

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69

## Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации

Ю.Н. Булатов<sup>1 a</sup>, А.В. Крюков<sup>2,3 b</sup>, Нгуен Ван Хуан<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 национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup>bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup>huanco.k7a@gmail.com

Статья поступила 19.12.2015, принята 20.01.2016

*На основе использования алгоритмов прогнозирования становится возможной настройка системы автоматического управления с помощью одного параметра — времени прогноза; при этом можно отказаться от дорогостоящей процедуры идентификации динамических характеристик объекта и расчета оптимальных параметров регуляторов. Поэтому прогностические алгоритмы, построенные на основе типовых законов регулирования, могут оказаться весьма перспективными для реальных систем управления технологическими процессами, особенно в условиях необходимости ускоренного ввода в эксплуатацию объектов, например установок распределенной генерации, работающих на основе синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения и частоты вращения. В статье приведены результаты исследований прогностических регуляторов установок распределенной генерации, направленных на изучение их влияния на качество управления напряжением и частотой вращения ротора турбогенератора малой мощности. Прогностические алгоритмы в сочетании с методикой согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения позволяют реализовать адаптивное управление, не требующее оперативного определения оптимальных согласованных настроек регуляторов для всех возможных режимов работы турбогенератора. Эти настройки могут быть определены во время эксплуатации, когда агрегатом управляют прогностические регуляторы, что является весьма перспективным для реальных установок распределенной генерации.*

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы; установки распределенной генерации; прогностические регуляторы возбуждения и частоты вращения ротора.

## Forecasting controls for distributed generation plants

Yu.N. Bulatov<sup>1 a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2,3 b</sup>, Nguyen Van Huan<sup>3 c</sup>

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

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

<sup>3</sup>Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup>bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup>huanco.k7a@gmail.com

Received 19.12.2015, accepted 20.01.2016

*On the basis of the use of forecasting algorithms it becomes possible to set an automatic control system with a single parameter which is the time of the forecast; thus, it is possible to abandon the costly procedure of identification of dynamic characteristics of an object and calculation of the optimal parameters of the elements of control systems. Therefore, forecasting algorithms, built on the basis of the model laws of regulation, may prove to be very promising for real systems of technological process control, especially in the need to accelerate the commissioning of objects, such as distributed generation plants, working on the basis of synchronous generators with automatic excitation and speed controls. The articles gives the research results for forecasting controls of distributed generation plants aimed at the study of their impact on the quality of the control of voltage and the speed of rotation of turbine generator rotor of a low power. Forecasting algorithms in conjunction with the procedure of agreed settings of the automatic excitation and speed controls make it possible to implement the adaptive control that does not require an operational definition of the optimal agreed settings of controls for all possible modes of operation of the turbine-generator. These settings can be determined during operation, when the unit is controlled with forecasting controls, which is very promising for real distributed generation plants.*

**Key words:** electric power systems; distributed generation plants; forecasting controls of excitation and rotor speed.

### Введение

Определение оптимальных настроек систем автоматического управления (САУ) требует решения таких

задач, как идентификация динамического объекта и расчет взаимосвязанных параметров настройки САУ, обеспечивающих заданный критерий оптимальности.

При этом полученная настройка САУ с типовыми линейными законами управления (ПИ, ПИД и т. п.), широко используемыми на практике, может оказаться неоптимальной в результате изменения режима работы объекта. Поэтому необходимо определять оптимальные настройки САУ для всех возможных режимов работы динамического объекта, что связано с трудоемкими расчетами большого количества взаимосвязанных параметров.

В работах [1; 2] предлагается перейти от принципа управления по текущему значению ошибки регулирования  $\varepsilon(t)$  к принципу управления по прогнозу, предполагающему вычисление значения ошибки  $\varepsilon(t + \tau_{пр})$ , ожидаемой через время прогнозирования  $\tau_{пр}$ . В этом случае реализуется упреждающее воздействие и удается частично скомпенсировать инерционность объекта, заключающуюся в отстающей реакции на действия управляющего устройства. Регулятор, управляющий объектом по прогнозу ошибки регулирования, назван в [1; 2] прогностическим.

