

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 004.8: 621.311

МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ УСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Ю.Н. БУЛАТОВ *, А.В. КРЮКОВ **,*** НГУЕН ВАН ХУАН ***

* Братский государственный университет

** Иркутский государственный университет путей сообщения

*** Иркутский национальный исследовательский технический университет

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

В статье представлена методика определения параметров прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ и результаты исследований на компьютерной модели системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД), включающей: турбогенератор мини ТЭЦ, гидрогенератор малой ГЭС, ветрогенерирующую установку (ВГУ) на основе машины постоянного тока и солнечную электростанцию.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что применение прогнозирующих звеньев позволяет обеспечить устойчивость работы генераторов установок РГ при больших возмущениях в системе без использования трудоёмкой процедуры идентификации динамических характеристик и расчёта оптимальных настроек АРВ и АРЧВ. Предлагаемая методика определения параметров прогностических регуляторов может быть рекомендована при необходимости оперативного ввода в эксплуатацию установок РГ в системы электроснабжения железных дорог.

Ключевые слова: система электроснабжения железных дорог, установка распределённой генерации, прогностические регуляторы возбуждения и частоты вращения ротора генератора, моделирование.

Введение

В последнее время получает развитие направление, связанное с использованием установок распределённой генерации (РГ), находящихся в непосредственной близости от потребителей электроэнергии. Применение таких установок позволяет разгрузить основную сеть электроэнергетических систем (ЭЭС), повысить надёжность электроснабжения, а также увеличить пропускную способность межсистемных связей [1]. Использование в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) установок РГ даёт возможность снизить финансовые затраты на энергообеспечение стационарных объектов транспорта, повысить надёжность энергообеспечения ответственных потребителей и, как показывают исследования [2–4], улучшить качество электроэнергии. Однако при внедрении установок РГ возникают задачи определения оптимальных настроек автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) их генераторов, для решения которых требуются наиболее полные модели ЭЭС и трудоёмкие расчёты большого числа взаимосвязанных параметров элементов систем автоматического управления (САУ). В условиях необходимости ускоренного ввода в эксплуатацию установок РГ, работающих на основе синхронных генераторов с АРВ и АРЧВ, необходим другой подход, связанный с возможностью настройки регуляторов, обеспечивающей их устойчивую работу, с помощью одного параметра. Для этого 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 удаётся частично скомпенсировать инерционность объекта. Регулятор, управляющий объектом по величине $\varepsilon(t + \tau_{for})$, назван в работах [5, 6] прогностическим.

Затем, после успешного ввода в эксплуатацию установки РГ, настройки АРВ и АРЧВ можно оптимизировать с использованием экспериментальных данных [7]. Такой подход может оказаться весьма перспективным для реальных систем управления процессами в СЭЖД с установками РГ, где дополнительное влияние оказывают особенности режимов работы, связанные с резко переменным характером однофазных тяговых нагрузок, наличием несимметрии и гармонических искажений. В этих условиях требуется проведение дополнительных исследований по влиянию прогностических алгоритмов на эффективность работы АРВ и АРЧВ.

Прогностический регулятор (рис. 1) включает в себя два сегмента [8]: элемент прогнозирования с передаточной функцией $W_{for}(s)$ и регулятор с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования и передаточной функцией $W_{PID}(s)$.

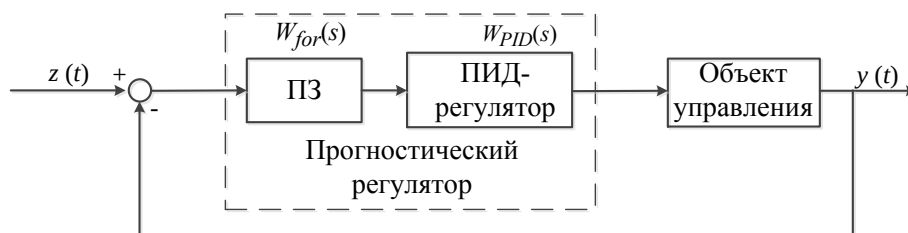


Рис. 1. Схема замкнутой САУ с прогностическим регулятором

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 [8]:

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

где s – комплексная переменная преобразования Лапласа.

