

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ПОЧАТКОВОГО ЗБУДЖЕННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЗА ГІБРИДНОЮ REAL-TIME МОДЕЛЛЮ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

© Куцик А. С., 2018

Проаналізовано перехідні електромагнітні процеси в системі генерування електроенергії турбогенератором із безщітковою системою збудження в режимі початкового збудження турбогенератора. Дослідження проведено в гібридній системі, що поєднує комп'ютерну модель силової частини з реальним регулятором збудження. Проаналізовано вплив налаштування системи автоматичного регулювання на якісні показники регулювання напруги та струму збудження генератора.

Ключові слова: системи генерування електроенергії, турбогенератор, real-time модель, безщіткова система збудження, математичне моделювання.

The transient electromagnetic processes in the power generation system with turbo-generator and brushless excitation system in a mode of initial excitation of turbo-generator are analyzed in the article. The research was carried out in the hybrid system that combines a computer model of a power part with the real excitation controller. The influence of setting the automatic control system on quality of voltage regulation and generator excitation current regulation is analyzed.

Key words: power generation system, turbo-generator, real-time model, brushless excitation system, mathematical modeling.

Постановка проблеми

Система регулювання збудження генератора на електростанції є основним чинником, що визначає якість регулювання напруги генератора та стійкість його роботи в енергосистемі. Враховуючи нелінійність електромагнітних зв'язків у синхронному генераторі, мінливість його навантаження синтез та налагодження систем регулювання збудження є достатньо складною задачею. Для її розв'язання необхідно застосовувати математичні моделі, які враховують нелінійність синхронної машини, напівпровідникових перетворювачів у системі збудження, змінність навантаження. Важливою проблемою є початкове (перед введенням в експлуатацію) та періодичне тестування систем регулювання збудження генераторів для підвищення надійності та якості їх роботи.

Одним із ключових режимів роботи системи збудження є режим початкового збудження генератора на неробочому ході, завданням якого є виведення напруги генератора за заданим законом до заданого рівня перед вмиканням генератора на паралельну роботу в мережі.

Аналіз останніх досліджень

Сьогодні для аналізу складних електротехнічних систем дедалі частіше використовують технології гібридного моделювання hardware-in-the-loop, які полягають у поєднанні в єдиній системі цифрових моделей та реальних фізичних об'єктів [1–4]. Цифровою моделлю, зокрема, може бути замінена відсутня у фізичному виконанні частина системи, що аналізується [4]. Як варіант, фізичним об'єктом може бути реальна система регулювання, а комп'ютерною моделлю – об'єкт регулювання. Такий варіант дає змогу

провести тестування та налагодження системи регулювання за відсутності об'єкта регулювання, наприклад, на стадії виготовлення системи керування. Використання цього підходу для тестування систем збудження генераторів електростанції описано в [3]. У [5] описано реалізацію гібридної моделі системи генерування електроенергії, в якій система перетворення енергії (силова частина) є комп'ютерною моделлю, а система перетворення інформації (система регулювання збудження) є реальною. Зазначимо, що цифрові моделі в складі таких систем повинні функціонувати в режимі реального часу, бути чисельно стійкими, здатними працювати тривалий час, обмінюючись сигналами з фізичними об'єктами. Для створення таких моделей нами запропоновано використовувати метод середніх напруг на кроці чисельного інтегрування, описаний в [7]. Цей метод дозволяє алгебраїзувати диференціальні рівняння математичної моделі електротехнічної системи і, як показує досвід його використання, є ефективним для створення чисельно стійких real-time моделей, здатних неперервно функціонувати тривалий (близько доби) час у взаємодії з фізичними об'єктами.

Формування цілей статті

Метою статті є аналіз впливу налаштування системи автоматичного регулювання збудження турбогенератора атомної електростанції на якісні показники регулювання напруги та проміжних координат у режимі початкового збудження генератора на неробочому ході. Такий аналіз проводили на прикладі безщіткової системи збудження генератора Південно-Української АЕС з використанням реального автоматичного регулятора збудження (АРЗ) сильної дії типу АРВ-СД та комп'ютерної моделі силових частини.

Виклад основного матеріалу

Функціональну схему гібридної моделі системи генерування електроенергії, яку використовували для досліджень, показано на рис. 1. Комп'ютерною моделлю є система перетворення потужності, що містить основний генератор G із безщітковою системою самозбудження у складі допоміжного генератора AG, струм збудження якого регулюється тиристорним перетворювачем TC, що отримує живлення від основного генератора.

