

УДК 621.316.722.9:629.735.064.53(045)
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2022.2\(489\).8](https://doi.org/10.15589/znp2022.2(489).8)

NEURO-NETWORK REGULATOR OF AC AVIATION POWER ACTION VOLTAGE

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ АВІАЦІЙНОГО ЕНЕРГОВУЗЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Serhii V. Yenchев

esw@ukr.net

ORCID: 0000-0001-6994-9378

Viktor P. Zakharchenko

vzahar@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9370-4661

Tetiana P. Hobatiuk

rennfahrerin97@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3453-8450

С. В. Єнчев,

докт. техн. наук, доцент

В. П. Захарченко,

канд. техн. наук, доцент

Т. П. Гобатюк,

аспірантка

National Aviation University, Kyiv

Національний авіаційний університет, м. Київ

Abstract. The development of aviation electrified complexes leads to an increase in electricity consumers. The installed capacity of the equipment is growing, which leads to an overall increase in aircraft energy consumption, against the background of growing demands on the quality of electricity. Contactless synchronous generators with rotating rectifiers, which use deviation voltage regulators, have been widely used in aviation AC power supply systems. The article considers actual combined voltage regulation: deviation and perturbation using artificial neural networks. The main task is to develop the mathematical model and analysis of the combined intelligent neural network voltage regulator of the aviation synchronous contactless generator, which improves the quality of electricity. The mathematical model of an aviation synchronous contactless generator consisting of a main synchronous generator with a rotating open-pole inductor, an exciter – a six-phase synchronous generator with a rectifier and an exciter – a three-phase magnetoelectric generator. The basic mathematical relations are obtained, which connect the output voltage of the generator from the control influence – the control signal of the neural network. The structural scheme of the combined neural network control system with two control circuits is developed: by deviation – output voltage; perturbation – generator current. The control characteristics of the generator are used to train the neural network. A three-layer backpropagation network containing 4 neurons in the input layer was elaborated; 55 neurons in the hidden layer; 1 neuron in the source layer. The Levenberg-Marquardt algorithm with a learning error of 0.001 was used as a training algorithm. The modeling of voltage control based on the neural network to assess its response to a single function. The simulation results show that the voltage regulation time is 0.09 s, and the control error does not exceed 2%. That is, the control system with a neural network provides high quality transients.

Key words: regulation, voltage, aviation synchronous generator, neural network, combined control.

Анотація. Розвиток авіаційних електрифікованих комплексів призводить до збільшення споживачів електричної енергії. Підвищується встановлена потужність обладнання, що призводить до загального збільшення енергоспоживання літака, на тлі зростаючих вимог до якості електричної енергії. В авіаційних системах електропостачання змінного струму широке застосування отримали безконтактні синхронні генератори з обертовими випрямлячами, в яких використовуються регулятори напруги за відхиленням. У статті розглядається перспективне комбіноване регулювання напруги: за відхиленням і збуренням з використанням штучних нейронних мереж. Основне завдання - розробка математичної моделі та аналіз комбінованого інтелектуального нейромережевого регулятора напруги авіаційного синхронного безконтактного генератора, що забезпечує підвищення якості електричної енергії. Сформовано математичну модель авіаційного синхронного безконтактного генератора, що складається з основного синхронного генератора з обертовим явнополюсним індуктором, збуджувача – шестифазного синхронного генератора з випрямлячем та підбуджувача – трифазного магнітоелектричного генератора. Отримано основні математичні співвідношення, які пов'язують вихідну напругу генератора

від керувального впливу – сигналу керування нейронної мережі. Розроблено структурну схему комбінованої нейромережевої системи регулювання з двома контурами регулювання: за відхиленням – вихідної напруги; за збуренням – струм генератора. Для навчання нейронної мережі використовуються регулювальні характеристики генератора. Була розроблена тришарова мережа зворотного поширення, яка містить 4 нейрони у вхідному шарі; 55 нейронів у прихованому шарі; 1 нейрон у вихідному шарі. В якості навчального алгоритму використано алгоритм Левенберга-Марквардта з похибкою навчання 0,001. Проведено моделювання керування напругою на базі нейронної мережі для оцінки її реакції на одиничну функцію. Результати моделювання показують, що час регулювання напруги складає 0,09 с, а похибка регулювання не перевищує 2%. Тобто, система регулювання з нейронною мережею забезпечує високу якість перехідних процесів.

