

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ «ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ – СПЕЦІАЛЬНИЙ ТРАНСФОРМАТОР» УСТАНОВКИ ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬТОВИХ СУПЕРТОНКИХ ВОЛОКОН

В.П. Стяжкін*, канд. техн. наук, П.П. Подейко**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: tems@ukr.net

Розглянуто особливості математичного моделювання та проведено аналіз електромагнітних процесів у системі «тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор» (ТРС–СТ). Запропоновано непрямий метод вимірювання температури фільтрної пластини, що базується на контролі струмів первинних обмоток СТ. Створено імітаційну модель системи ТРС–СТ, що дає змогу враховувати нелінійність характеристик матеріалу осердя трансформатора й нелінійність опору навантаження для досягнення необхідної точності відображення електромагнітних процесів. Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність розробленої математичної моделі, розходження кривих перехідних процесів, отриманих за допомогою моделювання та кривих, отриманих під час проведення досліджень на експериментальній установці, складає не більше 5 % і дає змогу оптимізувати багатоконтурні системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами. Бібл. 9, рис. 12.

Ключові слова: електротермічна установка, базальтові супертонкі волокна, фільтрний живильник, тиристорний регулятор, спеціальний трансформатор.

Вступ. Проектування та реалізація систем регулювання струму для електротермічних установок (ЕТУ) неможливі без глибокого аналізу динамічних режимів роботи ЕТУ. Особливий інтерес викликають дослідження нестационарних процесів, що впливають на розрахункові параметри силових елементів систем «тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор». Застосування нових методів та засобів керування установкою із виробництва базальтових супертонких волокон (БСТВ), за допомогою математичного та імітаційного моделювання системи «тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор – активне навантаження», що враховує нелінійні властивості осердя трансформатора та нелінійну залежність температури нагрівального елемента установки в зоні утворення первинних волокон від величини первинного струму трансформатора, дає можливість підвищити якість вихідного продукту та ефективність роботи ЕТУ [1].

Формування струмової системи живлення фільтрного живильника дає змогу забезпечити оптимальну роботу установки виробництва БСТВ. Регулювання струму фільтрних живильників потребує використання системи «тиристорний регулятор струму (ТРС) – спеціальний трансформатор (СТ)». Найпростіша функціональна схема такої системи зображена на рис. 1.

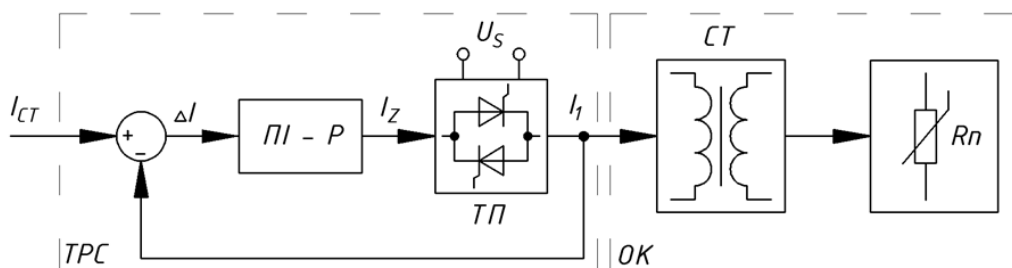


Рис. 1

Тиристорний регулятор струму складається (рис. 1) з ПІ-регулятора струму і тиристорного перетворювача (ТП) з імпульсно-фазовим керуванням, підключеного до первинної об-

мотки спеціального трансформатора, навантаженням вторинної обмотки якого є нелінійний активний опір Rn , що є еквівалентом фільтрного живильника.

Моделювання та дослідження режимів. Для проведення аналізу електромагнітних перехідних і сталих процесів у системі ТРС–СТ необхідно розробити математичні моделі системи для основних електричних схем, які реалізують процес регулювання струму фільтрних живильників в установках виробництва БСТВ. Таке імітаційне моделювання виконується за допомогою програми SIMULINK програмного пакета MATLAB.

Для розрахунку та моделювання силових електротехнічних комплексів створено широкий набір програм і алгоритмів, які суттєво розширюють можливості дослідження й аналізу електромагнітних процесів у системі ТРС–СТ. Але в більшості стандартних програм і алгоритмів не розглядаються питання моделювання СТ, які входять в досліджуваний комплекс, або вони представлені у формі лінійної схеми [2].