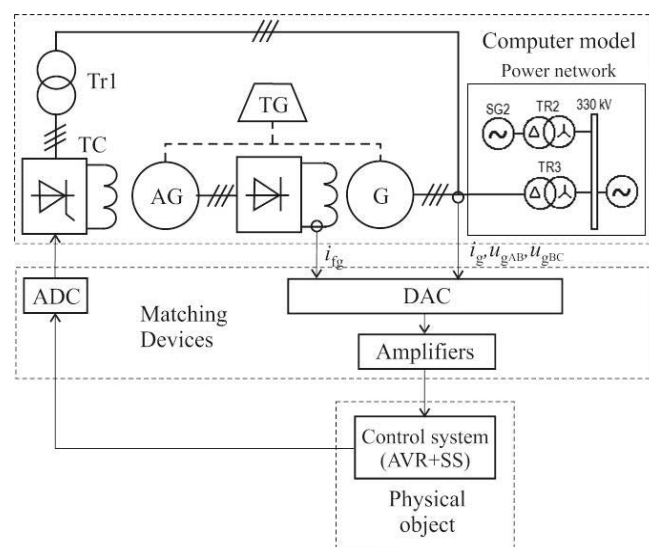


Рис. 1. Функціональна схема гібридної моделі

До складу цієї моделі входить також модель турбіни TG зі своєю системою регулювання. Навантаженням генератора є лінія електропередачі з врахуванням паралельно працюючих генераторів електростанції (для досліджень режиму початкового збудження генератора на неробочому ході це навантаження не враховували). Системою керування є реальний автоматичний регулятор збудження типу АРВ-СД, в складі якого є канали регулювання напруги на виході генератора U_g (автоматичний регулятор напруги AVR), а також канали регулювання за частотою f та її похідною (системний стабілізатор SS). Автоматичний регулятор напруги AVR містить також канали регулю-

вання за першою і другою похідними напруги, канал регулювання за напругою збудження U_f із жорстким зворотним зв'язком, а також канал регулювання за похідною струму збудження СГ I_f . Наявність цих каналів властива регуляторам збудження сильної дії і забезпечує інтенсивне демпфування коливань на виході СГ. На рис. 2 наведено структурну схему регулятора збудження з врахуванням передатних функцій регулятора та вимірювальних кіл [8]. З комп'ютерної моделі на регулятор збудження надходять сигнали вихідної лінійної напруги генератора u_{gAB}, u_{gBC} , струму фази статора генератора i_g , струму збудження генератора i_{fg} . З фізичного регулятора збудження на комп'ютерну модель подається напруга керування тиристорним перетворювачем.

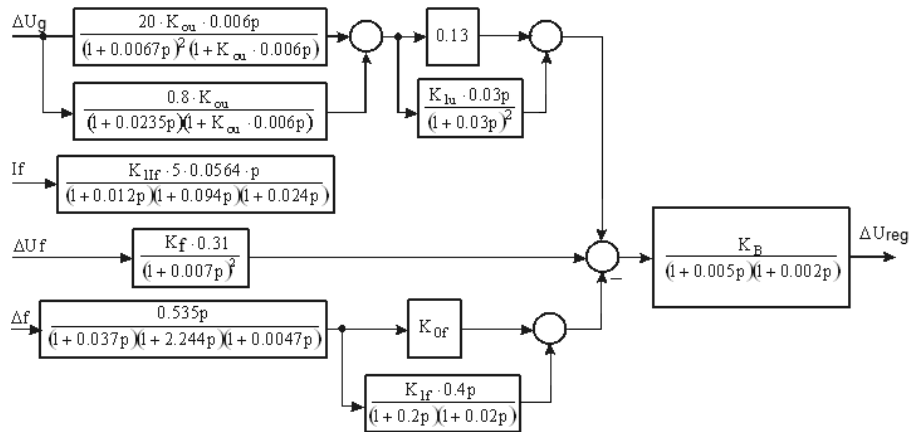


Рис. 2. Структурна схема регулятора збудження типу APB-СД

Узгоджувальні пристрої (Matching Devices) забезпечують зв'язок комп'ютерної та реальної частин гібридної моделі. Їх функціями є: аналогово-цифрове та цифро-аналогове перетворення (регулятор збудження є аналоговим), а також узгодження рівня та підсилення потужності сигналів.