Исследования, результаты которых приведены в работах [5, 6], показали, что на основе прогнозирования можно существенно повысить точность работы САУ при сохранении прежних настроек типового регулятора. Кроме того, может иметь место увеличение запаса устойчивости и уменьшение диапазона перемещения регулирующего органа.

В статье представлена методика определения параметров прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ и результаты исследований на компьютерной модели СЭЖД, включающей в свой состав следующие установки РГ: турбогенератор мини ТЭЦ, гидрогенератор малой ГЭС, ветрогенерирующую установку (ВГУ) на основе машины постоянного тока и солнечную электростанцию.

Методика настройки прогностических АРВ и АРЧВ установок РГ

В работе [8] отмечается, что наилучшее время прогнозирования составляет 0,1 периода собственных колебаний оптимально настроенной исходной замкнутой системы, что требует определения её динамических свойств. При этом в ЭЭС динамические свойства определяются электромагнитной и электромеханической составляющими, обуславливающими различные частоты собственных колебаний. Блок-схема алгоритма предлагаемой методики настройки прогностических АРВ и АРЧВ показана на рис. 2.

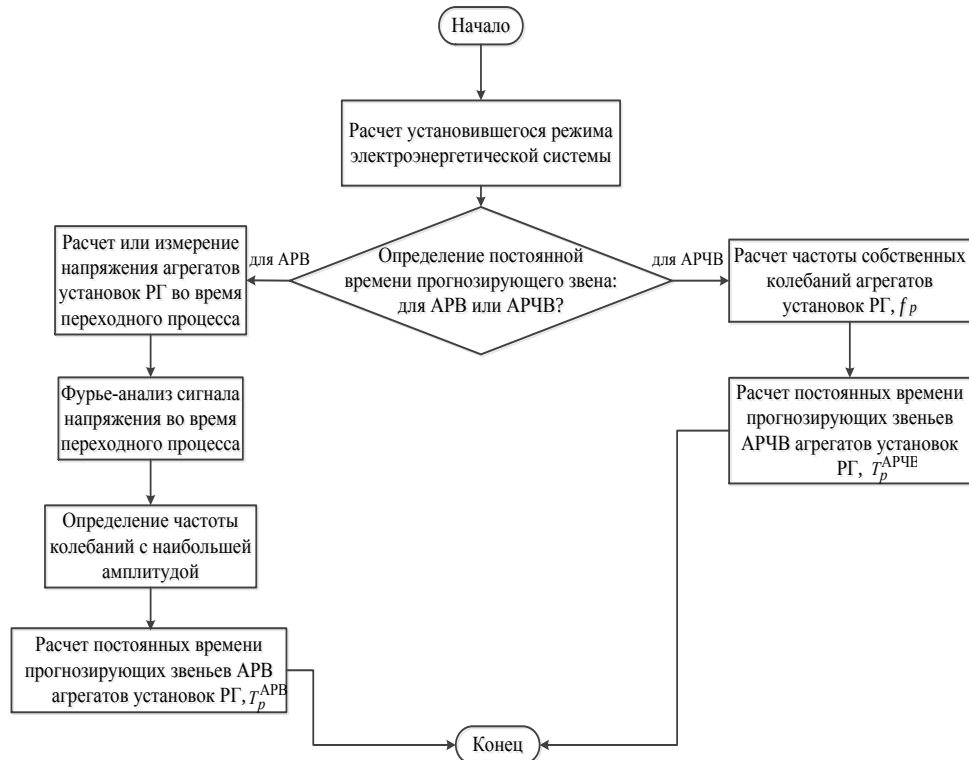


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета постоянных времени прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ

В результате расчёта установившегося режима работы ЭЭС с установками РГ определяются напряжения U_g и углы нагрузки δ для синхронных генераторов.

