

DOI: 10.18721/JEST.240202
УДК 621.311; 621.313

Д.Н. Седойкин¹, А.А. Юрганов²

1 – ООО Научно-производственное предприятие «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия
2 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

АДАПТИВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АППРОКСИМАТОРА В РЕЖИМЕ НЕДОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Переход к цифровой реализации систем управления позволил за счет применения более совершенных алгоритмов регулирования возбуждения синхронных генераторов повысить качество и надежность электроснабжения потребителей. Перспективное направление развития систем автоматического управления возбуждением – разработка адаптивных системных стабилизаторов для эффективного демпфирования электромеханических колебаний в энергосистемах. Один из вариантов решения задачи адаптивного управления – настройка системного стабилизатора с помощью нечеткого аппроксиматора, который в зависимости от параметров электроэнергетической системы, к которой подключен генератор, определяет оптимальные коэффициенты каналов стабилизации по избыточной мощности и отклонению скорости энергоблока. Особенно важно обеспечить оптимальность настройки системного стабилизатора в режимах потребления генератором реактивной мощности (невозбуждение). В работе показано, что закономерности, связывающие оптимальные коэффициенты автоматического регулятора напряжения и системного стабилизатора с параметрами энергосистемы, выбранные в нормальных режимах генератора, справедливы и для режима невозбуждения.

Ключевые слова: синхронные машины, регулирование возбуждения, режим невозбуждения, системный стабилизатор, демпфирование электромеханических колебаний, адаптивный регулятор возбуждения.

Ссылка при цитировании:

Д.Н. Седойкин, А.А. Юрганов. Адаптивный автоматический регулятор на основе нечеткого аппроксиматора в режиме невозбуждения синхронной машины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 22–29. DOI: 10.18721/JEST.240202.

D.N. Sedoykin¹, A.A. Yurganov²

1 – EKRA Research and Production Enterprise Ltd, Cheboksary, Russia
2 – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

AN ADAPTIVE AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR BASED ON FUZZY APPROXIMATION OPERATING WITH AN UNDER-EXCITED GENERATOR

Digital implementation of control systems made it possible to improve the quality and reliability of power supply through more sophisticated algorithms for regulating the excitation of synchronous generators. A promising direction of development of automatic excitation control systems is the development of adaptive system stabilizers for effective damping of electromechanical oscillations in power systems. One of the options for solving the problem of adaptive control is to adjust the system stabilizer with the help of a fuzzy approximator. The fuzzy approximator, depending on the parameters of the power system, determines the optimum coefficients of the stabilization channels for excess power and the speed deviation of the power unit. It is especially important to ensure the optimum tuning of the system stabilizer in the under-excitation mode. The article shows that the regularities connecting the optimum coefficients of the automatic

voltage regulator and the system stabilizer with the parameters of the power system selected in normal generator modes are also valid for the under-excitation mode.

Keywords: synchronous machines, excitation control, underexcitation mode, power system stabilizer, damping of electromechanical oscillations, adaptive excitation regulator.

Citation:

D.N. Sedoykin, A.A. Yurganov, An adaptive automatic excitation regulator based on fuzzy approximation operating with an under-excited generator, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 22–29, DOI: 10.18721/JEST.240202.

XXI век в электроэнергетике ознаменовался массовым переводом аппаратуры управления и регулирования на принципиально новую аппаратную базу – микропроцессорную. Она позволяет расширить возможности систем управления и повысить качество и надежность электроснабжения потребителей. Во многих отраслях науки и техники этот переход сопровождается внедрением принципиально новых алгоритмов (нечеткая логика и др.) [8, 9]. Однако, в автоматике и регулировании возбуждения синхронных машин (СМ) возможности цифровой техники используются только при реализации логических операций. Как правило, реализация цифровых регуляторов сопровождается переносом с аналоговых устройств предыдущего поколения давно известных ПИД-алгоритмов. В результате недоиспользуются возможности систем управления.