**Постановка задачи.** Использование алгоритма прогнозирования в составе типовых регуляторов позволяет осуществить настройку САУ с помощью одного параметра — времени прогноза [3], отказавшись от дорогостоящей процедуры идентификации динамических характеристик объекта [4] и расчета оптимальных

параметров элементов систем регулирования. Прогностические алгоритмы, построенные на основе типовых законов регулирования, могут оказаться весьма перспективными для реальных систем управления технологическими процессами, особенно в условиях необходимости ускоренного ввода в эксплуатацию объектов, например установок распределенной генерации [5–17], работающих на основе синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ).

В статье приведены результаты исследований прогностических АРВ и АРЧВ, направленных на определение их влияния на качество управления напряжением и частотой вращения ротора турбогенератора малой мощности.

**Принцип автоматического управления по прогнозу.** Прогностический регулятор (рис. 1) включает два сегмента [3]:

- элемент прогнозирования с передаточной функцией  $W_{пр}(s)$ ;
- регулятор с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования и передаточной функцией  $W_{PID}(s)$ .

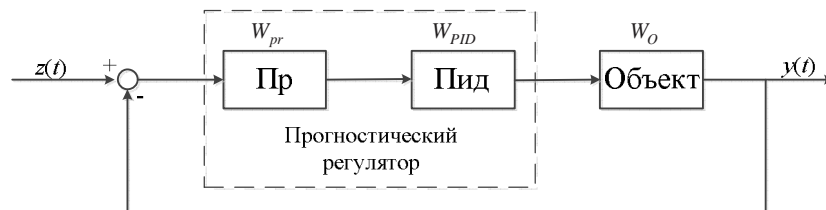


Рис. 1. Схема замкнутой САУ с прогностическим регулятором

Самый простой прогноз является линейным по двум значениям регулируемой величины — текущему  $y(t)$  и предыдущему  $y(t - \Delta t)$ . Передаточная функция линейного прогнозирующего звена (ПЗ) определяется так [3]:

$$W_{пр}(s) = \tau_{пр} s + 1,$$

где  $\tau_{пр}$  — постоянная времени линейного прогнозирующего звена;  $s$  — оператор Лапласа.

На основе проведенных в работах [1; 2] исследований показано, что за счет прогнозирования можно существенно повысить точность работы САУ при сохранении прежних настроек типового регулятора. Одновременно с повышением точности регулирования отмечено увеличение запаса устойчивости системы и уменьшение диапазона перемещения регулирующего органа.

Прогностические алгоритмы могут быть реализованы на базе программируемой микропроцессорной техники и использованы в АРВ и АРЧВ турбогенераторов

установок распределенной генерации. В сочетании с методикой согласованной настройки, предложенной в работе [17] и развитой в работах [9; 15; 16], это позволит сформировать адаптивную САУ напряжением и частотой вращения турбогенератора, не требующую оперативного определения оптимальных согласованных настроек АРВ и АРЧВ для всех возможных режимов работы установки распределенной генерации (РГ). Эти настройки могут быть определены в процессе эксплуатации, когда агрегатом управляют прогностические АРВ и АРЧВ.

**Описание модели исследования.** Исследование влияния прогностических АРВ и АРЧВ на качество управления напряжением и частотой проводилось в системе MATLAB на модели турбогенератора с номинальным напряжением 6,3 кВ и мощностью 2,5 МВ·А, работающего на активно-индуктивную нагрузку. Схема модели исследуемой системы в MATLAB представлена на рис. 2.