Расчёт частоты собственных колебаний агрегатов установок РГ можно выполнять по выражению [9]

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

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 системой [9]; $\frac{\partial P_G}{\partial \delta_G}$ – 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 агрегата, с; X_d – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.; δ – угол между напряжением и ЭДС E_q генератора, зависящий от нагрузочного режима, эл. град.

Далее выполняется расчёт постоянных времени прогнозирующих звеньев АРЧВ по выражению $T_p^{\text{АРЧВ}} = \frac{1}{f_p}$. При этом проведенные ранее исследования [10, 11]

показывают, что наибольшего эффекта удастся достичь при увеличении постоянной времени прогнозирующего звена АРЧВ в 100 раз, что предполагает использование усилителя, включенного последовательно с прогнозирующим звеном.

Для определения постоянных времени прогнозирующих звеньев АРВ необходимо рассчитать или измерить сигнал изменения напряжения агрегатов установок РГ во время переходного процесса и провести его Фурье-анализ. После определения частоты $f_{\max}$ колебаний напряжения с наибольшей амплитудой можно рассчитать постоянные времени прогнозирующих звеньев АРВ по выражению

$$T_p^{\text{АРВ}} = \frac{1}{f_{\max}}.$$

Исследования показывают [10, 11], что постоянную времени

прогнозирующего звена АРВ лучше определять как 0,1 периода собственных колебаний. Это объясняется высоким быстродействием современных тиристорных систем возбуждения синхронных генераторов, что требует снизить время прогноза.

Описание компьютерной модели

Исследования проводились в системе *MATLAB* применительно к структурной схеме, показанной на рис. 3. Моделировался отдельный район электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей с суммарной мощностью 2,6 МВ·А, присоединённый к тяговой подстанции через вставку постоянного тока [4] и включающий следующие установки РГ: турбогенератор мини-ТЭЦ с мощностью 3,125 МВ·А и напряжением 6 кВ; гидрогенератор микро-ГЭС с мощностью 0,25 МВ·А и напряжением 0,4 кВ; ВГУ на основе машины постоянного тока мощностью 200 кВт и солнечную электростанцию (СЭС) мощностью 107,5 кВт; при этом СЭС и ВГУ работают через общий инвертор на шины 0,4 кВ. Основная нагрузка в РЭС сосредоточена на шинах 6 кВ. Установки РГ,

работающие на возобновляемых источниках энергии, связаны через трансформатор с сетью 6 кВ.

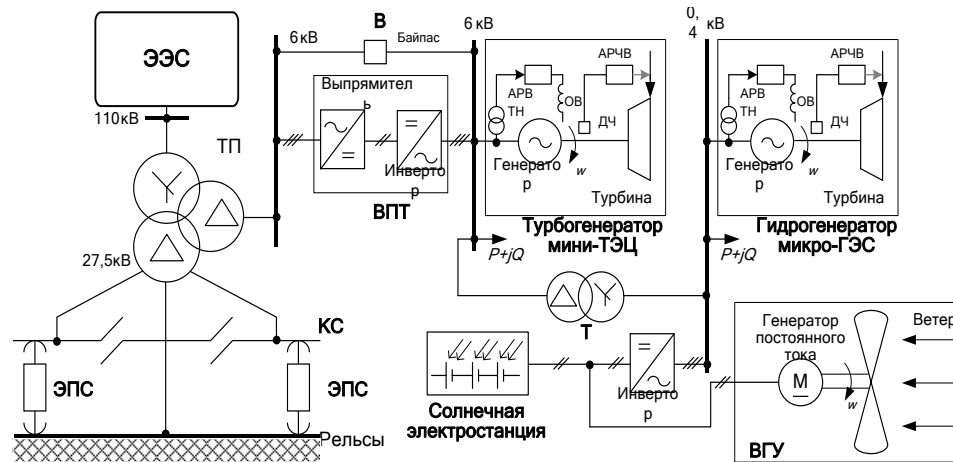


Рис. 3. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги с установками РГ:
 ЭЭС – электроэнергетическая система; ТП – тяговая подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; КС – контактная сеть; В – выключатель; ВПТ – вставка постоянного тока; АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; ДЧ – датчик частоты вращения; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения

