

## Автоматические регуляторы для установок распределенной генерации

Ю.Н. Булатов<sup>1 a</sup>, А.В. Крюков<sup>2 b</sup>, Чан Зюй Хынг<sup>3 c</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup>bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup>tranduyhung67@yahoo.com

Статья поступила 10.05.2014, принята 05.08.2014

*В настоящее время происходит переход электроэнергетики России на новую технологическую платформу, основанную на использовании концепции интеллектуальных сетей (smart grid). Эта концепция предусматривает широкое применение установок распределенной генерации, которые могут работать в составе действующих сетей или объединяться в сетевые кластеры. Статья посвящена вопросам автоматического регулирования возбуждения и скорости вращения генераторов, работающих в составе сетевых кластеров, предназначенных для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог переменного тока. Для регулирования частоты и напряжения в различных режимах работы используются автоматический регулятор частоты вращения, работающий по пропорционально-интегрально-дифференциальному принципу, и микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения. Предложена методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения синхронных генераторов, работающих в составе сетевых кластеров. При оптимизации и согласовании настроек регуляторов возбуждения и частоты использовался метод непараметрической идентификации системы «турбина – генератор», которую можно представить в виде комплексных передаточных функций основных каналов и перекрестных связей регуляторов и генератора. Метод идентификации ориентирован на пассивный подход с применением аппарата дискретного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора, используемого в качестве тестового воздействия. На основе компьютерного моделирования в среде MATLAB подтверждена эффективность применения предложенных методов согласованной настройки регуляторов.*

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог, сетевые кластеры, распределенная генерация, согласованная настройка регуляторов возбуждения и частоты.

## Automatic regulators for installations of distributed generation

Yu.N. Bulatov<sup>1 a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2 b</sup>, Tran Duy Hung<sup>3 c</sup>

<sup>1</sup>Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup>bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup>tranduyhung67@yahoo.com

Received 10.05.2014, accepted 5.08.2014

*Nowadays there is a transition of electric power industry of Russia to the new technological platform based on the use of the concept of intellectual networks (smart grid). This concept provides broad usage of installations of the distributed generation which can work as a part of operating networks or be merged into network clusters. The article is devoted to the questions of automatic control of excitation and rotation speed of the generators working as a part of network clusters intended to power supply the non-traction consumers for railroads of alternating current. To regulate frequency and voltage in various operating modes automatic controller of the rotation frequency, working on proportional-integrated-differential principle, and microprocessor-based automatic excitation controller have been used. The technique of the coordinated parameterization for automatic excitation and rotation frequency controllers of the synchronous generators, working as a part of network clusters, has been offered. When optimize and coordinate the parameterization of excitation and frequency controllers, the method of nonparametric identification of «turbine-generator» system, which can be presented in the form of the complex transfer functions of the main channels and cross communications of controllers and the generator, has been used. Identification method is aimed at passive approach with the use of the device for discrete Fourier transformation and Wavelet-transformation to allocate the controller noise which is used as a test input. On the basis of computer modeling in the Matlab environment the efficiency of using these methods of the coordinated parameterization of controllers has been confirmed.*

**Keywords:** systems of power supply of the railroads, network clusters, distributed generation, coordinated parameterization of excitation and frequency controllers.

**Введение.** В настоящее время происходит переход электроэнергетики России на новую технологическую платформу [1], основанную на использовании концеп-

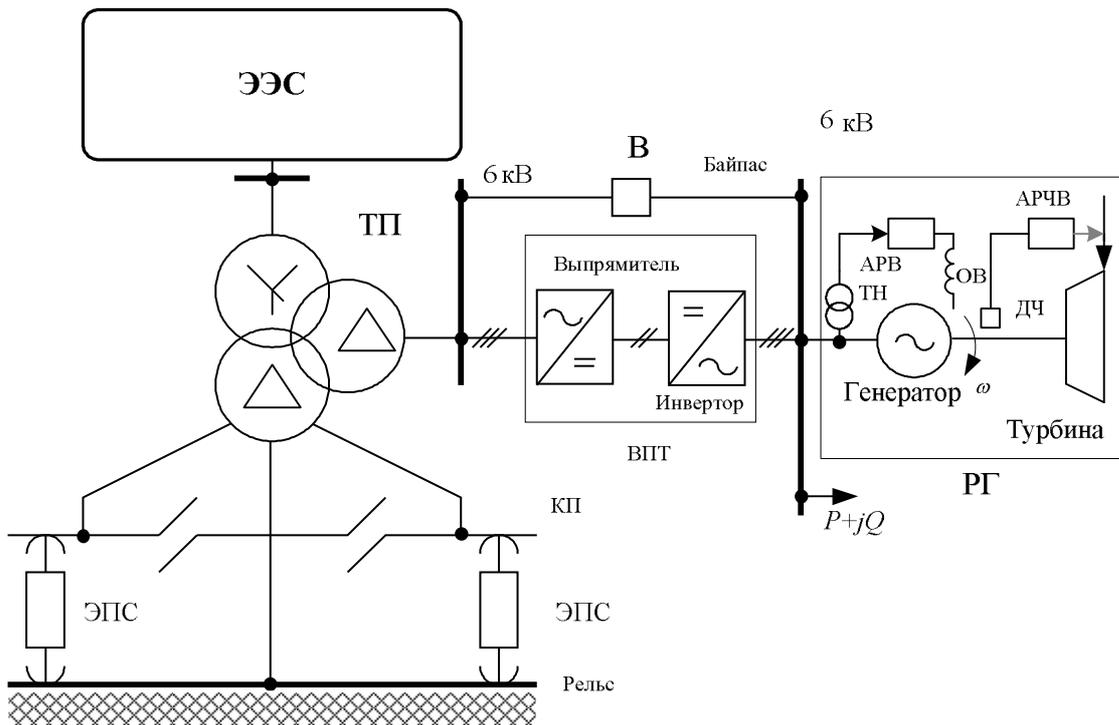
ции интеллектуальных сетей (smart grid). Эта концепция предусматривает широкое применение установок распределенной генерации, которые могут работать в

