

**А.С. Куцик<sup>1</sup>, В.В. Тутка<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Національний університет «Львівська політехніка», Львів

<sup>2</sup> ДТЕК Бурштинська ТЕС ПАТ «ДТЕК Західенерго», Бурштин

## **СТАТИЧНА СИСТЕМА САМОЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**



*Розглянуто систему регулювання вихідної напруги генератора з синтезованим нечітким регулятором напруги. Синтез такого регулятора проведено з використанням уточнених математичних моделей, які враховують нелінійність синхронної машини та напівпровідникових перетворювачів системи збудження. Це відрізняє його від традиційних регуляторів збудження, синтез яких ґрунтується на використанні спрощених лінеаризованих моделей. Наведені результати математичного моделювання дають можливість порівняти регульовальні характеристики в системі з запропонованим нечітким регулятором напруги і в системі з традиційним регулятором.*

*Ключові слова: синхронний генератор, система збудження, нечіткий регулятор.*

Електроенергія виробляється, в основному, синхронними генераторами. Керування генератором здійснюється регулюванням струму збудження через систему збудження, що виконує різноманітні функції, серед яких основними є:

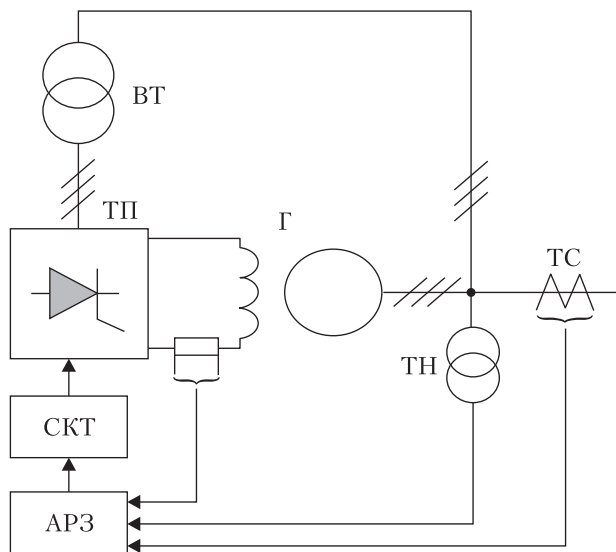
- ✦ підтримання напруги в точці регулювання з заданою точністю в різних режимах роботи;
- ✦ інтенсивне демпфування малих коливань і значних післяаварійних коливань, що виникають в енергосистемі;
- ✦ забезпечення високого рівня динамічної стійкості шляхом форсування збудження до максимального значення під час коротких замикань та накиді навантаження в зовнішній електричній мережі;
- ✦ захист генератора.

Зростаючі вимоги до якості електроенергії вимагають покращення якості регулювання напруги на виході генератора, підвищення стабільності його роботи в електромережі та демп-

фування коливань на виході генератора, спричинених процесами в енергосистемі. Постійна зміна умов функціонування системи генерування електроенергії, обумовлена зміною величини і характеру навантаження генератора, а також наявність нелінійностей в каналах регулювання ускладнюють розв'язання цієї актуальної задачі.

### **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Сьогодні для регулювання збудження потужних синхронних генераторів електростанцій використовують регулятори напруги, побудовані за пропорційно-інтегральним (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом регулювання, доповнені контурами регулювання за іншими координатами та їх похідними, завданням яких є демпфування коливань на виході генератора та в енергосистемі [1]. Для синтезу таких систем регулювання збудження використовують спрощені лінеаризовані в окремій точці моделі системи,



**Рис. 1.** Статична система самозбудження синхронного генератора: ВТ – випрямний трансформатор, ТП – тиристорний перетворювач, Г – генератор, ТС – трансформатор струму, ТН – трансформатор напруги, АРЗ – автоматичний регулятор збудження, СКТ – система керування тиристорами

що не забезпечує надійного функціонування системи в різних режимах роботи в умовах значного діапазону зміни координат.

Результати попередніх досліджень показали ефективність застосування в системах регулювання збудження інтелектуальних регуляторів, побудованих на принципах теорії штучних нейронних мереж та теорії нечітких множин. Відомі переваги нечітких регуляторів, зокрема можливість невикористання моделі системи для синтезу регулятора та робастність до параметричних збурень [2], дали поштовх для їх застосування в системах регулювання збудження синхронних генераторів [3, 4].

Для синтезу систем керування електро-механічними та електроенергетичними системами необхідною є інформація про поведінку системи в різних (зокрема і в аварійних) режимах роботи. Отримання такої інформації можливе при застосуванні адекватних математичних та комп'ютерних моделей. Використання спрощених лінеаризованих моделей електричних

машин та напівпровідникових перетворювачів призводить до значних похибок при отриманні результатів і не дає можливості відобразити адекватно процеси в усіх режимах роботи електротехнічного об'єкта, що істотно знижує якість розроблених інтелектуальних регуляторів. У зв'язку з цим доцільним є застосування уточнених моделей, які враховують нелінійність електричних машин та напівпровідникових перетворювачів.

Завданням нашого дослідження є перевірка ефективності застосування нечіткого регулятора напруги в статичних системах регулювання збудження потужних синхронних генераторів засобами математичного моделювання.

### СТАТИЧНА СИСТЕМА САМОЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для регулювання збудження синхронних генераторів малих та середніх потужностей найбільш широко використовують статичну систему самозбудження, структурна схема якої показана на рис. 1. Використання в даних системах напівпровідникових перетворювачів забезпечує високу швидкість регулювання збудження генератора. Водночас недоліком такої системи є обмежена можливість форсування збудження в аварійних режимах у випадку значної просадки напруги на виході генератора і, відповідно, зменшення вхідної напруги тиристорного перетворювача.