Ключові слова: регулювання, напруга, авіаційний синхронний генератор, нейронна мережа, комбіноване керування.

Вступ. Розвиток електрифікованих комплексів повітряних суден (ПС) призводить до збільшення споживачів електричної енергії. Наразі практичне все бортове обладнання ПС є споживачем електричної енергії. Разом з цим, підвищується встановлена потужність обладнання, що призводить до загального збільшення енергоспоживання ПС. Одночасно зростають вимоги до якості електричної енергії. Система електропостачання (СЕП) ПС відноситься до авіаційного обладнання й повинна забезпечувати ефективне і безпечне енергопостачання систем ПС за різноманітних зовнішніх збуреннях при якості електроенергії, що відповідає вимогам ДСТУ ISO 1540:2018 Аерокосмічні системи. Характеристика бортових повітряних електричних систем [1].

Постановка задачі. На сучасних ПС використовується цифрове та радіоелектронне обладнання, що характеризується імпульсними режимами роботи, які негативно впливають на якість електричної енергії: збільшується час перехідних процесів, збільшуються провали та викиди при комутації [2, с. 83]. У авіаційних СЕП змінного струму широке застосування отримали безконтактні синхронні генератори з обертовими випрямлячами, в яких використовуються регулятори напруги за відхиленням. Перспективним є впровадження комбінованого регулювання напруги: за відхиленням і збуренням [2, с. 105; 3, с. 43], з використанням цифрових засобів керування. Цифрові регулятори мають ряд суттєвих переваг, що полягають у вищій точності, завадостійкості, можливості реалізації складних законів керування, перебудові структури, появі можливості побудови адаптивних регуляторів з елементами штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування теорії та синтезу систем регулювання напруги з елементами штучного інтелекту викладено в роботах [4-9]. Використання регуляторів напруги з нечіткою логікою [6-9] і нейронними мережами [4,5] для синхронного генератора дозволяє покращити динаміку процесів регулювання напруги, зменшити час перехідних процесів, зменшити провали та викиди напруги при комутації навантаження.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Використання комбінованого інтелектуального регулятора авіаційного енерговузла змінного струму на базі безконтактного синхронного генератора обмежене відсутністю математичних моделей для аналізу процесів регулювання напруги в статичних і динамічних режимах та експериментальних досліджень, у тому числі імітаційного моделювання.

Мета дослідження – розробка математичної моделі та аналіз комбінованого інтелектуального нейромережевого регулятора напруги авіаційного синхронного безконтактного генератора (АСБГ), що забезпечує підвищення якості електричної енергії, є актуальною науковою задачею, яка вирішується в цій статті.

Методи дослідження – теорія електричних і магнітних кіл, теорія автоматичного керування, теорія штучних нейронних мереж, комп'ютерне моделювання.

Об'єкт дослідження – процеси регулювання напруги авіаційного синхронного безконтактного генератора змінного струму.

Предмет дослідження – методи, моделі та технічні засоби регулювання напруги авіаційного синхронного безконтактного генератора змінного струму.

Математична модель АСБГ з нейромережевим регулятором. АСБГ складається з трьох електричних машин [2, с. 81] (рис. 1):

1. Основного синхронного генератора, що являє собою синхронну машину з обертовим явнополюсним індуктором, обмотка збудження якого живиться постійним струмом через обертовий випрямляч від шестифазної РОЗ. Індуктор генератора, випрямлячі та РОЗ розміщені на одному валу. Живлення ОЗБ здійснюється постійним струмом через регулятор напруги БРЗУ від РОП підбуджувача, постійний магніт якого розміщено на роторі. РОГ АСБГ розрахована на номінальну напругу 200/115 В і частоту 400 Гц.

2. Збуджувач – шестифазний СГ з вбудованим однонапівперіодним випрямлячем. Збудження електромагнітне здійснюється випрямленим струмом підбуджувача.

3. Підбуджувач являє собою трифазний магнітоелектричний генератором з ротором типу «зірочка».

