

**Авторы:**

**Седойкин Д.Н.**,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары,  
**д.т.н. Юрганов А.А.**,  
СПбПУ,  
г. Санкт-Петербург, Россия.

**Sedoykin D.N.,**

EKRA Research and  
Production Enterprise Ltd,  
Cheboksary, Russia,  
**D.Sn. Yurganov A.A.**,  
Peter the Great St. Petersburg  
Polytechnic University,  
Saint-Petersburg, Russia.

**Abstract:** the research of the efficiency of the adaptive automatic excitation regulator with fuzzy approximator was done when the synchronous generator was operating in a multi-machine electric power system. Multi-machine power system is represented by a model that is recommended by international organizations IEEE and IEC for research

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОГО АРВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АППРОКСИМАТОРА ПРИ РАБОТЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СЛОЖНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

## EFFICIENCY OF ADAPTIVE EXCITATION REGULATOR ON THE BASIS OF FUZZY APPROXIMATOR WHEN SYNCHRONOUS GENERATOR OPERATES IN A MULTI-MACHINE POWER SYSTEM

**Аннотация:** проведено исследование эффективности адаптивного автоматического регулятора возбуждения (АРВ) на основе нечеткого аппроксиматора (НА) при работе синхронного генератора в многомашинной электроэнергетической системе (ЭЭС). Многомашинная ЭЭС представлена моделью, которая рекомендована международными организациями IEEE и МЭК для изучения электромеханических колебаний в сложных энергосистемах и для оценки эффективности их демпфирования системными стабилизаторами (PSS). Исследование построено на основе сравнения качества переходных процессов в многомашинной ЭЭС при управлении возбуждением синхронных генераторов адаптивными АРВ с НА и регуляторами с многополосными PSS, разработанными канадской компанией Hydro-Québec.

Показано, как изменяется качество переходных процессов при переходе от исходной многомашинной модели ЭЭС к ее эквивалентной схеме «генератор-линия-шины бесконечной мощности (ШБМ)». Даны рекомендации по применению моделей ЭЭС при разработке новых систем управления возбуждением.

**Ключевые слова:** синхронные генераторы, регулирование возбуждения, системный стабилизатор, демпфирование электромеханических колебаний, адаптивный регулятор возбуждения, нечеткий аппроксиматор.

of electromechanical oscillations in complex power systems and for assessment of the effectiveness of their damping by PSS. The research is based on a comparison of the quality of transients in multi-machine power systems when excitation of synchronous generators is controlled by an adaptive regulator based on a fuzzy approximation and a regulator with a multi-

### Введение

Одним из вариантов решения задачи адаптивного управления возбуждением синхронного генератора является применение нечетких аппроксиматоров (НА). Нечеткая аппроксимация позволяет определить взаимосвязь между параметрами, характеризующими состояние объекта управления, и коэффициентами жестко детерминированной системы управления, при которых обеспечивается требуемое/заданное качество переходных процессов. Несмотря на то, что такая взаимосвязь носит приближенный характер, НА тем не менее позволяют обеспечить и сохранить заданное каче-

ство переходных процессов при изменении схемно-режимных условий работы энергоблока, а также адаптировать систему автоматического управления возбуждением для работы с различными типами генераторов. При таком построении адаптивная система условно разделена на две части: линейную, которая представлена АРВ, и нелинейную – нечеткий аппроксиматор, реализующий поверхности или пространства оптимальных настроек этого регулятора. Метод построения таких адаптивных систем и один из вариантов ее реализации (рис. 1) рассмотрены в [1, 2].

band PSS developed by the Canadian company «Hydro-Qu bec».

It is presented how the quality of transients changes during the transition from the original multi-machine model of the power system to its equivalent scheme "generator-line-infinite bus". Recommendations are given on the application of power system models in the development of new excitation control systems.

**Keywords:** synchronous generators, excitation control, power system stabilizer, damping of electromechanical oscillations, adaptive excitation regulator, fuzzy approximator.

