

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-84-91

Определение параметров прогностических регуляторов для установок распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог

Ю.Н. Булатов^{1 a}, А.В. Крюков^{2,3 b}, Нгуен Ван Хуан^{3 c}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^chuanco.k7a@gmail.com

Статья поступила 16.03.2016, принята 24.04.2016

На основе использования алгоритмов прогнозирования становится возможной настройка системы автоматического управления с помощью одного параметра — времени прогноза. 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 (РГ), работающих на основе синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ). Применение в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) установок РГ позволит снизить финансовые затраты на энергообеспечение объектов инфраструктуры, повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей и улучшить качество электроэнергии. В статье описана методика определения параметров прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ и приведены результаты исследований, направленных на определение влияния этих параметров на качество процессов управления напряжением и частотой вращения ротора генератора установки РГ, работающей в СЭЖД. Результаты компьютерного моделирования показывают, что применение прогностических АРВ и АРЧВ позволяет снизить время переходного процесса и перерегулирование напряжения и частоты вращения ротора генератора.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; установки распределенной генерации; прогностические регуляторы возбуждения и частоты вращения ротора генератора.

Parameter determination for forecasting controllers on distributed generation plants of railway power supply systems

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2,3 b}, Nguyen Van Huan^{3 c}¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^chuanco.k7a@gmail.com

Received 16.03.2016, accepted 24.04.2016

On the basis of the use of forecasting algorithms, it becomes possible to set automatic control system with a single parameter which is the forecast time. Therefore, the predictive 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 (DG) plants, working on the basis of synchronous generators with automatic excitation and speed controls (AEC and ASC). The use in railway power supply systems (RPSS) DG plants allows to reduce financial costs on energy supply for railway infrastructure facilities, to increase the reliability of power supply to responsible consumers and to improve the quality of power. This article describes a method for determining the parameters of the forecasting links of AEC and ASC and the research results directed at definition of influence of these parameters on quality of processes controls of voltage and rotor speed of the generator of DG plant working in RPSS. The results of computer modeling show that use of forecast AEC and ASC allows to reduce the transient time and the overshoot voltage and rotor speed of the generator.

Key words: railway power supply systems; distributed generation plants; forecasting excitation and rotor speed controls.

Введение

Определение оптимальных настроек систем автома-

тического управления (САУ) с типовыми линейными законами (ПИ, ПИД и т. п.), отвечающих области воз-

можных режимов работы динамического объекта, связано с трудоемкими расчетами большого числа взаимосвязанных параметров. Для реализации возможности настройки САУ с помощью одного параметра в работах [1–3] предлагается перейти от регулирования по текущему значению ошибки $\varepsilon(t)$ к управлению, предполагающему вычисление значения прогноза $\varepsilon(t + \tau_{for})$; при этом реализуется упреждающее воздействие, и удается частично скомпенсировать инерционность объекта. Регулятор, управляющий объектом по величине $\varepsilon(t + \tau_{for})$, назван в [1; 2] прогностическим.

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 (РГ), работающих на основе синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ).

Применение в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) установок РГ позволит снизить финансовые затраты на энергообеспечение объектов ин-

фраструктуры железных дорог, повысить надежность электроснабжения и, как показывают исследования [4–9], улучшить качество электроэнергии в районах электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей. Однако особенности режимов работы СЭЖД, связанные с резко переменным характером однофазных тяговых нагрузок, наличием несимметрии и гармонических искажений, усложняют условия работы синхронных генераторов и требуют проведения дополнительных исследований по влиянию прогностических алгоритмов на эффективность работы АРВ и АРЧВ.

Ниже описана методика определения параметров прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ и представлены результаты исследований, направленных на определение влияния этих параметров на качество процессов управления напряжением и частотой вращения ротора генератора установки РГ, работающей в СЭЖД. Исследования проводились применительно к структурной схеме, представленной на рис. 1. Моделировался отдельный РЭС нетяговых потребителей, включающий установку РГ, питающую группу нагрузок с суммарной мощностью 2,42 МВ·А, объединенную в сетевой кластер [9]. Мощность установки РГ равнялась 2,5 МВ·А.

