



Также была построена численно-математическая модель для теплообменника с достаточной поверхностью теплообмена и низким статическим сопротивлением. Результаты моделирования для заданных начальных условий – скорости потока газа 15 м/с, температуры газа 150 °С и начальной температуры охлаждающей воды 25 °С – продемонстрировали наибольшую эффективность процесса для медного (алюминиевого) теплообменника с овальными трубами (в кол. 27 шт.) с оребрением с общей площадью теплообмена $F_{var3} = 2,489 \text{ м}^2$, расчетным охлаждением газа $\Delta t = 31,1 \text{ °С}$ и падением статического давления по тракту $\Delta p = 29,3 \text{ Па}$.

На основании расчетной модели была создана пилотная лабораторная установка и разработана система сбора данных для измерения температуры в газоходе. Проведенные испытания показали результат, превосходящий результаты моделирования, что в дальнейшем позволит интенсифицировать существующие и перспективные системы газоудаления и газоочистки промышленных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J.M.Jolas, J.Bos, Cathode Drop Comparisons on Aluminium Peshiney Modern Cells, Light Metals 1994, P. 403–410.
2. S. S. Lee, K.-S. Lei, P. Xu, J. J. Brown, Determination of Melting Temperatures and Al_2O_3 Solubilities for Hall Cell Electrolyte Compositions. Light Metals, 1984. P. 841–855.
3. Sorlie M., Oye H.A. Cathodes in Aluminum Electrolysis. - 2nd ed. Dusseldorf: Aluminium. Verlag, 1994.
4. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния. М. : Metallurgia, 1987. 320 с.
5. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферова М.А. ANSYS в руках инженера. М. : УРСС, 2003. 270 с.
6. Застосування методу граничних елементів для розв'язання тривимірних задач теплопровідності / А.Я. Карвацький, П.Й. Дудніков, С.В. Лелека, А.І. Жученко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2005. № 5. С. 5–13.
7. Техничко-экономические и правовые аспекты производства алюминия / Кондратьев В.В., Ершов В.А., Сысоев И.А. и [др.]. СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2011. 224 с.
8. Криворученко В.В., Коробов М.А. Тепловые и энергетические балансы электролизеров. М. : ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1963. 320 с.
9. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов и др. ; под общ.ред. Громова Б.С. М. : ИД «Руда и металлы», 1998. 256 с.
10. Физические величины : справ. / под ред. К.С. Григорьева. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

УДК 621.311: 621.331

Булатов Юрий Николаевич,

к. т. н., доцент, Братский государственный университет, e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич,

д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Чан Зюй Хынг,

аспирант, Иркутский государственный технический университет, e-mail: tranduyhung67@yahoo.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ДЛЯ УСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, Tran Duy Hung

INTELLIGENT CONTROLLERS FOR DISTRIBUTED GENERATION PLANTS

Аннотация. В системах электроснабжения железных дорог в полном объеме применимы интеллектуальные технологии. Интеллектуальные системы электроснабжения включают в свой состав следующие сегменты: развитые комплексы, обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования; автоматические регуляторы, построенные на основе цифровых технологий; пофазно управляемые источники реактивной мощности; установочные распределенной генерации и накопители электроэнергии; устройства для улучшения качества электроэнергии. Для формирования необходимых характеристик переходного процесса установки распределенной генерации должны оснащаться системами автоматического управления, оптимальная настройка которых позволяет улучшить качество электроэнергии и повысить надежность электроснабжения потребителей. В статье предложена методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов применительно к установке распределенной генерации, работающей в системе электроснабжения железной дороги. Особенность предлагаемых методов заключается в применении следующих интеллектуальных технологий: генетического алгоритма для оптимизации настроек регуляторов; нечеткой логики для адаптивного управления согласованной настройкой устройств регулирования напряжения и частоты. На основе моделирования показано, что управление режимами работы установки распределенной генерации с помощью согласованно настроенных регуляторов частоты и возбуждения позволяет обеспечить устойчивость и живучесть системы электроснабжения железной дороги, нормативное качество электроэнергии и высокую надежность электроснабжения потребителей.