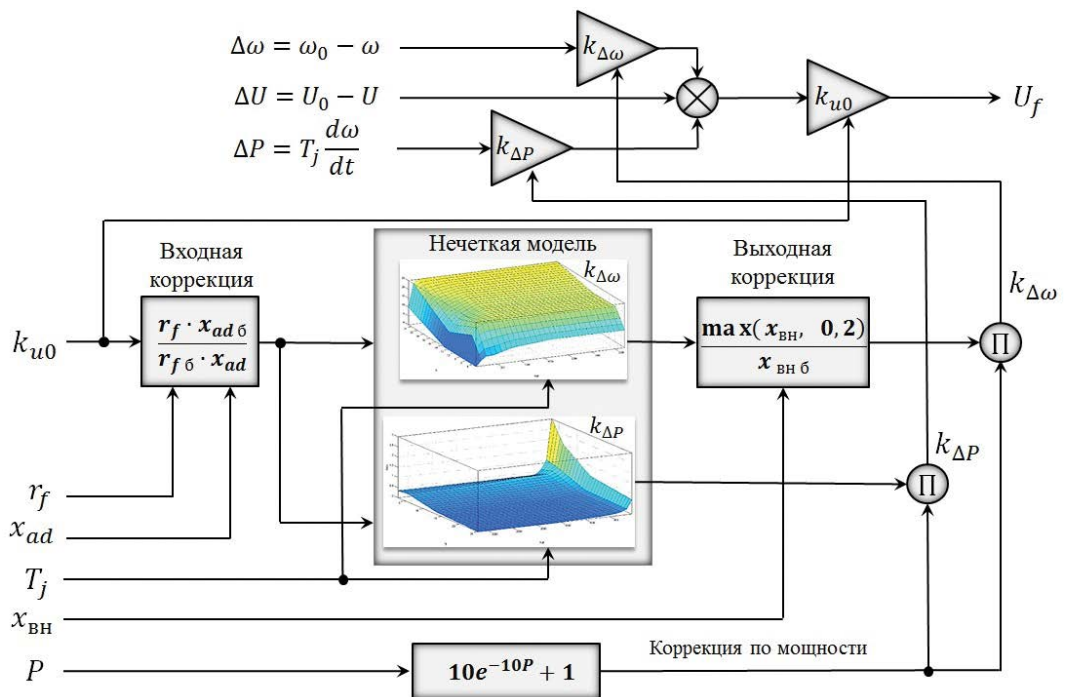


Рис. 1. Структурная схема адаптивного АРВ на основе НА

В представленных работах показана параметрическая адаптация на основе НА для эквивалентированных ЭЭС, т.е. для схем «генератор-линия-ШБМ». Однако исследования, подтверждающие эффективность ее применения в многомашинных энергосистемах, не проводились.

Необходимо отметить, что настройка НА выполняется один раз либо под определенную серию СГ, либо под определенный класс СГ (явнополюсные/неявнополюсные), и её дальнейшая корректировка не требуется. Разработанный НА (рис. 1) подходит для большинства синхронных машин, в том числе и для синхронных двигателей. В данном исследовании в состав энергосистемы входят «американские» генераторы, предназначенные для работы в сетях с частотой 60 Гц. Несмотря на это, НА адаптировал АРВ и для этих СГ.

**1. Постановка задач**

1. Убедиться, что НА [1, 2] определяют оптимальные коэффициенты АРВ для работы в многомашинной энергосистеме на основе параметров ее эквивалентной схемы. В качестве такой многомашинной энергосистемы выбрана четырехмашинная модель с двумя энергорайонами (Four

machine two area system – FMTAS), предложенная одним из ведущих западных специалистов в области энергетики П. Кундуром (Prabha Kundur) для исследования электромеханических колебаний в больших взаимосвязанных системах [4].

2. Определить, насколько отличаются показатели качества переходных процессов в многомашинной энергосистеме FMTAS и в ее эквивалентной схеме «генератор-линия-ШБМ».