В РФ, как и во всем мире, ведутся разработки интеллектуальных систем автоматического управления возбуждением (САУВ) [1–3, 7, 10, 12, 13]. Одним из направлений таких работ является адаптивная САУВ с применением нечеткого аппроксиматора (НА); ее функциональная схема представлена на рис. 1 [4, 5].

Основным элементом схемы является НА [11, 14, 15], который в зависимости от параметров эквивалентной схемы энергосистемы, формируемой на основе реальных измерений параметров режима СМ, и коэффициента усиления регулятора напряжения, определяет оптимальные значения коэффициентов каналов стабилизации – по отклонению скорости $k_{\Delta\omega}$ и по избыточной мощности $k_{\Delta P}$, тем самым обеспечивая следующее:

выбор оптимальной настройки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) для всех схемно-режимных условий работы генератора;

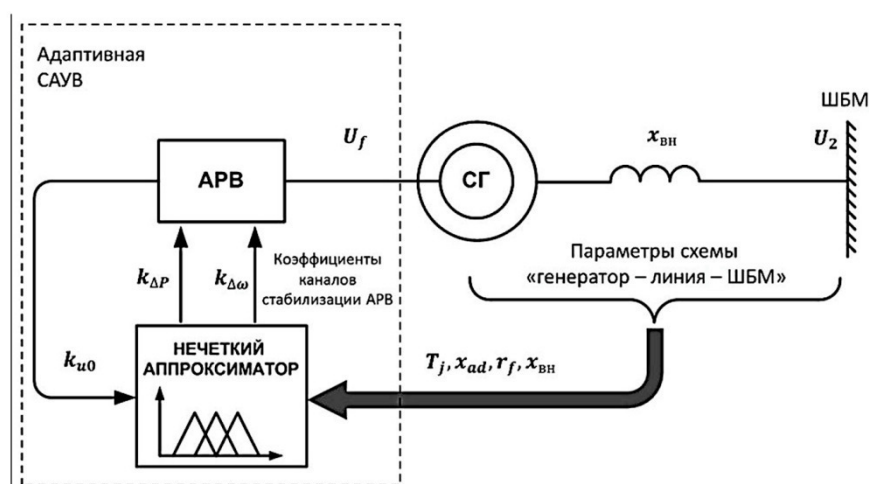


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной САУВ на основе нечеткого аппроксиматора

Fig. 1. Functional diagram of adaptive automatic excitation control system based on fuzzy approximator