В работе также рассмотрены вопросы моделирования и настройки нечеткой системы управления горизонтально-осевым ветрогенератором. Управление режимом ветрогенератора позволяет сохранить устойчивость его работы не только при вариациях скорости ветра, но и в случае изменения нагрузки потребителей. Предложенная методика настройки регулятора, использующего алгоритмы нечеткого логического вывода, позволяет сформировать универсальную базу правил для эффективной



работы установки как в автономном режиме, так и в составе сетевых кластеров, предназначенных для повышения надёжности электроснабжения стационарных потребителей железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, распределённая генерация, интеллектуальные регуляторы.

Abstract. Intelligent technologies are fully applied in power supply systems of railways. Intelligent power supply systems include the following segments: developed complexes, providing monitoring of electrical equipment condition; automatic controllers, built on the basis of digital technologies; per phase controlled reactive power sources; distributed generation plants and electricity storages; devices for improving the quality of electricity. For formation of the necessary characteristics of the transition process, the distributed generation plants shall be equipped with automatic control systems, the optimal setting of which allows improving the quality and increasing the reliability of electric power supply to consumers. The article suggests a method of consistent configuration of automatic controllers of excitation and rotation speed of generators in relation to the distributed generation plant, operating in the power supply system of the railway. Feature of the proposed methods consists in application of the following intelligent technologies: genetic algorithm for optimizing the controller settings; fuzzy logic for adaptive control of consistent configuration of the control system of voltage and frequency.

It is shown that the control of operation modes of the distributed generation plant through consistently configured controllers of frequency and excitation ensures the stability and vitality of the power supply system of the railway, the standard power quality and high reliability of power supply to consumers on the basis of simulation.

This work also addressed issues of modeling and configuration of fuzzy control system of horizontal-axis wind turbine. Controlling the wind turbine allows to maintain the stability of its work not only at variation of wind speed, but also in case of changes of consumer loads. The proposed method of controller setting, which uses the algorithms of fuzzy inference, allows you to create a universal rule base for efficient operation of the unit in standalone mode or as part of a networked cluster, designed to increase the reliability of electricity for stationary consumers of railway transport.

Keywords: power supply system of railways, distributed generation, intelligent controllers.

Введение

Современный этап развития цивилизации характеризуется процессами интеллектуализации техники [1]. В работе [2] дано следующее определение: интеллектуализация техногенеза представляет собой расширенное внедрение в технические объекты и системы, а также технологии компонентов, обладающих интеллектуальными свойствами. Технические системы (ТС) становятся самоуправляемыми за счёт использования интеллектуальных компонентов, в результате чего реализуется переход управленческих функций от человека к встроенным подсистемам, входящим в состав ТС.

Помимо интеллектуализации технических объектов расширяется использование интеллектуальных информационных технологий (ИИТ), образующих универсальный технологический базис для всех видов деятельности [1]. Применение ИИТ в практике подразумевает учёт специфики проблемной области, которая может характеризоваться следующими признаками:

- нечёткость целей;
- множество объектов, создающих проблему, и большое число субъектов, участвующих в её решении;
- хаотичность и флуктуируемость поведения среды;
- множественность влияющих друг на друга факторов;
- слабая формализуемость, уникальность, нестереотипность ситуаций;
- латентность и неявность информации;
- девиантность реализации планов;
- парадоксальность логики решений и др.

Перечисленные признаки в полном объёме присущи системам электроснабжения железных дорог (СЭЖД):

- качество электроэнергии определяется режимами работы множества элементов, входящих в состав СЭЖД;
- текущие цели субъектов, управляющих работой отдельных подсистем железнодорожной магистрали, могут быть противоречивыми; так, например, формирование тяжёлого пакета поездов, диктуемое необходимостью выполнения планового объёма перевозок, может привести при недостаточно мощной СЭЖД к целому ряду негативных эффектов за счёт резкого ухудшения качества электроэнергии;
- из-за хаотичности и флуктуируемости поведения внешней среды СЭЖД обладает свойством многорежимности (рис. 1);