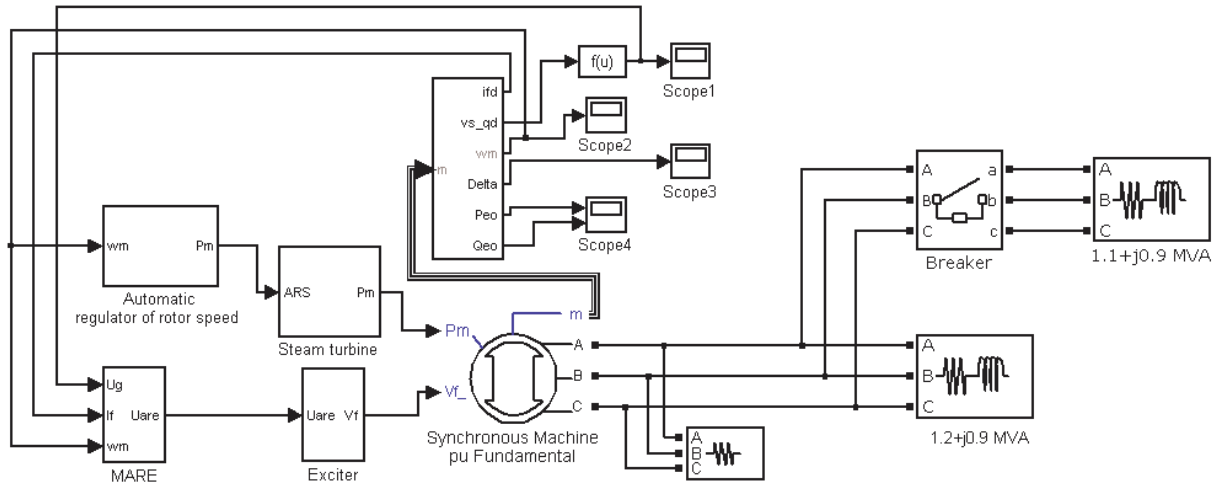


Рис. 2. Схема исследуемой системы в MATLAB

Блок Steam turbine моделирует паровую турбину с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{P_m}{\mu} = \frac{1}{T_T s + 1},$$

где  $P_m$  — мощность турбины;  $\mu$  — открытие регулирующего органа;  $T_T$  — постоянная времени турбины, определяемая запаздыванием в преобразовании энергии пара в механическую энергию (в среднем  $T_T$  составляет 0,2 с).

Тиристорный возбудитель (блок Exciter) моделируется аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом  $k_e$ , постоянной времени  $T_e$  и блоком ограниче-

ния напряжения. При моделировании принимались следующие числовые значения параметров:  $k_e = 1$ ;  $T_e = 0,025$  с. В модели имеется возможность внесения возмущения в виде отключения или подключения активно-индуктивной нагрузки мощностью  $1,1 + j0,9$  МВ·А с помощью выключателя (блок Breaker). Параметры турбогенератора в модели измеряются с помощью осциллографов (блоки Scope). За основу прогностических АРВ и АРЧВ (блоки MARE и Automatic regulator of rotor speed соответственно) были взяты их модели, представляющие собой микропроцессорные ПИД-регуляторы [16]. Структурные схемы моделей прогностических АРВ и АРЧВ, разработанных в пакете Simulink системы MATLAB, представлены на рис. 3 и 4.