Турбогенератор (моделировался стандартным блоком библиотеки *SymPowerSystems* системы *MATLAB – Synchronous Machine pu Fundamental*) приводился во вращение паровой турбиной, выполненной с учётом промежуточного отбора пара. Структурная схема паровой турбины показана на рис. 4. 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, $\delta = 46,9$ эл. град.

Тиристорный возбудитель 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.

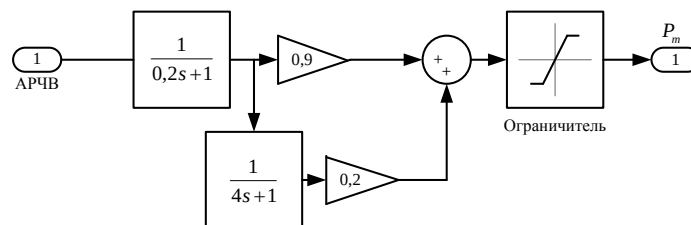


Рис. 4. Структурная схема модели паровой турбины с учётом промежуточного отбора пара в *MATLAB*

Гидрогенератор (моделировался стандартным блоком *Synchronous Machine pu Standart*) приводился во вращение гидротурбиной. Структурная схема гидротурбины представлена на рис. 5, а. Модель состоит из главного сервомотора, структурная схема которого показана на рис. 5, б. Как видно из рисунка, сервомотор с передаточной

функцией $\frac{1}{T_C s + 1}$ охвачен гибкой (изодромной) обратной связью, характерной для регуляторов гидротурбин (постоянная времени сервомотора принималась равной 0,25с) [12]. Изодромный регулятор моделировался следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{nu \cdot T_i s}{T_i s + 1}, \quad (2)$$

где nu – коэффициент усиления изодрома (при моделировании принимался равным 10 о.е.); T_i – постоянная времени гибкой обратной связи или постоянная времени изодрома (при моделировании принималась равной 0,1 с).

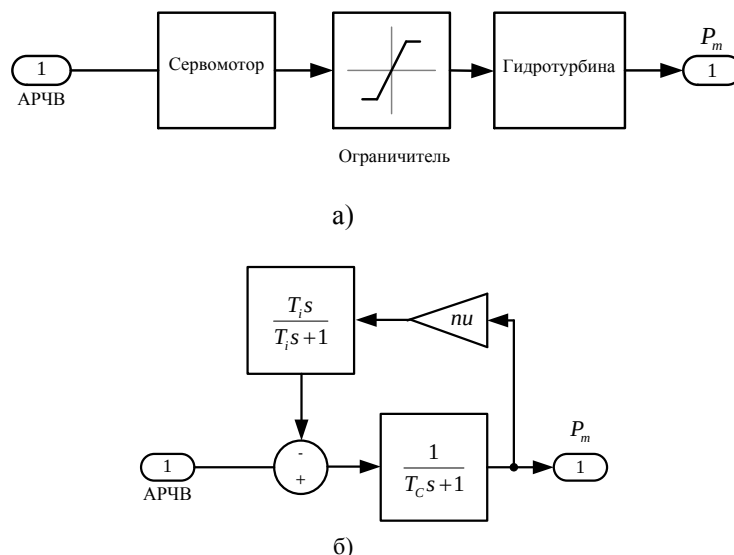


Рис. 5. Структурная схема модели гидротурбины (а) и главного сервомотора (б) в MATLAB

Гидравлическая турбина моделировалась передаточной функцией с учётом гидроудара, характерного для гидротурбин [12]:

$$W_T(s) = \frac{1 - a_{уст} T_B s}{1 + 0,5 a_{уст} T_B s}, \quad (3)$$

где T_B – постоянная времени гидротурбины (при моделировании принималась равной 0,344 с); $a_{уст}$ – положение открытия направляющего аппарата (принимает значения в диапазоне 0 ÷ 1).