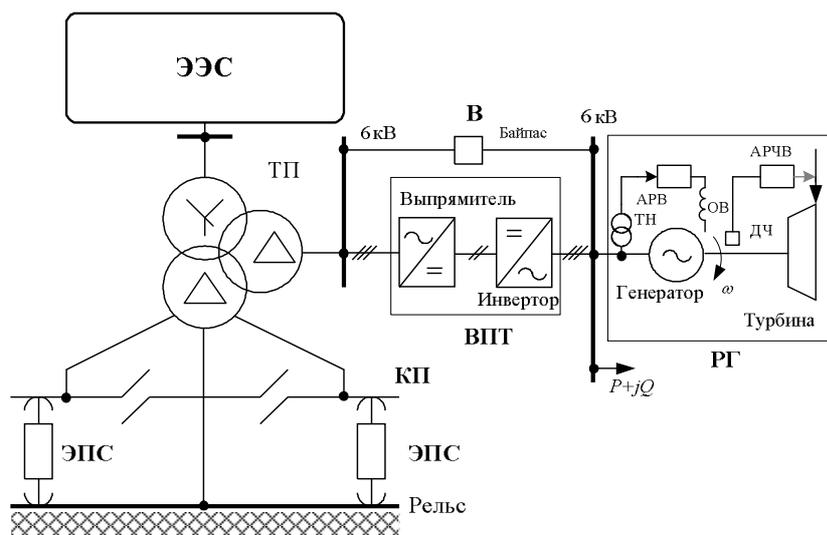


Рис. 1. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги: ЭЭС — электроэнергетическая система; ТП — тяговая подстанция; ЭПС — электроподвижной состав; КП — контактный провод; АРВ — автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения; ДЧ — датчик частоты вращения; ОВ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

Принцип автоматического управления по прогнозу. Прогностический регулятор (рис. 2) включает в себя два сегмента [3]: элемент прогнозирования с пере-

даточной функцией $W_{for}(s)$ и регулятор с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования и передаточной функцией $W_{pid}(s)$.

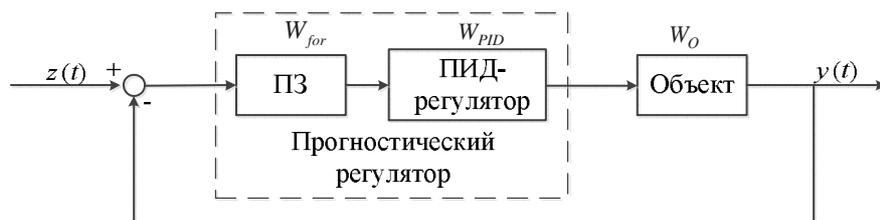


Рис. 2. Схема замкнутой САУ с прогностическим регулятором

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 [3]:

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

где s — оператор Лапласа.

Исследования, результаты которых приведены в работах [1; 2], показали, что на основе прогнозирования можно существенно повысить точность работы САУ при сохранении прежних настроек типового регулято-

ра. Кроме того могут иметь место увеличение запаса устойчивости и уменьшение диапазона перемещения регулирующего органа.

Описание модели исследования. На рис. 3 представлена схема модели исследуемой системы, созданной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB. Генератор установки РГ моделировался блоком Synchronous Machine pu Fundamental с номинальным напряжением 6,3 кВ и мощностью 2,5 МВ·А.