У процесі моделювання треба враховувати нелінійність характеристик матеріалу осердя трансформатора і нелінійність опору навантаження Rn для досягнення необхідної точності відображення електромагнітних процесів, тому модель трансформатора у вигляді блока «Linear Transformer» із бібліотеки «SimPowerSystem» необхідно замінити новою моделлю, яка в реальному пристрої та в просторі математичних об'єктів наблизить адекватність відображення всіх процесів, що протікають.

Основні допущення під час розроблення нелінійної математичної моделі СТ [3, 4]:

- магнітна система СТ представлена схемою заміщення з нелійними зосередженими магнітними опорами, які визначаються апроксимуванням основної кривої намагнічування;
- повні поточозчеплення фаз представлені як суми поточозчеплень від основного магнітного потоку і поточозчеплення розсіювання обмоток фази;
- поточозчеплення розсіювання обмоток СТ є лійними функціями від струмів;
- не враховуються ємнісні зв'язки між елементами обмоток, між обмотками і заземленими частинами магнітопроводу, а також струми витоку ізоляції.

Розширимо набір стандартних елементів бібліотеки «SimPowerSystem», створивши структурну модель складного електричного кола трансформатора за допомогою програми SIMULINK [2].

Модель трансформатора (рис. 2) складається з двох структурних блоків, які охоплені зворотним зв'язком за магнітним потоком.

Блок mW – модель електричної схеми обмоток трансформатора, де вхідна змінна E є ЕРС джерела живлення, F – магнітний потік; вихідна змінна – струм I , що протікає в обмотках трансформатора.

Блок mF – модель магнітної схеми. Для визначення електрорушійних сил, що наводяться у відповідних обмотках, використовуються результати розрахунку магнітного кола.

Схему заміщення магнітного кола спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою показано на рис. 3. На схемі вказані $w_1 i_1$ та $w_2 i_2$ – магніторушійні сили первинної і вторинної обмоток, Hl – падіння магнітної напруги в нелінійному опорі на феромагнітній ділянці, H – напруженість магнітного поля, l – довжина середньої магнітної лінії осердя [5].

Рівняння магнітного стану спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою має вигляд:

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 = Hl. \quad (1)$$

Складемо систему рівнянь Кірхгофа для двох індуктивно пов'язаних обмоток і активного нелінійного навантаження:

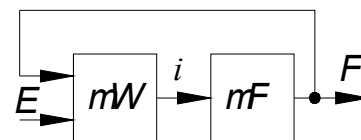


Рис. 2

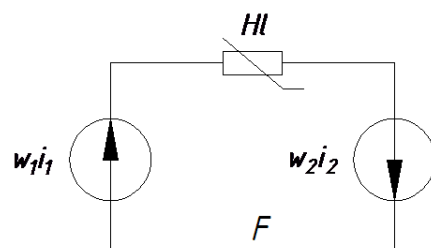


Рис. 3

$$\begin{cases} U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + L_{S1.2} \frac{di_2}{dt} + w_1 \frac{dF}{dt} + R_1 i_1; \\ -U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + L_{S2.1} \frac{di_1}{dt} + w_2 \frac{dF}{dt} + R_2 i_2; \\ U_2 = k_n R_n i_2. \end{cases} \quad (2)$$

де U_1, U_2 – напруги первинної і вторинної обмоток; $L_{S1.1}, L_{S2.2}$ – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток; $L_{S1.2}, L_{S2.1}$ – індуктивності розсіювання пари обмоток; k_n – коефіцієнт, що враховує нелінійний характер активного опору навантаження, $k_n = f(R_n)$; R_1, R_2 – активний опір обмоток; w_1, w_2 – число витків обмоток трансформатора; F – магнітний потік.

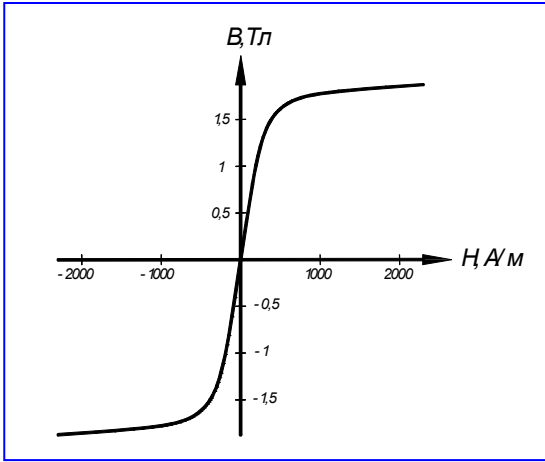


Рис. 4

У диференціальних рівняннях електромагнітних зв'язків трансформатора (1) і (2) нелінійним є магнітний потік F , що залежить від струму намагнічування. Цій залежності відповідає нелінійна функція $B = f(H)$, тобто крива намагнічування (рис. 4) для осердя з високолегованої холодновальцованої сталі 3413 [2].