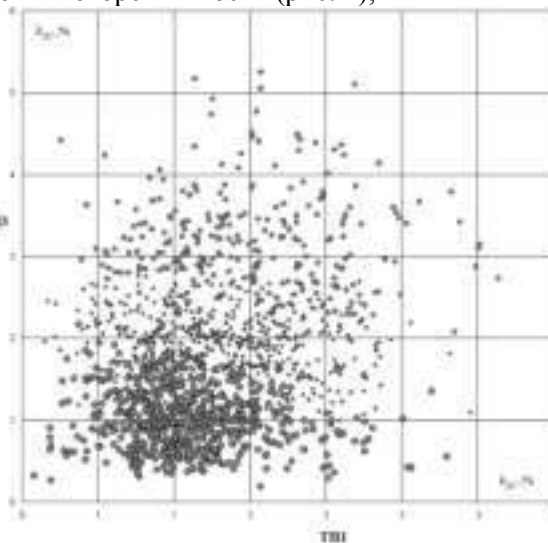


Рис. 1. Флуктуации коэффициентов несимметрии по обратной последовательности. Плоскость ТП1 – ТП3



- показатели качества электроэнергии (ПКЭ) определяются большим числом взаимовлияющих факторов;

- на практике возможно возникновение уникальных и нестереотипных ситуаций, например, резонансов на частотах высших гармоник;

- информация, существенно влияющая на ПКЭ, может быть недоступна персоналу, осуществляющему управление режимами; это связано, прежде всего, с недостаточной информационной обеспеченностью по системе внешнего электропитания.

ИИТ формируются для повышения эффективности принятия решений в условиях, связанных с возникновением проблемных ситуаций. В этом случае любая ситуация описывается в виде некоторой познавательной модели, которая затем используется в качестве основания для построения и проведения компьютерного моделирования. Эволюция информационных технологий и систем на современном этапе определяется их интеллектуализацией. Она оказывает существенное влияние на научные и технологические направления, связанные с использованием компьютеров, и даёт практически значимые результаты, многие из которых способствуют кардинальным изменениям в сферах их применения. Целями интеллектуальных информационных технологий являются [1–4]:

- расширение круга задач, решаемых с помощью компьютеров, особенно в слабоструктурированных предметных областях;

- повышение уровня интеллектуальной информационной поддержки современного специалиста.

Интеллектуальные системы электроснабжения железных дорог

Железнодорожный транспорт России является достаточно ёмким потребителем энергоресурсов. В целом по сети железных дорог ежегодно потребляется до 5–6 % вырабатываемой в РФ электроэнергии (ЭЭ). На тягу поездов расходуется около 80 % электроэнергии, потребляемой отраслью. Кроме того, значительный объём ЭЭ дополнительно перерабатывается СЭЖД на транзит и снабжение нетранспортных потребителей. В электрических сетях, питающих тяговые подстанции магистральных железных дорог, а также в СЭЖД в полном объёме применимы интеллектуальные технологии [5]. Особую актуальность вопрос применения таких технологий приобретает в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с тяговыми подстанциями железнодорожных магистралей. Ввиду значительного объёма резкопеременной, нелинейной и однофазной тяговой нагрузки показатели качества ЭЭ в

этих сетях далеко выходят за допустимые пределы.

Интеллектуальные СЭЖД включают в свой состав следующие сегменты:

- развитые комплексы, обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования, включая устройства, работающие в режиме онлайн;

- автоматические устройства управления, построенные на основе цифровых технологий;

- пофазно управляемые источники реактивной мощности;

- установки распределённой генерации [6] и накопители электроэнергии [7];

- комплекс устройств для улучшения качества электроэнергии, включающий активные конденсаторы гармоник (АКГ), симметрирующие трансформаторы и другие устройства.

Следует отметить многофункциональность значительной части из перечисленных выше устройств [5]. Так, например, установки FACTS (flexible alternative current transmission systems), имеющие пофазное (векторное) управление, могут эффективно применяться не только для стабилизации уровней напряжения, но и для снижения несимметрии в питающих сетях, а также в сетях районов электроснабжения нетяговых потребителей. Накопители электроэнергии будут способствовать снижению потерь в тяговой сети, а также уменьшать отклонения и колебания напряжений.