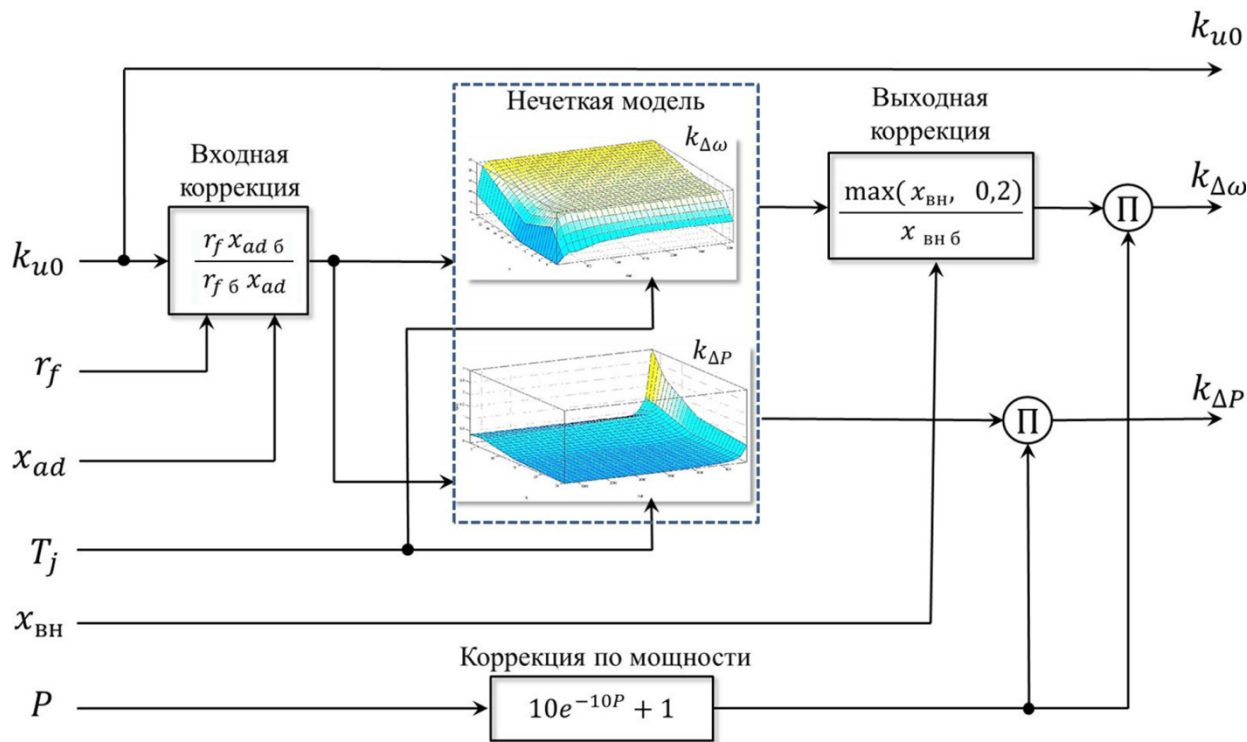


Рис. 2. Структурная схема нечеткого аппроксиматора
 Fig. 2. Structural diagram of fuzzy approximator.

адаптацию САУВ для работы с различными типами СМ.

Структура нечеткого аппроксиматора представлена на рис. 2.

Входными переменными нечеткого аппроксиматора являются: параметры генератора – r_f , x_{ad} , T_j ; эквивалентное сопротивление линии $x_{вн}$; величина активной мощности P и коэффициент усиления регулятора напряжения k_{u0} . Параметры $r_{f\delta}$, $x_{ad\delta}$, $x_{вн\delta}$ – это параметры «базовой» эквивалентной схемы «генератор – линия – шины бесконечной мощности (ШБМ)», на основе которой произведен синтез нечеткой модели (нечеткое ядро) аппроксиматора.

В вышеуказанных работах не рассматривались переходные процессы в режимах потребления реактивной мощности. Такие режимы регулярно появляются при снижении активной нагрузки мощных энергосистем в ночное время, а также при аварийных отключениях линий, соединяющих между собой два или несколько энерго районов, либо при подключении к элек-

тростанции незагруженных линий. В условиях острого дефицита быстродействующих устройств компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях РФ задача оптимизации её потребления и нормализации уровня напряжений в сети решается путем перевода турбогенераторов в режим недовозбуждения. Работа в этих режимах приводит к вибрации и нагреву торцевых зон статора и, как следствие, к снижению ресурса генератора. Кроме того, уменьшение тока возбуждения приводит к снижению уровней статической и динамической устойчивости генератора. Потеря устойчивости в режиме недовозбуждения сопровождается асинхронным ходом «внутри» генератора, когда ротор начинает проворачиваться относительно поля статора; такое возможно даже при работе СМ в очень мощной энергосистеме.

Очевидно, что одновременное решение проблем, возникающих в таких режимах, наталкивается на внутренние противоречия. В этих условиях первостепенное зна-

чение имеет эффективное демпфирование электромеханических колебаний, позволяющее повысить устойчивость энергоблока. Для повышения устойчивости в режимах потребления реактивной мощности в отечественных САУВ применяется канал стабилизации производной тока возбуждения, получивший название стабилизатор внутреннего движения [6]. В предыдущих работах [4, 5] рассмотрен синтез НА и проведена оценка качества регулирования адаптивной САУВ на его основе применительно к режимам выдачи реактивной мощности.

Цель настоящего исследования – определить, способен ли адаптивный АРВ на основе НА в режиме недовозбуждения СМ сохранить заданное (характеризующееся нулевым перерегулированием и единичной степенью затухания электромеханических колебаний) качество регулирования возбуждения без ввода дополнительного канала стабилизации.