3. Определить, какая из моделей ЭЭС, многомашинная энергосистема или ее эквивалент, более критична к выбору настройки АРВ.

**2. Расчетная схема энергосистемы FMTAS**

Расчетная схема FMTAS [4-6] состоит из двух идентичных энергорайонов (Area 1 и Area 2), соединенных между собой двумя воздушными линиями ВЛ1 и ВЛ2 (Line 1 и Line 2) протяженностью 220 км (рис. 2). Каждый энергорайон представлен двумя одинаковыми генераторами, удаленными друг от друга на расстояние 25 км. В первом энергорайоне (Area 1) расположены генераторы G1 и G2 (рис. 3), во втором (Area 2) – G3 и G4. Параметры



**Седойкин Дмитрий Николаевич**

Окончил в 1995 году Чувашский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В настоящее время – руководитель направления систем возбуждения синхронных электродвигателей и генераторов департамента высоковольтной преобразовательной техники ООО НПП «ЭКРА».



**Юрганов Алексей Анатольевич**

Дата рождения: 19.07.1939 г. Окончил в 1962 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. В 1991 году защитил в Ленинградском политехническом институте докторскую диссертацию по теме «Регулирование возбуждения генераторов атомных электростанций». Профессор кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Senior Member IEEE. Член рабочей группы МТ12 Технического комитета МТ2 Международной электротехнической комиссии (МЭК). Член редколлегии журнала «Известия Системного оператора ЕЭС РФ».