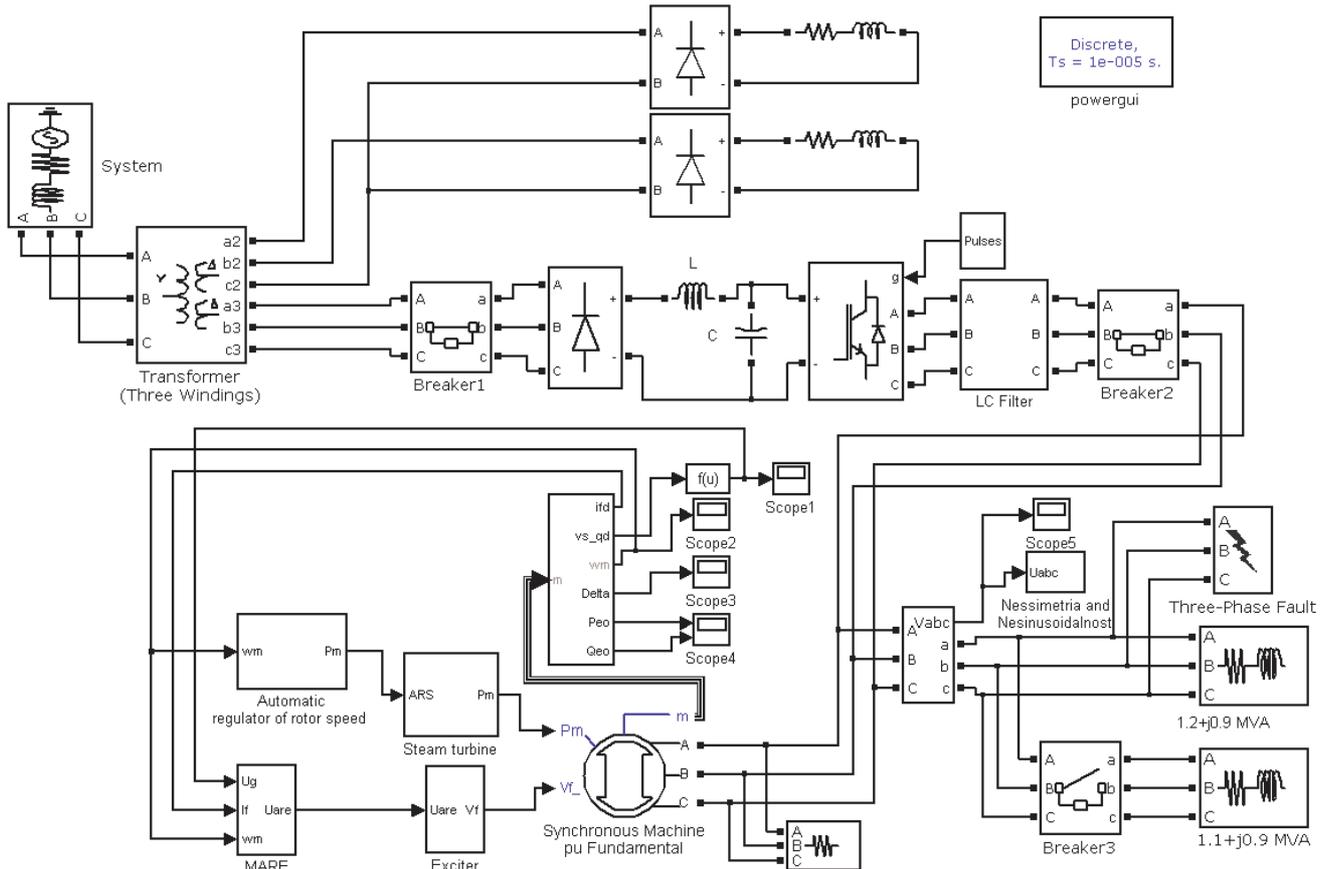


Рис. 3. Схема модели исследуемой системы в MATLAB

Блок Steam turbine моделировал паровую турбину с передаточной функцией:

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

где P_m — мощность турбины; μ — 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) моделировался аperiодическим 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.

Вставка постоянного тока (ВПТ), обеспечивающая связь установки РГ с системой тягового электроснабжения, моделировалась с помощью стандартных блоков библиотеки силовой электроники пакета SymPowerSystems. Как показали исследования, ВПТ обеспечивает ограничение мощности короткого замыкания (КЗ) на шинах установки РГ, позволяет повысить качество электроэнергии и придает электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [10].

Измерение параметров турбогенератора и напряжения на шинах нетягового потребителя осуществлялось с помощью осциллографов (Scope1–Scope5). Для измерения несинусоидальности и несимметрии использовались стандартные блоки пакета SymPowerSystems: Total Harmonic Distortion и 3-phase Sequence Analyzer. В модели предусматривалась возможность внесения возмущения в виде отключения или подключения актив-

но-индуктивной нагрузки мощностью $1,1 + j0,9$ МВ·А с помощью выключателя Breaker3. Кроме этого, с помощью блока Three-Phase Fault выполнялась имитация КЗ на шинах нетягового потребителя.

За основу прогностических АРВ и АРЧВ (блоки MARE и Automatic regulator of rotor speed соответ-

ственно) были взяты их модели, представляющие собой микропроцессорные ПИД-регуляторы [11]. Структурные схемы моделей прогностических АРВ и АРЧВ, разработанных в пакете Simulink системы MATLAB, представлены на рис. 4 и 5.