При моделировании использовались следующие параметры гидрогенератора: $X_d = 2,84$ о.е., $E_q = 1,1$ о.е., $U_g = 1$ о.е., $T_{je} = 3,779$ с, $\delta = 37,5$ эл. град.

Ветрогенератор моделировался с использованием стандартных блоков библиотеки *SymPowerSystems* системы MATLAB: ветротурбины (*Winde turbine*) и машины постоянного тока (*DC Machine*) с независимым возбуждением. Схема модели ВГУ в MATLAB показана на рис. 6.

Модель солнечной электростанции реализована с использованием блока *PV Array*, построенного на основе 100 параллельных и 10 последовательных солнечных фотоэлектрических модулей, соединённых между собой. Схема модели солнечной

электростанции показана на рис. 7, а. Принципиальная электрическая схема отдельного модуля представлена на рис. 7, б.

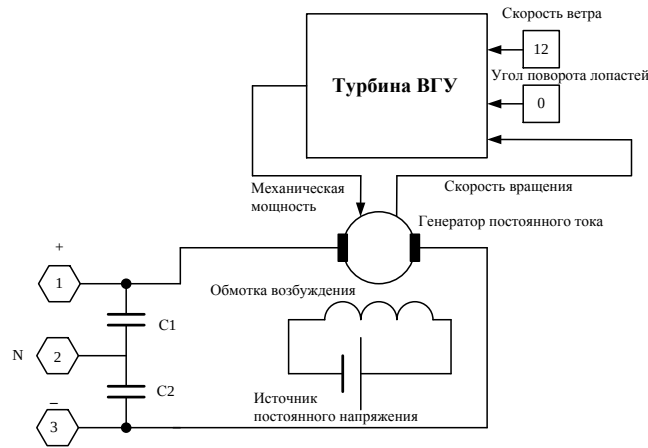


Рис. 6. Схема модели ВГУ

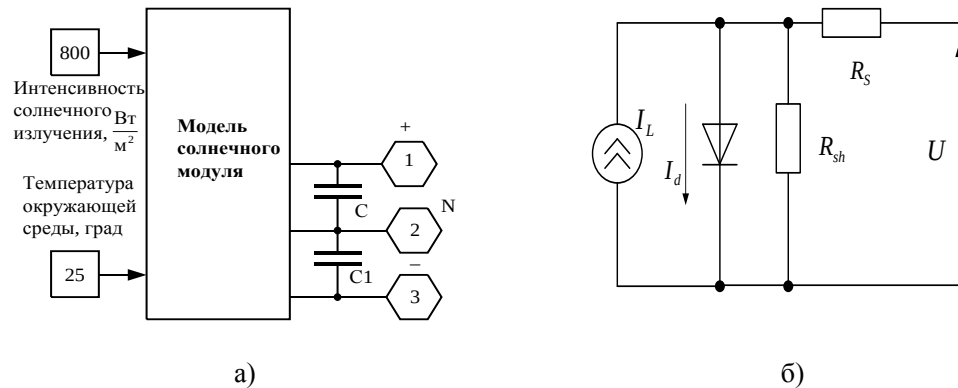


Рис. 7. Схема модели солнечной электростанции (а) и принципиальная электрическая схема фотоэлектрического модуля (б)

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 придаёт электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [4].