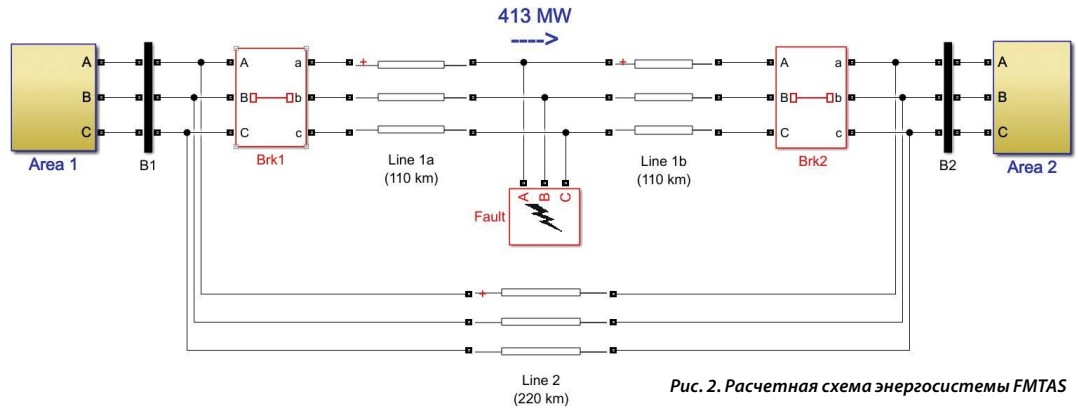


Рис. 2. Расчетная схема энергосистемы FMTAS

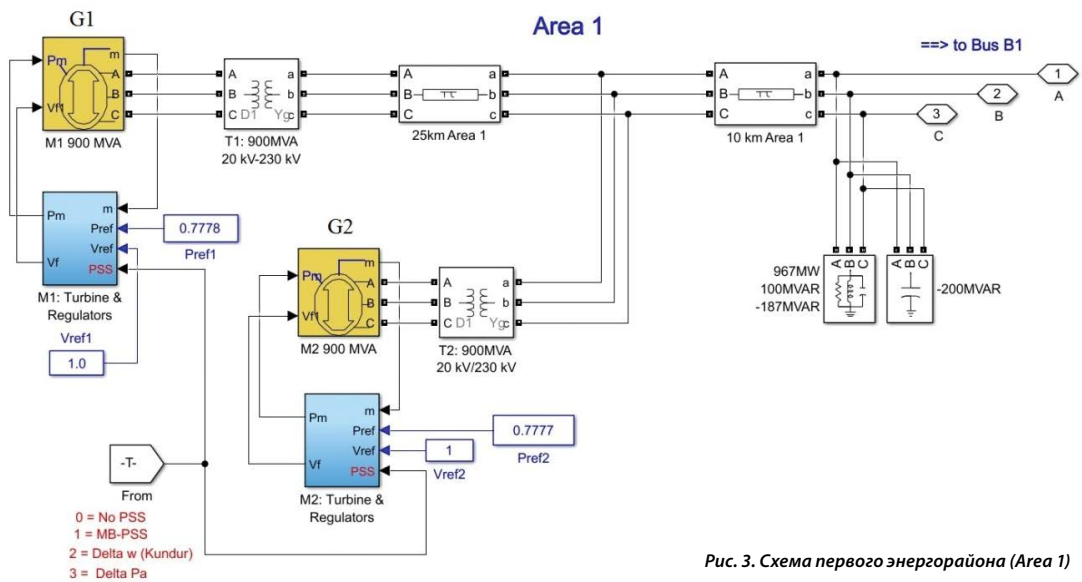


Рис. 3. Схема первого энергорайона (Area 1)

генераторов приведены в табл. 1.

Исследование эффективности адаптивного АРВ с НА заключается в сравнении его действия с пропорциональным АРВ с коэффициентом усиления  $k_{uo} = 300$  и системным стабилизатором Multi-Band PSS (IEEE Standard 421,5-2005). Multi-Band PSS (MB PSS) – многополосный системный стабилизатор, разработанный канадской компанией Hydro-Québec для демпфирования

электромеханических колебаний трех типов [7, 8]:

- локальных, межсетевых и межстанционных, в диапазоне частот 0,8 – 4 Гц;
- межобластных, в диапазоне частот 0,2 – 0,8 Гц;
- общесистемных, в диапазоне частот менее 0,2 Гц.

Необходимо отметить, что энергосистема FMTAS позволяет проводить ана-

Табл. 1. Параметры генераторов

$S = 900 \text{ MVA}$	$U_1 = 20 \text{ кВ}$	$f = 60 \text{ Гц}$	$T_j = 6,5 \text{ с}$	$r_1 = 0,0025 \text{ о.е.}$
$x_d = 1,8 \text{ о.е.}$	$x'_d = 0,30 \text{ о.е.}$	$x''_d = 0,25 \text{ о.е.}$	$T'_{d0} = 8 \text{ с}$	$T''_{d0} = 0,03 \text{ с}$
$x_q = 1,7 \text{ о.е.}$	$x'_q = 0,55 \text{ о.е.}$	$x''_q = 0,25 \text{ о.е.}$	$T'_{q0} = 0,4 \text{ с}$	$T''_{q0} = 0,05 \text{ с}$

лиз электромеханических колебаний во всех трех вышеуказанных диапазонах.

Использовалась стандартная модель системного стабилизатора MB PSS из библиотеки Matlab/Simulink/Simscape Power Systems.

Для генератора G1 произведено эквивалентирование внешней сети энергосистемы FMTAS на основе двух её расчетных режимов [3]:

**Режим 1:**  $P_{11} = 0,77749$  о.е.;  $Q_{11} = 0,102$  о.е.;  $I_{11} = 0,783$  о.е.;  $U_{11} = 0,9982$  о.е.

**Режим 2:**  $P_{12} = 0,5092$  о.е.;  $Q_{12} = 0,007201$  о.е.;  $I_{12} = 0,5094$  о.е.;  $U_{12} = 0,9997$  о.е.

**Расчет  $x_{вн}$ :**

$$\begin{aligned} (I_{11}^2 - I_{12}^2) x_{вн}^2 - 2 \cdot (Q_{11} - Q_{12}) x_{вн} + U_{11}^2 - U_{12}^2 &= 0; \\ 0,35 \cdot x_{вн}^2 - 0,19 x_{вн} + 0,003 &= 0; \\ x_{вн} &= 0,55 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Недостающие параметры, необходимые НА для адаптации APB к типу генератора, определялись расчетным путем:

$$x_s = 0,81 x_d'';$$

$$x_{ad} = x_d - x_s = 1,8 - 0,81 \cdot 0,25 = 1,598 \text{ о.е.};$$

$$r_f \approx x_{ad} / (T_{d0} \cdot \omega_b) = \frac{1,598}{8 \cdot 120\pi} = 5,297 \cdot 10^{-4} \text{ о.е.}$$