Опис математичної моделі

Для створення математичної моделі силової частини системи генерування електроенергії використано числовий однокроковий метод середніх напруг на кроці інтегрування, описаний у [7]. У випадку використання цього методу другого порядку, коли струм на кроці чисельного інтегрування описується параболою, рівняння для електричної вітки, що містить джерело ЕРС e , активний опір R та індуктивність L і до якої прикладено напругу u , має вигляд:

$$U + E - Ri_0 + \left(\frac{R}{3} + \frac{L_0}{\Delta t} \right) i_0 - \frac{R\Delta t}{6} \frac{di_0}{dt} - \left(\frac{R}{3} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) i_1 = 0, \quad (1)$$

де i_0 – струм вітки на початку кроку інтегрування; L_0, L_1 – індуктивність вітки на початку та в кінці

кроку; $U = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u dt$, $E = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} e dt$ – середні на кроці інтегрування значення напруги вітки та ЕРС.

Рівняння (1) є базовим для створення математичних моделей елементів електротехнічних систем, які представляються багатополісниками. На основі цього рівняння формуємо зовнішнє вузлове рівняння електричного багатополісника виду

$$\mathbf{r} i_e + G_{se} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi_e dt + \mathbf{r} C_{se} = 0, \quad (2)$$

де Φ_e – вектор потенціалів зовнішніх полюсів багатополісника; i_e – вектор струмів зовнішніх віток багатополісника; G_{se} , C_{se} – матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів.

Під час формування розрахункової схеми зовнішні вітки багатополісників з'єднуються у вузлах системи. Спосіб з'єднання описано матрицями інцидентів. На основі цих матриць, а також коефіцієнтів G_{se} , C_{se} рівнянь виду (2) всіх елементів у складі електротехнічної системи за принципами, описаними в

[9], за першим законом Кірхгофа отримуємо таке алгебричне рівняння для середніх на кроці чисельного інтегрування значень потенціалів незалежних вузлів системи

$$\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi_c dt: \quad G_{sc} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi_c dt + C_{sc} \mathbf{r} = 0 \quad (3)$$

Розв'язком цього рівняння є середні на кроці інтегрування потенціали вузлів системи, за якими розраховуємо середні на кроці інтегрування значення потенціалів полюсів багатополюсника $\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi_e dt$. На їх

основі за рівнянням (2) розраховуються значення струмів в кінці кроку інтегрування.

Розглянемо розроблену згідно з описаним методом математичну модель синхронної машини. Модель побудовано у фазних координатах з врахуванням нелінійності характеристики намагнічування магнітопроводу та впливу демпферної системи ротора. Розрахункову схему синхронної машини як восьмиполюсника показано на рис. 3. Демпферну обмотку синхронної машини враховано двома короткозамкненими (демперними) обмотками, зорієнтованими по осях d і q синхронної машини.

Рівняння для кіл статора і збудження (зовнішніх кіл), записані з застосуванням рівняння (1) у векторному вигляді, матиме вигляд:

$$\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi^I dt - \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Phi^{II} dt - \left(\mathbf{r}_{ee} i_{ee0} + \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ee}}{3} i_{ee0} - \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ee} \Delta t}{6} \frac{di_{ee0}}{dt} - \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ee}}{3} i_{ee1} - \frac{1}{\Delta t} (\Psi_{ee1} - \Psi_{ee0}) \right) = 0 \quad (4)$$

Для кіл ротора (внутрішніх кіл) аналогічно запишемо:

$$\left(\mathbf{r}_{ii} i_{ii0} - \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ii}}{3} i_{ii0} + \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ii} \Delta t}{6} \frac{di_{ii0}}{dt} + \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ii}}{3} i_{ii1} + \frac{1}{\Delta t} (\Psi_{ii1} - \Psi_{ii0}) \right) = 0 \quad (5)$$

де $\Phi^I = (\Phi_{A1}, \Phi_{B1}, \Phi_{C1}, \Phi_{f1})^T$, $\Phi^{II} = (\Phi_{A2}, \Phi_{B2}, \Phi_{C2}, \Phi_{f2})^T$ – вектори потенціалів зовнішніх полюсів; $\mathbf{i}_{ee} = (i_A, i_B, i_C, i_f)^T$, $\mathbf{i}_{ii} = (i_D, i_Q)^T$ – струми зовнішніх і внутрішніх кіл; $\Psi_{ee} = (\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f)^T$ $\Psi_{ii} = (\Psi_D, \Psi_Q)^T$ – вектори потокозчеплень; $\dot{\mathbf{R}}_{ii} = \text{diag}(r_D, r_Q)$, $\dot{\mathbf{R}}_{ee} = \text{diag}(r_A, r_B, r_C, r_f)$ – матриці активних опорів обмоток. Індокси 0 і 1 означають значення змінної на початку та в кінці кроку чисельного інтегрування.