Для регулювання збудження генераторів електростанцій в країнах пострадянського простору в основному використовують т. зв. *регулятори збудження «сильної дії»*. В них використовується ПІД-регулятор напруги, а також численні зворотні зв'язки за похідними координат. Робота такого автоматичного регулятора збудження АРЗ (типу АРВ-СДП) описується рівнянням

$$U_f = U_{f0} - K_{0U} (\Delta U_G - K_{cm} I_r + K_{комн} I_{\Sigma r}) \left( 1 + \frac{1}{T_i} \right) - K_{1U} U'_G - K_{1f} W_{1f} I'_f + K_{0f} \Delta f + K_{1f} W_{1f} f',$$

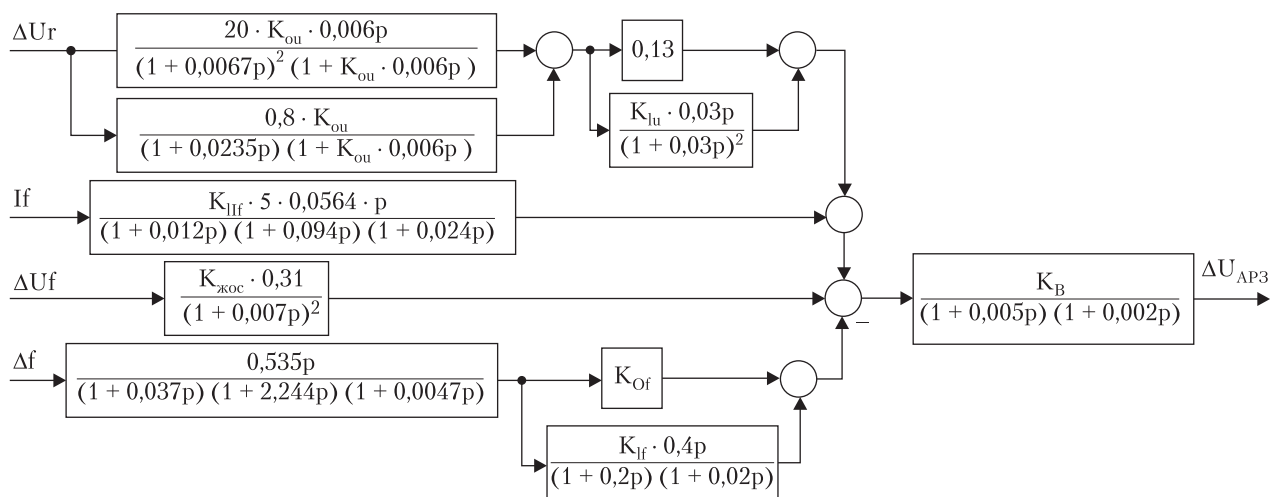


Рис. 2. Структурна схема АРЗ типу АРВ-СД, АРВ-СДП1

де  $\Delta U_r$  – відхилення напруги генератора від заданого значення;  $I_r$  – реактивний струм генератора;  $I_{\Sigma r}$  – реактивний струм групи генераторів, які працюють на спільні шини;  $K_{\text{ст}}$  – коефіцієнт стабілізації;  $K_{\text{комп}}$  – коефіцієнт компенсації реактивного опору підвищувального трансформатора;  $U'_r$  – перша похідна напруги генератора по часу;  $I'_f$  – перша похідна струму збудження генератора;  $\Delta f$  – відхилення частоти на виході генератора від номінального значення;  $f'$  – перша похідна частоти на виході генератора;  $U_f$  – напруга збудження генератора;  $T_i$  – стала часу інтегральної складової.

З урахуванням передатних функцій системи давачів та передавального тракту згаданий АРЗ можна представити структурною схемою, показаною на рис. 2 [1]. На цій структурній схемі відсутні канали регулювання за реактивним струмом групи генераторів та компенсації реактивного опору підвищувального трансформатора, які в багатьох випадках не враховуються.

Зауважимо, що в структурі АРЗ часто виділяють дві складові, а саме: *автоматичний регулятор напруги* (АРН), функцією якого є стабілізація напруги на шинах генератора, та *системний стабілізатор*, завданням якого є така дія на струм збудження, яка демпфує коливання на виході генератора. У струк-

турі регулятора типу АРВ-СД (АРВ-СДП1) функцію АРН відіграє канал регулювання напруги, а канали регулювання струму збудження та частоти відіграють роль системного стабілізатора.

Синтез такого АРЗ передбачає вибір значень коефіцієнтів підсилення по кожному каналу, які визначають характеристики регулювання в різних режимах роботи, що з урахуванням достатньо великої кількості цих коефіцієнтів суттєво ускладнює задачу синтезу та налаштування регулятора. Розраховані із застосуванням спрощених лінеаризованих в околі однієї робочої точки моделей генераторного блока параметри регулятора не забезпечують належних якісних показників регулювання в усіх режимах роботи і вимагають зміни параметрів регулятора залежно від режиму, що є нелегкою задачею.

У зв'язку з цим цікавим є застосування для регулювання збудження генератора інтелектуальних регуляторів збудження, побудованих на основі теорії нечіткої логіки. Синтез такого регулятора проведемо з використанням уточнених математичних моделей, які враховуватимуть нелінійність магнітопроводу синхронного генератора, вплив його демпферної системи, нелінійність тиристорного перетворювача та дискретність його вентилів.

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Для побудови математичної моделі статичної системи збудження застосовано об'єктно-орієнтований метод аналізу електромашинувентильних систем [5]. Перевагою даного методу є можливість створення математичних та комп'ютерних моделей, здатних працювати в реальному часі у взаємодії з фізичними об'єктами.

Для побудови математичних та комп'ютерних моделей в обраному методі використано теорію об'єктно-орієнтованого проектування та програмування, відповідно до якої модель представляється як сукупність об'єктів, які взаємодіють між собою.

Процес формування комп'ютерної моделі зводиться до об'єднання об'єктів, які реалізують моделі типових елементів електромашинувентильних систем (ЕМВС). Це – трансформатори, машини постійного та змінного струму, вентильні групи (катодна і анодна), мережі живлення (трифазна, однофазна),  $RL$ -ланки з ЕРС, конденсатори.

Використовуючи об'єктно-орієнтований метод для формування моделі складної системи, користувач оперує не сукупністю рівнянь і алгоритмів, а готовими моделями складових елементів системи, представлених багатополосниками і оформлених у вигляді об'єктів. Детальніше процедура синтезу математичної моделі із застосуванням реалізованих в об'єктно-орієнтованому вигляді моделей типових елементів багатополосників описана в [5]. У даному випадку об'єктами-моделями структурних елементів, згідно з показаною на рис. 3 розрахунковою схемою, є об'єкти, що реалізують моделі:

- ✦ синхронної машини (СМ);
- ✦ трифазного трансформатора (Тр);
- ✦ катодної (КВГ1) та анодної (АВГ1) вентильних груп (з них формується модель тиристорного перетворювача);
- ✦ мережі (МЕР).

Розрахункова схема силової частини генераторної установки зі статичною системою самозбудження показана на рис. 3.

Розрахункову схему синхронної машини як восьмиполосника згідно з підходом, реалізованим в теорії моделювання електромашинувентильних систем [6], показано на рис. 4. Демпферна система синхронної машини моделюється в координатах  $dq$  і представлена двома короткозамкненими індуктивностями, зорієнтованими по осях  $d$  і  $q$  синхронної машини.