В качестве модели энергоблока в составе электроэнергетической системы (ЭЭС) выбрана эквивалентная схема «генератор – линия – ШБМ». Такая схема достаточно точно отображает переходные процессы, связанные с локальными, межсетевыми и межстанционными качаниями. В ней переход в режим недовозбуждения вызывается увеличением напряжения на ШБМ.

Оценка эффективности параметрической адаптации в режиме недовозбуждения проводилась на основе моделирования пе-

реходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям для нескольких генераторов при различных параметрах ЭЭС. Параметры генераторов приведены в таблице. Результаты моделирования аналогичных переходных процессов в режиме перевозбуждения СМ показали, что адаптивная САУВ на основе НА обеспечивает характер переходных процессов, близкий к монотонному [4, 5].

В качестве основных критериев оценки качества переходных процессов выбраны перерегулирование и коэффициент демпфирования. Оценка качества переходного процесса проводилась на основе значения функции его принадлежности к нечеткому множеству «эталонный переходный процесс». Эталонный переходный процесс характеризуется единичной степенью затухания и нулевым значением перерегулирования. Функция принадлежности i -го переходного процесса к этому нечеткому множеству [4] определялась следующим выражением:

$$\mu_i = (1 - \sigma_i)(1 - 1/\zeta_i), \quad (1)$$

где σ_i – перерегулирование; ζ_i – коэффициент демпфирования, а выражение $(1 - 1/\zeta_i)$ определяет степень затухания колебаний.

При моделировании принималось следующее:

Начальные условия: напряжение на шинах генератора – $U = 1$ о.е.; величина активной мощности – $P_0 = 0,6$ о.е. (здесь и далее за единицу принята номинальная полная мощность).

Параметры генераторов

Parameters of synchronous generators

Генератор	Параметры										
	x_d , о.е.	x_q , о.е.	x_s , о.е.	x_{js} , о.е.	x_{D_s} , о.е.	x_{Q_s} , о.е.	r_a , о.е.	r_j , о.е.	r_D , о.е.	r_Q , о.е.	T_j , о.е.
Модельный турбогенератор МТ-30-6 ИЭМ	1,53	1,53	0,04	0,04	0,1*	0,1*	0,003	0,002	10*	10*	5,75
Турбогенератор Белорусской АЭС (БАЭС)	2,32	2,32	0,225	0,14	0,041	0,041	0,005	8E-04	0,136	0,68	11,56

* Нет данных; параметры выбраны исходя из условия снижения влияния демпферных контуров на качество переходных процессов.