При заданных значениях параметров генератора ( $T_j = 6,5$  с,  $x_{ad} = 1,598$  о.е.,  $r_f = 0,00053$  о.е.), внешнего индуктивного сопротивления линии  $x_{вн} = 0,552$  и коэффициента усиления регулятора напряжения  $k_{uo} = 300$  НА были определены коэффициенты усиления канала стабилизации по отклонению скорости  $k_{\Delta\omega} = 44,58$  и канала стабилизации по избыточной мощности  $k_{\Delta P} = 0,711$ , при которых обеспечивается апериодический характер переходных процессов [1, 2].

### 3. Эффективность адаптивного APB в энергосистеме FMTAS

#### 3.1 Критерии оценки эффективности адаптивного APB

Оценка эффективности адаптивного APB проводилась на основе таких показателей качества переходных процессов, как перерегулирование  $\sigma$  и коэффициент демпфирования  $\xi$ . В идеале НА на основе

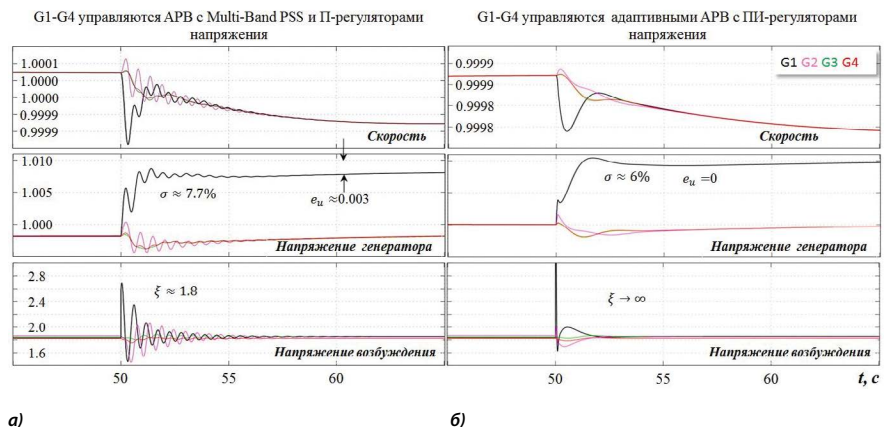


Рис. 4. Переходные процессы при изменении уставки по напряжению генератора G1

параметров эквивалентной схемы должен рассчитать такие коэффициенты APB, при которых в многомашинной энергосистеме обеспечиваются эталонные переходные процессы. Для рассматриваемого НА эталонный переходный процесс характеризуется отсутствием перерегулирования и бесконечно большим коэффициентом демпфирования. Такие показатели качества соответствуют монотонному переходному процессу. Согласно теории нечетких множеств, значение функции принадлежности  $i$ -ого переходного процесса к множеству «эталонный переходный процесс» может определяться следующим выражением:

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

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

#### 3.2 Качество регулирования при малых возмущениях

Рассмотрим переходные процессы при изменении уставки по напряжению генератора G1.

Сценарий моделирования.

В исходном режиме уставки по напряжению всех генераторов одинаковы:  $U_{0i} = 1$  о.е.

Активные мощности генераторов:  $P_1 = 0,78$  о.е. (G1),  $P_2 = 0,78$  о.е. (G2),  $P_3 = 0,80$  о.е. (G3),  $P_4 = 0,78$  о.е. (G4). На

50-ой секунде для генератора G1 меняется уставка по напряжению на величину  $\Delta U = 0,01$  о.е.