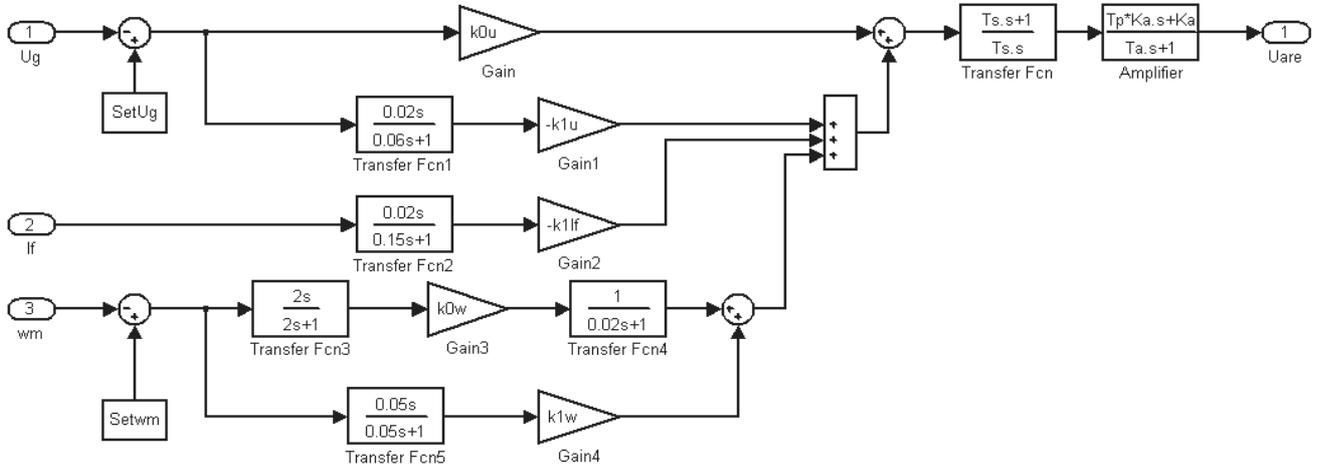


Рис. 4. Структурная схема модели прогностического АРВ в MATLAB: U_g — текущее значение напряжения турбогенератора; $SetU_g$ — заданное значение напряжения турбогенератора; I_f — ток возбуждения турбогенератора; ω_m — текущее значение частоты вращения ротора турбогенератора; $Set\omega_m$ — заданное значение частоты вращения ротора турбогенератора; $k_{0u}, k_{1u}, k_{1f}, k_{0\omega}, k_{1\omega}$ — коэффициенты настройки АРВ; T_p — постоянная времени прогнозирующего звена

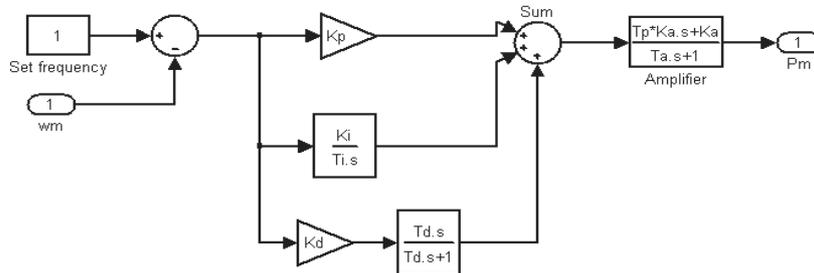


Рис. 5. Структурная схема модели прогностического АРЧВ в MATLAB: k_p, k_i, k_d — коэффициенты настройки АРЧВ

В блоках Amplifier (рис. 4, 5) учитывалось 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 блоков: $T_s = 0,5$ с; $K_a = 1$; $T_a = 0,001$ с; $T_i = 0,1$ с; $T_d = 1$ с.

Методика определения постоянных времени прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ. В работе [3] 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 электроэнергетических системах (ЭЭС) динамические свойства определяются электромагнитной и электромеханической составляющими, обуславливающими различные частоты собственных колебаний.