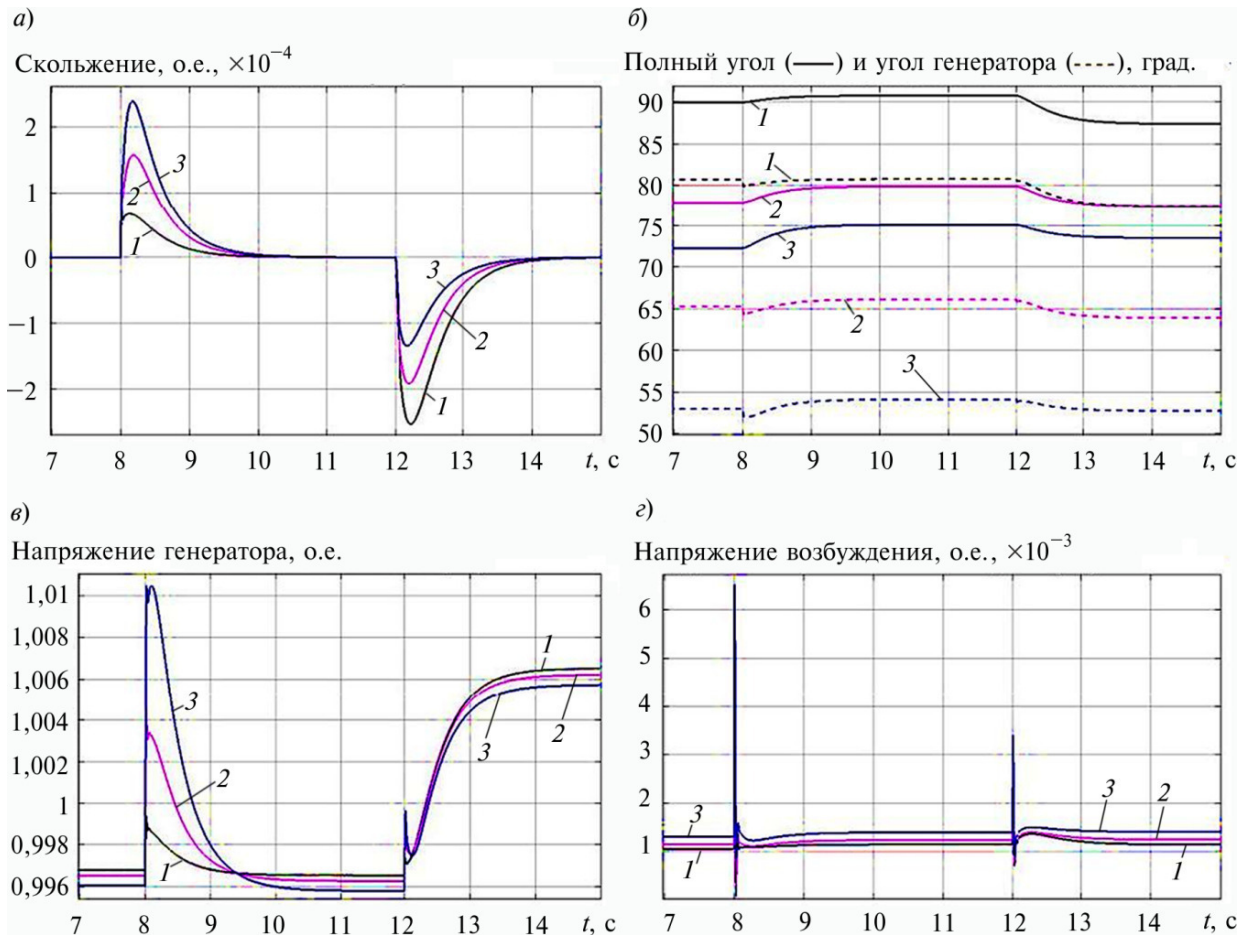


Рис. 3. Переходные процессы в ЭСС модельного генератора МТ30-6 ИЭМ ($S_n = 30$ кВА) при разных $x_{вн}$ (1 – 0,312; 2 – 0,431; 3 – 0,646)
 Fig. 3. Transient processes in the electric power system of the model generator МТ30-6 ИЭМ ($S_r = 30$ kVA) for $x_{вн} = 0,312$ (1); 0,431 (2); 0,646 (3)

Параметры ЭЭС. Внешнее индуктивное сопротивление линии $x_{вн} = [0,312; 0,431; 0,646]$. Напряжение на ШБМ: $U_2 = 1,18$ о.е. для ЭЭС с модельным генератором МТ30-6 ИЭМ; $U_2 = 1,13$ о.е. для ЭЭС с турбогенератором Белорусской АЭС.

Сценарий моделирования. Для генератора, работающего в ЭЭС с внешним индуктивным сопротивлением $x_{вн}$ и напряжением на ШБМ, равным U_2 , на 7-й секунде меняется величина активной мощности на $P_0 = 0,05$ о.е. (возмущающее воздействие), а на 12-й секунде изменяется уставка по напряжению на величину $\Delta U = 0,01$ о.е. (управляющее воздействие).

Результаты моделирования переходных процессов в режиме недовозбуждения для ЭЭС с различными типами генераторов представлены на рис. 3 и 4.

Во всех представленных случаях адаптивный АРВ с НА обеспечивает монотонные переходные процессы с нулевым перерегулированием и единичной степенью затухания. Значения функций μ принадлежности всех переходных процессов к множеству «эталонный переходный процесс» стремятся к 1, что свидетельствует о полной адаптации САУВ к рассмотренным генераторам и изменениям внешней сети.

