

УДК 621.311

Автопрогностический регулятор частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации*

Ю.Н. БУЛАТОВ¹, А.В. КРЮКОВ², НГУЕН ВАН ХУАН³

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения; г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: and_kryukov@mail.ru

³ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, магистрант. E-mail: huanco.k7a@gmail.com

В электроэнергетике получило активное развитие направление, связанное с использованием установок распределенной генерации (РГ), находящихся в непосредственной близости от потребителей электроэнергии. Особую актуальность задача внедрения современных установок РГ приобретает при модернизации систем электроснабжения (СЭС), удаленных от сетевой инфраструктуры.

Частота переменного электрического тока является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. При использовании в установках распределенной генерации для изолированных СЭС синхронных генераторов ее отклонения от номинального значения могут быть значительными. Поэтому требуются алгоритмы, позволяющие с минимальными затратами усовершенствовать классические регуляторы частоты вращения роторов. Прогностические алгоритмы, построенные на основе типовых законов регулирования, позволяют настроить систему автоматического управления с помощью одного параметра – времени прогноза. Это может оказаться весьма перспективным для реальных систем управления технологическими процессами, особенно в условиях необходимости ускоренного ввода в эксплуатацию объектов, например, установок РГ, работающих на основе синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения и частоты вращения (АРЧВ).

В статье представлен автопрогностический регулятор частоты вращения синхронного генератора установки распределенной генерации и исследовано его влияние на качество управления частотой в автономной системе электроснабжения при изменениях режимов работы.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что использование автопрогностического АРЧВ при возмущениях в СЭС позволяет существенно улучшить качество регулирования частоты в автономной системе электроснабжения и повысить демпферные свойства. Предлагаемый автопрогностический АРЧВ синхронных генераторов может быть рекомендован при необходимости оперативного ввода в эксплуатацию установок РГ.

* Статья получена 15 сентября 2016 г.

Ключевые слова: установка распределенной генерации, частота, прогностический регулятор, автоматический регулятор частоты вращения, синхронный генератор, автопрогностический регулятор, моделирование

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-15-25

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в электроэнергетике активно развивается направление, связанное с использованием установок распределенной генерации (РГ), находящихся в непосредственной близости от потребителей электроэнергии. Установки РГ позволяют разгрузить основную сеть, повысить надежность электроснабжения и улучшить качество электроэнергии [1–10]. Особую актуальность задача внедрения современных установок РГ приобретает при модернизации систем электроснабжения (СЭС), удаленных от сетевой инфраструктуры. Зоны децентрализованного электроснабжения охватывают около 70 % территории Российской Федерации.

Внедрение установок РГ на основе синхронных турбо- и гидрогенераторов требует решения задачи определения оптимальных настроек автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) для различных режимов работы СЭС. Решение этой задачи возможно путем использования полных моделей СЭС и трудоемких расчетов большого числа взаимосвязанных параметров.

В условиях ускоренного ввода в эксплуатацию установок РГ, работающих на основе синхронных генераторов с АРВ и АРЧВ, возможен другой подход, обеспечивающий настройку регуляторов с помощью одного параметра. Для этого предлагается перейти от регулирования по текущему значению ошибки $\varepsilon(t)$ к управлению, предполагающему вычисление прогноза $\varepsilon(t + \Delta t)$. Регулятор, управляющий объектом по величине $\varepsilon(t + \Delta t)$, назван в [11–13] прогностическим.

Частота переменного электрического тока является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. В изолированных СЭС ее отклонения от номинального значения могут быть значительными. Поэтому требуются алгоритмы, позволяющие с минимальными затратами усовершенствовать классические регуляторы частоты вращения роторов генераторов РГ и на этапе ускоренного ввода в эксплуатацию отказаться от процедуры поиска оптимальных параметров. Как показали исследования [14, 15], такое усовершенствование возможно путем применения прогностических алгоритмов, на основе которых можно существенно повысить точность работы систем автоматического управления (САУ) при сохранении прежних настроек типового регулятора. Кроме того, может иметь место увеличение запаса устойчивости и уменьшение диапазона перемещения регулирующего органа [13]. При этом больший эффект можно получить, используя автоматическую подстройку времени прогноза при изменении режима работы генераторов.