Система рівнянь, яка описує явнопольосну синхронну машину (рис. 3), має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 - \bar{\varphi}_2 - p\bar{\psi}_e - \bar{R}_e \cdot \bar{i}_e &= 0, \\ p\bar{\psi}_i - \bar{R}_i \cdot \bar{i}_i &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\bar{\varphi}_1 = (\varphi_{A1}, \varphi_{B1}, \varphi_{C1}, \varphi_{f1})$ ,  $\bar{\varphi}_2 = (\varphi_{A2}, \varphi_{B2}, \varphi_{C2}, \varphi_{f2})$  – вектори потенціалів у вузлах під'єднання;  $\bar{\psi}_e = (\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_f)_t$ ,  $\bar{\psi}_i = (\psi_D, \psi_Q)_t$  – вектори потокозчеплень;  $\bar{R}_e = \text{diag}(r_A, r_B, r_C, r_f)$  – матриця активних опорів обмоток статора і збудження;  $\bar{R}_i = \text{diag}(r_D, r_Q)$  – матриця активних опорів демпферних обмоток.

Похідні потокозчеплень визначаються як

$$\begin{aligned} p\bar{\psi}_e &= \frac{\partial \bar{\psi}_e}{\partial \bar{i}_e} \cdot p\bar{i}_e + \frac{\partial \bar{\psi}_e}{\partial \bar{i}_i} \cdot p\bar{i}_i + \frac{\partial \bar{\psi}_e}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \\ &= \bar{L}_e \cdot p\bar{i}_e + \bar{L}_{ei} \cdot p\bar{i}_i + \bar{\psi}_e^r \cdot p\gamma \quad (2) \\ p\bar{\psi}_i &= \frac{\partial \bar{\psi}_i}{\partial \bar{i}_e} \cdot p\bar{i}_e + \frac{\partial \bar{\psi}_i}{\partial \bar{i}_i} \cdot p\bar{i}_i + \frac{\partial \bar{\psi}_i}{\partial \gamma} \cdot p\gamma = \\ &= \bar{L}_{ie} \cdot p\bar{i}_e + \bar{L}_i \cdot p\bar{i}_i + \bar{\psi}_i^r \cdot p\gamma. \end{aligned}$$

Коефіцієнти рівнянь (2) визначаються так:

$$\bar{\psi}_{ee}^r = \bar{L}_{ee}^r \cdot \bar{i}_{ee} + \bar{L}_{ei}^r \cdot \bar{i}_{ii}, \quad \bar{\psi}_{ii}^r = \bar{L}_{ie}^r \cdot \bar{i}_{ee}, \quad (3)$$

де  $\bar{L}_{ee}^r, \bar{L}_{ei}^r, \bar{L}_{ie}^r$  – похідні матриць  $\bar{L}_{ee}, \bar{L}_{ei}, \bar{L}_{ie}$  за кутом повороту ротора;

$$\begin{aligned} \bar{L}_{ee} &= \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} \end{bmatrix} \quad \bar{L}_{ei} = \begin{bmatrix} L_{AD} & L_{AQ} \\ L_{BD} & L_{BQ} \\ L_{CD} & L_{CQ} \\ L_{fD} & L_{fQ} \end{bmatrix} \\ \bar{L}_{ie} &= \begin{bmatrix} L_{DA} & L_{DB} & L_{DC} & L_{Df} \\ L_{QA} & L_{QB} & L_{QC} & L_{Qf} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Тут  $\bar{L}_{ee}$  – матриця  $(4 \times 4)$  взаємних і власних індуктивностей фазних обмоток статора та обмотки збудження, де діагональні елементи  $L_{AA}$ ,

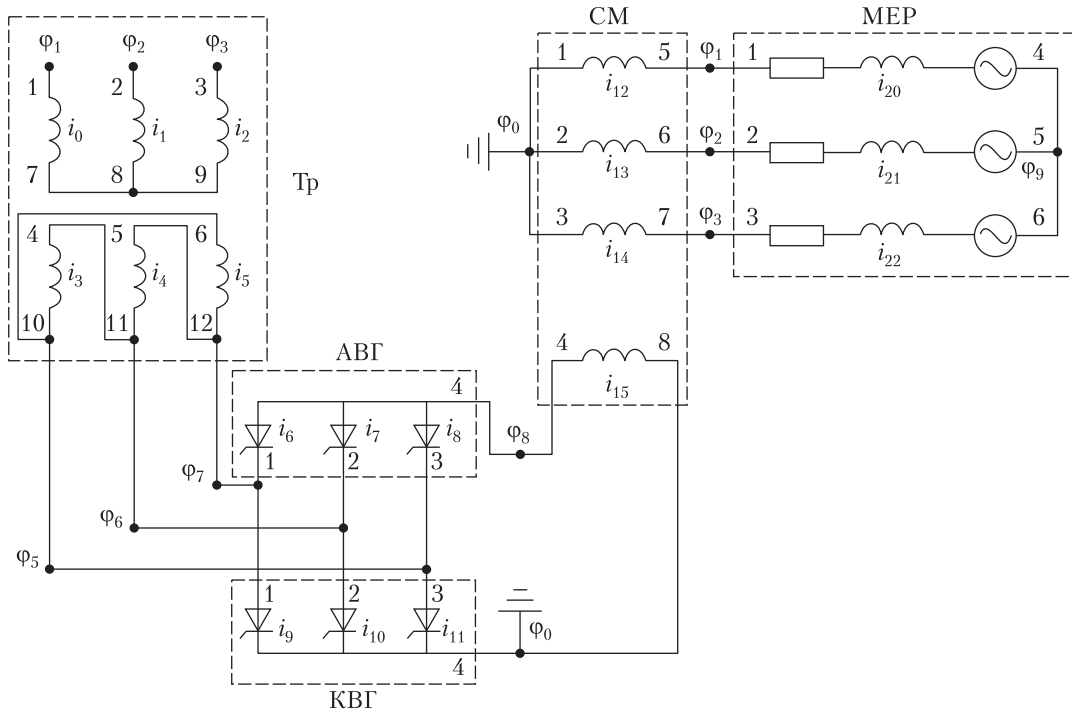


Рис. 3. Розрахункова схема силової системи самозбудження СМ:  $i_0 \dots i_{22}$  – струми електричних віток структурних елементів,  $\Phi_1 \dots \Phi_9$  – потенціали незалежних вузлів електромашинувентильної системи

$L_{\text{ВВ}}, L_{\text{СС}}, L_{\text{ff}}$  – власні індуктивності фазних обмоток і обмотки збудження, а всі інші – взаємні індуктивності відповідних обмоток;  $\tilde{L}_{\text{ei}}, \tilde{L}_{\text{ie}}$  – матриці взаємних індуктивностей демпферних обмоток та обмоток фаз статора і збудження машини;  $\tilde{L}_{\text{ii}} = (L_{\text{DD}}, L_{\text{QQ}})$  – матриця власних індуктивностей демпферних обмоток. Ці індуктивності розраховуються на основі електромагнітних параметрів СМ:  $L_{\text{d}}, L_{\text{ad}}, L_{\text{q}}, L_{\text{aq}}, L_{\text{sf}}, L_{\text{SD}}, L_{\text{SQ}}, L_{\text{0}}$ .