В качестве прогностических АРВ и АРЧВ использовались микропроцессорные ПИД-регуляторы [4, 7]. Структурные схемы моделей прогностических АРВ и АРЧВ, разработанных в пакете *Simulink*, показаны на рис. 8 и 9. В блоке «Усилитель» 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 АРВ и АРЧВ принимались следующие числовые значения параметров: $K_a = 1$; $T_a = 0,001$ с.

В модели предусматривалась возможность внесения возмущения в виде отключения или подключения активно-индуктивной нагрузки мощностью $2+j1,5$ МВ·А, имитации трёхфазного КЗ на шинах нетягового потребителя, а также в виде отключения питания от тяговой подстанции.

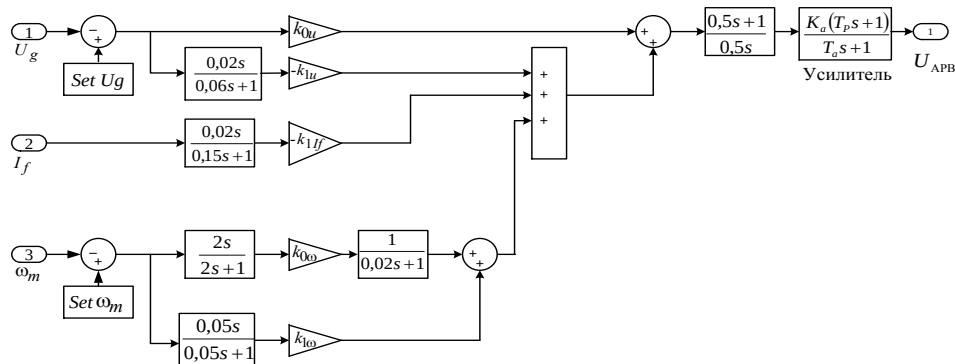


Рис. 8. Структурная схема модели прогностического АРВ в MATLAB:

$Set U_g$ – 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

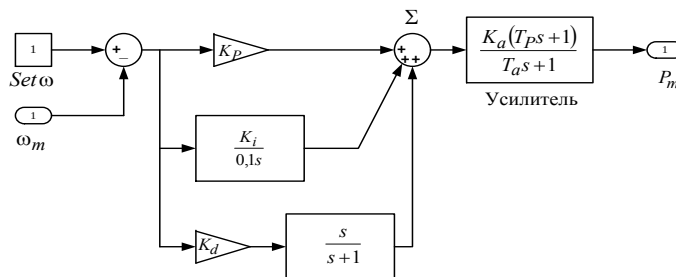


Рис. 9. Структурная схема модели прогностического АРЧВ в MATLAB:

k_p, k_i, k_d – коэффициенты настройки АРЧВ

Результаты моделирования

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

- подключение дополнительной нагрузки;
- возникновение КЗ на шинах нетягового потребителя и его отключение релейной защитой через 1 с;
- отключение основного питания от тяговой подстанции; при этом предполагалось, что турбо- и гидрогенераторы загружены не полностью и в доаварийном режиме часть энергии поступает от ЭЭС через ВПТ.

Проведённые ранее исследования [10, 11] показали, что при оптимальной настройке АРВ и АРЧВ прогнозирующие звенья улучшают демпферные свойства

регуляторов, позволяют снизить величину перерегулирования и время переходного процесса при различных возмущениях в системе. В описанных ниже экспериментах процедура оптимизации настроек АРВ и АРЧВ генераторов не выполнялась, а коэффициенты настройки регуляторов принимались равными единице.

В соответствии с предлагаемой методикой были определены следующие параметры прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ:

- для турбогенератора: $T_p^{АРВ} = 0,4$ с, $T_p^{АРЧВ} = 1727$ с;
- для гидрогенератора: $T_p^{АРВ} = 0,4$ с, $T_p^{АРЧВ} = 1242$ с.