В статье представлена модель автопрогностического регулятора частоты вращения ротора синхронного генератора установки РГ и исследовано его влияние на качество управления частотой в автономной системе электроснабжения при изменении режима работы установки РГ.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОПРОГНОСТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА

Прогностический регулятор (рис. 1) включает в себя два сегмента [13]: элемент прогнозирования с передаточной функцией $W_{for}(s)$ и регулятор с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования и передаточной функцией $W_{PID}(s)$.

Простой линейный прогноз может быть реализован по двум значениям регулируемой величины – текущему $y(t)$ и предыдущему $y(t - \Delta t)$, при этом передаточная функция прогнозирующего звена (ПЗ) определяется так [13]:

$$W_{for}(s) = T_p s + 1,$$

где T_p – постоянная времени линейного прогнозирующего звена (время прогноза); s – оператор Лапласа.

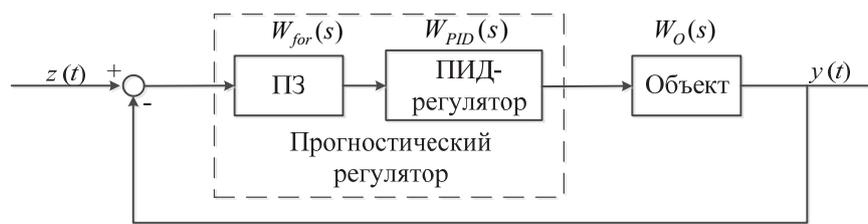


Рис. 1. Схема замкнутой САУ с прогностическим регулятором

Таким образом, возникает задача определения постоянной времени прогнозирующего звена для конкретного объекта регулирования.

В работе [13] отмечается, что наилучшее время прогнозирования составляет 0,1 периода собственных колебаний оптимально настроенной исходной замкнутой системы, что требует определения ее динамических свойств. При этом в СЭС динамические свойства определяются электромагнитной и электромеханической составляющими, обуславливающими различные частоты собственных колебаний.

Расчет частоты собственных колебаний агрегатов установок РГ можно определять по выражению [16]

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{\partial P_g}{\partial \delta_g} \frac{\omega_0}{T_{je}}}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{E_q U_g \cos \delta}{X_d} \frac{\omega_0}{T_{je}}}}{2\pi}, \quad (1)$$

где f_p – частота собственных колебаний ротора генератора при неизменности по модулю и углу вектора напряжения на его шинах – парциальная частота, являющаяся параметром генератора, комплексно характеризующим его инерционность и жесткость связи с СЭС [16]; $\frac{\partial P_g}{\partial \delta_g}$ – синхронизирующая

мощность генератора, определяемая как $P_c = \frac{E_q U_g}{X_d} \cos \delta$, о.е.; $\omega_0 = 314$ рад/с – номинальная частота вращения ротора генератора; T_{je} – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата, с; X_d – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.; U_g – номинальное напряжение генератора, о.е.; δ – угол между напряжением и ЭДС E_q генератора, зависящий от нагрузочного режима, эл. град.

Период собственных колебаний агрегатов установок РГ, являющийся в данном случае временем прогноза, может быть определен по выражению $T_p = 1/f_p$. Проведенные ранее исследования [15] показывают, что наибольший эффект удастся получить при увеличении постоянной времени прогнозирующего звена АРЧВ в 100 раз, что предполагает использование усилителя, включенного последовательно с прогнозирующим звеном.