Частота собственных колебаний электромагнитной составляющей может быть определена с помощью спектрального анализа напряжения генератора; при этом для настройки постоянной времени прогнозирующего звена АРВ целесообразно выбирать частоту, на которой наблюдается максимальное значение амплитуды колебания. Затем определяется период колебаний для выбранной частоты. Частоту собственных колебаний электромеханической составляющей системы можно определить по частоте собственных колебаний ротора турбогенератора [12]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\partial P_G}{\partial \delta_G} \cdot \frac{\omega_0}{2\pi} T_{je}}, \quad (1)$$

где ω_p — частота собственных колебаний ротора генератора при неизменности по модулю и углу вектора напряжения на его шинах — парциальная частота, являющаяся параметром генератора, комплексно харак-

теризующим его инерционность и жесткость связи с системой [12]; $\frac{\partial P_r}{\partial \delta_r}$ — синхронизирующая мощность

генератора, определяемая как $P_c = \frac{E_q \cdot U_G}{X_d} \cdot \cos \delta$, о. е.;

$\omega_0 = 314$ рад/с — номинальная частота вращения ротора генератора; T_{je} — эквивалентная постоянная механической инерции системы, 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.

Необходимо также отметить, что изменение угла δ будет приводить к вариации частоты собственных колебаний.

Результаты проведенных исследований. Для анализа влияния прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ на параметры электромагнитных и электромеханических переходных процессов рассматривались следующие режимы:

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

Оптимальная настройка АРВ и АРЧВ турбогенератора была определена для автономного режима работы

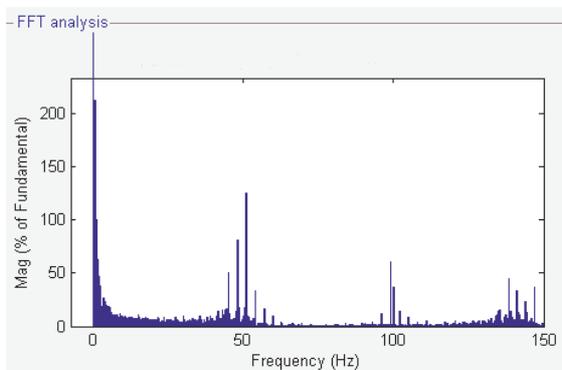
с помощью программного комплекса «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций», описание которого дано в [11]. Коэффициенты настройки регуляторов и соответствующий запас устойчивости системы представлены в табл. 1. Данные настройки АРВ и АРЧВ не являются оптимальными для того же генератора, но работающего в составе СЭЖД.

Таблица 1

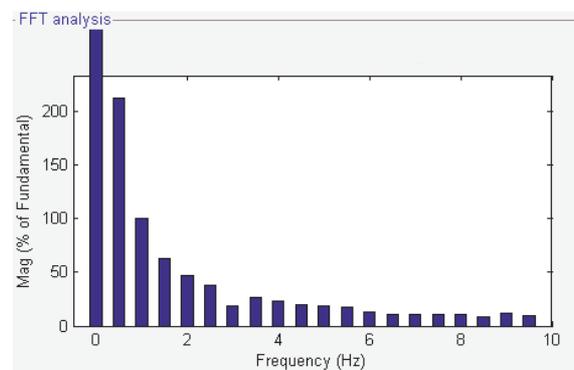
Настройка АРВ и АРЧВ исследуемого генератора

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

Для определения постоянных времени прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ в программе Powergui FFT Analysis Tool системы MATLAB с помощью быстрого преобразования Фурье был произведен спектральный анализ действующего значения напряжения генератора во время переходного процесса, вызванного подключением дополнительной нагрузки у нетягового потребителя (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Спектральный анализ сигнала напряжения генератора: а — основной диапазон частот; б — низкие частоты

Из рис. 6 видно, что преобладают колебания низких частот, поэтому для настройки прогнозирующего звена АРВ выбрана частота 0,5 Гц, что соответствует периоду 2 с, когда постоянная времени равна $T_p^{APB} = 0,2$ с. Частота собственных колебаний ротора турбогенератора была определена по выражению (1) для следующих параметров: угол $\delta = 56,5$ эл. град., $X_d = 2,43$ о. е., $E_q = 1,13$ о. е., $U_g = 1$ о. е., $T_{je} = 5,697$ с. Частота собственных колебаний ротора генератора составила 0,599 Гц, что соответствует периоду 1,67 с. Согласно приведенным выше

рекомендациям была выбрана постоянная времени прогнозирующего звена для АРЧВ $T_p^{APCB} = 0,167$ с.