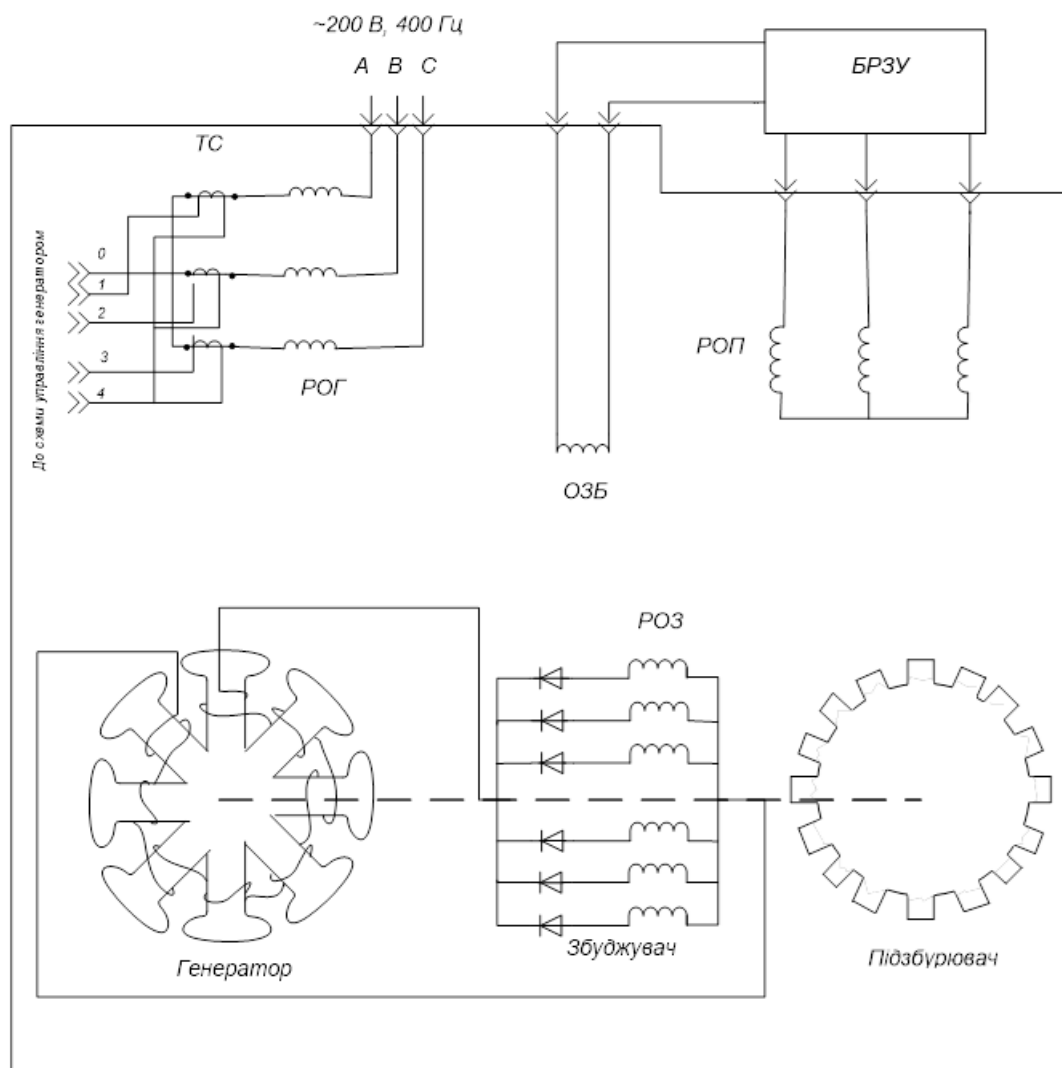


Рис. 1. Схема АСБГ: БРЗУ – блок регулювання, захисту та управління; РОП – робоча обмотка підбуджувача; РОЗ – робоча обмотка збуджувача; ОЗБ – обмотка збудження (збуджувача); РОГ – робоча обмотка генератора; ТС – трансформатори струму

Напруга АСБГ без врахування неймережевого регулятора напруги (НМРН) має вигляд [2, с. 82; 3, с. 45]:

$$u_G = K_1 u_{q_0} \left[(K_2 - 1) e^{\frac{t}{T'_{EG}}} + 1 \right], \quad (1)$$

де $K_1 = \frac{z_q z}{x_d x_q + r^2}$; $K_2 = \frac{x_d x_q + r^2}{x'_d x_q + r^2}$; x'_d - синхрон-

ний перехідний індуктивний опір СГ за подовжньою віссю; x_d - синхронний індуктивний опір СГ за подовжньою віссю; x_q - синхронний індуктивний опір СГ за поперечною віссю; u_{q_0} - початкова напруга в НМРН; T'_{EG} - постійна часу обмотки збудження СГ за замкнутого статора; z - повний опір навантаження; z_q - повний опір навантаження за поперечною віссю; r - активний опір навантаження.