Из выражения (1) видно, что частота собственных колебаний ротора генератора, а значит, и постоянная времени прогнозирующего звена существенно зависят от угла нагрузки δ . Принимая во внимание данное обстоятельство, а также то, что современные быстродействующие тиристорные системы возбуждения генераторов позволяют поддерживать в нормальных режимах работы напряжение у генератора практически неизменным, целесообразно вычислять и изменять постоянную времени прогнозирования АРЧВ при вариации режима работы генератора. Структурная схема системы регулирования частоты вращения ротора генератора с автопрогностическим АРЧВ представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что функция $f_p(\delta)$ зависит от параметров агрегатов и для различных установок РГ будет отличаться.

Представленный автопрогностический АРЧВ не требует оптимизации коэффициентов настройки регулятора и определения постоянной времени прогнозирующего звена. Необходимо лишь знать параметры агрегата установки РГ, входящие в выражение (1).

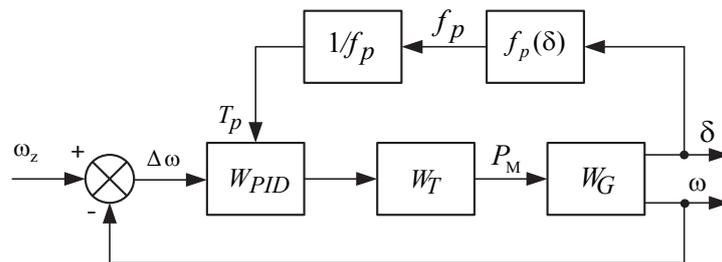


Рис. 2. Структурная схема системы регулирования частоты с автопрогностическим АРЧВ:

W_G – передаточная функция генератора; W_T – передаточная функция турбины; W_{PID} – передаточная функция АРЧВ (ПИД-регулятор)

2. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Моделирование осуществлялось применительно к эквивалентной схеме изолированной СЭС, показанной на рис. 3. Схема модели исследуемой системы в MATLAB представлена на рис. 4.

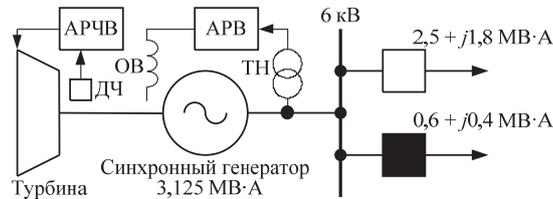


Рис. 3. Схема изолированной СЭС:

ДЧ – датчик частоты вращения; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения

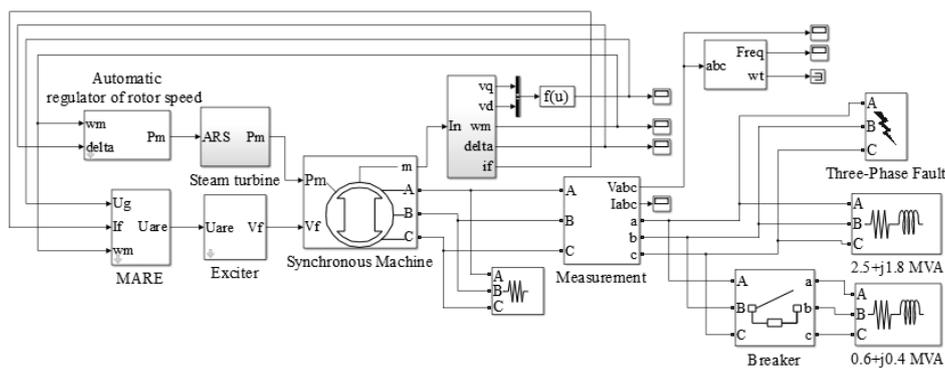


Рис. 4. Схема исследуемой системы в MATLAB

В модели (рис. 4) предусматривалась возможность внесения возмущения в виде отключения или подключения активно-индуктивной нагрузки мощностью $0,6 + j0,4$ МВ·А с помощью выключателя (блок Breaker), имитации трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах потребителя с помощью блока Three-Phase Fault и его отключения через 0,5 с.

Турбогенератор, приводимый во вращение паровой турбиной, моделировался стандартным блоком пакета SymPowerSystems – Synchronous Machine. Модель паровой турбины (блок Steam turbine) выполнена с учетом промежуточного отбора пара. Структурная схема блока Steam turbine представлена на рис. 5.