составе действующих сетей или объединяться в сетевые кластеры. Под распределенной генерацией (РГ) понимается совокупность потребительских энергоустановок как индивидуального использования, так и объединенных в микроэнергосистемы [2].

Современная преобразовательная техника позволяет присоединять установки РГ к электроэнергетической системе (ЭЭС) через вставки постоянного тока (ВПТ). Подобная концепция ограничивает мощность короткого замыкания на шинах источников РГ, обеспечивает высокое качество электроэнергии и придает электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [3]. Источники РГ, объединенные в микроэнергосистемы (сетевые кластеры), обеспечивают не только повышенную надежность электроснабжения, но и открывают широкие возможности для оптимизации режимов и повышения экономичности производства и распределения электроэнергии (ЭЭ). Таким образом, применение технологий РГ позволяет получить целый ряд положительных эффектов, главные из которых состоят в снижении затрат на энергообеспечение, повышении надеж-

ности электроснабжения ответственных потребителей, улучшении качества ЭЭ, а также в уменьшении техногенного воздействия на окружающую природную среду.

Имеющийся отечественный и зарубежный опыт показывает применимость технологий РГ в промышленности, коммунально-бытовом секторе, сельском хозяйстве и на транспорте. В настоящей работе рассматриваются вопросы применения установок распределенной генерации, работающих в составе сетевых кластеров (рис. 1), для повышения эффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог [3...8]. Исследования проводились применительно к структурной схеме системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД), представленной на рис. 1. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей (РЭС), включающий установку РГ, питающую группу нагрузок с суммарной активной мощностью 5.5 МВт, объединенную в сетевой кластер. Мощность установки РГ равнялась 2.5 МВт.



**Рис. 1.** Фрагмент системы электроснабжения железной дороги: ЭЭС – электроэнергетическая система; ТП – тяговая подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; КП – контактный провод; АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; ДЧ – датчик частоты вращения; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения; В – выключатель

Эффективная работа рассматриваемой системы требует создания рациональной системы управления установкой РГ, включающей автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). Для решения этой задачи могут использоваться методы,

предложенные в работах [9...12].

**Методика моделирования.** На рис. 2 представлена схема модели исследуемой системы, созданной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems системы

MATLAB. На приемном конце воздушной линии электропередачи (Line) длиной 10 км имеется короткозамыкатель (Three-Phase Fault) для имитации трехфазного короткого замыкания (КЗ) длительностью 0,1 с. Измерение параметров турбогенератора и напряжения на шинах потребителя в модели осуществляется с помощью осциллографов (Scope1-Scope5). Для измерения несинусоидальности и несимметрии в модели используются стандартные блоки пакета SymPowerSystems Total Harmonic Distortion и 3-phase Sequence Analyzer.

Для регулирования частоты и напряжения генератора РГ используются автоматический регулятор частоты вращения (АРЧВ) (Automatic regulator of rotor speed), представляющий собой пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, и микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения (АРВ-М) (MARE) с тиристорной системой возбуждения (Excitation System) (рис. 2). Структурная схема модели АРЧВ в MATLAB представлена на рис. 3. В качестве входного сигнала АРЧВ используется отклонение частоты вращения ротора генератора  $dw$ , поступающее на ПИД-регулятор, на выходе которого сигнал усиливается с помощью блока Amplifier. В результате формируется управляющее воздействие на

изменение механической мощности турбогенератора  $P_m$ . С помощью модели АРЧВ возможно изменять нагрузку генератора, задавая определенными значениями мощности  $P_m$ . При моделировании использовались следующие значения параметров блока АРЧВ: постоянные времени: интегрирующего звена  $T_i = 0,1$  с; дифференцирующего звена  $T_d = 1$  с; коэффициент усиления  $k_a = 1$ ; постоянная времени усилителя  $T_a = 0,01$  с.

Модель тиристорной системы возбуждения создавалась на основе уравнений, описывающих тиристорный преобразователь и входной усилитель. В качестве усилительной схемы в системе возбуждения могут использоваться электромашинный, магнитный или электронный усилители. В любом случае можно принять допущение о линейной характеристике этого элемента с коэффициентом усиления  $k_a$  и постоянной времени  $T_a$ . Тиристорный возбудитель моделируется аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом  $k_e$  и постоянной времени  $T_e$  и блоком ограничения напряжения (Limit) (рис. 4). При моделировании принимались следующие числовые значения параметров:  $k_a = 1$ ;  $T_a = 0,001$ ;  $k_e = 1$ ;  $T_e = 0,025$ .

Структурная схема модели АРВ-М представлена на рис. 5.