Проведенные на модели СЭЖД (рис. 3) исследования показывают, что описанный выбор постоянных времени прогнозирующих звеньев для АРВ и АРЧВ дает приемлемый результат по параметрам переходного процесса, вызванным трехфазным КЗ на шинах нетягового потребителя и отключением его через 0,5 с; при этом основное воздействие оказывается на частоту вращения ротора генератора (рис. 7) путем снижения перерегулирования в 2 раза, а зависимость напряжения от времени практически не меняется (рис. 8).

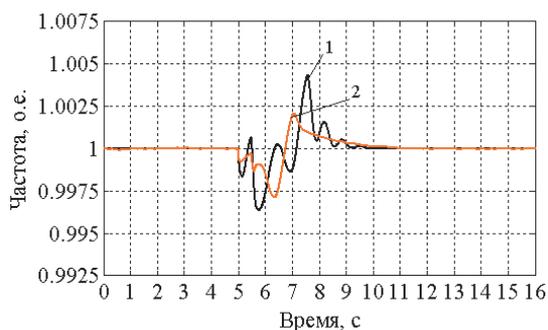
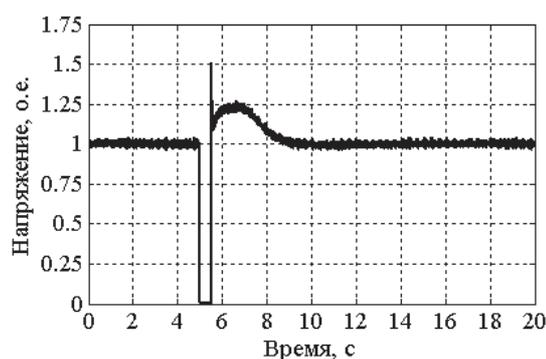
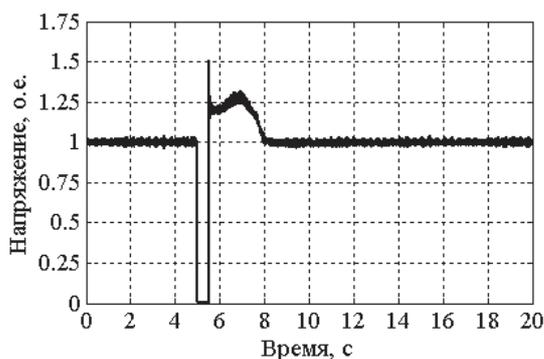


Рис. 7. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора турбогенератора при возникновении и отключении через 0,5 с трехфазного КЗ: 1 — без ПЗ (время переходного процесса $t_p = 5$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta\omega_{\max} = 0,0042$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0,42$ %); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ($t_p = 5$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta\omega_{\max} = 0,0029$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0,21$ %)



а)

б)

Рис. 8. Осциллограммы изменения напряжения турбогенератора при возникновении и отключении через 0,5 с трехфазного КЗ: а — без ПЗ (время переходного процесса после отключения КЗ $t_p = 2,5$ с; перерегулирование $\sigma = 50$ %); б — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ($t_p = 3$ с; перерегулирование $\sigma = 50$ %)

Одновременное увеличение постоянных времени прогнозирования для АРВ и АРЧВ приводит к снижению перерегулирования. Однако при этом увеличивается время переходного процесса и возрастают несимметрия и несинусоидальность напряжения в сетях нетяговых потребителей, что особенно проявляется при росте постоянной времени прогнозирующего звена АРВ.

Проведенные эксперименты также показывают, что увеличение постоянной времени прогнозирующего звена для АРЧВ в 100 раз относительно периода собственных колебаний позволяет значительно снизить перерегулирование, время переходного процесса, амплитуду колебаний ротора генератора и, как следствие, уменьшить его вибрацию при пониженном качестве электроэнергии. Осциллограммы частоты вращения ротора генератора, подтверждающие сделанные выводы, представлены на рис. 9.

Дальнейшее повышение времени прогнозирующего звена для АРЧВ приводит к появлению колебаний частоты вращения ротора генератора на высоких частотах. Соответствующие спектральные характеристики частоты представлены на рис. 10. При подключении дополнительной нагрузки также наблюдается положительный эффект, выражающийся в снижении максимального отклонения регулируемой величины и перерегулирования. Соответствующие осциллограммы частоты вращения ротора генератора представлены на рис. 11.