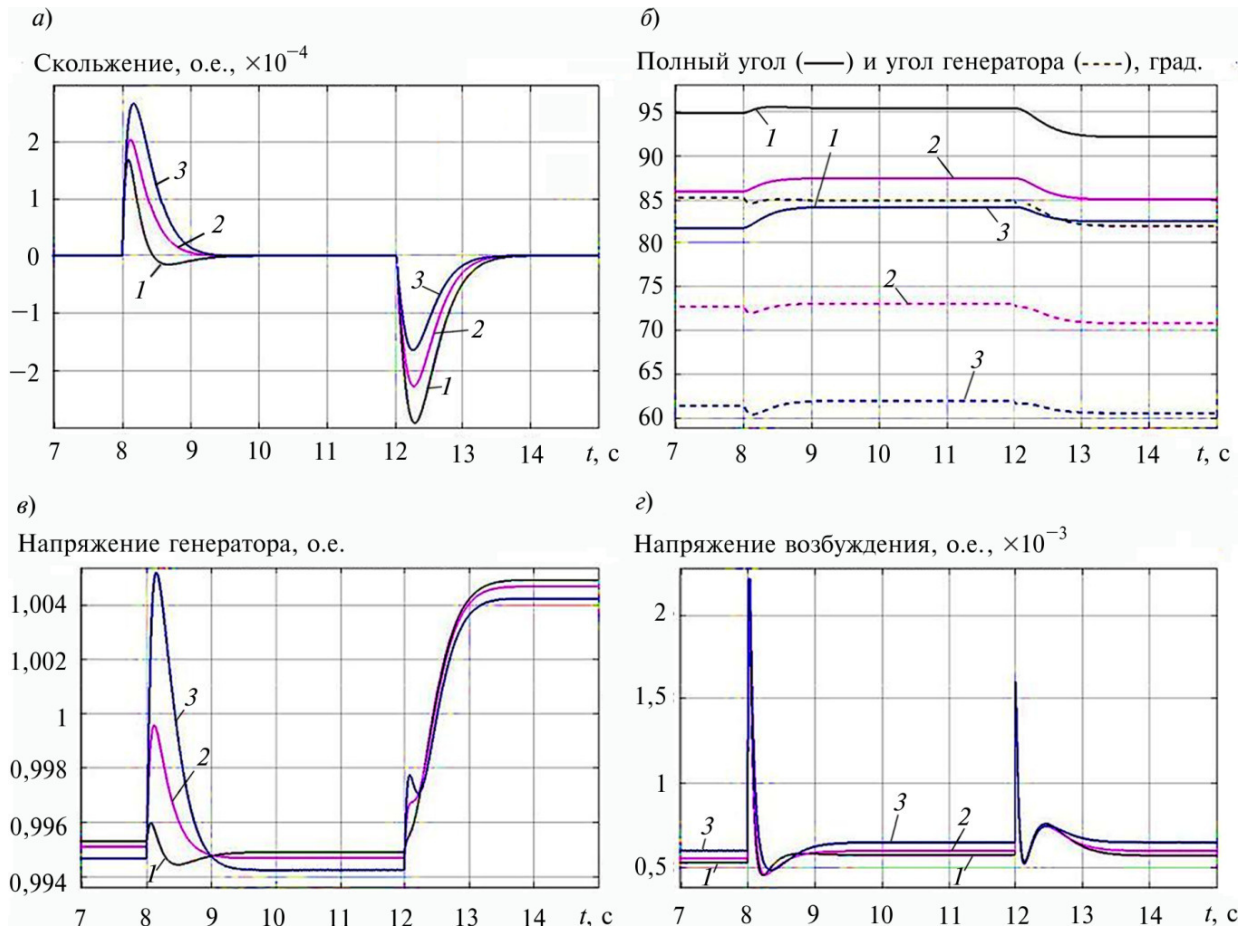


Рис. 4. Переходные процессы в ЭСС турбогенератора Белорусской АЭС ($P_n = 1200$ МВт) ($x_{вн}$: 1 – 0,312; 2 – 0,431; 3 – 0,646)