У діапазоні робочих струмів намагнічування залежність магнітного потоку F від струму намагнічування можна вважати лінійною (рис. 4), тому систему рівнянь (1) і (2) можна представити в операторній формі [6, 7]:

$$\begin{cases} w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p) = H(p)l; \\ U_1(p) = pL_{S1.1} I_1(p) + pL_{S1.2} I_2(p) + pw_1 F(p) + R_1 I_1(p); \\ -U_2(p) = pL_{S2.2} I_2(p) + pL_{S2.1} I_1(p) + pw_2 F(p) + R_2 I_2(p); \\ U_2 = k_n R_n I_2(p). \end{cases} \quad (3)$$

Рівняння (3) представлено у вигляді:

$$\begin{cases} H(p) = \frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p)}{l}; \\ B = f(H), F = B \cdot S; \\ F = f\left(\frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p)}{l}\right) \cdot S; \\ I_1(p) = \frac{U_{LS1.1}(p)}{pL_{S1.1}}; \\ U_{LS1.1} = U_1(p) - pL_{S1.2} I_2(p) - pw_1 F(p) - R_1 I_1(p); \\ I_2(p) = \frac{U_2(p)}{k_n R_n}; \\ k_n = f(R_n); \\ -U_2(p) = pL_{S2.2} I_2(p) + pL_{S2.1} I_1(p) + pw_2 F(p) + R_2 I_2(p), \end{cases} \quad (4)$$

де p – оператор диференціювання; B – магнітна індукція; S – площа перетину осердя.

Система рівнянь (4) є математичною моделлю трансформатора з однією первинною обмоткою за зазначених вище припущень, якій тотожна структурна схема рис. 5, створена за

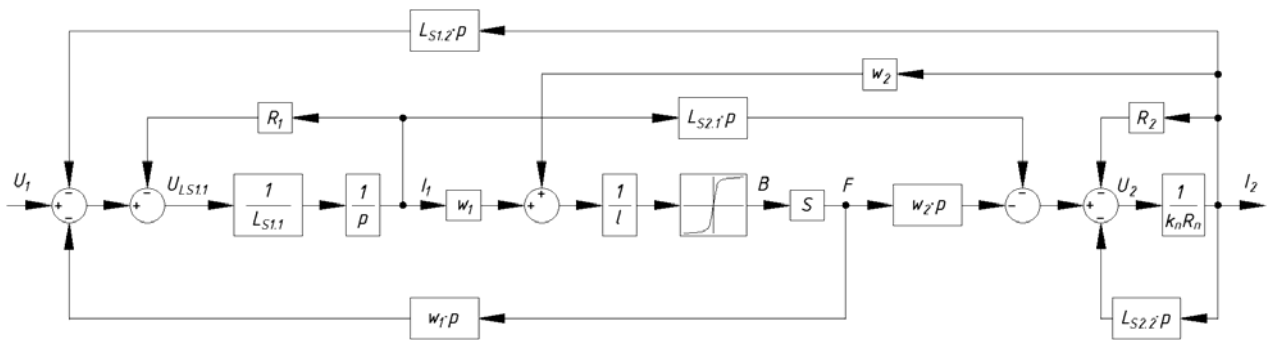


Рис. 5

правилами теорії автоматичного керування, і дає змогу аналізувати систему досить простими методами.

Цю структурну схему доцільно модифікувати, використовуючи методика, викладену в [8, 9]. Для цього перетворимо ланку Rn і перенесемо точки знімання вхідних сигналів ланок $L_{S12}p$, $L_{S21}p$ на входи відповідних інтеграторів, виключаючи одночасно операції диференціювання. Введемо також аперіодичні ланки з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці, і малою постійною часу T у прямий канал обчислення потоку послідовно з блоком S . Отримана структурна схема (рис. 6) також відповідає рівнянням (4), але спрощує їхнє розв’язання.