Закон зміни напруги на затискачах СГ за відсутності регулювання визначається параметрами генератора, а саме, індуктивними опорами за подовжньою і поперечною осями, постійною часу обмотки збудження СГ і параметрами навантаження.

Напруга АБСГ після увімкнення навантаження не повернеться до свого початкового рівня, якщо не відбудеться збільшення струму збудження. Збільшення струму збудження в СГ у результаті автоматичного збільшення сигналу керування НМРН при вмиканні навантаження [5, с. 1531]. Зміна напруги СГ під дією керувального сигналу регулятора з використанням нейронної мережі визначається виразом [4, с. 454]

$$u_{G2} = \frac{z_q z \cdot z_{qB} z_B U_{NN}}{(x_d x_q + r^2)(x_{dB} x_{qB} + r_B^2)} \left[1 - \frac{T_{EG}^2 \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + T_{EE}^2 \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EE}}}}{(T'_{EG} - T'_{EE})} \right], \quad (2)$$

де U_{NN} - керувальний сигнал НМРН.
Приймаємо

$$\frac{z_{qB} z_B}{x_{dB} x_{qB} + r_B^2}. \quad (3)$$

Тоді, з врахуванням (1) і (3) рівняння (2) приймає вигляд

$$u_{G2} = K_1 K_3 U_{NN} \left[1 - \frac{T_{EG}'^2 \cdot e^{-\frac{t}{T_{EG}'}} + T_{EE}'^2 \cdot e^{-\frac{t}{T_{EE}'}}}{(T_{EG}' - T_{EE}')} \right] = K_1 K_3 U_{NN} F(t), \quad (4)$$

$$\text{де } F(t) = 1 - \frac{T_{EG}'^2 \cdot e^{-\frac{t}{T_{EG}'}} + T_{EE}'^2 \cdot e^{-\frac{t}{T_{EE}'}}}{(T_{EG}' - T_{EE}')}, \quad (5)$$

Для визначення залежності напруги на затисках АБСГ з НМРН після увімкнення навантаження складемо вирази (1) і (4)

$$U_G = U_{G1} + U_{G2} = F(t) = K_1 u_0 \left[(K_2 - 1) e^{-\frac{t}{T_{EG}'}} + 1 \right] + K_1 K_3 U_{NN} F(t). \quad (6)$$

З виразів (1), (4) і (6) випливає, що в АБСГ з НМРН швидкість зростання напруги СГ визначається постійними часами кіл збудження збуджувача T_{EE}' та генератора T_{EG}' . Статичний режим отримаємо при $t \rightarrow \infty$ виразу (6)

$$U_G = K_1 K_3 U_{NN}. \quad (7)$$

Значення сигналу керування нейронної мережі U_{NN} за заданого типу та значенні навантаження можна реалізувати у вигляді навчальної вибірки для НМРН.

Комбіноване нейромережеве регулювання напругою АБСГ. Структура комбінованої нейромережевої системи регулювання напруги СГ наведена на рис. 2. У системі (рис. 2) використано два канали регулювання:

1. За відхиленням – контур напруги, що складається з вимірювача напруги, диференціатора.
2. За збуренням – контур струму, який використовує датчик струму.

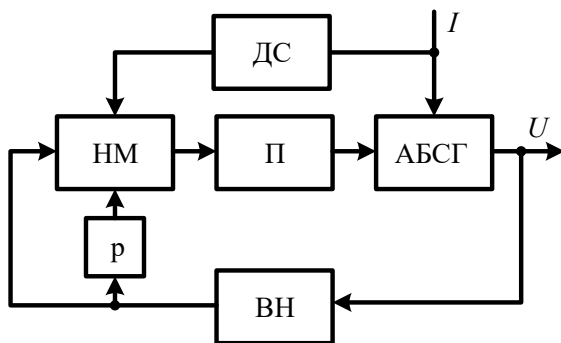


Рис. 2. Комбінована нейромережева система регулювання напруги АБСГ: ВН – вимірювач напруги; ДС – датчик струму; П – підсилювач; НМ – нейронна мережа, р – диференціатор

Для навчання НМ використовуються регулювальні характеристики СГ (рис. 3).

