

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ЗАДВИЖВАЩ ЕЛЕКТРОМАГНИТ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

Мустафа Ебазир\*, Петър Пенчев\*\*

Република България, 8000 Бургас, бул. „Проф. Яким Якимов“ №1, Университет „Проф. д-р.  
Асен Златаров“, Факултет по технически науки

\* Катедра „Компютърни системи и технологии“, студент II курс, [mustafa\\_ebazir@abv.bg](mailto:mustafa_ebazir@abv.bg)

\*\* Катедра „Електроника, електротехника и машинознание“, студент, IV курс,  
[penchev\\_93@abv.bg](mailto:penchev_93@abv.bg)

### ВЪВЕДЕНИЕ

Преходните процеси в електрическите вериги играят изключително голяма роля в техниката. В много устройства, като импулсни и радиоелектронни схеми, системи за автоматично регулиране и др., преходните процеси представляват нормален режим на работа. При къси съединения и аварийни изключения в електроенергийната система се получават много големи токове и напрежения, които са опасни за електротехническите устройства.

При изследване на преходните процеси се приема, че измененията в електрическата верига се осъществяват мигновено в резултат на дадена комутация на електрическата верига. В действителност преходните процеси протичат за определено изключително малко време – за части от  $\mu s$ , части от  $ms$  или части от секундата.

Преходните процеси в една електрическа верига зависят от наличието на индуктивните и капацитивните елементи ( $L, C$ ). В тези елементи се съхранява електромагнитна енергия. При комутация се изменя енергийното състояние на електрическата верига. Електрическата верига преминава от един режим към друг режим. Това е свързано с увеличаване или с намаляване на електромагнитната енергия, т.е. с изменение на електромагнитната енергия в електрическата верига. За да се създаде електрически апарат с висока надеждност (голяма механическа и електрическа износоустойчивост и достатъчно бързодействие), е необходимо да се изследват и да се познават преходните процеси, респективно динамичните процеси в него. Главна роля играе скоростта на движение на котвата във функция от преместването  $y = f(x)$ . Именно скоростта определя времето за движение на котвата, а също и натрупването на кинетична енергия при нейното движение, която в момента на допиране на котвата до полюсите се превръща в енергия на удара. Характерът на изменение на скоростта определя

противо е.д.н.  $\frac{d\Psi}{dt}$ , което възниква в намотката на електромагнита при движение на котвата.

По такъв начин, като се има предвид  $v = f(x)$  към електромагнита могат да се поставят различни изисквания по отношение на бързодействие и дълготрайност.

Целта на настоящата разработка е изследване на преходните процеси при включване на постояннотоков електромагнит, като се определи основната му динамична характеристика - зависимостта на тока през бобината на електромагнита във функция от времето на движение на котвата  $i_L = f(t)$ , както и зависимостта на пада на напрежение върху бобината във функция от времето на движение на котвата  $u_L = f(t)$  и съответно времето за практическата продължителност на преходния процес  $t_{nn}$ .

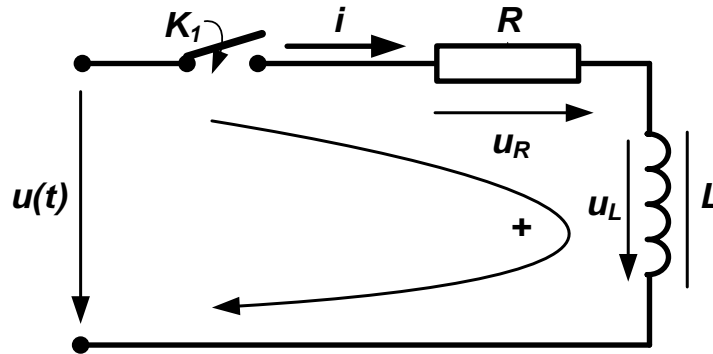
### ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

#### Графичен метод за изследване на преходните процеси

За изследване на преходните процеси в нелинейни  $EB$  от първи ред се използват графични или числени методи.

Разглежда се включване на нелинейна бобина (електромагнит) към източник на

постоянно напрежение (фиг.1).



фиг.1. Включване на нелинейна бобина към източник на постоянно напрежение

Диференциалното уравнение за режима на веригата е

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \tag{1}$$

където  $\Psi = L \frac{di}{dt}$  - потокосцепление,  $Wb.s$ ;

$L$  – индуктивност на бобината,  $H$ ;

$R$  – съпротивление на проводника на бобината,  $\Omega$ ;

$i$  – ток, протичащ през бобината,  $A$ ;

$u$  – захранващо напрежение,  $V$ .