Зміна потокозчеплень зовнішніх та внутрішніх кіл синхронної машини на кроці дорівнюватиме:

$$\Psi_{ee1} - \Psi_{ee0} = \dot{L}_{ee1} \cdot i_{ee1} + \dot{L}_{ei1} \cdot i_{ii1} - \dot{L}_{ee0} \cdot i_{ee0} - \dot{L}_{ei0} \cdot i_{ii0}, \quad (6)$$

$$\Psi_{ii1} - \Psi_{ii0} = \dot{L}_{ii} \cdot i_{ii1} + \dot{L}_{ie1} \cdot i_{ee1} - \dot{L}_{ii} \cdot i_{ii0} - \dot{L}_{ie0} \cdot i_{ee0}, \quad (7)$$

де \dot{L}_{ee} – матриця власних та взаємних індуктивностей зовнішніх кіл розмірністю (4×4), в якій діагональні елементи – власні індуктивності фазних обмоток і обмотки збудження, а всі інші – взаємні індуктивності відповідних обмоток; $\dot{L}_{ei}, \dot{L}_{ie}$ – матриці взаємних індуктивностей між зовнішніми і внутрішніми колами; $\dot{L}_{ii} = \text{diag}(L_{DD}, L_{QQ})$ – матриця власних індуктивностей демпферних контурів. Ці індуктивності розраховують на основі електромагнітних параметрів СМ та кута повороту ротора.

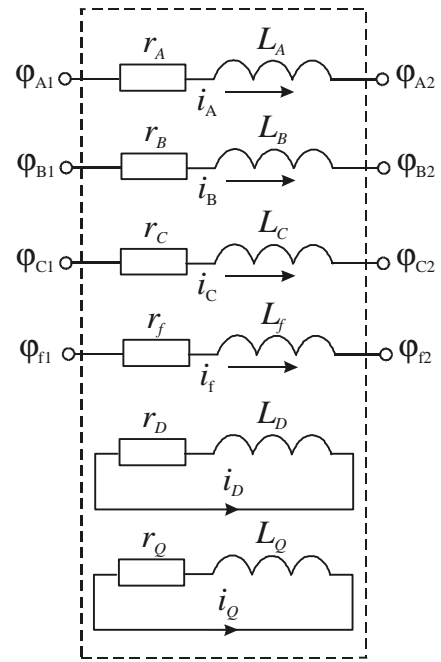


Рис. 3. Розрахункова схема синхронної машини

У випадку врахування нелінійності характеристики магнітопроводу індуктивність реакції якоря явнополюсної синхронної машини по осі d L_{ad} є функцією (задається таблично за кривою намагнічення) струму намагнічення.

Підставивши (6) і (7) в (4) і (5) та провівши перетворення, отримаємо:

$$\mathbf{i}_{SCM} + \mathbf{G}_{SCM} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \Phi_{CM} dt + \mathbf{C}_{SCM} = 0, \quad (6)$$

де $\Phi_{CM} = (\Phi^I, \Phi^{II})^T$ – вектор потенціалів зовнішніх полюсів; $\mathbf{i}_{CM} = (i_{ee}, -i_{ee})^T$ – вектор струмів зовнішніх віток; $\mathbf{G}_{SCM} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^{-1} & -\mathbf{R}^{-1} \\ -\mathbf{R}^{-1} & \mathbf{R}^{-1} \end{pmatrix}$; $\mathbf{C}_{SCM} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^{-1} \\ -\mathbf{R}^{-1} \end{pmatrix} \times \mathbf{E}$ – матриця коефіцієнтів та вектор вільних

членів $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{R}}{6} \frac{di_{ee0}}{dt} - \frac{\mathbf{L}_{ei1} \mathbf{R}_{ii}^{*-1}}{\Delta t} \frac{\mathbf{R}_{ii} \Delta t}{6} \frac{di_{ii0}}{dt} + \left(\mathbf{R}_{ee} - \mathbf{R}_{ee0}^* + \frac{\mathbf{L}_{ei1} \mathbf{R}_{ii}^{*-1} \mathbf{L}_{ei0}}{\Delta t^2} \right) \mathbf{i}_{ee0} - \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{L}_{ei0} - \frac{1}{\Delta t} \mathbf{L}_{ei1} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{L}_{ei1} \mathbf{R}_{ii}^{*-1} \mathbf{R}_{ii} \right) \mathbf{i}_{ii0} -$