Для врахування нелінійності характеристики магнітопроводу індуктивність реакції якоря явнополюсної синхронної машини по осі  $d$   $L_{\text{ad}}$  є функцією (задається таблично за кривою намагнічення) струму намагнічення, який визначається з виразу

$$i_{\mu} = \frac{2}{3} [i_{\text{A}} \cos(\gamma) + i_{\text{B}} \cos(\gamma - \rho) + i_{\text{C}} \cos(\gamma - 2\rho)] + \frac{i_{\text{f}}}{k_{\text{i}}} + i_{\text{D}}.$$

Система рівнянь (1) після підстановки виразів з (2) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2 - \tilde{L}_{\text{e}} \cdot p \vec{i}_{\text{ee}} - \tilde{L}_{\text{ei}} \cdot p \vec{i}_{\text{ii}} - \bar{\Psi}_{\text{ee}}^{\text{r}} \cdot p\gamma - \tilde{R}_{\text{ee}} \cdot \vec{i}_{\text{ee}} &= 0, \\ \tilde{L}_{\text{ie}} \cdot p \vec{i}_{\text{ee}} + \tilde{L}_{\text{ii}} \cdot p \vec{i}_{\text{ii}} + \bar{\Psi}_{\text{ii}}^{\text{r}} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{\text{ii}} \cdot \vec{i}_{\text{ii}} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Знайшовши з другого рівняння системи (4) вираз для  $p \vec{i}_{\text{ii}}$  і підставивши його в перше рівняння, отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2 - (\tilde{L}_{\text{ee}} - \tilde{L}_{\text{ei}} \cdot \tilde{L}_{\text{ii}}^{-1} \cdot \tilde{L}_{\text{ie}}) \cdot p \vec{i}_{\text{ee}} - \\ - (\bar{\Psi}_{\text{ee}}^{\text{r}} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{\text{ee}} \cdot \vec{i}_{\text{ee}} - \tilde{L}_{\text{ei}} \cdot \tilde{L}_{\text{ii}}^{-1} \cdot (\bar{\Psi}_{\text{ii}}^{\text{r}} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{\text{ii}} \cdot \vec{i}_{\text{ii}})) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Врахувавши, що  $p\gamma = p_0\omega$ , де  $\gamma$  – кут повороту ротора в ел. гр.,  $p_0$  – кількість пар полюсів,  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора, та ввівши позначення

$$\begin{aligned} \tilde{L} &= \tilde{L}_{\text{ee}} - \tilde{L}_{\text{ei}} \cdot \tilde{L}_{\text{ii}}^{-1} \cdot \tilde{L}_{\text{ie}}, \\ \vec{E} &= \bar{\Psi}_{\text{ee}}^{\text{r}} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{\text{ee}} \cdot \vec{i}_{\text{ee}} - \tilde{L}_{\text{ei}} \cdot \tilde{L}_{\text{ii}}^{-1} \cdot (\bar{\Psi}_{\text{ii}}^{\text{r}} \cdot p\gamma + \tilde{R}_{\text{ii}} \cdot \vec{i}_{\text{ii}}), \end{aligned}$$

запишемо систему рівнянь (4) у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2 - \tilde{L} \cdot p \vec{i}_{\text{ee}} - \vec{E} &= 0, \\ p \vec{i}_{\text{ii}} &= -\tilde{L}_{\text{ii}}^{-1} \cdot (\tilde{L}_{\text{ie}} \cdot p \vec{i}_{\text{ee}} + \bar{\Psi}_{\text{ii}}^{\text{r}} \cdot p_0\omega + \tilde{R}_{\text{ii}} \cdot \vec{i}_{\text{ii}}). \end{aligned} \quad (6)$$

Отриману математичну модель СМ (рівняння (6)), доповнимо рівнянням механічного стану:

$$M + M_{\text{n}} = Jp\omega, \quad (7)$$

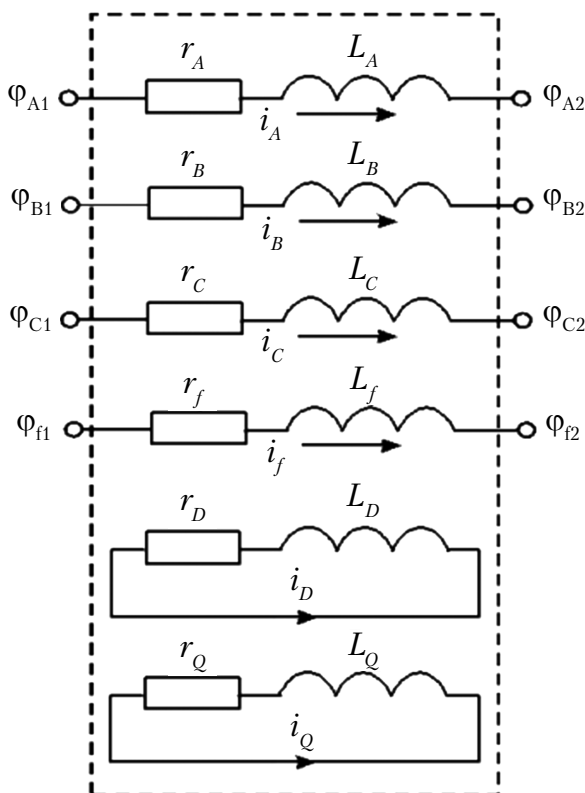


Рис. 4. Розрахункова схема СМ

де  $M$  – електромагнітний момент машини,  $M_n$  – момент, прикладений до вала ротора,  $J$  – момент інерції ротора.

Для побудови математичних моделей напівпровідникових перетворювачів використано такі допущення:

- ✦ силові схеми напівпровідникових перетворювачів розглядалися як електричні кола з постійною структурою та змінними параметрами;
- ✦ вентиля перетворювачів представлялися гілками, які складаються з послідовно з'єднаних активного опору  $r$  і індуктивності  $L$ , що приймають малі значення у відкритому стані вентиля і великі – у закритому стані. Відношення  $L/r$  в обох станах тиристора приймаємо приблизно в 10–50 разів більшим від очікуваного середнього кроку чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, які описують електромагнітні та електромеханічні процеси;

- ✦ вентиля закриваються в момент, коли залежність їх струмів від часу переходить через нуль з додатних значень у від'ємні. Таке допущення передбачає, що час відновлення запираючих властивостей вентиля дорівнює нулю;

- ✦ момент відкриття вентиля знаходиться шляхом розв'язання логічних рівнянь, які описують систему керування вентилями (відкриття вентилів здійснюється миттєво).