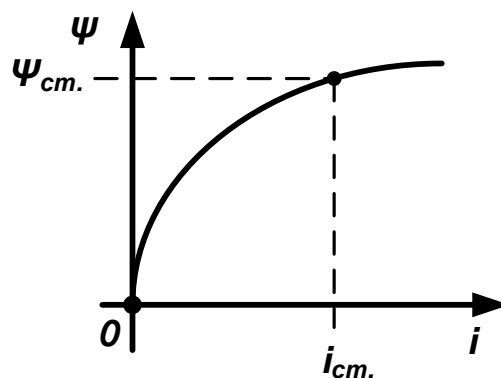
Вебер-амперната характеристика на бобината е  $\Psi = \Psi(i)$  (фиг.2). Тя може да се снее експериментално или да се получи като се използват апроксимиращи изрази.

Независимите начални условия се определят при липса на енергийни запаси в магнитното поле на бобината  $i(0^-) = i(0) = i(0^+) = 0$  и  $\Psi(0^-) = \Psi(0) = \Psi(0^+) = 0$ .

От диференциалното уравнение (1) се определя времето за практическата продължителност на преходния процес  $t_{nn}$  чрез интегриране от 0 до  $t$  :

$$dt = \frac{d\Psi}{u - R \cdot i} \tag{2}$$

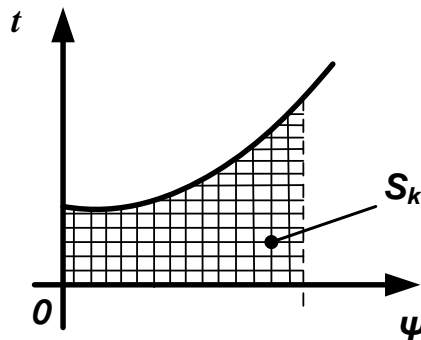
$$t_{nn} = \int_0^{\Psi_{cm.}} \frac{d\Psi}{u - R \cdot i} \tag{3}$$



фиг.2. Вебер-амперна характеристика на бобината  $\Psi = \Psi(i)$

От уравнение (3) се вижда, че времето  $t$ , за което пълният магнитен поток  $\Psi$  достига

установената си стойност  $\Psi_{cm}$ , е решение на интеграла (3). Този интеграл може да се реши графично (фиг.3), като се интегрира функцията  $t = f(\Psi)$ .



фиг.3. Графично решение на интеграла (3)

За различни стойности на пълния магнитен поток  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots, \Psi_k, \dots, \Psi_{ст.}$ , графично се решава уравнение (3), като за съответната стойност на пълния магнитен поток се определя редицата от времена  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ . Времето  $t_k$ , за което се достига стойността  $\Psi = \Psi_k$ , е пропорционално на площта  $S_k$ , като се отчете мащабът на графичното построение. Стационарният магнитен поток  $\Psi_{ст.}$  се установява достатъчно дълго време след комутацията и съответства на стационарния постоянен ток  $i_{ст.} = \frac{u}{R}$  (фиг.2).

Съответните стойности на тока през бобината се намират от вебер-амперната характеристика (фиг.3):  $i_1 = i(\Psi_1), i_2 = i(\Psi_2), i_3 = i(\Psi_3), \dots, i_k = i(\Psi_k)$ .

### Числени методи за изследване на преходните процеси

Съставя се система от нелинейни диференциални уравнения, която включва уравнението на веригата (1), експериментално снетата зависимост  $i = f(t)$ ,  $\Psi = f(i)$  – определя се от зависимостта  $u_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} = f(t)$ , като се вземе предвид и уравнението на противодействащите сили в електромагнита.

Числените методи са свързани с численото решаване на системата нелинейни обикновени диференциални уравнения. Решението се получава в числена форма в определен брой точки във времето. При численият метод с резисторните модели анализа на преходния процес се свежда до анализа на постоянния стационарен режим в съответната резистивна верига. Числено се интегрират диференциалните зависимости, свързани с бобината.

Времето за затихване на преходния процес е  $t_{zm} = (3 \div 4)T$ , s,

където  $T = \frac{L}{R}$ , s и се нарича електрическа времеконстанта.

Първоначално запасената енергия в магнитното поле на бобината е  $W = \frac{1}{2}Li^2$  и се изразходва по време на преходния процес под формата на отделена в резистора топлина.

При стационарен режим действа външният източник на енергия  $u(t)$  (фиг.1.). Ключът  $K_1$  се затваря. Съгласно вторият закон на Кирхоф стационарният процес се описва с нехомогенното диференциално уравнение:  $u_L + u_R = u$ ,

където  $u_L = L \frac{di}{dt} = 0$ , а  $u_R = Ri$ .