Fig. 4. Transient processes in the electric power system of the turbine generator of the Belarusian NPP ($P_r = 1200$ MW) for $x_{вн} - 0,312$ (1); 0,431 (2); 0,646 (3)

Вывод

В режимах потребления реактивной мощности турбогенераторов (невозбуждение) для адаптивного АРВ на основе НА нет необходимости введения дополнительного канала стабилизации внутреннего движения, что упрощает САУВ программно

и аппаратно. Закономерности, связывающие с параметрами эквивалентной схемы «генератор – линия – ШБМ» коэффициенты АРВ, при соблюдении которых обеспечивается оптимальное регулирование, справедливы как для режима перевозбуждения, так и для режима невозбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И.А., Шанбур И.Ж., Юрганов А.А. Перспективы применения нечёткой логики в системах регулирования возбуждения синхронных генераторов // Труды международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'98. Том I. СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 1998. С. 242–245.

2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Юрганов А.А., Соколов П.В. Исследование нечетких стабилизаторов возбуждения синхронного генератора // Электричество. 1999. № 8. С. 50–55.

3. Борцов Ю.А., Юрганов А.А., Приходько И.А., Кожевников В.А. Экспериментальное исследо-

вание нечеткого стабилизатора возбуждения синхронного генератора // *Электротехника*. 1999. № 3. С.1–5.

4. **Седойкин Д.Н., Юрганов А.А.** Новая структура канала стабилизации режима синхронного генератора и общие принципы его настройки на основе нечеткого аппроксиматора // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. 2016. № 1 (74). С. 67–74.

5. **Седойкин Д.Н.** Адаптивный регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности» 31 августа 2017 г. Часть I. Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АН-ПИ). 2017. С. 117–121.

6. **Юрганов А.А., Кожевников В.А.** Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996. 138 с.

7. **Бошляков А.А., Рубцов В.И.** Проектирование нечеткого регулятора следящей системы // *Инженерный журнал: Наука и инновации*. 2013. № 8. [Электр. ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/search/word/page1.html>

8. **Жмудь В.А.** Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // *Автоматика и программная инженерия*. 2014. № 2(8). С. 106–122.

9. **Жмудь В.А., Терешкин Д.О., Прыткова О.В.** Адаптивные системы управления // Сборник научных трудов НГТУ. 2011. № 1(63). С. 23–40.

10. **Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Стоцкая А.Д.** Адаптивное управление синхронным генератором // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского университета. 2016. С. 191–194.

11. **Пергат А.** Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

12. **Поляхов Н.Д., Ха Ань Туан.** Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма // *Электричество*. 2014. № 12. С. 47–54.

13. **Zhiting Guo, Hong Song, Penggao Wen, Zhizheng Fan.** Study on Synchronous Generator Excitation Control Based on FLC // *World Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 232-239. [Электр. ресурс]. URL: http://file.scirp.org/pdf/WJET_2015111913301109.pdf

14. **Kosko B.** Fuzzy systems as universal approximators // *IEEE Internal Conf. Fuzzy Systems (8–12 March 1992, San Diego-CA)*. 1992. P. 1153–1162.

15. **Timothy J. Ross.** Fuzzy logic with engineering application // *Second Edition*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 628 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕДОЙКИН Дмитрий Николаевич — руководитель направления систем возбуждения синхронных электродвигателей и генераторов, Общество с ограниченной ответственностью *Научно-производственное предприятие «ЭКРА»*

E-mail: barbudoss@yandex.ru

ЮРГАНОВ Алексей Анатольевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: aayurganov@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.02.2018

REFERENCES

[1] **Glebov I.A., Shanbur I.Zh., Yurganov A.A.**, Perspektivy primeneniya nechetkoy logiki v sistemakh regulirovaniya vzbuzhdeniya sinkhronnykh generatorov [Prospects for using fuzzy logic in synchronous generator excitation control systems], *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam SCM'98. Tom I*. SPb.: Izd-vo SPbGETU. 1998. S. 242–245. (rus.)