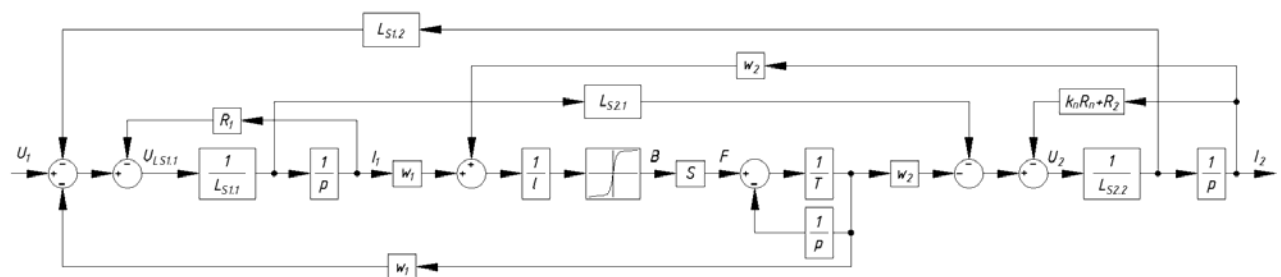


Рис. 6

Зростання температури в локальній зоні металевого сплаву фільтрального живильника призводить до збільшення його питомого електричного опору, але цей процес має нелінійний характер завдяки нелінійному тепловому коефіцієнту жаростійкого сплаву. Аналітичне визначення цього коефіцієнту дуже складне.

Для створення оптимальної системи керування вузлом вироблення установки БСТВ експериментально визначимо залежність активного опору фільтрального поля від вторинного струму трансформатора СТ.

Розбивши криву струму на три кусочно-лінійні ділянки, дістанемо апроксимовані залежності $T = f(I_2)$:

$$\begin{cases} T = k_1 I_2 + 1.35, & I_2 \leq 1000, \\ T = k_2 I_2 + 2, & 1000 \leq I_2 \leq 1365, \\ T = k_3 I_2 + 1.65, & I_2 \geq 1365, \end{cases} \quad (5)$$

де $k_1=2,21$, °C/A, $k_2=1,29$, °C/A, $k_3=0,99$, °C/A.

На рис. 7 побудовано апроксимовану залежність $T = f(I_2)$ для всього діапазону робочих струмів. (Криві, що показують залежність $T = f(I_2)$ для фільтри зі сплаву 20X23H18: - - - експериментальна; — апроксимована).

Проведемо дослідження математичної моделі системи ТРС–СТ у середовищі MATLAB. На рис. 8 наведено структурну схему математичної моделі системи ТРТ–СТ, або точніше, фільтрального нагрівального вузла під час роботи від регулятора струму.

На рис. 8 позначено: $W_{ТП}$ і $W_{СТ}$ – передавальні функції тиристорного перетворювача й трансформатора СТ. Позначено змінні: $I_{СТ}$ – сигнал завдання робочого струму, I_Z – сигнал

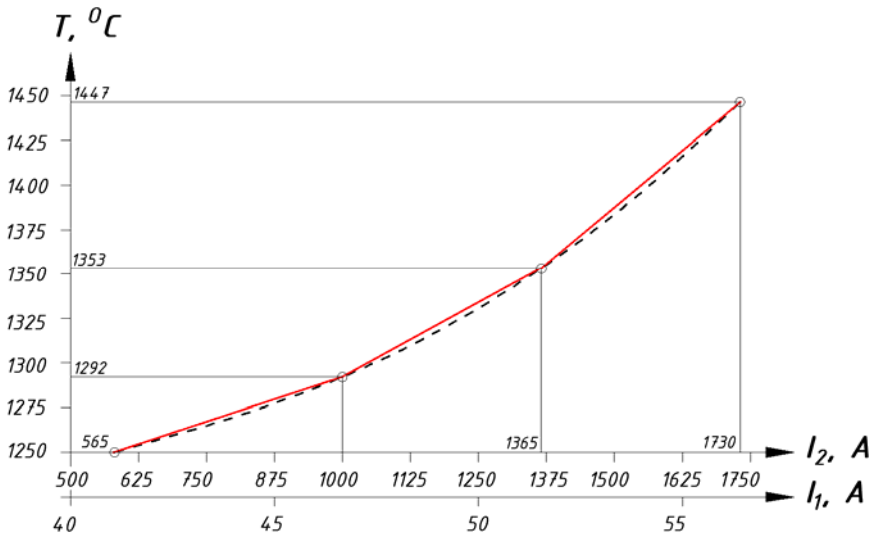


Рис. 7

завдання струму після ПІ-регулятора, U_1 – напруга первинної обмотки СТ, I_1 , I_2 – струми первинної і вторинної обмоток СТ, T – температура фільтри.

Синтез отриманої структурної схеми системи ТР–СТ (рис. 8) виконується за допомогою програми SIMULINK програмного пакета MATLAB (рис. 9).

Структурну схему спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою наведено на рис. 10.