Переходные процессы моделировались для двух случаев:

1. Управление возбуждением для всех генераторов осуществляется APB с MB PSS (рис. 4, а).
2. Управление возбуждением для всех генераторов осуществляется адаптивными APB на основе НА с PI-регуляторами напряжения (рис. 4, б).

Из приведенных графиков следует, что при управлении возбуждением генераторов от APB с MB PSS в ЭЭС возникают электромеханические колебания с частотой около 2 Гц. Во втором энергорайоне (Area 2) они незначительны, поскольку это локальные межстанционные колебания. Коэффициент демпфирования этих колебаний для APB с MB PSS составляет  $\xi = 1,8$ , перерегулирование  $\sigma = 7,7\%$ . В установившемся режиме существует ошибка регулирования напряжения  $e_u \approx 0,003$ , обусловленная наличием PI-регулятора напряжения. В случае, когда управление возбуждением генераторов осуществляется адаптивными APB, качество регулирования существенно улучшается. Переходные процессы имеют апериодический характер, коэффициент демпфирования межстанционных электромеханических колебаний  $\xi \rightarrow \infty$ , перерегулирование составляет  $\sigma \approx 6\%$ , ошибка



регулирования напряжения  $e_u = 0$ , поскольку регулятор напряжения выполнен ПИ.

Значения функций принадлежности переходных процессов к множеству «эталонный» согласно (1):

- при управлении АРВ с MB PSS  $\mu = 0,41$ ;
- при управлении адаптивными АРВ с НА  $\mu = 0,94$ .

Показатели качества переходных процессов свидетельствуют о том, что НА адаптировал систему управления возбуждением под конкретный тип генератора и схемно-режимные условия его работы в многомашинной энергосистеме FMTAS.

### 3.3 Качество регулирования при больших возмущениях

Рассмотрим случай трехфазного короткого замыкания в середине линии ВЛ1 (рис. 1).

Сценарий моделирования.

В исходном режиме уставки по напряжению всех генераторов одинаковы  $U_{0i} = 1$  о.е.

Активные мощности генераторов:  $P_1 = 0,78$  о.е. (G1),  $P_2 = 0,78$  о.е. (G2),  $P_3 = 0,8$  о.е. (G3),  $P_4 = 0,78$  о.е. (G4). На 50-ой секунде в середине линии ВЛ1 (Line 1) происходит трехфазное короткое замыкание длительностью 0,1 с.

На рис. 5, а представлены переходные процессы, когда управление возбуждением для всех генераторов осуществляется АРВ с MB PSS, а на рис. 5, б – при управлении адаптивными АРВ на основе НА с ПИ-регулятором напряжения.

При управлении от АРВ с MB PSS по окончании короткого замыкания в обоих энергорайонах возникают локальные межстанционные электромеханические колебания с частотой около 1,7 Гц и коэффициентом демпфирования  $\xi = 3,3$ , кроме того, возникают общесистемные колебания с частотой менее 0,2 Гц.

При управлении возбуждением генераторов от адаптивных АРВ электромеханические колебания отсутствуют, коэффициент демпфирования стремится к бесконечности (апериодический переходный процесс).

дический переходный процесс).

### 3.4 Сравнение переходных процессов в энергосистеме FMTAS и ее одночастотном эквиваленте

Рассмотрим, как изменяются показатели качества переходных процессов при переходе от многомашинной схемы FMTAS к ее эквивалентной схеме «генератор-линия-ШБМ». Управление возбуждением генераторов осуществляется адаптивными АРВ на основе НА. Переходные процессы при изменении уставки по напряжению для генератора G1 моделировались для двух случаев:

1. ПИ-регулятор напряжения (рис. 6, а).
2. ПИ-регулятор напряжения (рис. 6, б).