Проведённое моделирование показывает, что при подключении дополнительной нагрузки напряжение и частота генераторов изменяются одинаково как при использовании прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ, так и без них. При больших возмущениях в системе применение прогностических АРВ и АРЧВ позволяет существенно улучшить демпферные свойства регуляторов и обеспечить необходимый запас устойчивости. Осциллограммы изменения напряжения и частоты вращения роторов генераторов, подтверждающие данные выводы, показаны на рис. 10...12.

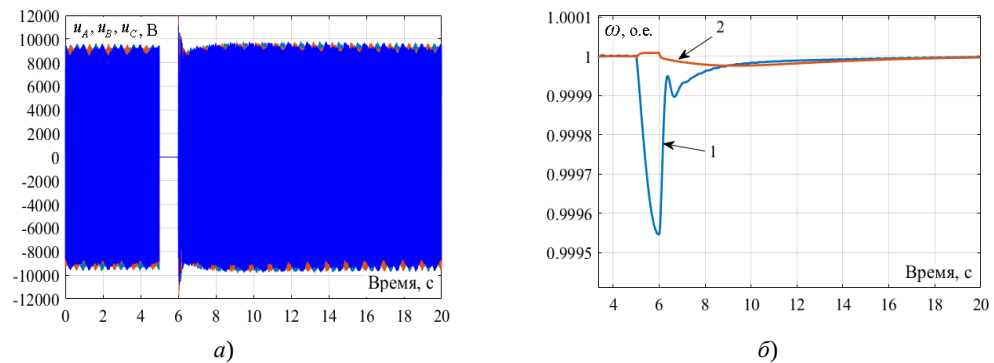


Рис. 10. Осциллограммы изменения напряжения на шинах нетягового потребителя (а) и частоты вращения ротора турбогенератора (б) при возникновении КЗ и его отключении релейной защитой через 1 с: 1 – без использования прогнозирующих звеньев в АРВ и АРЧВ; 2 – с использованием прогностических АРВ и АРЧВ

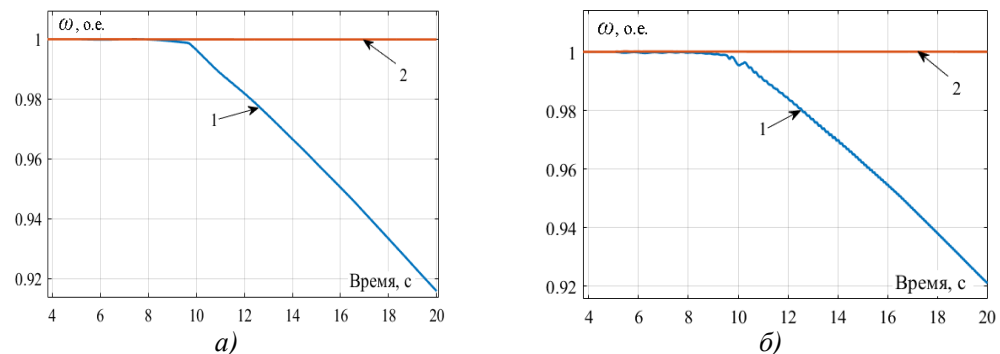


Рис. 11. Осциллограммы изменения частота вращения роторов турбогенератора (а) и гидрогенератора (б) при отключении основного питания от системы тягового электроснабжения: 1 – без использования прогнозирующих звеньев в АРВ и АРЧВ; 2 – с использованием прогностических АРВ и АРЧВ