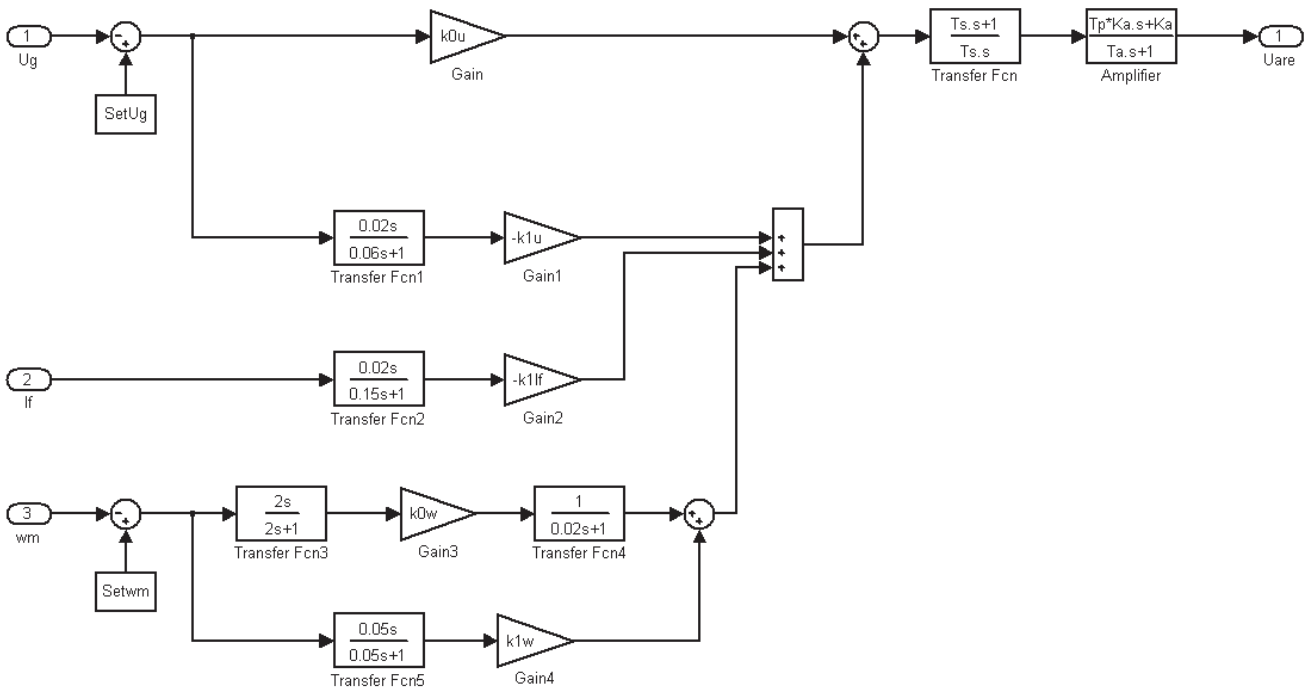


Рис. 3. Структурная схема модели прогностического АРВ в MATLAB

Функции регулирования возбуждения генератора в исследуемой модели осуществляются при подаче в

АРВ следующих параметров: напряжения генератора  $U_g$ , тока возбуждения  $I_f$ , частоты вращения ротора ге-

нератора  $\omega$ ; последний параметр обозначен на схемах, реализованных средствами системы MATLAB, как  $wm$ . Канал по напряжению образуется блоком, определяющим отклонение напряжения генератора  $U_g$  от заданной уставки  $SetUg$  и дифференциатором с передаточной функцией  $\frac{0,02s}{0,06s+1}$ . Для стабилизации применяется 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 и демпфирования послеаварийных колебаний применяются стабилизирующие каналы по отклонению и производной частоты, настройка которых осуществляется коэффициентами усиления  $(k_{0w}, k_{1w})$ . Все сигналы суммируются и

поступают на общий канал с ПИ-законом регулирования и передаточной функцией  $\frac{sT_s+1}{sT_s}$ . Таким образом,

формируется сигнал по изменению напряжения возбуждения генератора, который перед подачей на тиристорный возбудитель проходит через блок Amplifier, учитывающий последовательное соединение электронного усилителя с передаточной функцией  $\frac{K_a}{T_a s+1}$  и линейного прогнозирующего звена с передаточной функцией  $T_p s+1$  (рис. 3). При моделировании принимались следующие числовые значения параметров:  $T_s = 0,5$  с;  $K_a = 1$ ;  $T_a = 0,001$  с.