Моделі напівпровідникових перетворювачів представлялися як сукупність об'єктів, що реалізують моделі силової частини, а також об'єкта, який реалізує модель системи керування.

Модель силової частини напівпровідникових перетворювачів формується з об'єктів-моделей анодної і катодної вентиляльних груп (рис. 5). Силова схема катодної чи анодної вентиляльної групи представляється 4-полюсником і описується рівняннями, складеними за методом вузлових потенціалів:

$$\begin{aligned} \varphi_1 \frac{1}{L_1} - \varphi_4 \frac{1}{L_1} + \dot{p}_1 &= -\frac{R_1 i_1}{L_1}, \\ \varphi_2 \frac{1}{L_2} - \varphi_4 \frac{1}{L_2} + \dot{p}_2 &= -\frac{R_2 i_2}{L_2}, \\ \varphi_3 \frac{1}{L_3} - \varphi_4 \frac{1}{L_3} + \dot{p}_3 &= -\frac{R_3 i_3}{L_3}, \\ \varphi_4 \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) - \varphi_1 \frac{1}{L_1} - \varphi_2 \frac{1}{L_2} - \varphi_3 \frac{1}{L_3} + \dot{p}_4 &= \\ &= \frac{R_1 i_1}{L_1} + \frac{R_2 i_2}{L_2} + \frac{R_3 i_3}{L_3}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $i_1, i_2, i_3, i_4$  – струми зовнішніх гілок;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – потенціали зовнішніх полюсів.

Подача імпульсів відкриття на тиристри перетворювача, що регулює струм збудження СМ, синхронізується з кутом повороту ротора (він у свою чергу достатньо точно визначає фазу вихідної напруги). Відповідно умова відкриття вентилів тиристорного перетворювача буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} (TM(i) > \alpha) \cap (TM(i) < \alpha + \Delta\alpha) \cap \\ (VT(i) > 0) \cap (IT(i) = 0) &= \text{true}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $TM$  – масив розмірністю 6, елементи якого дорівнюють:  $TM(1) = \gamma_R$ ;  $TM(2) = \gamma_R + 4\pi/3$ ;

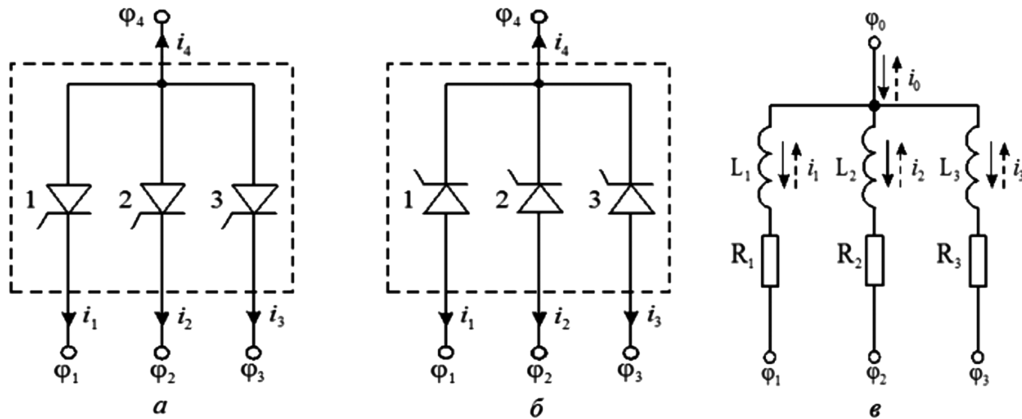


Рис. 5. Схеми анодної (а) та катодної (б) вентильних груп та їх розрахункова схема (в)

$TM(3) = \gamma_R + 2\pi/3$ ;  $TM(4) = TM(1) + \pi$ ;  $TM(5) = TM(2) + \pi$ ;  $TM(6) = TM(3) + \pi$ ;  $\gamma_R$  – кут повороту ротора генератора;  $VT$  – масив, елементами якого є напруги на вентилях;  $IT$  – масив, елементами якого є функції стану вентилів (приймають значення 1, коли вентиль відкритий і 0 – коли закритий);  $\Delta a$  – ширина відкриваючого імпульсу.

Під час досліджень режимів початкового збудження синхронного турбогенератора на неробочому ході швидкість обертання турбіни приймалася постійною.

Параметри системи збудження, що використовувалися під час проведення розрахунків процесів у даній системі, були такими. Для синхронного турбогенератора (типу ТГВ-200-2МУЗ):  $P_{ном} = 210$  МВт; номінальна напруга та струм  $U_{ном} = 15750$  В,  $I_{ном} = 9060$  А; струм збудження неробочого ходу  $i_{fn.x.} = 715$  А; номінальний струм збудження  $i_{fn} = 1945$  А; активні опори обмоток статора та збудження  $r_{ст} = 0,0024$  Ом,  $r_f = 0,174$  Ом; індуктивні опори  $X_d = 1,997$  в.о.,  $X_{ad} = 1,723$  в.о.,  $X'_d = 0,34$  в.о.,  $X''_d = 0,223$  в.о. Для випрямного трансформатора (ВТр) типу ТСЗП-3000/20 ВУЗ:  $S_{ном} = 2540$  кВА; номінальна напруга первинної і вторинної обмоток  $U_{1н} = 15750$  В,  $U_{2н} = 855$  В; струм неробочого ходу  $I_{нх} = 0,9$  %; напруга короткого замикання  $U_{кз} = 6,5$  %; активна потужність втрат  $\Delta P_{кз} = 22$  кВт.

Параметри АРЗ були такими:  $K_{OU} = 20$ ;  $K_{1U} = 0,5$ ;  $K_{1ff} = 1,0$ ;  $K_{of} = 0,3$ ;  $K_{1f} = 0,8$ .

### СТРУКТУРА НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЗБУДЖЕННЯ

Для забезпечення регулювання напруги синхронного генератора пропонується структура нечіткого регулятора (див. рис. 6).

Функцію регулювання вихідної напруги генератора та забезпечення програмного початкового збудження виконує нечіткий регулятор напруги (НРН), на вхід якого подаються:  $e_u$  – різниця між заданим та дійсним значенням вихідної напруги генератора (похибка регулювання напруги);  $\Delta e_u$  – приріст (перша похідна) похибки регулювання напруги. Використання контурів регулювання за напругою генератора та її першою (а інколи і другою) похідною притаманне більшості сучасних АРЗ.

Крім цього, до складу нечіткого регулятора введено гнучкий зворотний зв'язок за струмом збудження генератора ( $-\Delta i_f$ ). Введення цього зворотного зв'язку дає змогу підвищити демпфувальні властивості регулятора, що покращує якість регулювання струму збудження та напруги генератора.