Комбінована система регулювання містить НМРН, структуру якого необхідно визначити. Для синтезу НМ-регулятора скористаємося методикою визначення мінімально-необхідної структури нейронної мережі викладених в [10, с. 270; 11, с. 37; 12, с. 537].

Була розроблена тришарова мережа зворотного поширення рис. 4, яка містить 4 нейрони у вхідному шарі, за кількістю компонентів вхідного вектору параметрів – вихідна напруга генератора, швидкість зміни напруги, струм навантаження, $\cos\phi$, зі сигмоїдною функцією активації logsig ; 55 нейронів у прихованому шарі з сигмоїдною функцією активації; 1 нейрон у вихідному шарі – струм збудження збудника АБСГ з лінійною функцією активації purelin .

В якості навчального алгоритму використано алгоритм Левенберга-Марквардта [5, с. 1533; 12, с. 540]. Значення інтегральної середньоквадратичної похибки навчання встановлено в 0,001, процес навчання ілюструється графіком залежності (рис. 5).

У середовищі Matlab / Simulink розроблені моделі регуляторів напруги для АБСГ (типу ГТ-30НЖЧ12) з ПІД-регулятором (рис. 6, а) та НМРН (рис. 6, б). Моделювання розробленої моделі системи керування напругою на базі НМРН проводиться для оцінки її реакції на одиничну функцію. Вибір навчальної вибірки регулятора здійснювалися в процесі моделювання. Таким чином, при використанні нейро-мережевого регулятора з'являється можливість завдання навчальної вибірки, яка враховує зміну режиму роботи АБСГ, рівень збудження тощо. Перехідні характеристики АБСГ з ПІД та НМ регуляторами напруги наведені на рис. 7. Моделювання процесів регулювання напруги АБСГ проводилося в Simulink-моделі, структура якої має вигляд (рис. 8).

В основну функцію математичної моделі АБСГ надходять такі параметри: струм навантаження, кое-

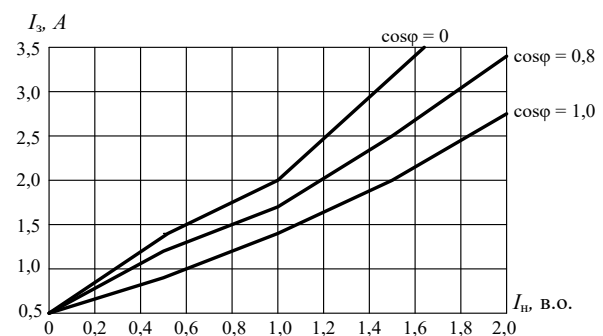


Рис. 3. Регулювальні характеристики АБСГ: $I_{\square}$ – струм збудження збудника АБСГ, А; $I_{\square}$ – струм навантаження, в.о.

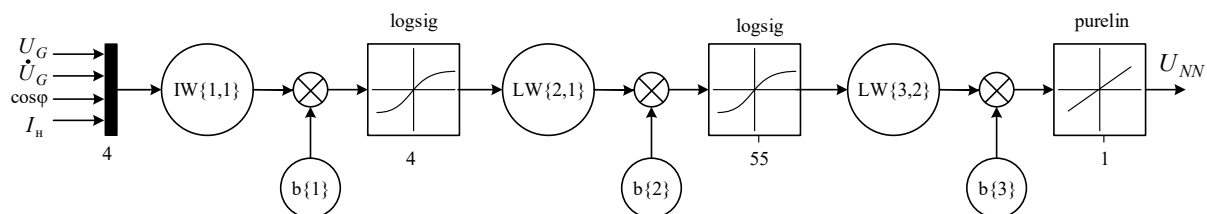


Рис. 4. Структура неймережевого регулятора наруги АБСТ

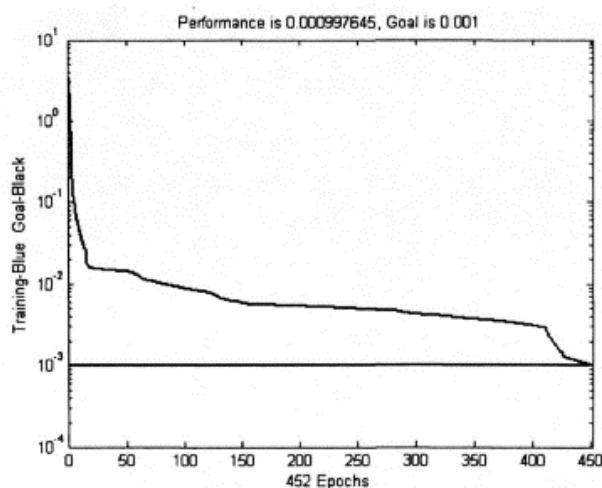


Рис. 5. Залежність зміни інтегральної квадратичної похибки від кількості епох (циклів навчання)