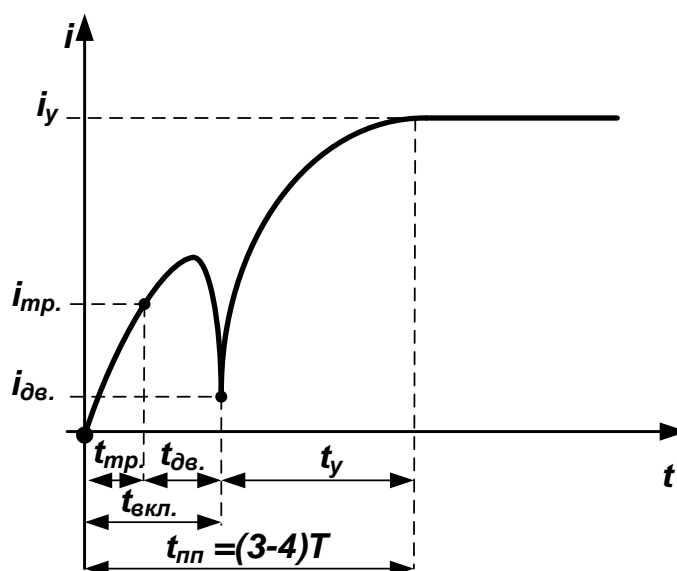
$$L \frac{di}{dt} + Ri = u \tag{4}$$

Стационарната съставка на тока  $i_{cm}$ . е:

$$i_{ст.} = \frac{u}{R} \tag{5}$$

Графически зависимостта  $i = f(t)$  е показана на фиг.4. По време на преходния процес токът се изменя по сложен закон във времето. Времето за тръгване на котвата  $t_{mp}$  зависи от активните загуби в магнитопровода (токове на Фуко), които се отчитат при измерването на  $i = f(t)$  и  $\frac{d\Psi}{dt} = f(t)$ . При движение на котвата потокосцеплението  $\Psi = L.i$  се изменя, а електрическият ток зависи от изменението на скоростта му  $\frac{di}{dt}$ , от изменение на индуктивността  $L$  и на скоростта на индуктивността на възбудителната намотка  $\frac{dL}{dt}$ .

От зависимостта на тока през бобината от времето  $i = f(t)$  при движение на котвата на електромагнита чрез компютърна програма могат да се получат зависимостите на е.д.н. на самоиндукцията  $\frac{d\Psi}{dt} = f(t)$  и потокосцеплението  $\Psi = f(t)$  във функция от времето, както и зависимостта на потокосцеплението от тока през бобината  $\Psi = f(i)$ .



фиг.4. Зависимост на тока през бобината от времето  $i = f(t)$  при движение на котвата на електромагнита, където  $t_{oe}$  - време за движение на котвата,  $t_y$  – време за установяване на тока,  $t_{пп}$  – време за практическата продължителност на преходния процес,  $T$  – електрическа времеконстанта

Определянето на динамичните характеристики с числени методи може да стане с готови програмни продукти. Използването на готови програмни продукти безспорно улеснява изследването, но това е свързано със значителни финансови разходи, наложени с течение на времето за осъвременяване на наличния продукт. От тази гледна точка се оказва, че по-целесъобразно е разработването на собствени програмни продукти. По този начин се осигурява възможност за непрекъсната надстройка на основния продукт.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

### Схема на опитната постановка

За измерванията е използван осцилоскоп с “памет” RIGOL DS1000D, свързан към персонален компютър и възможност за записване на измерените данни във файл.

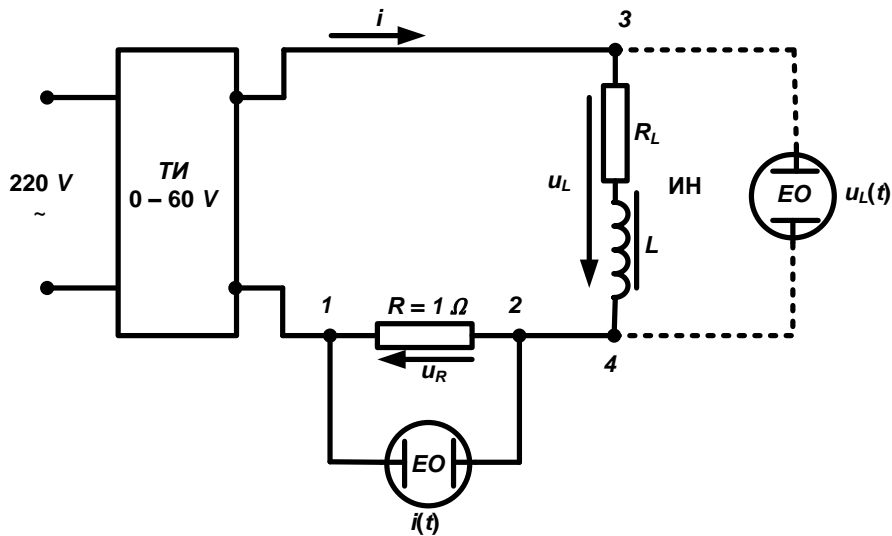
Опитната постановка (фиг.5) се състои от измервателна схема, електромагнит за