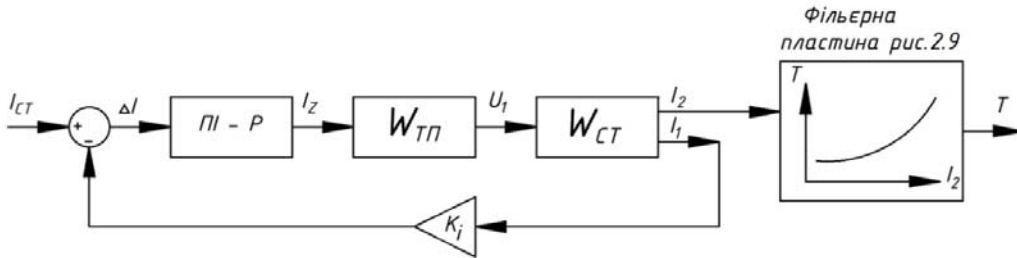


Рис. 8

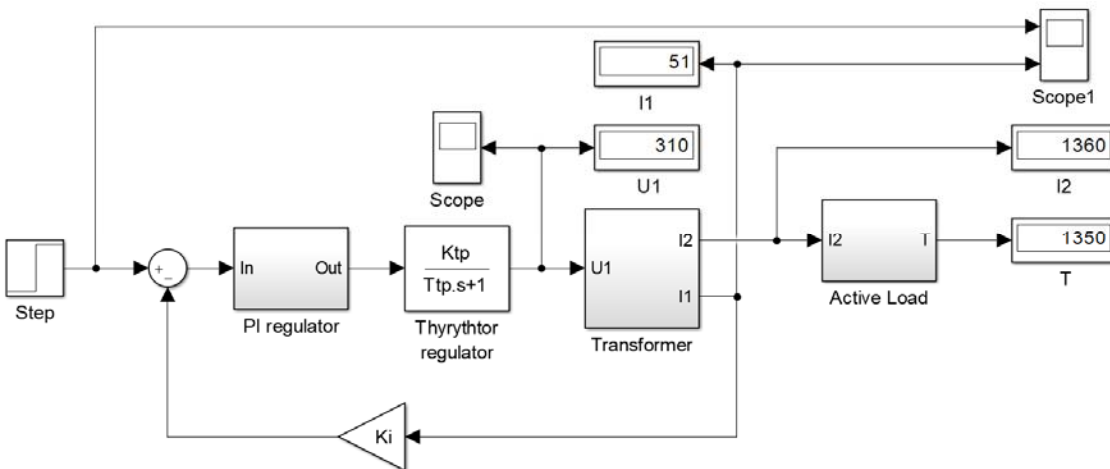


Рис. 9

Усі основні та додаткові блоки, а також внутрішня структура підсистем повністю відповідні структурній схемі, наведеній на рис. 9.