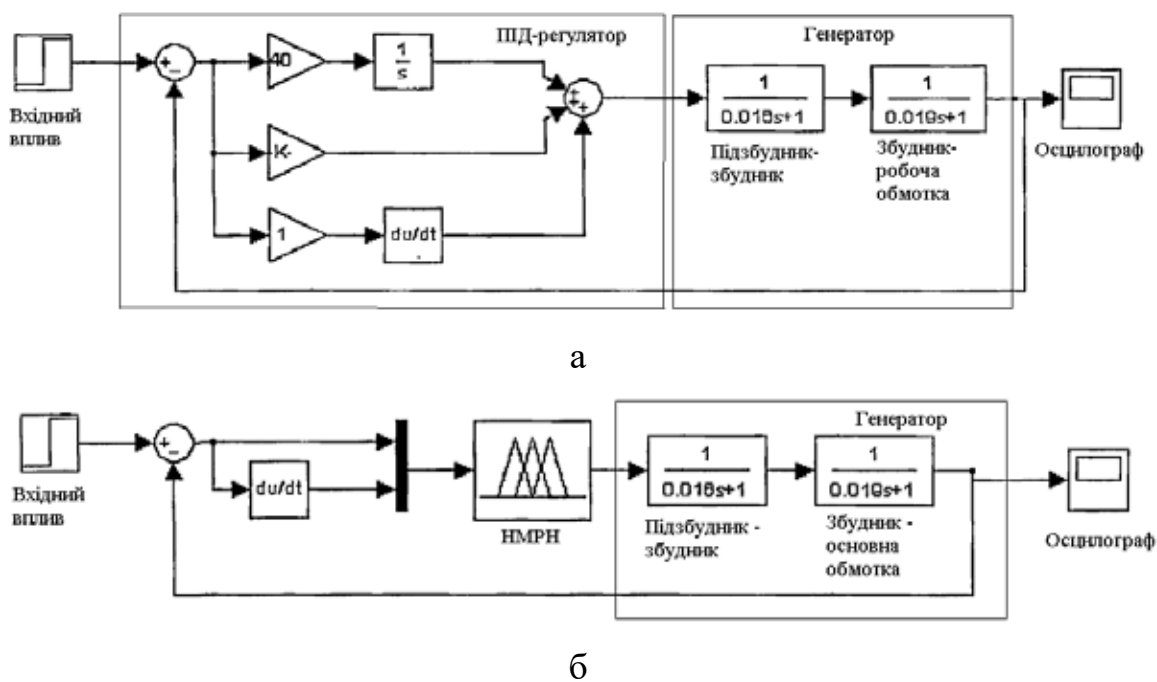


Рис. 6. Досліджувані моделі АБСТ: а – з ПД-регулятором; б – з НМРН

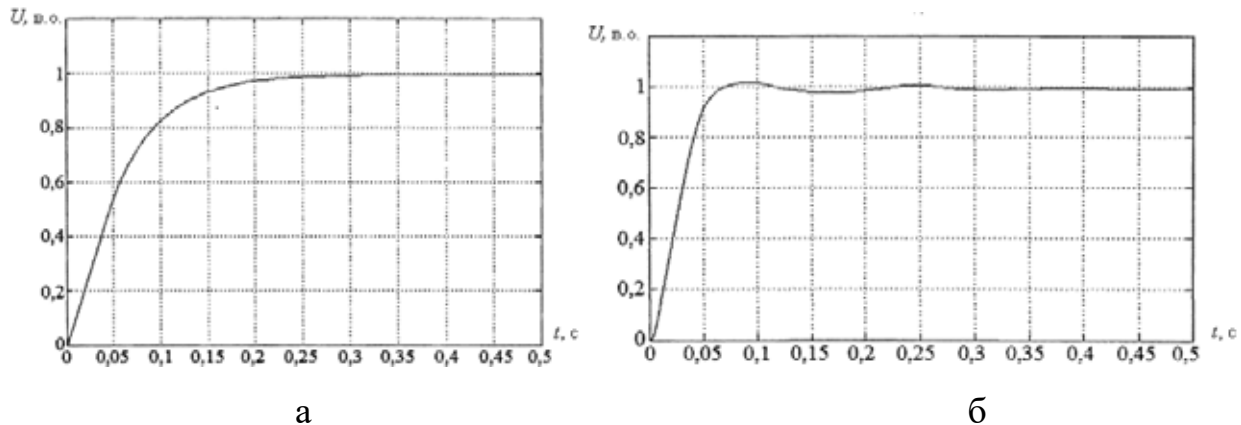


Рис. 7. Перехідні характеристики напруги АБСГ: а – з ПІД-регулятором; б – з НМРН

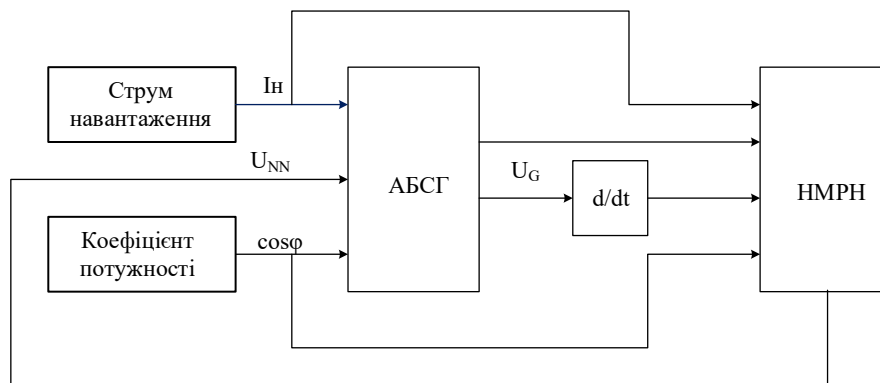


Рис. 8. Структура моделі системи регулювання напруги АБСГ

фіцієнт потужності, напруга збудження. Виходом математичної моделі є напруга генератора. НМРН представлений блоком, що викликається з робочої області Matlab попередньо налаштована нейронна мережа, в якій надходять 4 параметри – струм навантаження, напруга генератора та швидкість її зміни, коефіцієнт потужності. Виходом НМРН є напруга збудження.

Висновки. Результати моделювання показують, що час регулювання напруги в АБСГ з НМРН складає 0,09 с, похибка регулювання не перевищує 2%. Тобто, система регулювання з нейронною мережею забезпечує високу якість перехідних процесів. Необхідно провести серію експериментів, шляхом математичного моделювання в статичних і динамічних режимах роботи за різних величин та характеру навантажень.

REFERENCES