За основу взято регулятор Takagi-Sugeno з постійним виходом. Формування бази правил регулятора напруги проведено на основі ша-

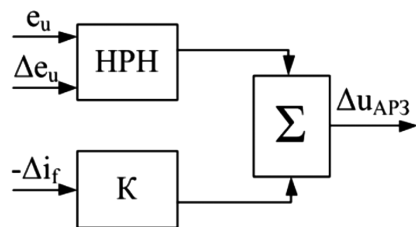


Рис. 6. Структура нечіткого регулятора напруги

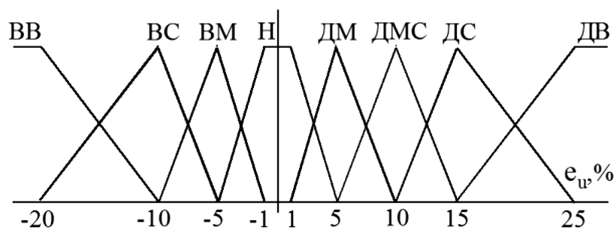


Рис. 7. Функції належності для похибки регулювання напруги

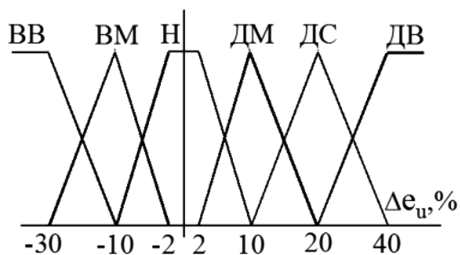


Рис. 8. Функції належності для приросту похибки регулювання напруги

блонної бази правил MacVicar–Whelana та її подальшого вдосконалення.

Відомо, що сигнал на виході нечіткого регулятора залежить від сформованих функцій належності, зокрема їх перекриття та типу, а та-

кож вибраного методу дефазифікації. Вибрані функції належності для вхідних змінних нечіткого регулятора напруги наведено на рис. 7 і рис. 8. Сформовані бази правил для нечітких регуляторів показано в таблиці. Для усунення нечіткості застосовано гравітаційний метод.

Приріст вихідного сигналу нечіткого регулятора напруги згідно з вибраним принципом дефазифікації визначається як

$$\Delta u_{pu} = \frac{\mu_1 \mu_2 y_{11} + \mu_1 (1 - \mu_2) y_{21} + (1 - \mu_1) \mu_2 y_{12} + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) y_{22}}{\mu_1 \mu_2 + \mu_1 (1 - \mu_2) + (1 - \mu_1) \mu_2 + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2)} = \mu_1 \mu_2 y_{11} + \mu_1 (1 - \mu_2) y_{21} + (1 - \mu_1) \mu_2 y_{12} + (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) y_{22}, \quad (10)$$

де  $\mu_1$  — функція належності для похибки регулювання напруги  $e_u$ ;  $\mu_2$  — функція належності для приросту похибки регулювання напруги  $\Delta e_u$ .

Приріст вихідного сигналу нечіткого регулятора напруги доповнюємо сигналом, пропорційним похідній (приросту) струму збудження  $\Delta i_f$ , взятій з протилежним знаком. У результаті приріст сумарного вихідного сигналу нечіткого регулятора збудження визначатиметься як

$$\Delta u_{НРЗ} = \kappa_1 \cdot \Delta u_{pu} - \kappa_2 \cdot \Delta i_f, \quad (11)$$

де  $\kappa_1, \kappa_2$  — вагові коефіцієнти, які можуть бути або постійними, або змінюватися залежно від режиму роботи генератора (наприклад, при початковому збудженні генератора на неробочому ході значення  $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ , а при роботі генератора в мережі значення  $\kappa_2$  зростає (збільшується потреба у зворотному зв'язку за струмом збудження), а значення  $\kappa_1$  — зменшується, оскільки напруга на виході генератора змінюється незначно.

База правил регулятора напруги

$\Delta e_u$	$e_u$							
	ВВ	ВС	ВМ	Н	ДМ	ДМС	ДС	ДВ
ДВ	-1,2	1,6	5	8	15	15	15	15
ДС	-1,2	-0,05	0,5	8	8	15	15	15
ДМ	-6	-1,2	0	5	8	8	8	15
Н	-15	-6	-6	0	5	5	8	8
ВМ	-15	-6	-6	-1,2	0	0	1	8
ВВ	-15	-15	-15	-15	-1,2	-0,05	0,5	5



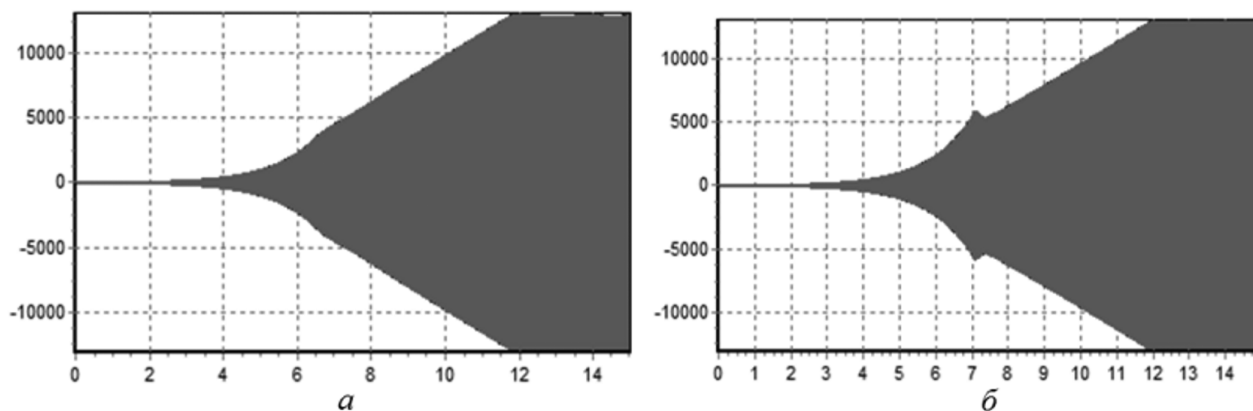


Рис. 9. Напруги (фазні миттєві значення, В) статора СМ в режимі початкового збудження: *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