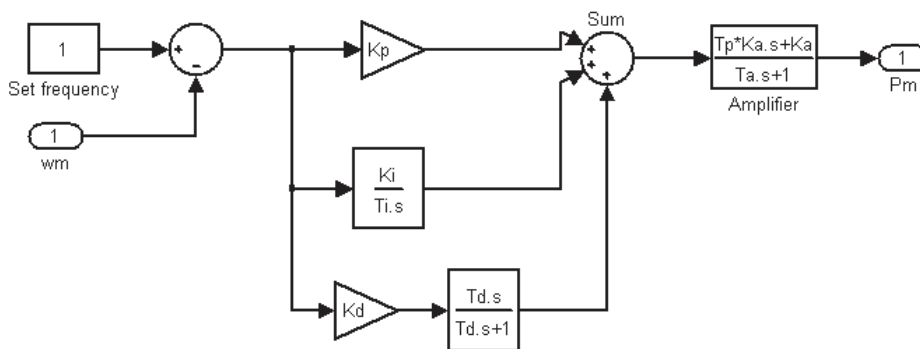


Рис. 4. Структурная схема модели прогностического АРЧВ в MATLAB

В качестве входного сигнала АРЧВ используется отклонение частоты вращения ротора генератора  $\omega$  от заданной уставки  $Set\ frequency$ , поступающее на ПИД-регулятор, с выхода которого сигнал подается на блок Amplifier, учитывающий последовательное соединение усилителя с передаточной функцией  $\frac{K_a}{sT_a+1}$  и линейного прогнозирующего звена (рис. 4). В результате формируется управляющее воздействие на изменение механической мощности турбогенератора  $P_T$ . При моделировании использовались следующие значения параметров: постоянные времени интегрирующего звена  $T_i = 0,1$  с; дифференцирующего звена  $T_d = 1$  с; коэффициент усиления  $K_a = 1$ ; постоянная времени усилителя  $T_a = 0,001$  с.

**Результаты проведенных исследований.** Исследования по влиянию прогностических АРВ и АРЧВ на качество управления напряжением и частотой вращения ротора турбогенератора проводились для двух случаев:

- при случайно выбранных коэффициентах настройки АРВ и АРЧВ;
- при согласованно настроенных АРВ и АРЧВ.

Исследовались переходные процессы, вызванные подключением дополнительной нагрузки.

При случайно выбранных коэффициентах настройки АРВ и АРЧВ система оказалась неустойчивой при

подключении дополнительной нагрузки в момент времени 5 с. Применение прогнозирующих элементов позволяет обеспечить устойчивость системы; при этом постоянные времени ПЗ, оказывающие значительное влияние на показатели качества переходного процесса, были определены опытным путем. Необходимо также отметить, что изменение настроек АРВ и АРЧВ влияет на выбор оптимального времени прогнозирующего звена. Результаты моделирования представлены на рис. 5 и 6. Таким образом, прогностические АРВ и АРЧВ позволяют обеспечить устойчивость работы и приемлемое качество управления напряжением и частотой вращения ротора турбогенератора без решения задач идентификации и поиска оптимальных настроек регуляторов.

Эффективность методики согласованной настройки АРВ и АРЧВ турбогенераторов заключается в снижении времени регулирования и перерегулирования частоты и напряжения, в обеспечении устойчивости, а также в улучшении качества электроэнергии нетяговых потребителей систем электроснабжения железных дорог [15; 16]. Согласование настроек АРВ и АРЧВ турбогенератора осуществлялось с помощью программного комплекса «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций», предложенного в [17]. В результате были определены коэффициенты настройки регуляторов и запас устойчивости системы (табл. 1).