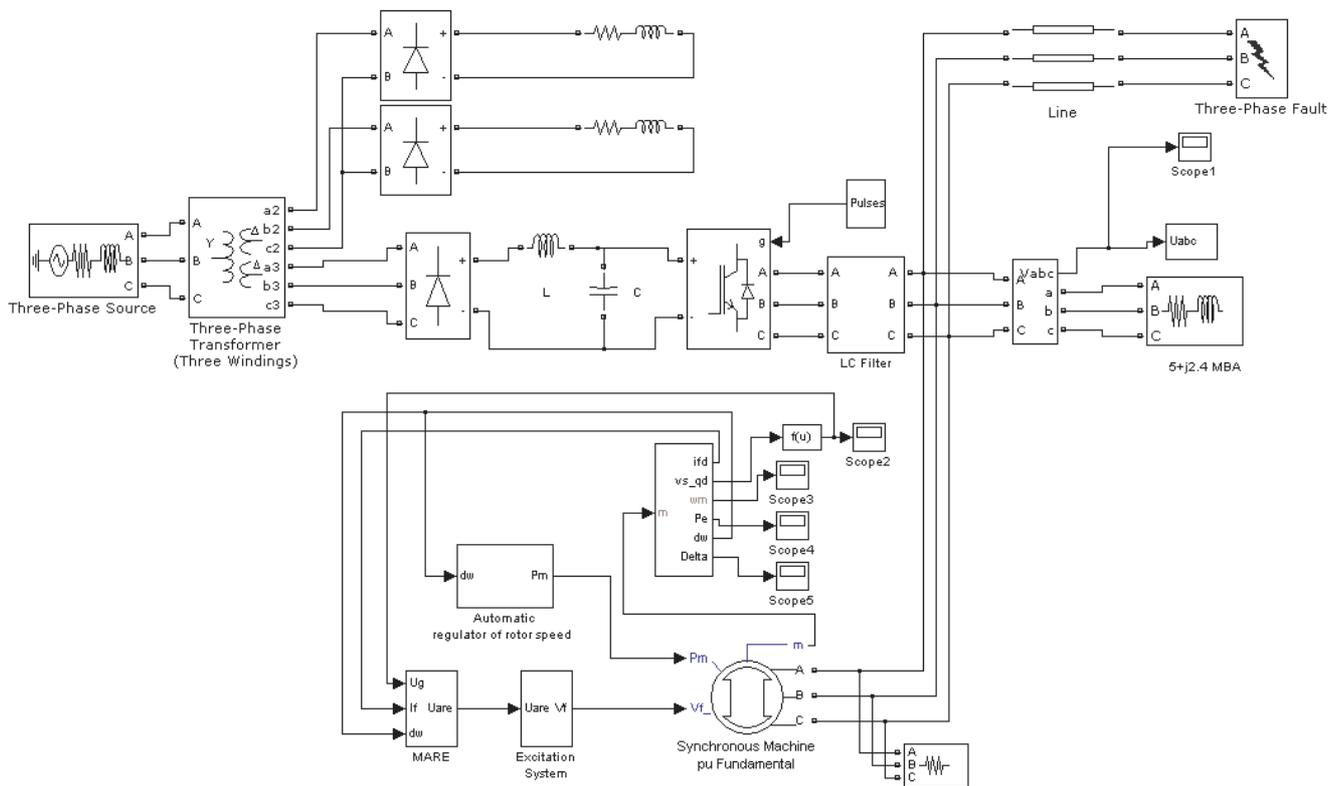


Рис. 2. Схема модели исследуемой электроэнергетической системы

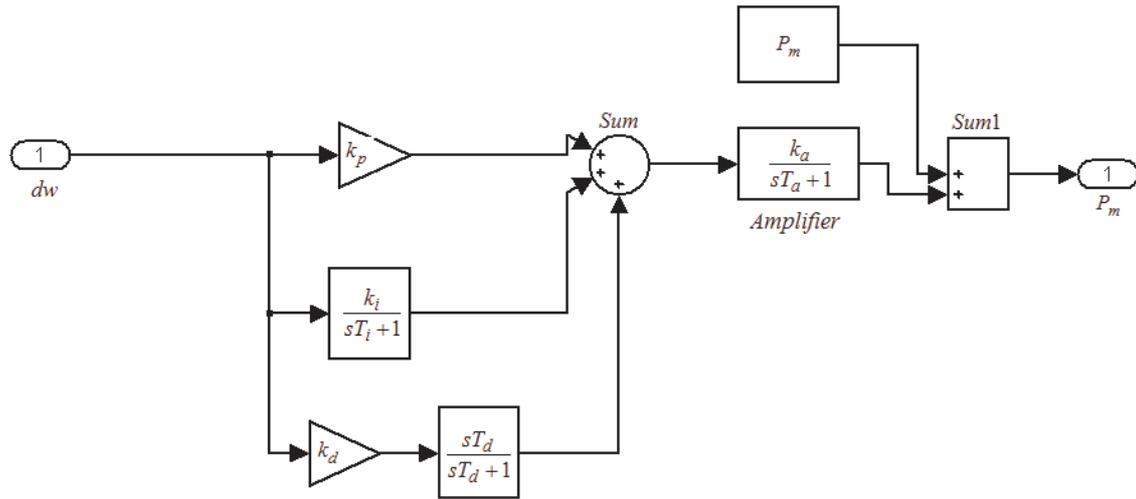


Рис. 3. Структурная схема модели автоматического регулятора частоты вращения

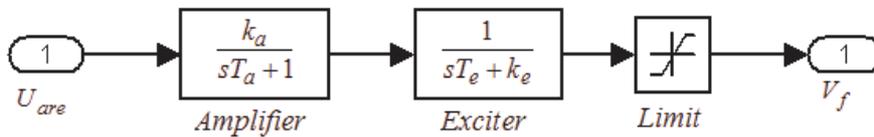


Рис. 4. Структурная схема модели тиристорной системы возбуждения в MATLAB:  $U_{are}$  – сигнал, поступающий от АРВ;  $V_f$  – сигнал, поступающий на обмотку возбуждения генератора; *Amplifier* – усилитель; *Exciter* – тиристорный возбудитель; *Limit* – блок ограничения напряжения