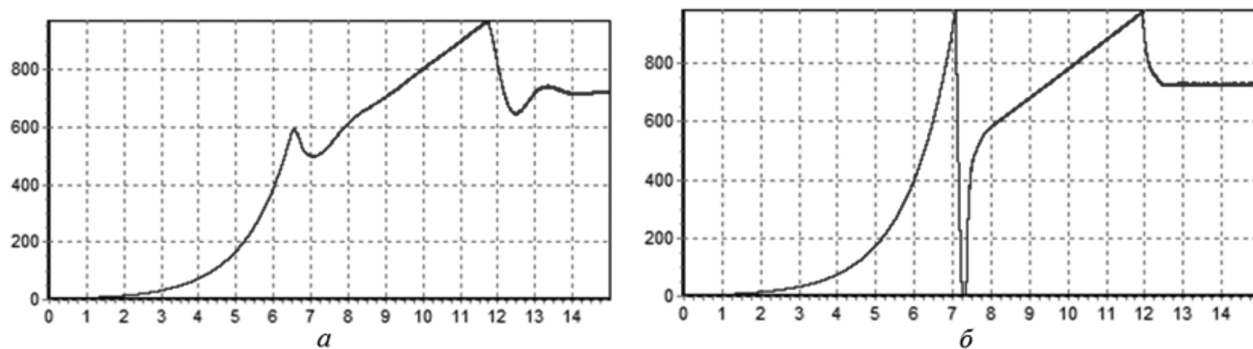


Рис. 10. Струм збудження СМ (А) в режимі початкового збудження: *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

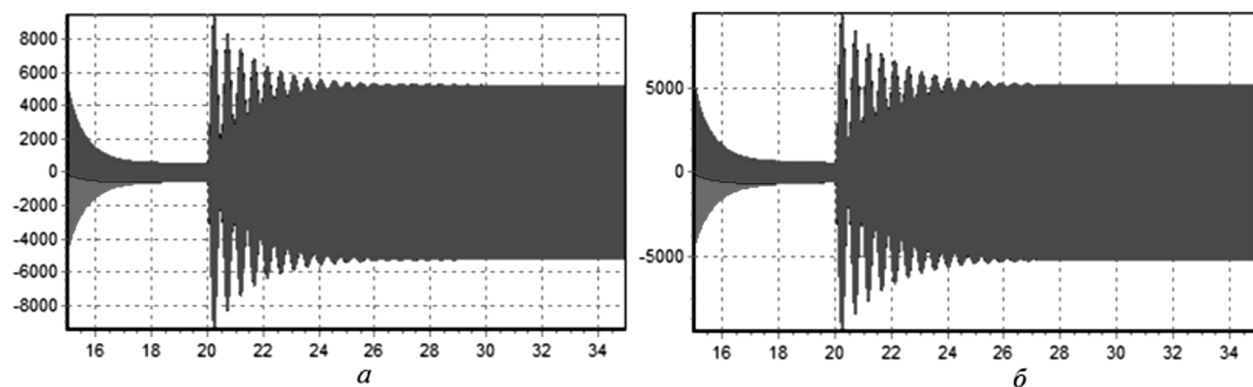


Рис. 11. Струми статора СМ (миттєві значення, А) в режимі вмикання генератора в мережу (на 15 с) з подальшим накидом навантаження (на 20 с): *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

Налаштування НРЗ, наведені вище, були підбрані експериментально за допомогою математичної моделі системи самозбудження СМ, описаної вище.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати досліджень електромагнітних процесів у системі з нечітким регулятором напруги порівнювалися з результатами досліджень

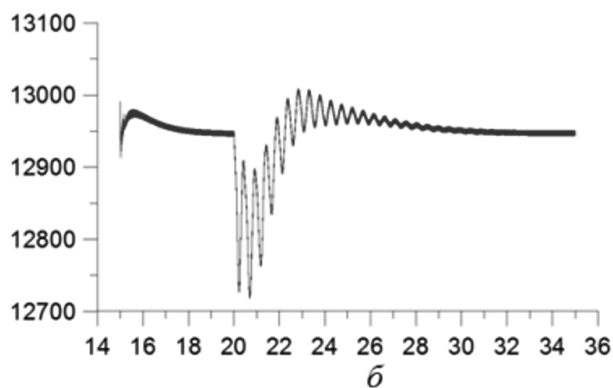
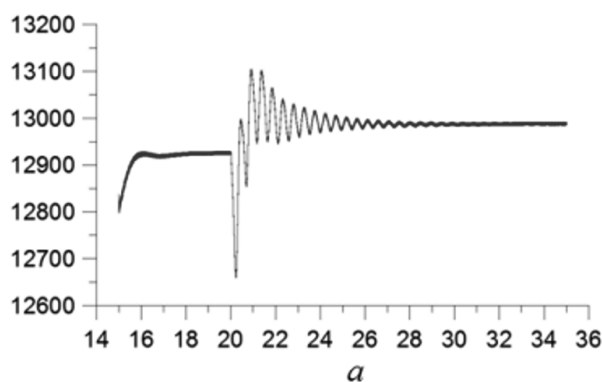


Рис. 12. Огинаюча фазної напруги СМ (В) в режимі вмикання генератора в мережу (на 15 с) з подальшим накидом навантаження (на 20 с): *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

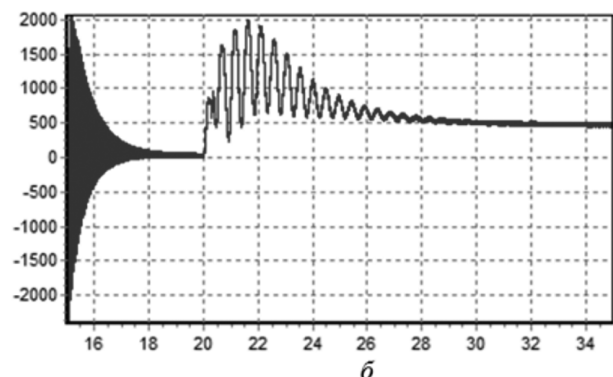
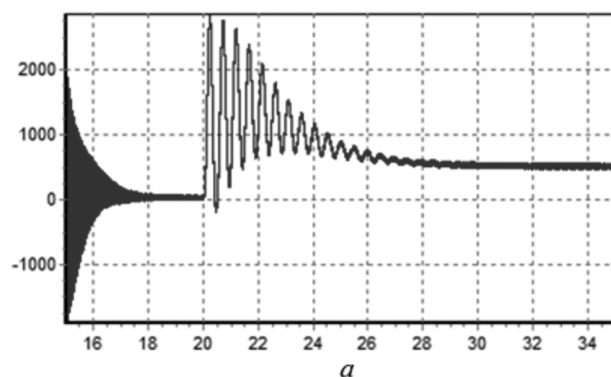


Рис. 13. Струм демпферної обмотки по осі d (А): *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