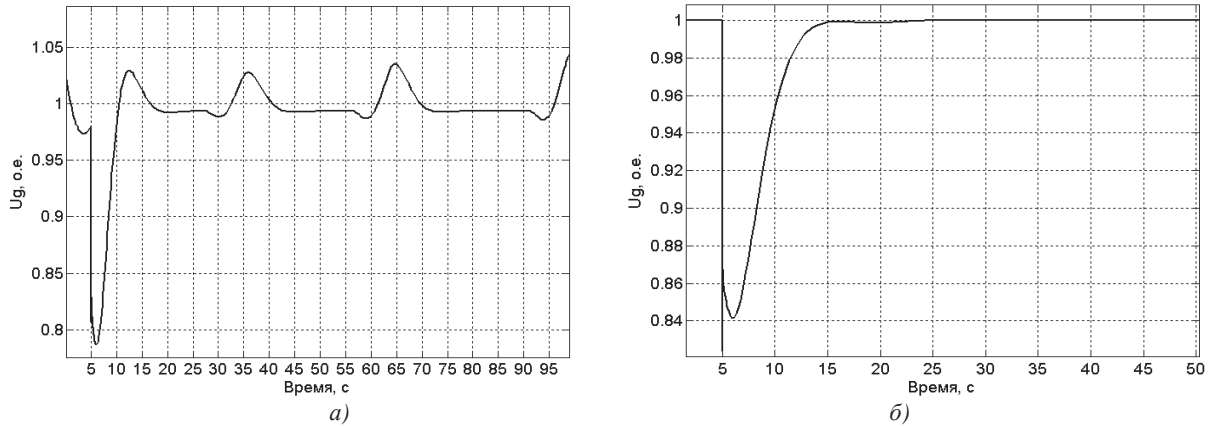


Рис. 5. Изменение напряжения турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: а) без ПЗ; б) с использованием прогностических АРВ и АРЧВ

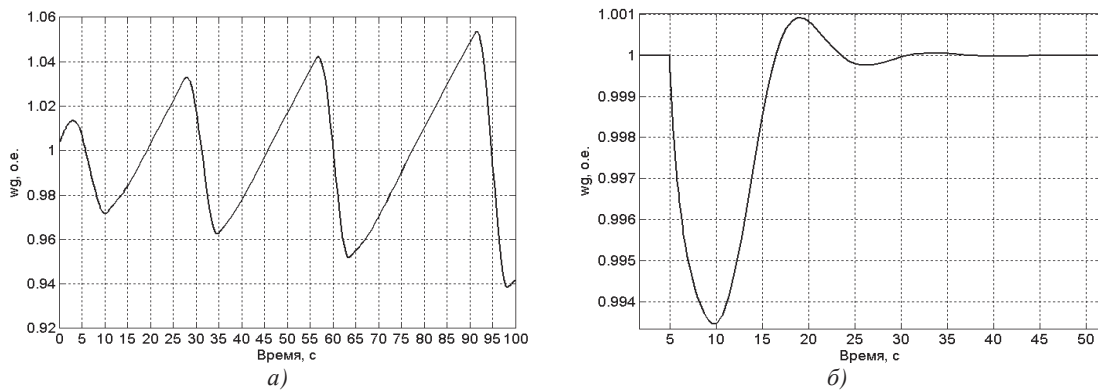


Рис. 6. Изменение частоты вращения ротора турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: а) без ПЗ; б) с использованием прогностических АРВ и АРЧВ

Таблица 1

Результаты согласованной настройки

Коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ	Степень устойчивости по характеристическому годографу системы, $V(\square)$	Запас аperiodической устойчивости, $V(0)$
1) АРВ: $k_{0u} = 100; k_{1u} = 50;$ $k_{0w} = 1,28; k_{1w} = -3,73;$ 2) АРЧВ: $k_p = 754,9; k_i = 52; k_d = -5,75$	0,01	155,7

На рис. 7, 8 и 9 представлены результаты моделирования для согласованно настроенных АРВ и АРЧВ.

Постоянные времени ПЗ были определены опытным путем и составили для АРВ и АРЧВ  $T_p = 0,1$  с.