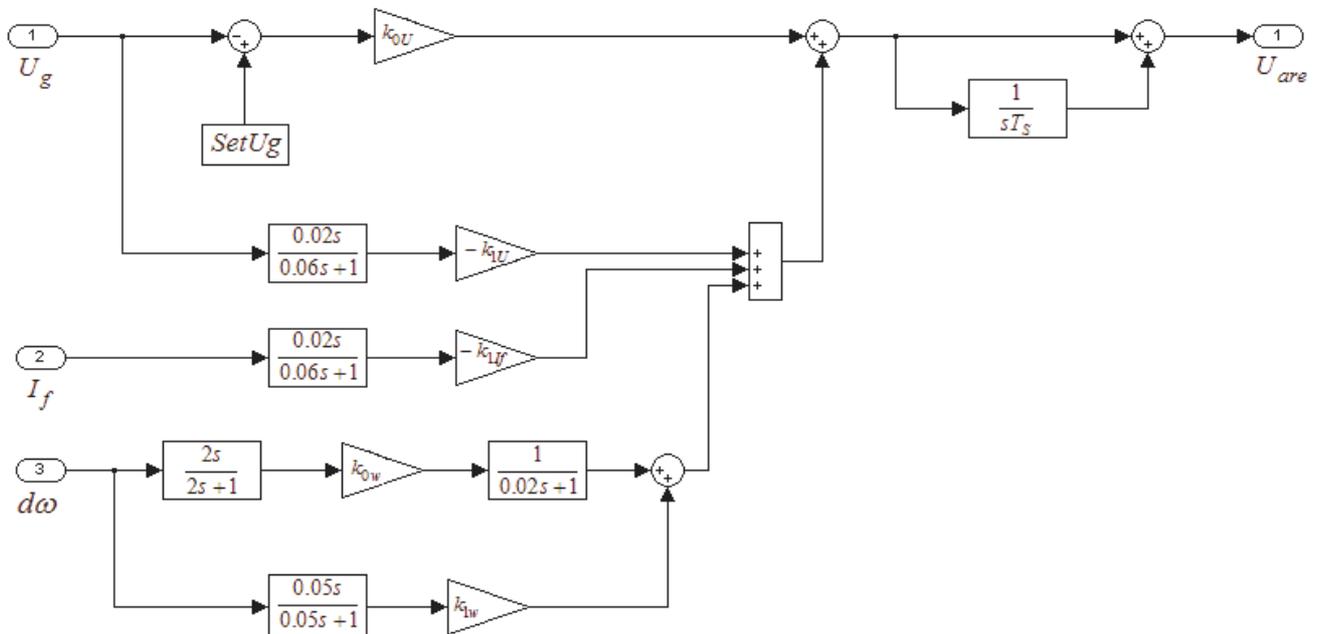


Рис. 5. Структурная схема модели АРВ-М:  $d\omega$  – отклонение частоты;  $U_g$  – напряжение генератора; *SetUg* – уставка по напряжению;  $I_f$  – ток возбуждения;  $U_{are}$  – выходной сигнал регулятора

Функции регулирования возбуждения генератора осуществляются при подаче в АРВ-М следующих параметров: напряжения генератора  $U_g$ , тока возбуждения  $I_f$ , отклонения частоты вращения ротора генератора  $d\omega$ . Канал по напряжению состоит из блока, опреде-

ляющего отклонение напряжения генератора  $U_g$  от заданной уставки *SetUg*, дифференциатора с передаточной функцией  $\frac{0,02s}{0,06s + 1}$ , коэффициентов усиления по

отклонению и первой производной напряжения ( $k_{0U}, k_{1U}$ ). Для стабилизации применяется особенно эффективная в режиме недовозбуждения обратная связь по производной тока ротора, определяемая с помощью дифференциатора с передаточной функцией  $\frac{0,02s}{0,15s+1}$  и коэффициентом усиления  $k_{1f}$ .

Для повышения пределов устойчивости, демпфирования послеаварийных колебаний применяются стабилизирующие каналы по отклонению и производной частоты, настройка которых осуществляется соответствующими коэффициентами усиления ( $k_{0w}, k_{1w}$ ). Все сигналы с описанных каналов суммируются и поступают на общий канал с ПИ-законом регулирования и передаточной функцией  $\frac{sT_S+1}{T_S}$ . При моделировании постоянная времени интегратора принималась равной  $T_S = 0,5$  с. Таким образом, формируется сигнал по изменению напряжения возбуждения генератора.

**Настройка автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генератора.** Настройка АРВ и АРЧВ в исследуемой модели осуществлялась для двух режимов работы установки РГ: загрузка генератора на 50 % и 100 %. При этом использовалась методика, описанная в работах [9...12] и реализованная в программном комплексе «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций». При оптимизации и согласовании

настроек АРВ и АРЧВ использовался метод непараметрической идентификации системы «турбина – генератор», которую можно представить в виде комплексных передаточных функций основных каналов и перекрестных связей регуляторов и генератора (рис. 6). Метод идентификации ориентирован на пассивный подход с применением аппарата дискретного преобразования Фурье и технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора, используемого в качестве тестового воздействия на систему. Результаты идентификации исследуемой системы в виде амплитудно-частотных характеристик основных каналов и перекрестных связей генератора представлены на рис. 7.