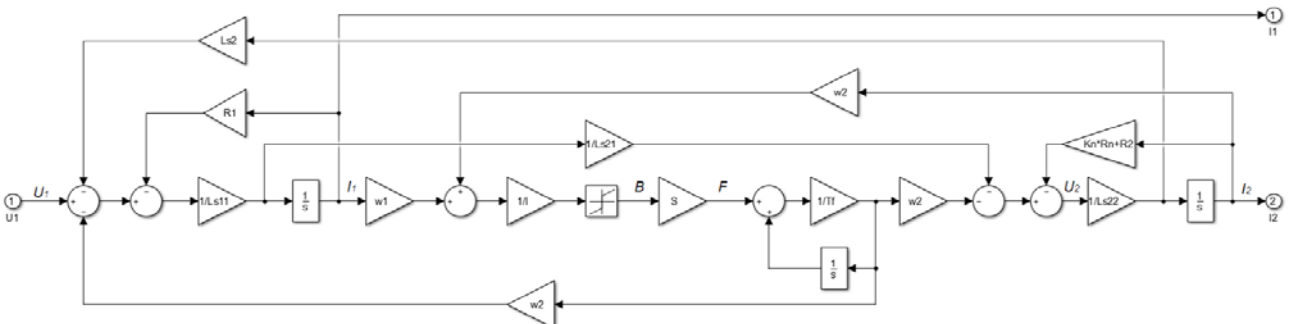


Рис. 10

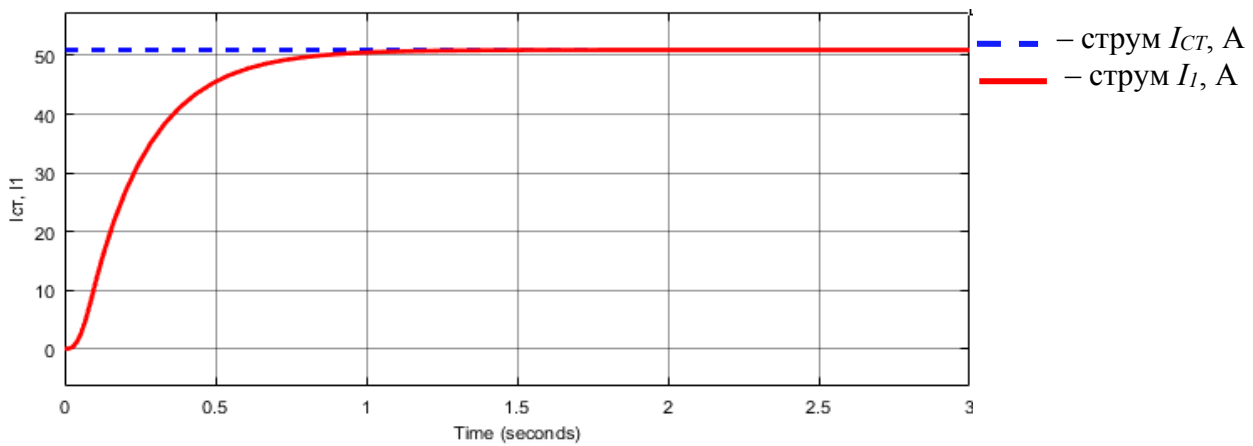
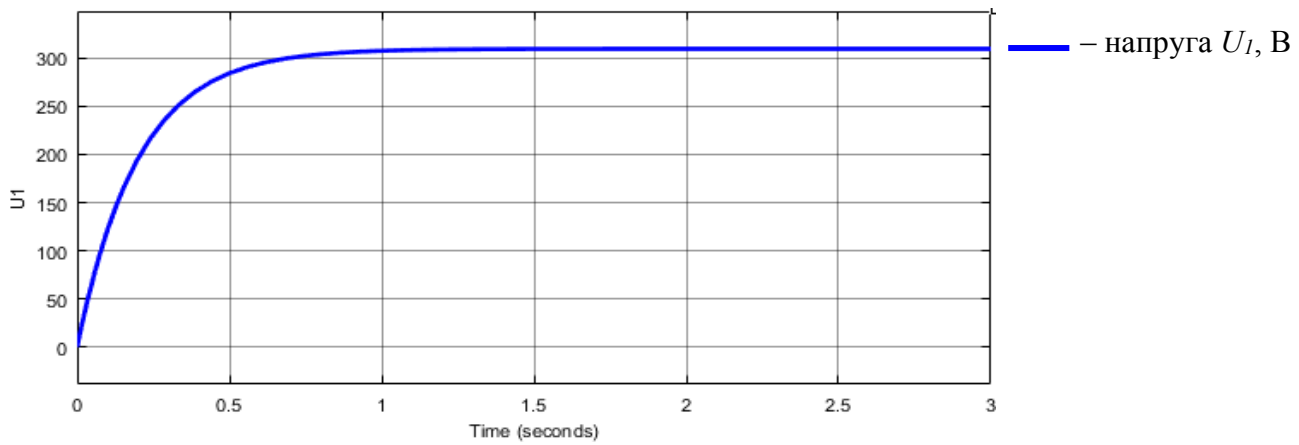