В случае ПИ-регулирования при переходе к эквивалентной схе-

ме перерегулирование возрастает с 6% до 18%, апериодический характер переходных процессов сохраняется ( $\xi \rightarrow \infty$ ). В отличие от энергосистемы FMTAS, в ее эквивалентной схеме отсутствуют общесистемные отклонения скорости от синхронного значения. В рассматриваемом переходном процессе общесистемные низкочастотные электромеханические колебания обусловлены работой ПИ-регуляторов напряжения. В переходных процессах с П-регуляторами напряжения эти колебания отсутствуют (рис. 6). Пытаясь вывести напряжения на заданное значение, ПИ-регуляторы напряжения вызывают низкочастотные отклонения скорости от синхронного значения. Это позволяет сделать вывод о том, что схема

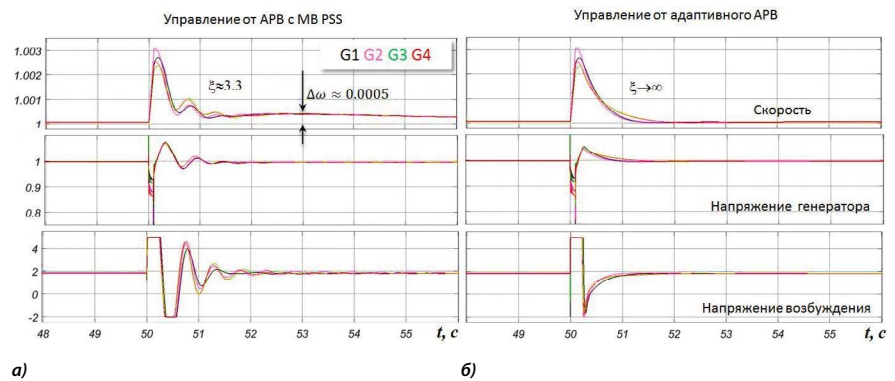


Рис. 5. Переходные процессы при коротком трехфазном замыкании

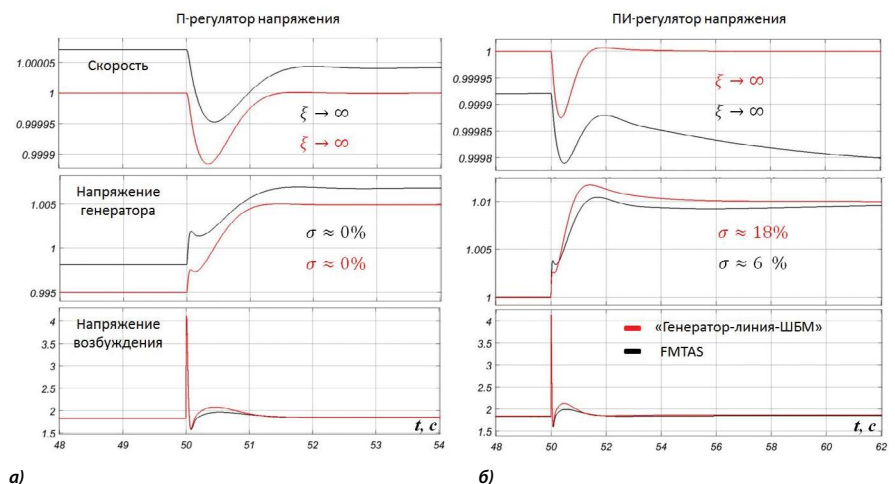


Рис. 6. Переходные процессы в энергосистеме FMTAS и в ее эквиваленте



«генератор-линия-ШБМ» не позволяет в полной мере имитировать общесистемные электромеханические колебания, диапазон которых менее 0,2 Гц. Она наиболее точно отображает переходные процессы, связанные с локальными, межсетевыми и межстанционными качаниями. Для исследования режимов, связанных с межобластными и общесистемными колебаниями, необходимо применять многомашинные модели. Существенных отличий показателей качества переходных процессов в энергосистеме FMTAS и ее эквиваленте с П-регуляторами напряжения не наблюдается (рис. 6). В обеих схемах перерегулирование  $\sigma \rightarrow 0$ , а коэффициент демпфирования  $\xi \rightarrow \infty$ . Различия заключаются лишь в величинах напряжения и скорости установившегося режима.