Оптимизация настроек АРВ и АРЧВ осуществлялась с помощью адаптивного генетического алгоритма, реализованного в программном комплексе «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций». В результате работы программного комплекса были определены коэффициенты настройки регуляторов и запас устойчивости системы, табл. 1.

Проведенные исследования показали эффективность методики согласованной настройки АРВ и АРЧВ, заключающейся в повышении запаса апериодической устойчивости (табл. 1), снижении времени регулирования и перерегулирования частоты и напряжения генератора при возникновении трехфазного КЗ длительностью 0,1 с. Соответствующие осциллограммы при загрузке турбогенератора на 50 % представлены на рис. 8 и 9.

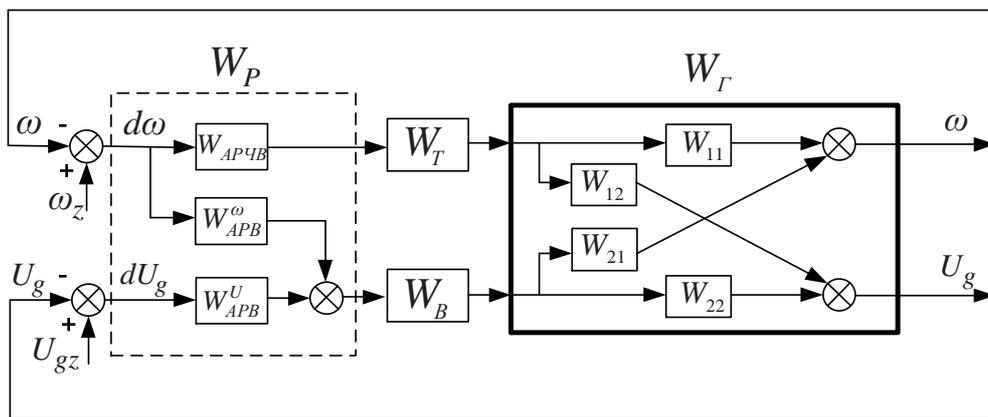


Рис. 6. Структурное представление регулируемой системы «турбина – генератор»