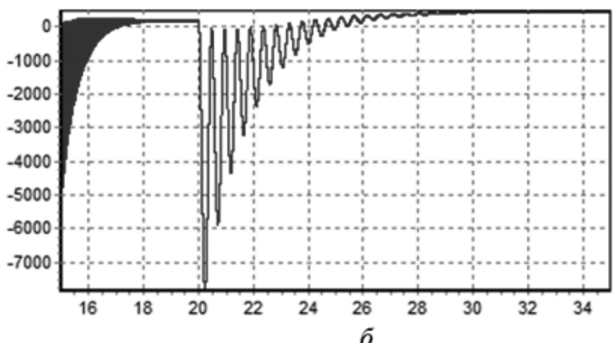
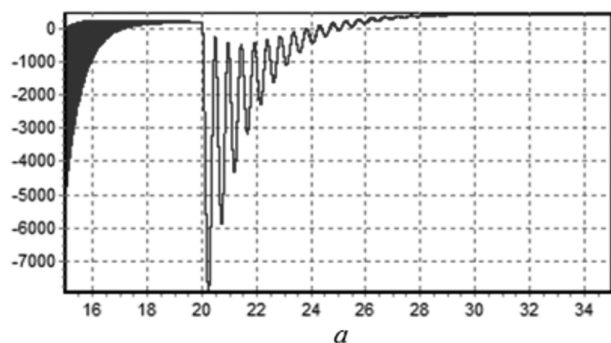


Рис. 14. Струм демпферної обмотки по осі q (А): *a* – АРЗ сильної дії, *б* – нечіткий регулятор напруги

у системі з традиційним АРЗ сильної дії АРВ-СДП1, структура якого описана вище.

На рис. 9 та 10 показано результати досліджень процесів у системі самозбудження СМ для режиму початкового збудження на неробочому ході. Показано результати досліджень: *a* — для традиційного АРЗ сильної дії, *б* — для розробленого нечіткого регулятора збудження.

Характер збудження в даному випадку — програмний: спочатку стрибкоподібно подається сигнал задання напруги СМ величиною  $0,333 U_{\text{н}}$ , після досягнення напругою СМ цього значення (близько 6,5 с) сигнал задання напруги СМ зростає лінійно до номінального значення; відповідно лінійно зростає і її вихідна напруга (рис. 9).

Як видно з рис. 9, фазні напруги статора СМ дещо відрізняються у місці виходу на задане значення, а саме при використанні традиційного регулятора спостерігаємо коливний процес з незначним перерегулюванням 1,44 %, який триває 1,5 с. У випадку з НРЗ напруга СМ досягає заданого значення без перерегулювання та коливань. Практична відсутність коливань напруги при наявності коливань струму збудження (рис. 10) пояснюється впливом демпферної системи генератора.

На рис. 11–14 показано результати досліджень режиму вмикання генератора в мережу (на 15 с) з подальшим додаванням навантаження (на 20 с) величиною 50 % від номінального. Для оцінки демпфувальних властивостей системи регулювання збудження проведено дослідження цього режиму роботи СМ для найнесприятливішого випадку — стрибкоподібного додавання навантаження (в реальних умовах експлуатації завантаження генератора, що працює паралельно з мережею, активною потужністю здійснюється плавно за рахунок поступового збільшення потужності, що підводиться турбіною).

Взагалі, порівнюючи поведінку системи при використанні різних типів регуляторів збудження, можна стверджувати, що в даних режимах роботи система регулювання напруги з

нечітким регулятором збудження не поступається за своїми регулювальними властивостями системі з АРЗ сильної дії. У випадку стрибкоподібного завантаження система з НРН забезпечує меншу максимальну динамічну похибку регулювання напруги (2,2 % проти 3 %), а також меншу статичну похибку. Зауважимо, що введення гнучкого зворотного зв'язку за струмом збудження генератора в структуру системи з НРН (як і в системі з АРЗ сильної дії) є доцільним, оскільки без нього погіршуються демпфувальні властивості, зростають коливність і час перехідного процесу.

## ВИСНОВКИ

1. Для синтезу систем регулювання збудження синхронних машин доцільним є використання уточнених математичних моделей, що враховують нелінійності СМ та напівпровідникових перетворювачів системи збудження.

2. Розроблений нечіткий регулятор напруги в режимах початкового збудження СМ, вмикання в мережу, стрибкоподібні зміни навантаження за регулювальними властивостями загалом не поступається традиційному автоматичному регулятору збудження сильної дії (АРВ-СДП1) і забезпечує дещо кращі якісні показники регулювання напруги в зазначених режимах (менші динамічну та статичну похибки, відсутність перерегулювань в режимі початкового збудження).

3. Для поліпшення якості перехідних процесів доцільним є введення в структуру системи регулювання збудження з НРН від'ємного зворотного зв'язку за похідною струму збудження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Юрганов А.А. Регулирование синхронных генераторов. — СПб.: Наука, 1996. — 138 с.
2. Yager R., Filev R. Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. — WNT: Warszawa, 1995. — 388 st.
3. Нгуен Ню Хунг. Использование нечетких регуляторов для настройки коэффициентов усиления ПИД-регулятора напряжения синхронного генератора // Технічна електродинаміка. — Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки», 2006. — С. 117–120.

4. Приходько И.А. Нечеткие структуры систем регулирования возбуждения синхронного генератора // Электричество. — № 2. — 2002. — Стр. 46–50.
5. Куцук А.С. Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем // Технічна електродинаміка. — 2006. — № 2. — С. 57–63.
6. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. — Львов: Изд-во при Львов. ун-те, 1986. — 161 с.

*А.С. Куцук, В.В. Тутка*

СТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ  
НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрена система регулирования выходного напряжения генератора с синтезированным нечетким регулятором напряжения. Синтез такого регулятора проведен с использованием уточненных математических моделей, учитывающих нелинейность синхронной машины и полупроводниковых преобразователей системы возбуждения. Это отличает его от традиционных регуляторов возбуждения, синтез которых основывается на использовании упрощенных линеаризованных моделей. Представленные результаты математического моделирования

позволяют сравнить регулировочные характеристики в системе с предложенным нечетким регулятором напряжения и в системе с традиционным регулятором.

*Ключевые слова:* синхронный генератор, система возбуждения, нечеткий регулятор.

*A. Kutsyk, V. Tutka*

THE SEMICONDUCTOR SELF-EXCITATION  
SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATOR  
WITH FUZZY VOLTAGE REGULATOR

The synchronous generator's voltage control system with the synthesized fuzzy voltage regulator is described. The synthesis of the regulator is carried out with the use of mathematical model taking into account the nonlinearity of synchronous machines and semiconductor converters in the excitation system. This distinguishes it from traditional excitation regulators, whose synthesis is based on the use of simplified linearized models. The mathematical modeling results allow to compare the control characteristics in the system with the proposed fuzzy voltage regulator and in the system with a traditional voltage controller.

*Key words:* synchronous generator, excitation system, fuzzy regulator.

Стаття надійшла до редакції 03.10.13