marquardt pentru găsirea coeficienților funcțiilor și în Figura 7 se compară rezultatele obținute.

Pentru a analiza comportarea circuitului s-a utilizat un program de calcul realizat în mediul Matlab-Simulink. Acest program utilizează un algoritm Runge-Kutta de ordinul 4 pentru rezolvarea ecuației Duffing. Parametrii de simulare utilizați sunt precizați.

Figura 8 arată rezultatele simulării și experimentale într-un moment anterior dar foarte apropiat de momentul saltului rezonant. Punctul de funcționare glisează între M și N pe caracteristica U_L dată în Figura 6.

Figura 9 prezintă rezultatele simulării și experimentale într-un moment ulterior saltului rezonant. Punctul de funcționare corespunde lui N din Figura 6 și caracterul capacitiv este evident, dar lampa încă nu este aprinsă.

Se observă similitudinile de formă și amplitudine între caracteristicile simulate și experimentale ale curentului.