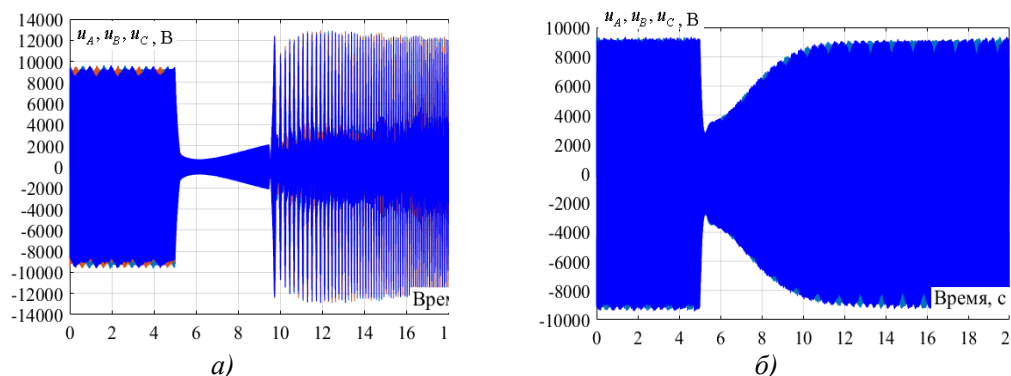


Рис. 12. Осциллограммы изменения напряжения на шинах нетягового потребителя при отключении основного питания от системы тягового электроснабжения:

- а) без использования прогнозирующих звеньев в АРВ и АРЧВ;
 б) с использованием прогностических АРВ и АРЧВ

Заключение

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предлагаемая методика настройки прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ позволяет определить параметры регуляторов генераторов установок распределённой генерации, обеспечивающих приемлемые демпферные свойства.
2. При малых возмущениях, например при подключении дополнительной нагрузки, напряжение и частота генераторов изменяются одинаково как при использовании прогнозирующих звеньев АРВ и АРЧВ, так и без них.
3. Прогнозирующие звенья позволяют обеспечить устойчивость работы генераторов установок распределённой генерации при больших возмущениях без использования трудоёмкой процедуры идентификации динамических характеристик и расчёта оптимальных настроек АРВ и АРЧВ.
4. Предлагаемая методика определения параметров прогностических регуляторов генераторов может быть рекомендована при необходимости оперативного ввода в эксплуатацию установок распределённой генерации в системы электроснабжения железных дорог.

Summary

On the basis of the use of algorithms for forecasting, it becomes possible to set automatic control system with a single parameter - the time of the forecast. 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 paper presents a methodology of determining the parameters predictive links AEC and ASC and the results of research on the computer model railway power supply systems (RPSS) including in its membership following the DG plants: turbogenerator mini thermoelectric plant, hydro small power plant, wind power plant on the basis of the machine DC and solar power.

The results of computer simulation show that the use of predictive units ensures the stability of the generator DG plants at large perturbations in the system without the time consuming procedure of identification of dynamic characteristics and calculation of

optimal AEC and ASC settings. The proposed method of determining the prognostic regulator parameters can be recommended, if necessary, the operational commissioning of DG plants in railway power supply system.

Keywords: *railway power supply systems, distributed generation plants, forecasting excitation and rotor speed controls, modeling.*

Литература

1. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:6, No:4, 2012, pp. 385-389.
2. 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.
3. 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.
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
5. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. 2011. №4. С.61–66.
6. Durgaryan I.S., Pashchenko F.F., Pikina G.A., Pashchenko A.F. Information method of consistent identification of objects. // Proceedings of the 2013. IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013, pp. 1325-1330.
7. 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.
8. Пикина Г.А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. №3. С.5–13.
9. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1(29). С. 63–69.
11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Определение параметров прогностических регуляторов для установок распределенной генерации систем электроснабжения железных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2(30). С. 84–91.
12. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. М.: «Энергия», 1975. 216 с.

Поступила в редакцию

23 ноября 2016 г.

Булатов Юрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета (БрГУ). Тел.: 8(950)138-15-82. E-mail: bulatovyura@yandex.ru.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНITU), заслуженный энергетик РБ, академик Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, член-корр. Академии наук высшей школы РФ. Тел.: 8(902)513-87-23. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Нгуен Ван Хуан – магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрННТУ). Тел.: 8(964) 118-72-68.
E-mail: huanco.k7a@gmail.com.