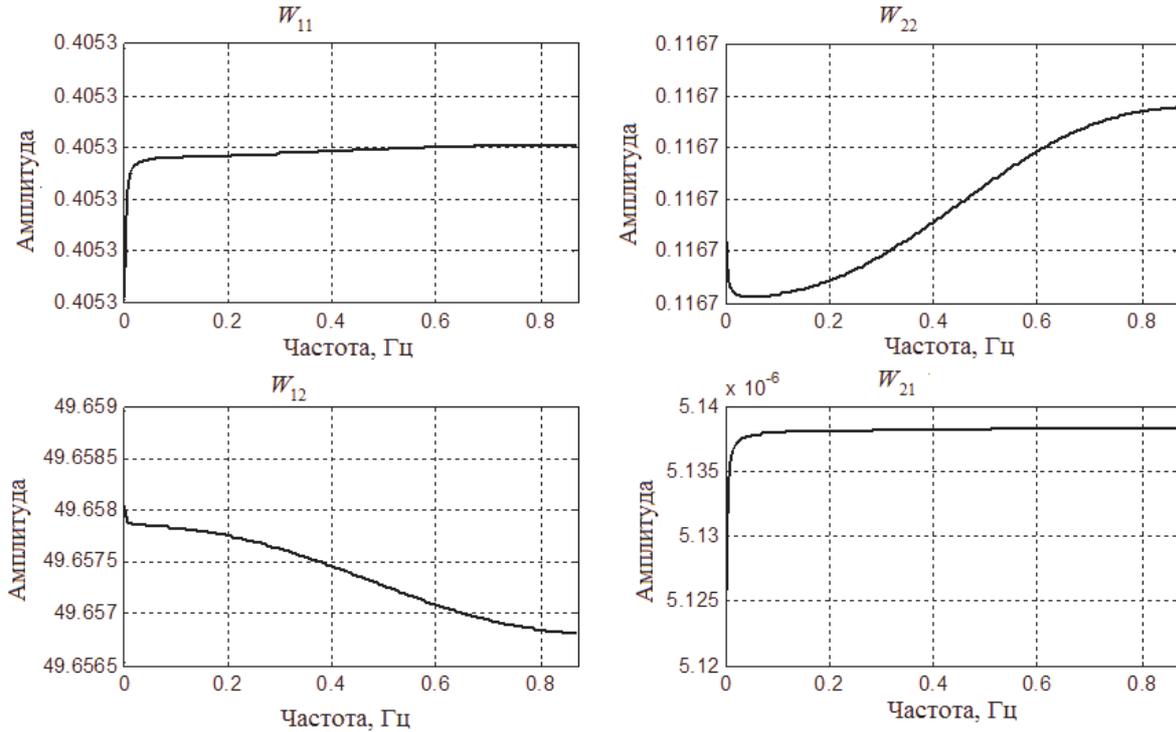


Рис. 7. Частотные характеристики системы для согласованной настройки АРВ и АРЧВ

Таблица 1

Результаты настройки АРВ и АРЧВ турбогенератора

Настройка АРВ и АРЧВ	Загрузка турбогенератора, %		Запас аperiodической устойчивости (для режима полной загрузки генератора)
	50	100	
Несогласованная настройка	1) АРВ: $k_{0u}=1, k_{1u}=50,$ $k_{0w}=-154.5, k_{1w}=84;$ 2) АРЧВ: $k_p=0.026, k_i=-0.126,$ $k_d=-0.75.$	1) АРВ: $k_{0u}=100, k_{1u}=50,$ $k_{0w}=-196.5, k_{1w}=3876.5;$ 2) АРЧВ: $k_p=-0.093, k_i=0.441,$ $k_d=-194.$	2.01
Согласованная настройка	1) АРВ: $k_{0u}=1, K_{1u}=50, k_{0w}=1.099,$ $k_{1w}=2.81;$ 2) АРЧВ: $k_p=2.46, k_i=0.0000002,$ $k_d=-0.078.$	1) АРВ: $k_{0u}=100, k_{1u}=50, k_{0w}=0.976,$ $k_{1w}=-11.81;$ 2) АРЧВ: $k_p=2.44, k_i=0.00004,$ $k_d=-4.163.$	199.5

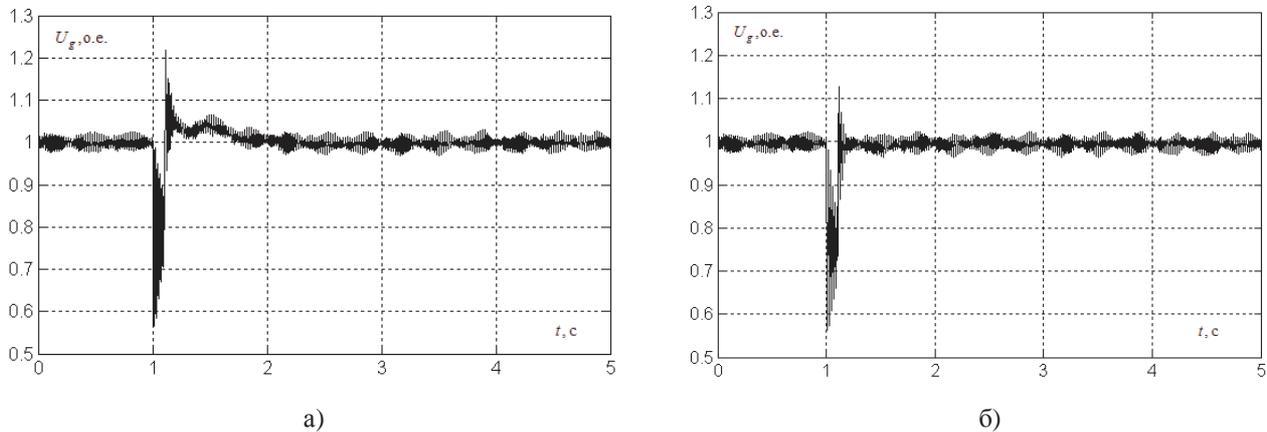
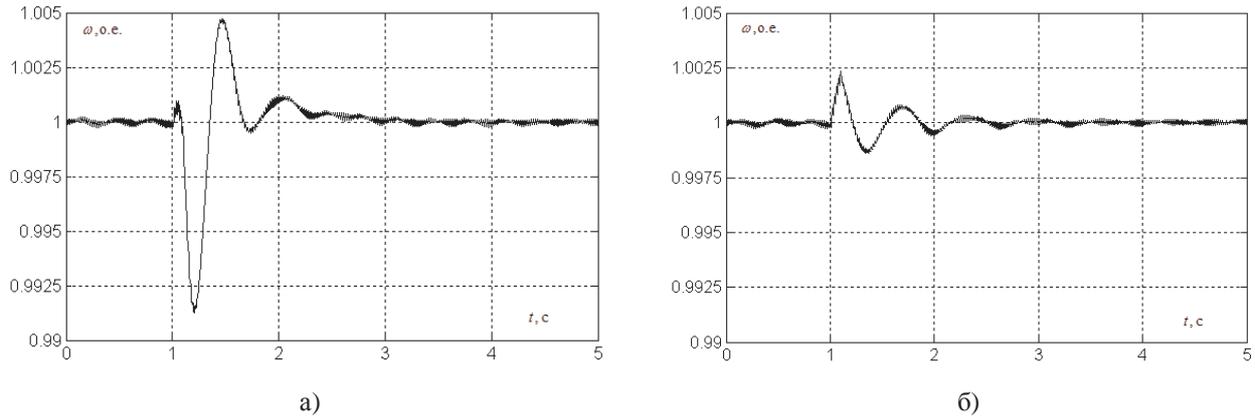


Рис. 8. Осциллограммы изменения напряжения генератора при возникновении трехфазного КЗ длительностью 0,1 с: а) несогласованная настройка АРВ и АРЧВ: время переходного процесса  $t_p = 0,8$  с, перерегулирование  $\sigma = 17,9$  %; б) согласованная настройка АРВ и АРЧВ:  $t_p = 0,1$  с,  $\sigma = 11,3$  %



**Рис. 9.** Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора при возникновении трехфазного КЗ длительностью 0,1 с: а) несогласованная настройка АРВ и АРЧВ:  $t_p = 2$  с,  $\sigma = 0,47$  %; б) согласованная настройка АРВ и АРЧВ:  $t_p = 1,8$  с,  $\sigma = 0,24$  %