Рис. 11

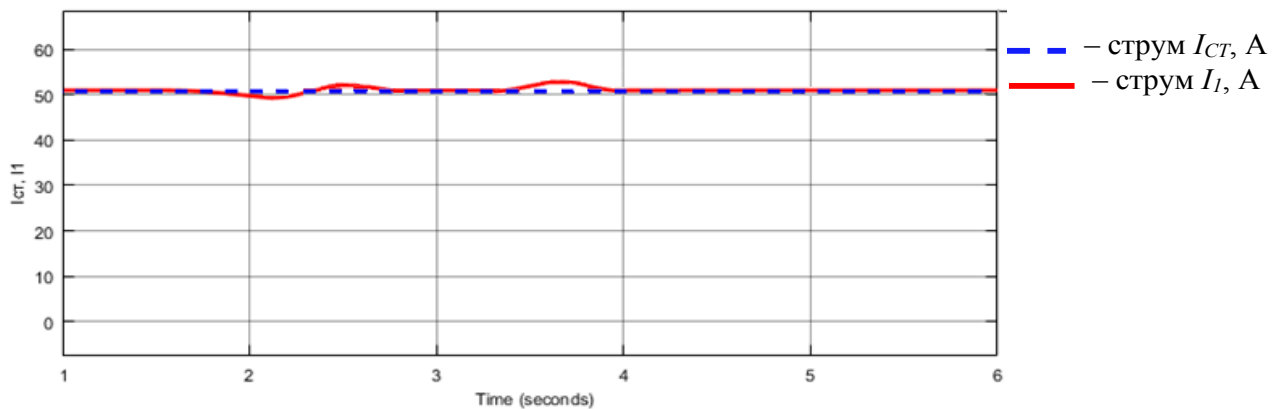
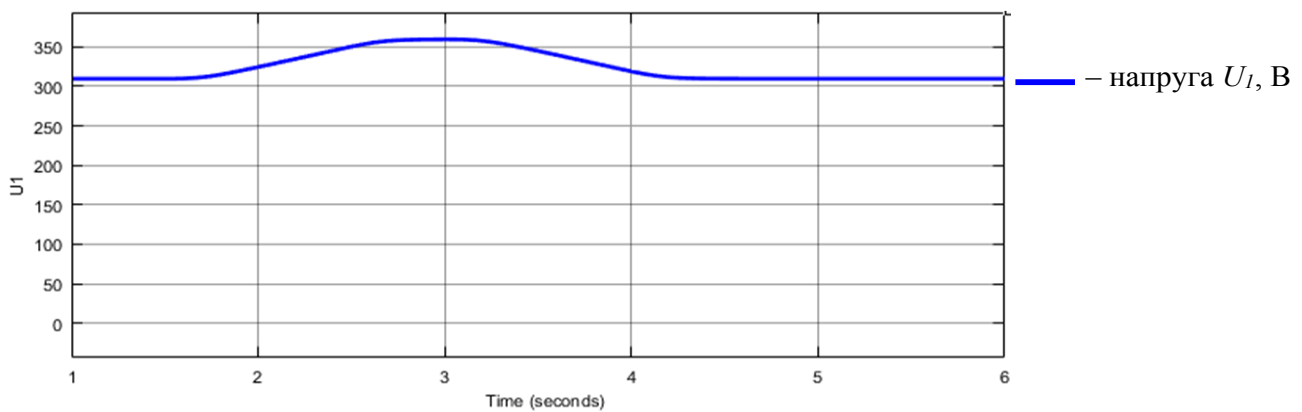


Рис. 12

На рис. 11 та 12 наведено графіки перехідних процесів напруг і струмів первинної об-

мотки трансформатора, отримані в результаті моделювання. Графіки сигналів завдання струму обмоток показано пунктирною лінією.

Наведені графіки перехідних процесів струмів і напруг у первинній обмотці СТ демонструють, що система виходить на заданий робочий режим без перерегулювання та з необхідним часом $t_{mn} = 1,5$ с, який задається під час налаштування коефіцієнтів пропорційно-інтегрального регулятора. Як свідчить практичний досвід, такий час перехідних процесів цілком прийнятний, тому що теплові процеси – інерційні, а головне завдання керування – не швидкість, а плавність і точність виходу на тепловий режим.

Отже, отримані графіки перехідних процесів повністю відповідають заданим вимогам. Система з пропорційно-інтегральними регуляторами струму спеціального трансформатора забезпечує задані плавність і точність регулювання температури фільєрного поля.

Розбіжність кривих перехідних процесів струмів і напруг, отриманих під час моделювання, і знятих під час проведення заводських випробувань, становить не більше 5 %. Це свідчить про адекватність розробленої математичної моделі системи її практичній реалізації.

Висновки.

1. Розроблено математичну модель спеціального трансформатора, яка враховує нелінійні властивості осердя та нелінійну залежність опору навантаження від температури фільєри, які адекватно (за результатами експериментальних досліджень) показують реальні електромагнітні процеси в трансформаторах такого типу.

2. Визначено, що головна змінна установки БСТВ – температура фільєрного поля T у зоні вироблення розплаву – нелінійно залежить від величини струму вторинної обмотки СТ. Побудовано апроксимовану залежність $T = f(I_2)$ для всього діапазону робочих струмів, яку доцільно використовувати під час синтезування структурних схем системи.

3. Розроблено математичну модель системи “тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС–СТ”, яка відображає процес регулювання струму фільєрних живильників. Проведено розрахунки та аналіз перехідних процесів системи в середовищі *MATLAB SIMULINK*, результати яких свідчать про адекватність запропонованої математичної моделі (розбіжність між змодельованими та реальними графіками перехідних процесів – не більше 5 %). Результати моделювання можуть бути використані для подальшої оптимізації багатоконтурної системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами.