- [1] DSTU ISO 1540:2018 Aerokosmichni systemy. Kharakterystyka bortovykh povitryanykh elektrychnykh system [Aerospace systems. Characteristics of onboard air electrical systems] (ISO 1540:2006, IDT).
- [2] V.P. Zakharchenko, S.V. Yenchov, S.S. Ilyenko. Elektropostachannya povitryanykh suden. Navchal'nyy posibnyk [Aircraft power supply. Textbook]. Kyiv, 2021, 244 p.
- [3] G.N. Utlyakov, V.P. Kulyapin, Ye.V. Bovtrikova. Kombinirovannyye sistemy regulirovaniya napryazheniya sinkhronnykh generatorov [Combined voltage regulation systems for synchronous generators]. Moscow, 1998, 224 p.
- [4] Y.Y. Hsu, R.H. Liang. Scheduling of hydroelectric generations using artificial neural networks, IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No 5, September 1994, pp.452-458.
- [5] J.W. Park, R.G. Harley. Critic Based Neurocontrol for Synchronous Generator in Power System Using MLP/RBF Neural Networks. Industry Applications, IEEE Transactions on Vol.39, Issue 5, Sept. 2003, pp. 1529 – 1540.
- [6] M. Djukanovic, Dj. Djukanovic, M. Calovic. Coordinated stabilizing control for the exciter and governor loops using fuzzy set theory and neural nets. Electrical Power & Energy Systems, 1997, Vol.19, No.8, pp.489-499.