крокова ЕРС, яка визначається похідними струмів та початковими умовами; $\mathbf{R}_{ee0}^* = \left(\frac{\mathbf{R}_{ee}}{3} + \frac{\mathbf{L}_{ee0}}{\Delta t} \right)$,

$\mathbf{R}_{ee1}^* = \left(\frac{\mathbf{R}_{ee}}{3} + \frac{\mathbf{L}_{ee1}}{\Delta t} \right)$ – матриці крокових опорів зовнішніх кіл на початку та в кінці кроку;

$\mathbf{R}_{ii}^* = \left(\frac{\mathbf{R}_{ii}}{3} + \frac{\mathbf{L}_{ii}}{\Delta t} \right)$ – матриця крокових опорів внутрішніх кіл; $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{ee1}^* - \mathbf{R}_{ii1}^{*-1} \frac{\mathbf{L}_{ei1} \mathbf{L}_{ei1}}{\Delta t^2}$.

Рівняння (6) дозволяє визначити струми зовнішніх контурів в кінці кроку, а рівняння (5) – струми внутрішніх (демпферних) контурів. Для визначення крокової ЕРС необхідною є інформація про похідні струмів на початку кроку. Ці похідні розраховуємо за принципами, описаними у [8].

Швидкість ротора в режимі початкового збудження на неробочому ході приймали постійною, що дорівнює номінальній. Зазначимо, що струм статора в цьому режимі дорівнюватиме струму, що споживається системою збудження.

Вентилі напівпровідникових перетворювачів представляються послідовно – з'єднаними активним опором та індуктивністю, що надають малих значень у відкритому стані вентиля і великих – у закритому. Закривають вентиль у момент часу, коли його струм переходить через 0 з додатного у від'ємне значення (ці моменти розраховують в моделі). Моменти відкривання вентилів визначають за логічними рівняннями на підставі напруги керування, отриманої за фізичним регулятором збудження.

Результати досліджень

На рис. 4 показано часові залежності напруги статора генератора, напруги та струму збудження генератора, а також напруги та струму збудження збудника у випадку використання реального АРЗ із типовим налаштуванням. Режим збудження в цьому випадку – програмний, коли сигнал завдання напруги генератора змінюється за визначеним законом, а саме: початковий стрибок до величини близько 30 % номінального значення з подальшим лінійним наростанням до заданого (номінального) значення. Такий характер збудження з відповідним налаштуванням регуляторів забезпечує наростання напруги генератора за заданий час до заданої величини без перерегулювання.

Визначальний вплив на якість перехідного процесу початкового збудження генератора має жорсткий зворотний зв'язок за напругою збудження генератора. Це демонструють результати дослідження, наведені на рис. 5, отримані для випадку відмикання цього зворотного зв'язку в реальному АРЗ. У цьому випадку спостерігаються значні коливання напруги генератора та проміжних координат у перехідному процесі.