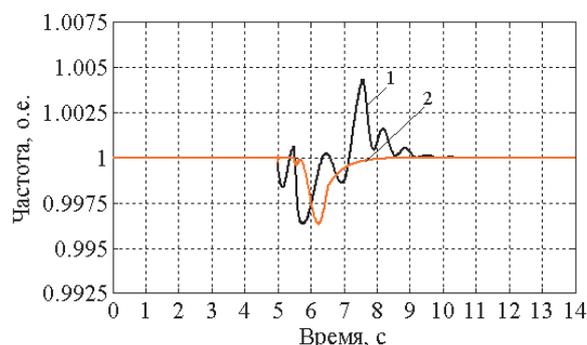


Рис. 9. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора турбогенератора при возникновении и отключении через 0,5 с трехфазного КЗ: 1 — без ПЗ ($t_p = 5$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta\omega_{\max} = 0,0042$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0,42$ %); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ($T_p^{APB} = 0,2$ с; $T_p^{APCB} = 166,97$ с) ($t_p = 3$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta\omega_{\max} = 0,0035$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0$ %)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что лучший результат удастся получить, когда постоянная времени прогнозирующего звена АРВ определяется как 0,1 периода электромагнитных колебаний с наибольшей амплитудой, а у АРЧВ прогнозирующее звено имеет постоянную времени, превышающую в 100 раз период собственных колебаний частоты вращения ротора генератора.

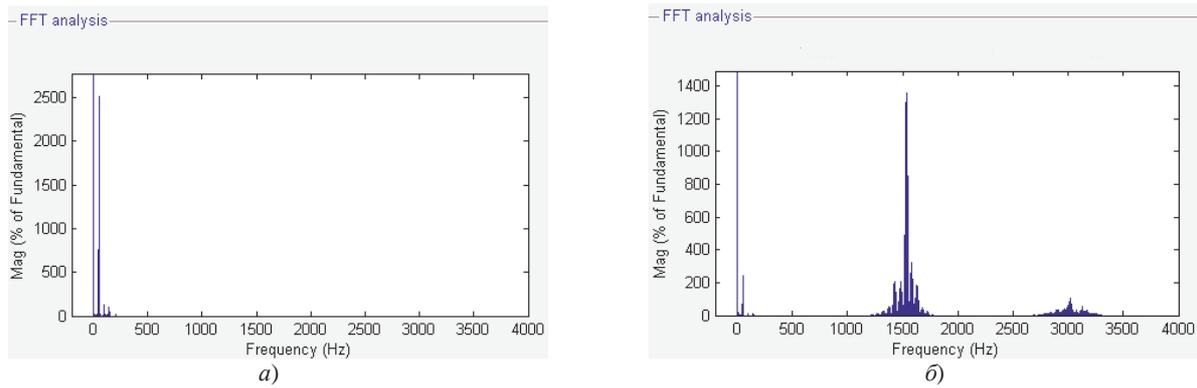


Рис. 10. Спектральный анализ сигнала частоты вращения ротора генератора: *a* — при постоянной времени прогнозирующего звена АРЧВ $T_p^{APЧВ} = 166,97$ с; *б* — при $T_p^{APЧВ} = 1669,695$ с

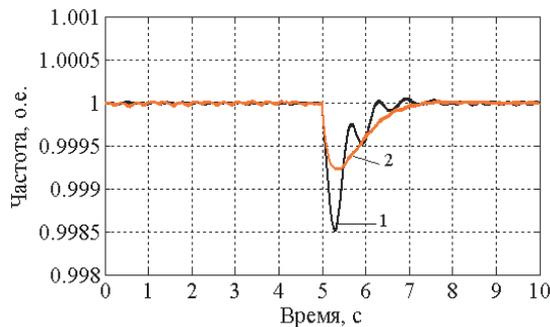


Рис. 11. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора турбогенератора при подключении дополнительной нагрузки у нетягового потребителя: 1 — без ПЗ ($t_p = 2,5$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta \square_{\max} = 0,0015$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0,01$ %); 2 — с использованием прогностических АРВ и АРЧВ ($T_p^{APВ} = 0,2$ с; $T_p^{APЧВ} = 0,167$ с) ($t_p = 2,5$ с; максимальное отклонение регулируемой величины $\Delta \square_{\max} = 0,00025$ о. е.; перерегулирование $\sigma = 0$ %)