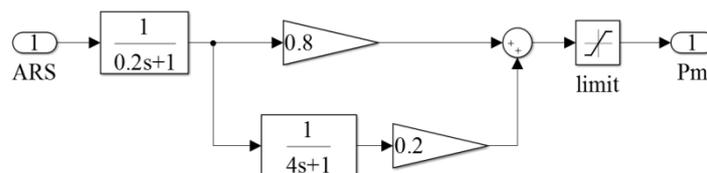


Рис. 5. Структурная схема модели паровой турбины с учетом промежуточного отбора пара

Тиристорный возбудитель (блок Exciter) моделировался аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения. При моделировании принимались следующие значения параметров: $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с.

В качестве регулятора возбуждения использовался прогностический АРВ (блок MARE), представляющий собой микропроцессорный ПИД-регулятор [14, 15, 17]. Структурная схема модели прогностического АРВ представлена на рис. 6. В блоке Amplifier учитывается последовательное соединение электронного усилителя с передаточной функцией $\frac{K_a}{T_a s + 1}$ и линейного прогнозирующего звена с передаточной функцией $T_p s + 1$. При моделировании принимались следующие числовые значения параметров: $K_a = 1$; $T_a = 0,001$ с.

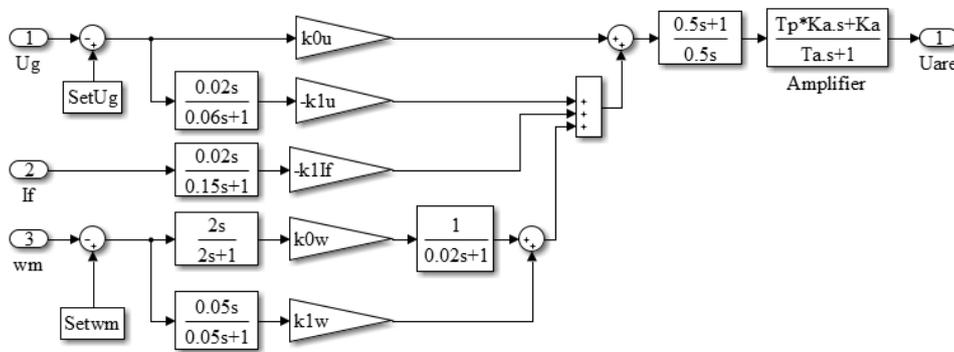


Рис. 6. Структурная схема модели прогностического АРВ:

U_g – текущее значение напряжения генератора; $SetU_g$ – заданное значение напряжения генератора; I_f – ток возбуждения генератора; ω_m – текущее значение частоты вращения ротора генератора; $Set\omega_m$ – заданное значение частоты вращения ротора генератора; $k_{0u}, k_{1u}, k_{1If}, k_{0\omega}, k_{1\omega}$ – коэффициенты настройки АРВ; T_p – постоянная времени прогнозирующего звена

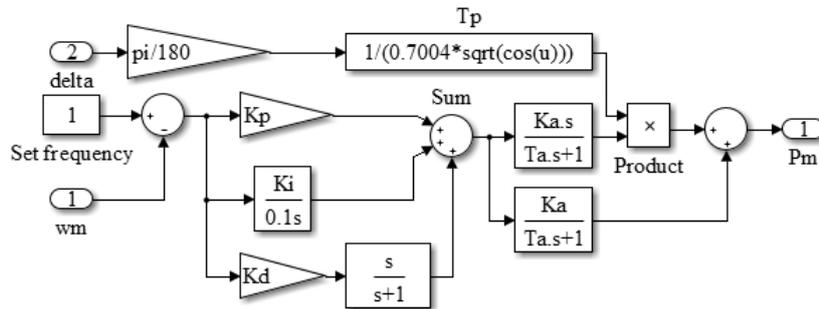


Рис. 7. Структурная схема модели автопрогностического АРЧВ:

K_p, K_i, K_d – коэффициенты настройки АРЧВ

С учетом необходимых модификаций была разработана модель автопрогностического АРЧВ, структурная схема которой представлена на рис. 7. При

моделировании использовались следующие параметры турбогенератора: $X_d = 2,34$ о.е.; $E_q = 1,25$ о.е.; $U_g = 1$ о.е.; $T_{je} = 8,669$ с. Функция $f_p(\delta)$, определяемая этими параметрами, имела следующий вид: $f_p(\delta) = 0,7004\sqrt{\cos \delta}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования влияния предложенного автопрогностического АРЧВ на качество управления частотой в автономной системе электроснабжения рассматривались следующие режимы:

- подключение дополнительной нагрузки;
- возникновение трехфазного КЗ на шинах потребителя и его отключение релейной защитой через 0,5 с.

Проведенные ранее исследования [14] показали, что при оптимальной настройке АРВ и АРЧВ прогнозирующие звенья улучшают демпферные свойства регуляторов, позволяют снизить величину перерегулирования и время переходного процесса при больших возмущениях в системе. Прогнозирующие звенья позволяют также обеспечить устойчивость работы генераторов установок распределенной генерации при больших возмущениях без использования трудоемкой процедуры идентификации динамических характеристик и расчета оптимальных настроек АРВ и АРЧВ [15]. В данной работе процедура оптимизации настроек АРВ и АРЧВ генераторов не выполнялась, а коэффициенты настройки регуляторов были выбраны из практических соображений.

Результаты моделирования показывают, что использование автопрогностического АРЧВ при подключении дополнительной нагрузки позволяет уменьшить время регулирования частоты в автономной системе электроснабжения в 2,3 раза по сравнению с типовым прогностическим АРЧВ (рис. 8).

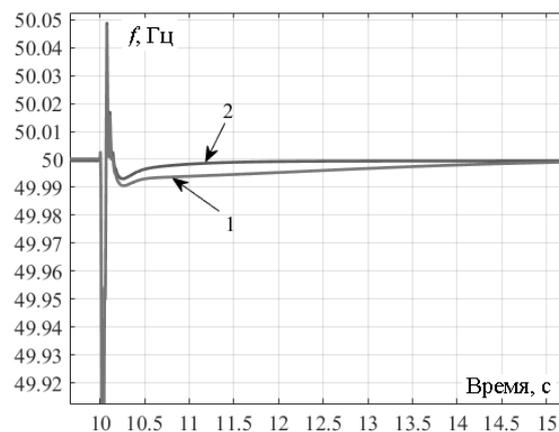


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты в системе при подключении дополнительной нагрузки:

1 – с использованием типового прогностического АРЧВ (время переходного процесса $t_p = 4,5$ с); 2 – с использованием автопрогностического АРЧВ ($t_p = 2$ с)

При больших возмущениях в системе, вызванных коротким замыканием и его отключением релейной защитой, применение автопрогностического АРЧВ позволяет существенно улучшить демпферные свойства регулятора и снизить инерционность объекта. Соответствующие осциллограммы изменения частоты, подтверждающие данные выводы, представлены на рис. 9.

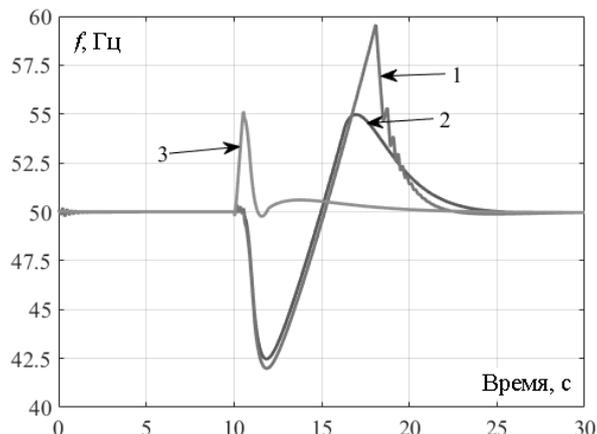


Рис. 9. Осциллограммы изменения частоты в системе при возникновении трехфазного КЗ на шинах потребителя и его отключении релейной защитой через 0,5 с:

1 – без использования прогнозирующих звеньев в АРВ и АРЧВ (перерегулирование $\sigma = 19\%$, время переходного процесса $t_p = 12,5$ с); 2 – с использованием типового прогностического АРЧВ ($\sigma = 10\%$, $t_p = 14$ с); 3 – с использованием автопрогностического АРЧВ ($\sigma = 10\%$, $t_p = 10$ с)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработана модель автопрогностического регулятора частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации, позволяющего улучшить качество регулирования частоты в автономной системе электроснабжения. При подключении дополнительной нагрузки такой регулятор позволяет уменьшить время стабилизации частоты по сравнению с типовым прогностическим АРЧВ (в рассматриваемом примере в 2,3 раза). Для больших возмущений в системе, вызванных коротким замыканием и его отключением релейной защитой, применение автопрогностического АРЧВ позволяет значительно улучшить демпферные свойства и снизить инерционность (в рассматриваемом примере величина перерегулирования σ снизилась на 9%, а время переходного процесса – на 2,5 с).

2. Предлагаемый автопрогностический регулятор частоты вращения синхронного генератора может быть рекомендован при необходимости оперативного ввода в эксплуатацию установок распределенной генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков А.В., Чан З.Х. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – Т. 2. – С. 75–81.
2. Крюков А.В., Чан З.Х. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4 (36). – С. 162–167.
3. *Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Technical and economic impacts of distributed generation on distribution system // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2012. – Vol. 6, N 4. – P. 385–389.
4. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Системы электроснабжения железнодорожного транспорта с установками распределенной генерации. – Иркутск: ИрГТУ, 2013. – 152 с.
5. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог / М.О. Арсентьев, О.В. Арсентьев, А.В. Крюков, З.Х. Чан. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 164 с.
6. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7/8. – С. 60–69.
7. *Mahtoud M.S., AL-Sunni F.M.* Control and optimization of distributed generation systems. – Cham: Springer, 2015. – 578 p.
8. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 2 (46). – С. 83–95.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – 205 с.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Применение сетевых кластеров (microgrid) в системах электроснабжения железных дорог. – Братск: БрГУ, 2016. – 178 с.
11. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Применение линейных прогностических алгоритмов регулирования // Новое в российской электроэнергетике. – 2009. – № 10. – С. 40–44.
12. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 61–66.
13. Пикина Г.А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – № 3. – С. 5–13.
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 1 (29). – С. 63–69. – doi: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69.
15. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х. Определение параметров прогностических регуляторов для установок распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 84–91. – doi: 10.18324/2077-5415-2016-2-84-91.
16. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
17. Игнатьев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 278 с.

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем. Имеет более 100 публикаций. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич, доктор техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 600 публикаций. E-mail: and_kryukov@mail.ru

Нгуен Ван Хуан, магистрант Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и

управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 10 публикаций. E-mail: huanco.k7a@gmail.com

An automatic prognostic controller of the distributed generator rotor speed*

Yu.N. BULATOV¹, A.V. KRYUKOV², NGUEN VAN KHUAN³

¹ Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, 665709, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk State Transport University, 15, Chernishevskaya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: and_kryukov@mail.ru

³ Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, master student. E-mail: huanco.k7a@gmail.com

There is a growing tendency in electrical power engineering related to the application of distributed generators (DG) located in close proximity to power consumers. The task of implementation of modern distributed generators becomes acute when upgrading power-supply systems (PSS) distant from the network infrastructure.