- [7] G.N. Utlyakov, V.M. Assadullin *Primeneniye nechetkoy logiki v sistemakh regulirovaniya napryazheniya sinkhronnykh generatorov* [Application of fuzzy logic in voltage regulation systems of synchronous generators]. Electromechanics, electrotechnical complexes and systems. Ufa, 2006. pp.14-19.
- [8] V.M. Assadulin *Sistemy regulirovaniya napryazheniya sinkhronnogo generatora s ispol'zovaniyem nechetkoy logiki* [Voltage regulation systems of a synchronous generator using fuzzy logic]. Bulletin of USATU. T.8. No. 1. Ufa, 2006. pp.27-30.
- [9] M.E. El-Hawary. *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*. Dalhousie University, 1998, 344 p.
- [10] V.P. Zakharchenko, S.V. Yenchев, S.S. Ilyenko. *Metody ta zasoby zabezpechennya rezervuvannya avioniky*. Monohrafiya [Methods and means of providing avionics redundancy]. Kyiv, 2020, 276 p.
- [11] S. V. Yenchев, S. O. Taku. *Rozrobka adaptivnoho neyromerezhevoho rehulyatora intelektualnoyi systemy keruvannya aviatsiynym dvyhunom* [Development of adaptive neural network regulator an intelligent aircraft engine control system]. Scientific notes of Tavriya National University named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences. 2018. № 6. vol. 29 (68), pp. 34–39.
- [12] S. V. Yenchев, S. O. Taku. *Syntezy alhorytmiv nalashtuvannya parametriv neyromerezhevoho rehulyatora aviatsiynoho hazoturbinnoho dvyhuna* [Synthesis of algorithms for adjusting the parameters of the neural network regulator of an aircraft gas turbine engine]. Science-intensive technologies. 2018. № 4 (40), pp. 535–543.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДСТУ ISO 1540:2018 Аерокосмічні системи. Характеристика бортових повітряних електричних систем (ISO 1540:2006, IDT).
- [2] Захарченко В.П. Електропостачання повітряних суден. /В.П. Захарченко, С.В. Єнчев, С.С. Ільєнко. – Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2021. – 244 с.
- [3] Утляков Г.Н. Комбинированные системы регулирования напряжения синхронных генераторов. / Г.Н. Утляков, В.П. Куляпин, Е.В. Бовтрикова – М.: МАИ, 1998. – 224 с.
- [4] Hsu Y.Y., Liang R.H. Scheduling of hydroelectric generations using artificial neural networks, IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 141. No 5, September 1994, pp.452-458.
- [5] Park J.W., Harley R.G. Critic Based Neurocontrol for Synchronous Generator in Power System Using MLP/RBF Neural Networks. Industry Applications, IEEE Transactions on Vol.39, Issue 5, Sept. 2003, pp. 1529 – 1540.
- [6] Djukanovic M., Djukanovic Dj., Calovic M. Coordinated stabilizing control for the exciter and governor loops using fuzzy set theory and neural nets. Electrical Power & Energy Systems, 1997, Vol.19, No.8, pp.489-499.
- [7] Утляков Г.Н., Ассадуллин В.М. Применение нечеткой логики в системах регулирования напряжения синхронных генераторов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 14-19.
- [8] Ассадуллин В.М. Системы регулирования напряжения синхронного генератора с использованием нечеткой логики // Вестник УГАТУ. Т.8. № 1. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 27-30.
- [9] El-Hawary M.E. *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*. Dalhousie University. IEEE PRESS, 1998. – 344 pp.
- [10] Захарченко В.П. Методика та засоби забезпечення резервування авіоніки. /В.П. Захарченко, С.В. Єнчев, С.С. Ільєнко // Монографія. –К.: НАУ, 2020. – 276 с.
- [11] Єнчев С. В., Таку С. О. Розробка адаптивного неймережевого регулятора інтелектуальної системи керування авіаційним двигуном. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. № 6. т. 29 (68). С. 34–39.
- [12] Єнчев С. В., Таку С. О. Синтез алгоритмів налаштування параметрів неймережевого регулятора авіаційного газотурбінного двигуна. Наукоємні технології. 2018. № 4 (40). С. 535–543.

© С. В. Єнчев, В. П. Захарченко, Т. П. Гобатюк
Дата надходження статті до редакції: 20.07.2022
Дата затвердження статті до друку: 29.07.2022