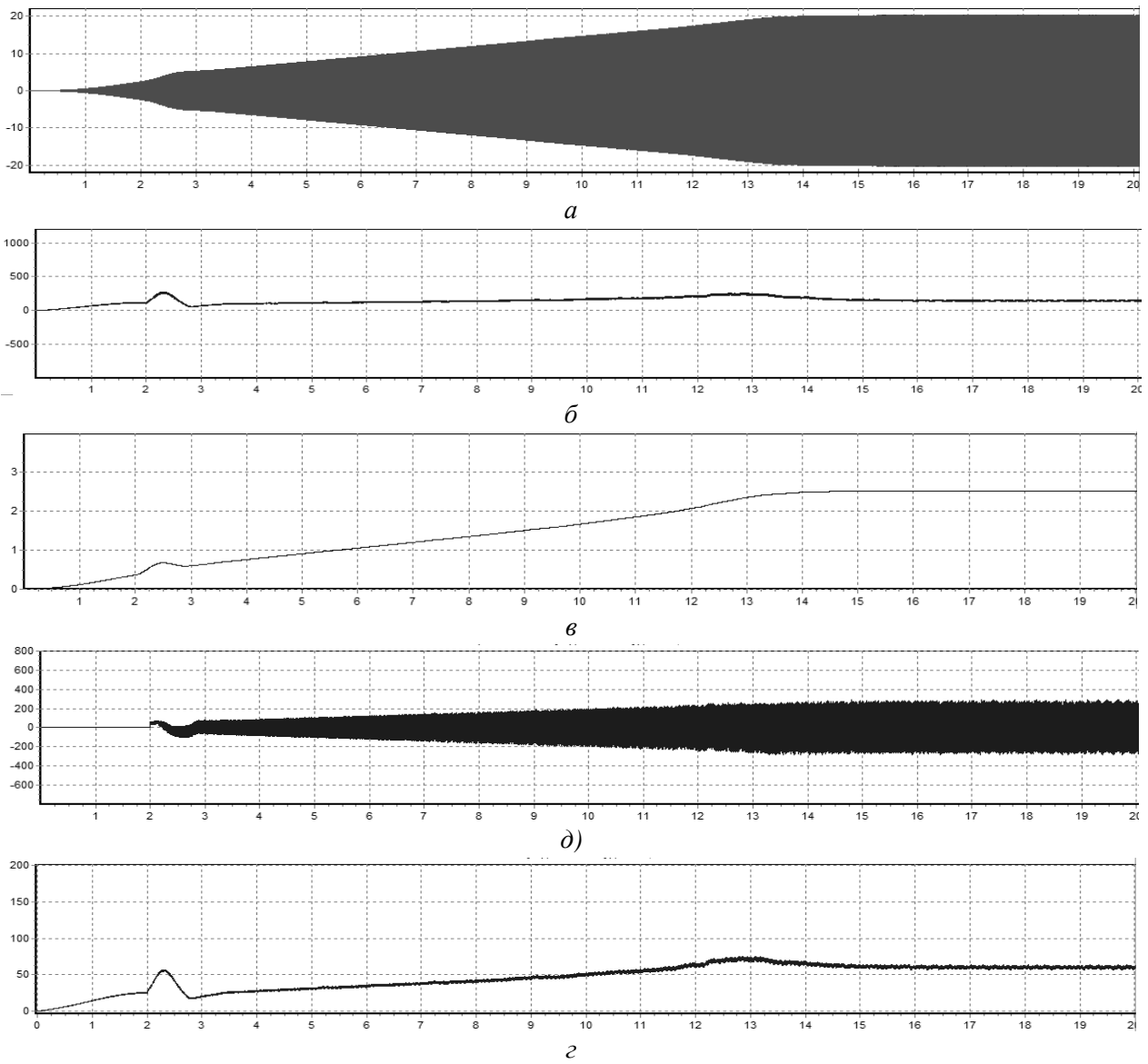


Рис. 4. Часові залежності напруги статора генератора (а, миттєві значення), напруги (б) та струму збудження (в) генератора, напруги (г) та струму збудження (д) збудника в режимі початкового збудження з нормальним налаштування автоматичного регулятора збудження

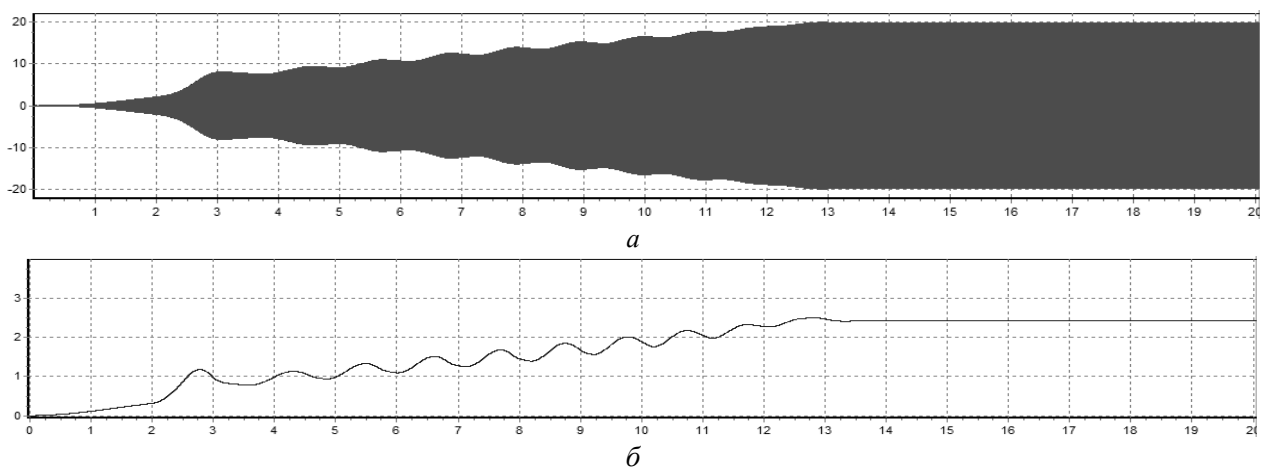
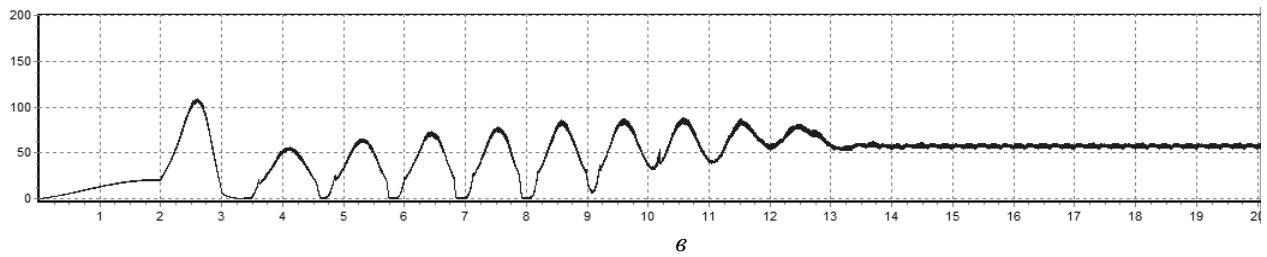