**Выводы**

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Адаптивный АРВ с нечетким аппроксиматором обеспечивает устойчивую работу во всех исследуемых режимах. Более того, его применение существенно улучшает качество переходных процессов и демпфирование электромеханических колебаний в ЭЭС. При замене всех АРВ на адап-

тивные переходные процессы и при малых, и при больших возмущениях становятся апериодическими, близкими к монотонным.

2. При переходе от энергосистемы FMTAS к ее эквиваленту «генератор-линия-ШБМ» качество переходных процессов:

- для АРВ с П-регулятором остается прежним:  $\sigma \rightarrow 0, \xi \rightarrow \infty$ ;
- для АРВ с ПИ-регулятором перерегулирование увеличивается с 6 до 18%;
- для АРВ с МВ PSS перерегулирование увеличивается с 11% до 22%, коэффициент демпфирования уменьшается с 2,35 до 1,85.

3. Эквивалентная схема «генератор-линия-ШБМ» более требовательна к реализации законов/алгоритмов управления возбуждением. Показатели качества переходных процессов, полученные в схеме «генератор-линия-ШБМ», при переходе к многомашинной энергосистеме FMTAS изменяются в лучшую сторону. Из чего можно заключить, что на начальных этапах разработки новых алгоритмов регулирования целесообразно применять эквивалентную схему «генератор-линия-ШБМ», чтобы гарантировать некоторый инженерный запас, а затем проводить проверку и уточнение на многомашинных математических и физических моделях ЭЭС.

**Литература:**

1. Седойкин Д.Н., Юрганов А.А. Новая структура канала стабилизации режима синхронного генератора и общие принципы его настройки на основе нечеткого аппроксиматора / Д.Н. Седойкин, А.А. Юрганов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2016. – № 1 (74). – С. 67–74.
2. Седойкин Д.Н. Адаптивный регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора. Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности. // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 августа 2017 г. Часть I.– Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АНПИ), 2017. – С. 117-121.
3. Юрганов А.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А.А. Юрганов, В.А. Кожевников. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.
4. Kundur P. Power system stability and control. / P. Kundur. – New York: McGraw-Hill, Inc. – 1176 p.
5. Kamwa I. Reactive Power Control for Improving Primary Frequency Response in Power Systems / A. Moeini, I. Kamwa, H. Le-Huy // Conference Paper. North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA. – 2015. – October. – P. 1-6. // <https://www.researchgate.net/publication/286626730>.
6. Kamwa I. Performance of Three PSS for Interarea Oscillations / I. Kamwa (Hydro-Québec) // Matlab/Simulink Demo power\_PSS.mdl // [www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations.html).
7. Jamal A. Multi-Band Power System Stabilizer model for power flow optimization in order to improve power system stability/ Agus Jamal, Slamet Surtopo, Ramadoni Syahputra // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. Vol. 81. No.1 (10th November). – P. 116-123.
8. Shirvani M. Multi Band Power System Stabilizer Design in a Multi Machine Power System / Mojtaba Shirvani // Applied mathematics in Engineering, Management and Technology. – 2014. – 2(4). – P. 237-248. // [www.amiemt-journal.com](http://www.amiemt-journal.com).
9. Abedinia O. Multimachine Power System Oscillation Damping: Placement and Tuning PSS VIA Multiobjective HBMO/O. Abedinia, N. Amjadi, H.R. Izadfar, H.A. Shayanfar // Technical and Physical Problems of Engineering. – 2012. – Vol. 4. – No.3. – P. 1-8.



ПОДПИСКА НА 2-е полугодие 2018 г.  
(2 номера)

**2000** руб.

в т.ч. НДС 10% + пересылка  
(через редакцию журнала)