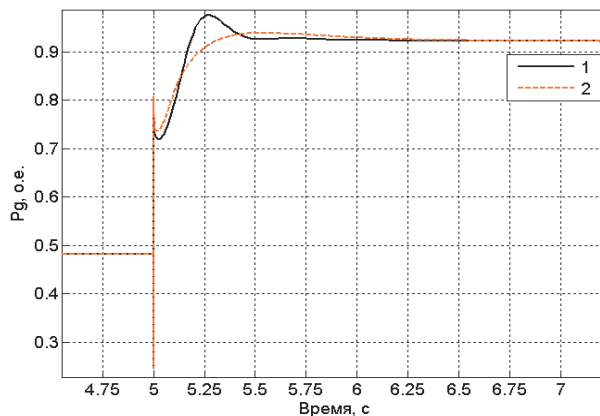
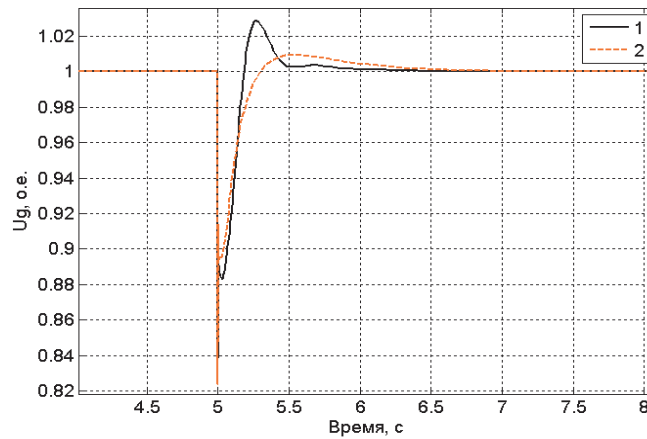
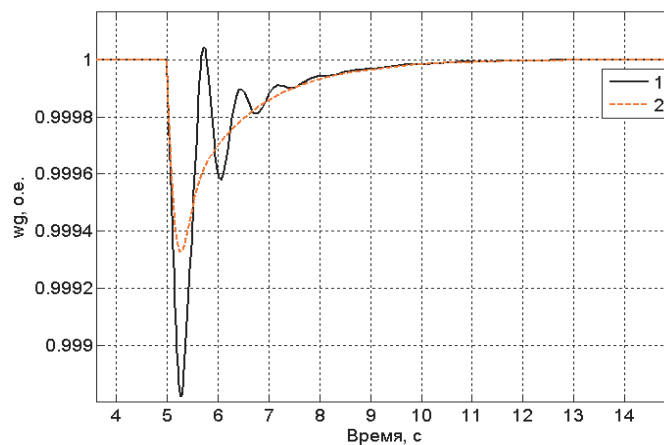


Рис. 7. Изменение активной мощности турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 — без ПЗ (время переходного процесса  $t_p = 1,25$  с, перегулирование  $\sigma = 7\%$ ); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ( $t_p = 1,25$  с, перегулирование  $\sigma = 0\%$ )





**Рис. 8.** Изменение напряжения турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 — без ПЗ ( $t_p = 1,5$  с, перерегулирование  $\sigma = 2,1$  %); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ( $t_p = 1,5$  с, перерегулирование  $\sigma = 0,1$  %)



**Рис. 9.** Изменение частоты вращения ротора турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки: 1 — без ПЗ ( $t_p = 6$  с, перерегулирование  $\sigma = 0,01$  %); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ( $t_p = 6$  с, перерегулирование  $\sigma = 0$  %)

Таким образом, применение прогностических АРВ и АРЧВ при их согласованной настройке позволяет получить дополнительный эффект в качестве управления напряжением и частотой вращения ротора турбогенератора, заключающийся главным образом в снижении перерегулирования.

#### Заключение

Результаты компьютерного моделирования прогностических регуляторов напряжения и частоты вращения ротора турбогенератора малой мощности позволяют сделать следующие выводы:

1. Прогнозирующие звенья позволяют обеспечить устойчивость работы турбогенератора без использования дорогостоящей процедуры идентификации динамических характеристик и расчета оптимальных настроек АРВ и АРЧВ, но при этом возникает задача поиска оптимальной постоянной времени ПЗ.

2. Согласованная настройка АРВ и АРЧВ позволяет обеспечить высокую степень устойчивости синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку, и получить при этом необходимые демпферные свойства системы.

3. При согласованно настроенных АРВ и АРЧВ прогнозирующие звенья позволяют снизить перерегулирование; главное достоинство ПЗ в этом случае состоит в том, что они дают приемлемый результат без

процедуры идентификации и оптимизации коэффициентов настройки. Однако полностью отказаться от процедуры настройки АРВ и АРЧВ не удастся, так как на параметры переходных процессов в электроэнергетической системе и устойчивость в значительной мере оказывают влияние именно коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ.