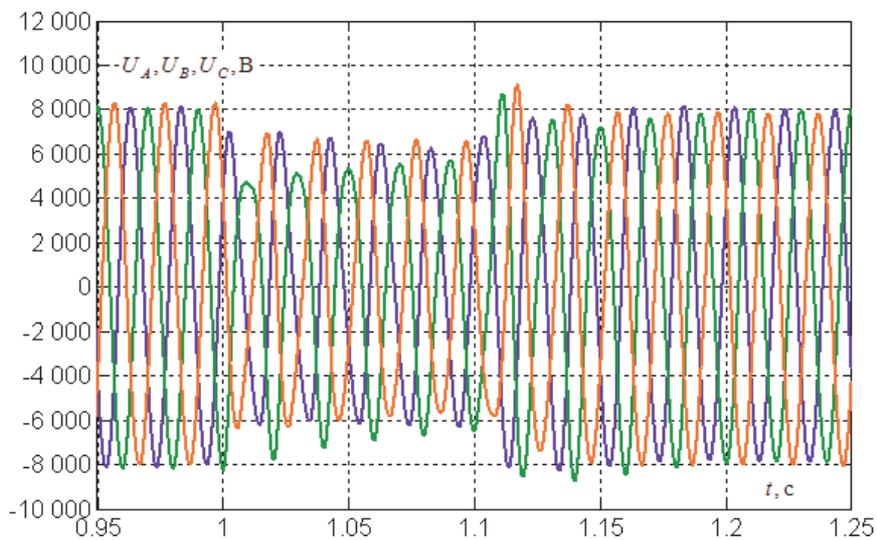
При моделировании без использования регуляторов у турбогенератора, работающего на полную мощность, в случае возникновения КЗ система оказывается неустойчивой, и ухудшаются показатели качества электроэнергии. В отличие от этого при использовании согласованно настроенных АРВ и АРЧВ исследуемая систе-

ма не только остается устойчивой при КЗ, но и приобретает хорошие демпферные свойства. Кроме того, улучшаются показатели качества электроэнергии (табл. 2). Осциллограммы, иллюстрирующие данные выводы, приведены на рис. 10...12.

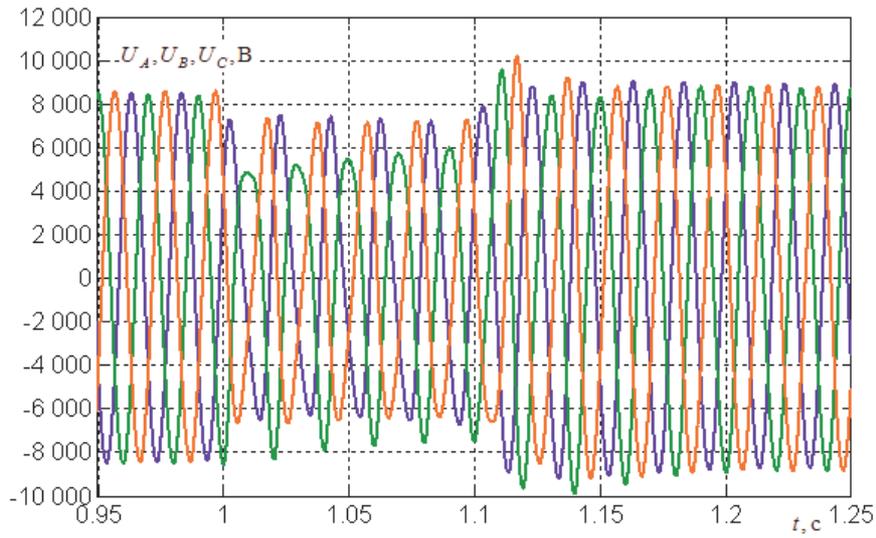
Таблица 2

*Коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения  $k_U$  и коэффициенты несимметрии по обратной последовательности, %*

	Режим системы	$k_{UAB}$	$k_{UBC}$	$k_{UCA}$	$k_{2U}$
1	Регуляторы отключены	1.53	1.65	0.79	0.57
2	Регуляторы работают с согласованной настройкой	0.75	0.85	0.44	0.35
3	Различие, %	104.00	94.12	79.55	62.86

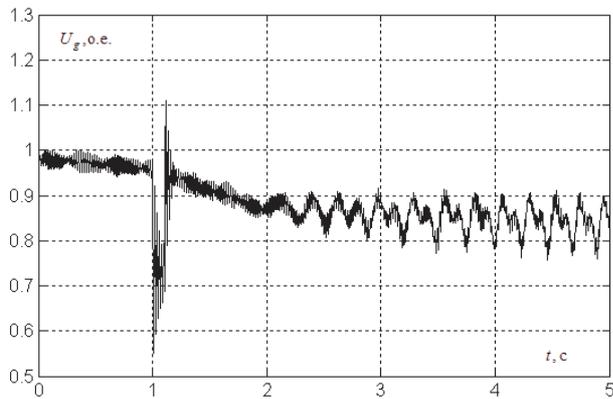


а)