Фінансується за держбюджетною темою «База-П8», що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 12.06.2018 р., протокол №10. Державний реєстраційний номер роботи ДР0119U001282. КПКВК 6541030.

1. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Вісник НТУ “ХПИ”*. 2015. № 12. С. 124–127.
2. Алтунин Б.Ю., Блинов И.В., Кралин А.А., Панкова Н.Г. Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики MATLAB SIMULINK. НГТУ. Н. Новгород. 2005. 102 с.
3. Алтунин Б.Ю. Макромоделирование тиристорных переключающих устройств силовых преобразовательных трансформаторов. НГТУ. Н. Новгород, 1998. 108 с.
4. Фильц Р.В., Семчишин О.В. Цифровая математическая модель обобщенного статического электромагнитного преобразователя энергии со стержневым магнитопроводом. *Изв. вузов. Сер. Энергетика*. 1987. № 9. С. 25–29.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1986, 263 с.
6. Блинов И.В., Кралин А.А., Панкова Н.Г. Информационное сопровождение учебного процесса по электротехнике с использованием системы MATLAB SIMULINK. Нижегород. гос. техн. ун-т, Волжская гос. инж.- педагогич. академия. Н. Новгород, 2003.
7. Попов В.А. Преобразователи электрической энергии с безреактивным сглаживанием пульсаций выпрямленного напряжения. *Технічна електродинаміка*, ч. 7. 2000. С. 56–63.
8. Иванушкин В.А., Сарапулов С.Ф., Шымчак П.Н. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. Щецин, 2000. 72 с.
9. Гулятьев А.К. Визуальное моделирование в среде MATLAB. СПб.: ПИТЕР, 2000. 320 с.

MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE THYRISTOR CURRENT REGULATOR SYSTEM - SPECIAL TRANSFORMER OF THE INSTALLATION OF PRODUCTION OF BASALT ULTRATHIN FIBERS**V.P. Styazhkin, P.P. Podeiko,**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: tems@ukr.net

Peculiarities of mathematical modeling are considered and electromagnetic processes in the system “thyristor current regulator - special transformer” (TRS-ST) are analyzed. An indirect method for measuring the temperature of a die plate, which is controlled by the primary current of the CT, is proposed. A simulation model of the TRS-ST system has been created, which makes it possible to take into account the nonlinearity of the characteristics of the transformer core material and the nonlinearity of the load resistance to achieve the required accuracy of electromagnetic processes. The results of simulation confirmed the effectiveness of the developed mathematical model as the difference between the curves of transients obtained by modeling and the curves obtained during research on the experimental setup is not more than 5% and allows to further optimize multi-loop control systems with interconnected and nonlinear parameters. Ref. 9, fig. 12.

Keywords: electrothermal installation, ultrathin fibers, spinneret feeder, thyristor regulator, special transformer.

1. Styazhkin V.P. Podeiko P.P. Optimal control of an electrotechnological installation for the production of basalt superfine fiber. *Visnyk NTU KhPI*. 2015. No 12. Pp. 124–127.
2. Altunin B.U., Blinov I.V., Kralin A.A., Pankova N.G. Electrotechnical calculations in the system of computer mathematics MATLAB SIMULINK. NGTU. N. Novgorod. 2005. 102 p.
3. Altunin B.U. Macromodeling of thyristor switching devices of power converter transformers. NGTU. N. Novgorod, 1998. 108 p.
4. Filts R.V. Semchishin O.V. A digital mathematical model of a generalized static electromagnetic energy converter with a magnetic core. *Izv. vuzov. Ser. Energetika*. 1987. No 9. Pp. 25–29.
5. Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field. Moskva: Vysshaya shkola, 1986, 263 p.
6. Blinov I.V., Kralin A.A., Pankova N.G. Informational support of the educational process in electrical engineering using the MATLAB SIMULINK system. Nizhny Novgorod. state tech. un-t, Volga state. engineer-pedagogical academy. N. Novgorod, 2003.
7. Popov V.A. Converters of electrical energy with non-reactive smoothing of rectified voltage ripples. *Tekhnichna elektrodynamika*, p. 7, 2000. Pp. 56–63.
8. Ivanushkin V.A., Sarapulov S.F., Shymchak P.N. Structural modeling of electromechanical systems and their elements. Szczecin, 2000. 72 p.
9. Gulyatiev A.K. Visual modeling in the MATLAB environment. SPb: PITER, 2000. 320 p.

Надійшла: 03.06.2021

Received: 03.06.2021