Заключение

Результаты компьютерного моделирования по определению влияния прогностических регуляторов напряжения и частоты вращения ротора генератора установки распределенной генерации, работающей в системе электроснабжения железной дороги, позволяют сделать следующие выводы:

1. Постоянные времени прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ следует выбирать по частоте собственных колебаний системы.
2. Постоянные времени прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ, определенные по 0,1 периода собственных колебаний, дают приемлемый результат по параметрам переходного процесса: перерегулирование частоты в рассматриваемом примере снижается в 2 раза.
3. Показатели качества процессов управления удается значительно улучшить, когда постоянная времени прогнозирующего звена АРВ определяется как 0,1 периода электромагнитных колебаний с наибольшей амплитудой, а у АРЧВ прогнозирующее звено имеет постоянную времени, превышающую в 100 раз период собственных колебаний частоты вращения ротора генератора.

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 // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 5-13.
4. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2012. Т. 2. С. 75-81.
5. 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.
6. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Системы электроснабжения железнодорожного транспорта с установками распределенной генерации. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 152 с.
7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 60-69.
8. 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.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
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. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 22 с.
12. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

References

1. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Application of linear predictive algorithms of regulation // New in Russian Electrical Power-Engineering. 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 of management according to the forecast and a possibility of control of systems of regulation by one parameter // New in Russian Electrical Power-Engineering. 2014. № 3. P. 5-13.
4. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Irkutsk, 2012. Т. 2. P. 75-81.
5. 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.
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. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Indistinct regulators for the wind generator of installations // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2014. № 7-8. P. 60-69.
8. 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.
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.
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. 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.
12. Bushuev V.V., Lizalek N.N., Novikov N.L. Dynamic properties of power supply systems. M.: Energoatomizdat, 1995. 320 p.

УДК 539.3:519.612

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-91-99

Использование критериев обусловленности при численных расчетах напряженного состояния силовых конструкций

А.Н. Рогалев^{1 a}, С.В. Доронин^{2 b}¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50/44, Красноярск, Россия²Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Института вычислительных технологий СО РАН, пр. Мира 53, Красноярск, Россия^arogalyov@icm.krasn.ru, ^bs.doronin@gmail.com

Статья поступила 25.03.2016, принята 22.04.2016

Одним из основных вопросов при конечно-элементном моделировании высокоответственных технических систем является анализ точности полученных результатов. Решение этого вопроса позволяет обосновать надежность характеристик технических объектов. На точность результатов влияют ошибки округления и погрешность приближенных методов линейной алгебры, применяемых в конечно-элементном анализе, а также ошибки, имеющие непосредственное отношение к методу конечных элементов при выборе (построении) сетки конечных элементов, что прямо отражается в свойствах обусловленности матрицы жесткости и величине ошибки решения системы линейных уравнений с матрицей жесткости. Для численных решений, полученных методом конечных элементов, характеристика точности вычислительной ошибки может определяться как величина ошибки решения системы линейных уравнений с матрицей жесткости. Для анализа точности реализован апостериорный анализ ошибок численных вычислений путем двукратного решения системы линейных уравнений с матрицей жесткости, имеющей специально подобранную правую часть. Для полноты анализа результатов конечно-элементного моделирования изучаются числа обусловленности матрицы коэффициентов системы, что позволяет в первом приближении выявлять степень вырожденности матрицы коэффициентов и определять степень чувствительности численных решений к ошибкам. Применение этих процедур позволяет контролировать точность численного решения и анализировать сходимость. Развиваемый подход весьма актуален для конструкций ответственных технических объектов, так как ошибки при проектных расчетах здесь приводят к серьезным последствиям. Оценки вычислительной ошибки численного решения системы линейных алгебраических уравнений с матрицей жесткости применяются в статье для контроля точности в задачах расчета коэффициента концентрации напряжений в круговой пластине с эксцентричным круговым разрезом. Результаты вычислений подтверждают теоретические рассуждения.

Ключевые слова: вычислительная ошибка; матрица жесткости; моделирование; система линейных алгебраических уравнений; контроль точности.