[2] **Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Prikhodko I.A., Yurganov A.A., Sokolov P.V.**, Issledovaniye nechetkikh

stabilizatorov vzbuzhdeniya sinkhronnogo generatora [Research of fuzzy stabilizers of excitation of a synchronous generator], *Elektrichestvo*. 1999. № 8. S. 50–55. (rus.)

[3] **Bortsov Yu.A., Yurganov A.A., Prikhodko I.A., Kozhevnikov V.A.**, Eksperimentalnoye issledovaniye nechetkogo stabilizatora vzbuzhdeniya sinkhronnogo generatora [Experimental research of the fuzzy stabilizer of excitation of a synchronous generator], *Elektrotehnika*. 1999. № 3. S. 1–5. (rus.)



[4] **Sedoykin D.N., Yurganov A.A.**, Novaya struktura kanala stabilizatsii rezhima sinkhronnogo generatora i obshchiye printsipy yego nastroyki na osnove nechetkogo approksimatora [The new structure of channel for stabilizing synchronous generator mode and the general principles of its tuning based on the fuzzy approximator], *Izvestiya NTTs Yedinoy energeticheskoy sistemy*. 2016. № 1 (74). S. 67–74. (rus.)

[5] **Sedoykin D.N.**, Adaptivnyy regulyator vzbuzhdeniya na osnove nechetkogo approksimatora [Adaptive excitation controller based on fuzzy approximator], *Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye problemy nauki, tekhnologii, innovatsionnoy deyatel'nosti» 31 avgusta 2017 g. Chast I*. Belgorod: OOO Agentstvo perspektivnykh nauchnykh issledovaniy (ANPI). 2017. S. 117–121. (rus.)

[6] **Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A.**, Regulirovaniye vzbuzhdeniya sinkhronnykh generatorov [Excitation control of synchronous generators]. SPb.: Nauka, 1996. 138 s. (rus.)

[7] **Boshlyakov A.A., Rubtsov V.I.**, Proyektirovaniye nechetkogo regulyatora sledyashchey sistemy, *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii*. 2013. № 8. [Elektr. resurs]. URL: <http://engjournal.ru/search/word/page1.html> (rus.)

[8] **Zhmud V.A.**, Adaptivnyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya s yedinstvennym osnovnym konturom [Adaptive automatic control systems with a single primary loop], *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2014. № 2(8). S. 106–122. (rus.)

[9] **Zhmud V.A., Tereshkin D.O., Prytkova O.V.**, Adaptivnyye sistemy upravleniya [Adaptive control systems], *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. 2011. № 1(63). S. 23–40. (rus.)

[10] **Polyakhov N.D., Prikhodko I.A., Stotskaya A.D.**, Adaptivnoye upravleniye sinkhronnym generatorom [Adaptive control of synchronous generator], *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*, 3–7 oktyabrya 2016 g. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta. 2016. S. 191–194. (rus.)

[11] **Pegat A.**, Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye [Fuzzy modeling and control]. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. 798 s. (rus.)

[12] **Polyakhov N.D., Kha An Tuan**, Adaptivnoye upravleniye sinkhronnym generatorom na osnove beznertsionnogo parametricheskogo algoritma [Adaptive control of a synchronous generator based on the inertial-free parametric algorithm], *Elektrichestvo*. 2014. № 12. S. 47–54. (rus.)

[13] **Zhiting Guo, Hong Song, Penggao Wen, Zhizheng Fan**, Study on Synchronous Generator Excitation Control Based on FLC, *World Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 232–239 [Elektr. resurs]. URL: http://file.scirp.org/pdf/WJET_2015111913301109.pdf

[14] **Kosko B.**, Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Internal Conf. Fuzzy Systems* (8–12 March 1992, San Diego-CA). 1992. P. 1153–1162.

[15] **Timothy J. Ross**, Fuzzy logic with engineering application. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 628 p.

THE AUTHORS

SEDOYKIN Dmitrii N. – *EKRA Research and Production Enterprise Ltd*

E-mail: barbudoss@yandex.ru

YURGANOV Aleksei A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: aayurganov@mail.ru

Received: 03.02.2018