постоянен ток и стабилизирани постоянноток източници. Изводи 1-2 и 3-4 се свързват към двуканален осцилоскоп с “памет” и компютър (каналите за измерване на времето; пада на напрежение в резистора със съпротивление  $R$ , пропорционален на протичащия в намотката ток -  $U_{R1} = f(t)$ ; пада на напрежение в  $ИН$ , навита успоредно с проводника на намотката, пропорционален на противо е.д.н. в намотката -  $u_L = \frac{d\Psi}{dt} = f(t)$ ).

Захранва се възбудителната намотка на електромагнита с напрежение от стабилизирани постоянноток източник  $ТИ$ , равно на номиналното напрежение  $U_n$  на намотката. Електронният осцилоскоп измерва електрическите сигнали в динамичен режим (преходния процес).

Техническите данни на електромагнита са:

- номинално напрежение на намотката  $U_n=40\text{ V}$ ;
- електрическо съпротивление на намотката  $R=53\ \Omega$ ;
- брой навивки на намотката  $N=2650$  нав.;
- критична въздушна междина  $\delta_{кр.}=2,4\text{ mm}$ ;
- начална въздушна междина  $\delta_{нач.}=6,4\text{ mm}$ ;
- крайна въздушна междина  $\delta_k\cong 0\text{ mm}$ ;
- маса на котвата  $m=1,27\text{ N}$ ;
- начална противодействаща сила  $F_{np.n.}=3,13\text{ N}$ ;
- крайна противодействаща сила  $F_{np.кр.}=23,28\text{ N}$ ;
- критична противодействаща сила  $F_{np.n}=17,39\text{ N}$ ;
- време за тръгване на котвата  $t_{mp.}=0,0112\text{ s}$ ;



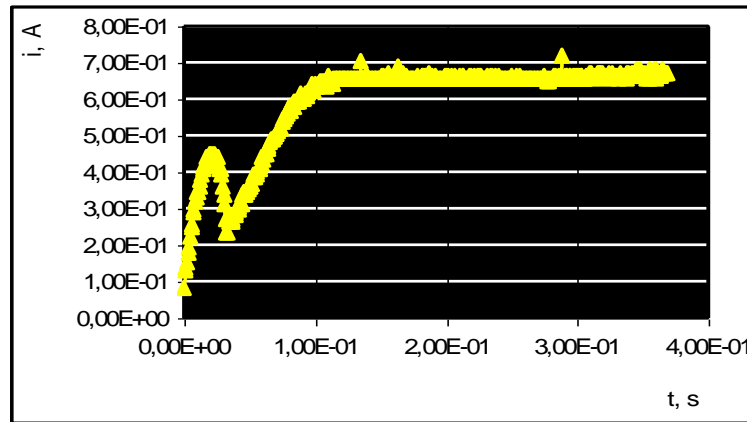
фиг.5. Схема на опитната постановка

#### Резултати от експерименталните изследвания

На фиг.6 е дадена зависимостта на  $i = f(t)$  при включване на електромагнита. От осцилограмите при зададеното време за тръгване на котвата  $t_{mp.}=0,0112\text{ s}$ , са отчетени:

- време за движение на котвата  $t_{де.}= 0,0188\text{ s}$
- време за включване на електромагнита  $t_{вкл.}= 0,030\text{ s}$
- време за установяване на тока до стационарната му стойност  $t_y= 0,090\text{ s}$
- време за практическата продължителност на переходния процес  $t_{mт}= 0,120\text{ s}$
- електрическа времеконстанта  $T = 0,030\text{ s}$
- ток за движение на котвата  $i_{де.}= 0,376\text{ A}$
- ток за тръгване на котвата  $i_{mp.}= 0,344\text{ A}$