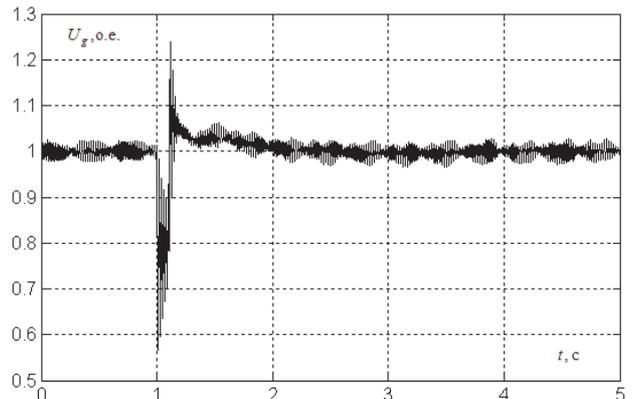


б)

**Рис. 10.** Осциллограммы изменения напряжения на шинах потребителя при возникновении трехфазного КЗ длительностью 0,1 с: а) без использования регуляторов; б) с использованием согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

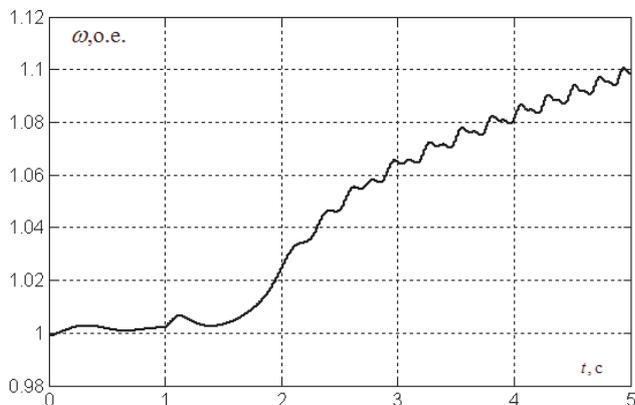


а)

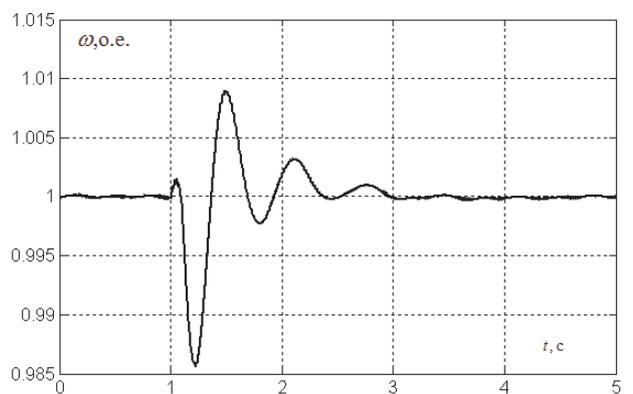


б)

**Рис. 11.** Осциллограммы изменения напряжения турбогенератора: а) без использования регуляторов; б) с использованием согласованно настроенных АРВ и АРЧВ



а)



б)

**Рис. 12.** Осциллограммы изменения частоты вращения ротора турбогенератора: а) без использования регуляторов; б) с использованием согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

## Заключение

На основании компьютерного моделирования показано, что использование оптимально согласованно настроенных АРВ и АРЧВ для генераторов, установленных в сетевом кластере, предназначенном для электропитания нетяговых потребителей железных дорог, позволяет улучшить качество электроэнергии и повысить надежность электроснабжения.

## Литература

1. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электропитания железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 164 с.
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ушаков В.А., Алексеенко В.А. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.
3. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение технологий сетевых кластеров в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. Ч. 1. С. 115-120.
4. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4 (36). С. 162-167
5. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск: ИрГУПС, 2012. Т. 2. С. 75-81.
6. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Моделирование систем электроснабжения железных дорог, включающих сетевые кластеры // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. ст. Иркутск: ИрГУПС, 2013. Вып. 22. С. 96-100.
7. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В., Попик В.А. Методика выбора оптимальных настроек систем АРЧВ генераторов электростанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 192-198.
8. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Разработка модели микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения в среде MATLAB и оптимизация его настроек // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 3-8.
9. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №1 (21). С. 150-153.
10. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 22 с.

11. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Решение оптимизационных задач электроэнергетики с помощью адаптивного генетического алгоритма // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 2. С. 94-99.

## References

1. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Distributed generation in systems of power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 164 p.
2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operational management in systems of power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 129 p.
3. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Application of technologies of network clusters in systems of power supply of not traction consumers of the railroads // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2013. Ch. 1. P. 115-120.
4. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of power supply of the railroads // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2012. № 4 (36). P. 162-167.
5. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The analysis of symmetrizing effect of the distributed generation // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Irkutsk: IrGUPS, 2012. T. 2. P. 75-81.
6. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Modeling of systems of power supply of the railroads including network clusters // Informatsionnye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte: sb. st. Irkutsk: IrGUPS, 2013. Vyp. 22. P. 96-100.
7. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V., Popik V.A. Technique of a choice of optimum settings of systems of ARChV of generators of power plants // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2011. № 1 (29). P. 192-198.
8. Bulatov Yu.N., Popik V.A. Development of model of the microprocessor automatic regulator of excitement in the environment of MATLAB and optimization of its settings // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. T. 2. P. 3-8.
9. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Optimization of coefficients of regulation of system of ARChM with use of genetic algorithm // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. 2009. № 1 (21). P. 150-153.
10. Bulatov Yu.N. Technique of the coordinated setup of automatic regulators of excitement and frequency of rotation of generators of power plants: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2012. 22 p.
11. Bulatov Yu.N., Popik V.A. The solution of optimization tasks of electric power industry by means of adaptive genetic algorithm // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. T. 2. P. 94-99.