AC current frequency is one of the most important indicators of power quality. In case of synchronous generator application in distributed generators for isolated PSS nominal deviations can be significant. Therefore there is a need for algorithms that can make it possible to improve standard rotor speed controllers at a minimum expense. Prognostic algorithms based on standard control laws make it possible to adjust an automatic control system by one parameter only, namely a weather forecast. This may be a promising trend for real technological process control systems especially when prompt commissioning of objects is required, for example DGs operating on the basis of synchronous generators with automated speed and field regulators (ASFR).

The article deals with an automatic prognostic controller of distributed generator rotor speed and its effect on the frequency control quality in an autonomous power-supply system under changing operating conditions.

Computer simulation results indicate that application of automatic prognostic ASFR when there are disturbances in PSS makes it possible to improve significantly the frequency control quality in an autonomous power-supply system as well as to improve its damping properties. The suggested automatic prognostic ASFR of synchronous generators can be recommended to be used when prompt commissioning of distributed generators is required.

Keywords: Distributed generator, frequency, prognostic controller, automatic speed controller, synchronous generator, automatic prognostic controller, simulation

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-15-25

REFERENCES

1. Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Analiz simmetriyushchego effekta raspredelennoi generatsii [The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Irkutsk, 2012, vol. 2, pp. 75–81.

2. Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Vliyanie ustanovok raspredelennoi generatsii na kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of electrical power supply of the railroads]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2012, no. 4 (36), pp. 162–167.

* Received 15 September 2016.

3. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and economic impacts of Distributed Generation on distribution system. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 385–389.
4. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V. Sistemy elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta s ustanovkami raspredelennoi generatsii [Systems of power supply of railway transport with installations of the distributed generation]. Irkutsk, IrSTU Publ., 2013. 152 p.
5. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. *Raspredelennaya generatsiya v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [The distributed generation in systems of power supply of the railroads]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2013. 164 p.
6. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Nechetkie regulatory dlya vetrogeneriruyushchikh ustanovok [Indistinct regulators for the wind generator of installations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2014, no. 7–8, pp. 60–69.
7. Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M. *Control and optimization of distributed generation systems*. Cham, Springer, 2015. 578 p.
8. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Intellektual'nye regulatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Intelligent regulators for installations of the distributed generation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2015, no. 2 (46), pp. 83–95.
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. *Setevye klasteri v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Network clusters in systems of electrical power supply of the railroads]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2015. 205 p.
10. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. *Primenenie setevykh klasterov (microgrid) v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Network clusters (microgrid) in systems of power supply of the railroads]. Bratsk, BrGU Publ., 2016. 178 p.
11. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Primenenie lineinykh prognosticheskikh algoritmov regulirovaniya [Application of linear predictive algorithms of regulation]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2009, no. 10, pp. 40–44.
12. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Prognosticheskie tipovye algoritmy regulirovaniya [Predictive standard algorithms of regulation]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2011, no. 4, pp. 61–66. (In Russian)
13. Pikina G.A. Printsip upravleniya po prognozu i vozmozhnost' nastroiки sistem regulirovaniya odnim parametrom [Principle management according to the forecast and possibility of control of systems of regulation by one parameter]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2014, no. 3, pp. 5–13.
14. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Prognosticheskie regulatory dlya ustanovok raspredelennoi generatsii [Prognostic regulators for installations of the distributed generation]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 1 (29), pp. 63–69. doi: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69
15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.Kh. Opredelenie parametrov prognosticheskikh regulatorov dlya ustanovok raspredelennoi generatsii sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Determination of parameters of prognostic regulators for installations of the distributed generation of systems of electrical power supply of the railroads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 2 (30), pp. 84–91. doi: 10.18324/2077-5415-2016-2-84-91
16. Bushuev V.V., Lizalek N.N., Novikov N.L. *Dinamicheskie svoystva energosistem* [Dynamic properties of power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 320 p.
17. Ignat'ev I.V., Bulatov Yu.N. *Modeli i metody nastroiки sistem regulirovaniya vozbuzhdeniya generatorov na osnove eksperimental'nykh dannykh* [Models and methods of setup of systems of regulation of excitation of generators on the basis of the experimental data]. Bratsk, BrGU Publ., 2016. 278 p.