време за установяване на тока до стационарната му стойност  $i_y = 0,750 \text{ A}$   
 потокосцепление  $\Psi = 0,760 \text{ V} \cdot \text{s}$



фиг.6.Зависимостта на  $i = f(t)$  при включване на електромагнита

От осцилограмите при зададеното време за тръгване на котвата  $t_{mp.} = 0,0112 \text{ s}$ , са отчетени:

време за движение на котвата  $t_{\text{дв.}} = 0,0188 \text{ s}$

време за включване на електромагнита  $t_{\text{вкл.}} = 0,030 \text{ s}$

време за установяване на тока до стационарната му стойност  $t_y = 0,090 \text{ s}$

време за практическата продължителност на преходния процес  $t_{mn} = 0,120 \text{ s}$

електрическа времеконстанта  $T = 0,030 \text{ s}$

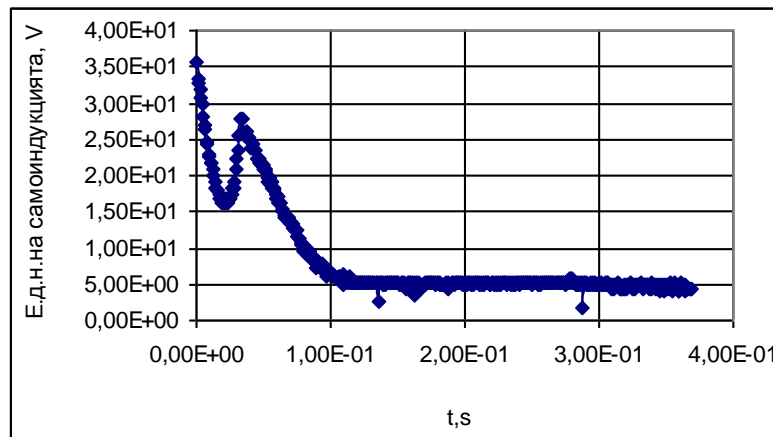
ток за движение на котвата  $i_{\text{дв.}} = 0,376 \text{ A}$

ток за тръгване на котвата  $i_{mp.} = 0,344 \text{ A}$

време за установяване на тока до стационарната му стойност  $i_y = 0,750 \text{ A}$

потокосцепление  $\Psi = 0,760 \text{ V} \cdot \text{s}$

На фиг. 7 е дадена зависимостта на  $u_L = f(t)$  при включване на електромагнита.



фиг.7.Зависимост на  $u_L = f(t)$  при включване на електромагнита

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Реализирана е  $RL$ -верига на постоянен ток електромагнит.
2. Заснети са осцилограмите на  $i(t)$  и  $u_L(t)$  по време на преходния процес при включване на електромагнита чрез електронен осцилоскоп.
3. Зависимостта на  $i(t)$  отчита цялата динамика на движението на котвата. В началния

момент при  $t = 0$  се взема предвид остатъчният магнитен поток в магнитопровода, това води до увеличаване на точността при измерването.

4. Зависимостта на тока от времето  $i = f(t)$ , получена по експериментален път, изключва допускания по отношение на пренебрегване на магнитното съпротивление, загубите в стоманата, триенето на подвижните части и др.

5. От получените осцилограми са отчетени времеконстантата и времето за практическата продължителност на преходния процес:  $T = 0,030 \text{ s}$ ,  $t_{mn} = 0,120 \text{ s}$ , както и времето за движение на котвата и времето за включване на електромагнита:  $t_{\text{дв.}} = 0,0188 \text{ s}$ ,  $t_{\text{вкл.}} = 0,030 \text{ s}$ .

6. Експерименталните изследвания са направени под ръководството на доц. Стоянова. Те могат да се използват за обучение на студентите от специалностите „Електротехника“, „Електроника“ и „Компютърни системи и технологии“, Образователно-квалификационни степени „Магистър“, „Бакалавър“ и „Професионален бакалавър“ в Университет „Проф. д-р Асен Златаров“ по дисциплините Теоретична електротехника и Електрически апарати.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Брандински, К. и др., Ръководство за лабораторни упражнения по теоретична електротехника, ИК „Кинг“, София, 2004.
2. Стоянова, С., Теоретична електротехника част втора, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, Бургас, 2015.
3. Стоянова, С., Ръководство за лабораторни упражнения по теоретична електротехника, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, Бургас, 2014.
4. Стоянова, С., Приложна електротехника част първа, Издателство „Божич“, Бургас, 2012.
5. Фархи, С., С. Папазов, Теоретична електротехника част 1, ДИ „Техника“, София, 1987.