4. Прогностические алгоритмы в сочетании с методикой согласованной настройки АРВ и АРЧВ позволяют реализовать адаптивный прогностический регулятор напряжения и частоты вращения турбогенератора, не требующий оперативного определения оптимальных согласованных настроек регуляторов для всех возможных режимов работы установки РГ. Эти настройки могут быть определены в процессе эксплуатации, когда агрегатом управляют прогностические АРВ и АРЧВ.

#### Литература

1. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Применение линейных прогностических алгоритмов регулирования // Новое в российской электроэнергетике. 2009. № 10. С.40-44
2. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. 2011. № 4. С.61-66
3. Пикина Г.А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром

ром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 5-13.

4. Солодуша С.В., Герасимов Д.О., Сулов К.В. Моделирование динамики ветрогенератора с помощью полинома Вольтерра // Материалы VII международного симпозиума «Обобщенные постановки и решения задач управления (GSSCP-2014)». М., 2014. С. 161-163.

5. Солонина Н.Н., Сулов К.В., Смирнов А.С. Повышение надежности функционирования автономных систем электроснабжения // Вестн. ИрГТУ. № 10 (69). 2012. С. 240-245.

6. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Системы электроснабжения железнодорожного транспорта с установками распределенной генерации. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 152 с.

7. 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.

8. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечёткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 60-69.

9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 83-95.

10. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 164 с.

11. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметризирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск: ИрГУПС, 2012. Т. 2. С. 75-81.

12. 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.

13. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение технологии сетевых кластеров в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Информационные и математические технологии в науке и управлении: сб. науч. ст. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. Ч. 1. С. 115-120.

14. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Моделирование аварийных режимов в сетевых кластерах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск: ИрГУПС, 2013. Т. 2. С. 52-56.

15. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение алгоритмов согласованной настройки регуляторов турбогенераторов установки распределенной генерации // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 130-139.

16. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.

17. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 22 с.

1. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Application of linear predictive algorithms of regulation // Novoe v rossiiskoi elektroenergetike. 2009. № 10. P. 40-44.

2. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Predictive standard algorithms of regulation // Thermal Engineering. 2011. № 4. P. 61-66.

3. Pikina G.A. Principle management according to the forecast and possibility of control of systems of regulation by one parameter // Novoe v rossiiskoi elektroenergetike. 2014. № 3. P. 5-13.

4. Solodusha S.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V. Modeling of dynamics of the wind generator by means of Voltaire's polynomials // Materialy VII mezhdunarodnogo simpoziuma «Obobshchennye postanovki i resheniya zadach upravleniya (GSSCP-2014)». М., 2014. P. 161-163.

5. Solonina N.N., Suslov K.V., Smirnov A.S. Increasing operational reliability of autonomous power supply systems // Bulletin of Irkutsk State Technical University. № 10 (69). 2012. P. 240-245.

6. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V. Systems of power supply of railway transport with installations of the distributed generation. Irkutsk: IrGTU, 2013. 152 p.

7. 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 // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 4 (36). P. 162-167.

8. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Indistinct regulators for the wind generator of installations // Problemy energetiki. 2014. № 7-8. P. 60-69.

9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Intelligent regulators for installations of the distributed generation // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. № 2 (46). P. 83-95.

10. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The distributed generation in systems of power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 164 p.

11. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Irkutsk: IrGUPS, 2012. Т. 2. P. 75-81.

12. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Modeling of systems of power supply of the railroads including net-work clusters // Informatsionnye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte: sb. st. Irkutsk: IrGUPS, 2013. Vyp. 22. P. 96-100.

13. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Application of technology of network clusters in systems of power supply of not traction consumers of the railroads // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: sb. nauch. st. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2013. Ch. 1. P. 115-120.

14. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Modeling of emergency operation in network clusters // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Irkutsk: IrGUPS, 2013. Т. 2. P. 52-56.

15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Application of algorithms of the coordinated setup of controls of turbo-generators of distributed generation plants distributed generation plants // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. Т. 2. P. 130-139.

16. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.

17. Bulatov Yu.N. The methodology of matched setting of automatic controllers of excitation and rate speed of power plants generators: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2012. 22 p.

## References