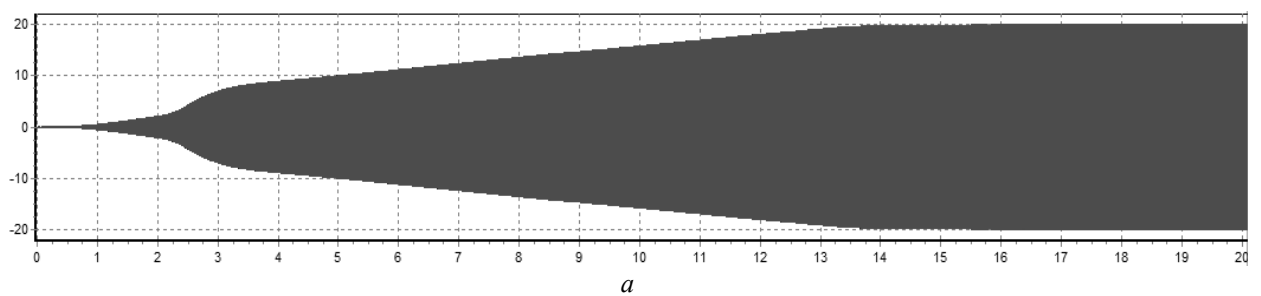
Рис. 5. Часові залежності напруги статора генератора (а, миттєві значення), струму збудження генератора (б), струму збудження збудника (в) у режимі початкового збудження за відсутності жорсткого зворотного зв'язку за напругою збудження генератора



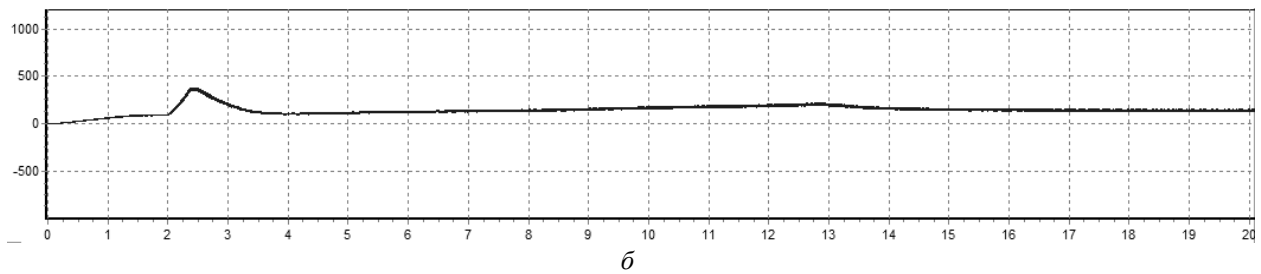
б

Рис. 5. (Продовження). Часові залежності напруги статора генератора (а, миттєві значення), струму збудження генератора (б), струму збудження збудника (в) у режимі початкового збудження за відсутності жорсткого зворотного зв'язку за напругою збудження генератора

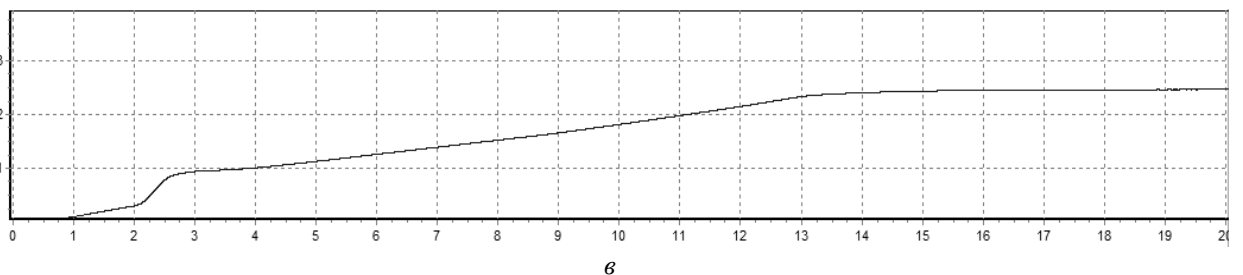
На якість перехідного процесу впливає також гнучкий зворотний зв'язок за струмом збудження генератора, відсутність якого збільшує кидок напруги та струму збудження генератора і збудника (рис. 6).



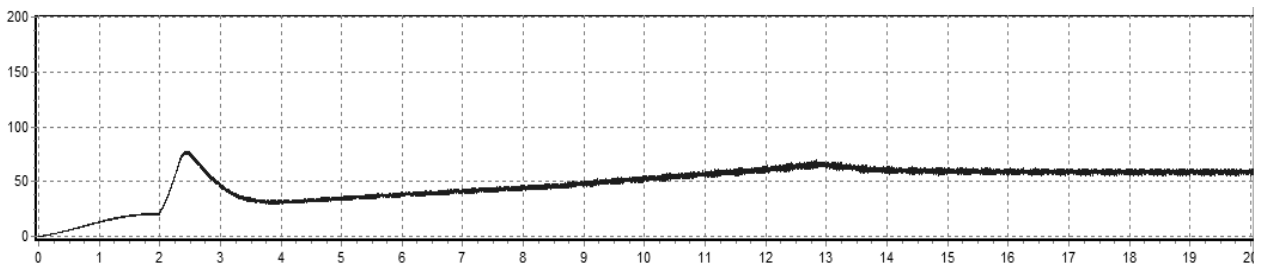
а



б



в



г

Рис. 6. Часові залежності напруги статора генератора (а, миттєві значення), напруги (б) та струму збудження (в) генератора, струму збудження збудника (г) у режимі початкового збудження за відсутності гнучкого зворотного зв'язку за струмом збудження генератора

Висновки

Технологія гібридного моделювання із застосуванням цифрових моделей реального часу у поєднанні з фізичними об'єктами дає змогу проводити діагностування та налаштування реальних систем керування за відсутності об'єктів керування, що підтверджено, зокрема, її використанням для тестування автоматичних регуляторів збудження турбогенераторів електростанцій. Визначальний вплив на якість перехідних процесів режиму початкового збудження турбогенератора має жорсткий зворотний зв'язок за напругою збудження, відсутність якого спричиняє коливання напруги генератора під час її наростання в діапазоні близько 20 %. На якість регулювання напруги та струму збудження впливає також гнучкий зворотний зв'язок за струмом збудження генератора.

1. R. A. Ufa, A. S. Vasilev and A. A. Suvorov, "Development of hybrid model of B2B HVDC", 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, 2017. – P. 1–5. 2. K. Ou et al., "MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, no. 4. – P. 1109–1116, Dec. 2014. 3. Borovikov, Y. S., Sulaymanov, A. O., Gusev, A. S., Andreev, M. V. "Simulation of automatic exciting regulators of synchronous generators in hybrid real-time power system simulator", 2nd Intern. Conference "Systems and Informatics (ICSAI)", Shanghai, 2014. – P. 153–158. 4. S. A. Vilsen, M. Fore and A. J. Sorensen, "Numerical models in real-time hybrid model testing of slender marine systems," OCEANS 2017 – Anchorage, Anchorage, AK, 2017. – P. 1–6. 5. Plachtyna O. A hybrid model of the electrical power generation system / Plachtyna O., Kutsyk A. // Proceeding of 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), IEEE Conference Publications. – 2016. – P. 16–20. 6. Плахтина О.Г., Куцик А. С., Чумак В. П., Мальцев М. О. Аналіз методом математичного моделювання динаміки паралельної роботи турбогенераторів Південно-Української АЕС // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. випуск «Проблеми автоматизованого ЕП. Теорія і практика» . – Кременчук, 2012. – С. 342–343. 7. Плахтина О. Г. Числовий однокроковий метод аналізу електричних кіл і його застосування в задачах електромеханіки / О. Г. Плахтина // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 30. – С. 223–225. 8. Юрганов А. А. Регулирование синхронных генераторов / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников. – СПб.: Наука, 1996 – 138 с. 9. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем / Плахтына Е. Г. – Л.: Вища шк., 1986. – 161 с.