Возможные места размещения интеллектуальных устройств управления в СЭЖД показаны на схеме рис. 2. Надо отметить, что размещение полного комплекса этих средств, являющихся частью интеллектуальных систем электроснабжения (smart grid), на каждой тяговой подстанции по экономическим и технологическим соображениям неприемлемо, так как функции многих устройств могут дублировать друг друга.

Интеллектуальные регуляторы для установок распределённой генерации

Главное назначение СЭЖД состоит в надёжном обеспечении электроэнергией высокого качества тяги поездов, а также нетяговых и нетранспортных потребителей. Применение в СЭЖД энергоустановок распределённой генерации (РГ) позволит снизить финансовые затраты на энергообеспечение объектов инфраструктуры железных дорог, повысить надёжность электроснабжения ответственных потребителей и улучшить качество электроэнергии в районах электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей [5–10]. При решении вопросов применения технологий распределённой генерации на железных дорогах необходимо учитывать особенности СЭЖД, отличающие их от систем электроснабжения общего назначения:

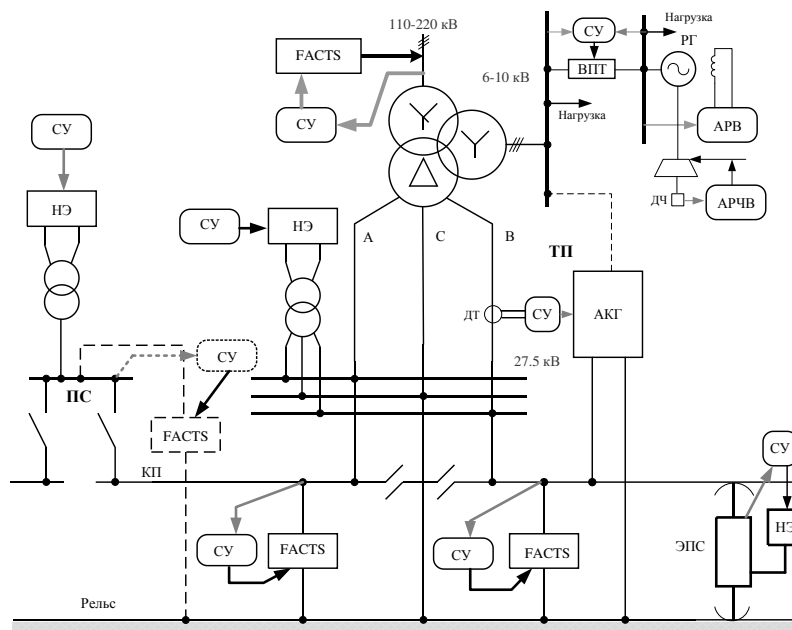


Рис. 2. Возможные места установки интеллектуальных устройств управления режимами СЭЖД: АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; ДТ – датчик тока; ДЧ – датчик частоты; ВПТ – вставка постоянного тока; СУ – система управления; РГ – распределённая генерация; ЭПС – электроподвижной состав; ТП – тяговая подстанция; КП – контактный провод; НЭ – накопитель электроэнергии; ПС – пост секционирования

резко переменный характер однофазных тяговых нагрузок, наличие несимметрии и гармонических искажений.

Используя современную преобразовательную технику, можно присоединять установки РГ к электроэнергетической системе (ЭЭС) через вставки постоянного тока (ВПТ), что позволяет ограничивать мощность короткого замыкания на шинах источников РГ, улучшает качество электроэнергии и придаёт электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [6]. Для формирования необходимых характеристик переходного процесса установки РГ в СЭЖД должны оснащаться системами автоматического управления, оптимальная настройка которых позволяет улучшить качество электроэнергии и повысить надёжность электроснабжения потребителей. Ниже описывается методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) генераторов [11–17] применительно к установке распределённой генерации, работающей в системе электроснабжения железной дороги. Особенность предлагаемой методики заключается в применении следующих интеллектуальных технологий: генетического алгоритма (ГА) для оптимизации настроек АРВ и АРЧВ [18–22]; нечёткой логики (fuzzy logic) для адаптивного управления согласованной настройкой АРВ и АРЧВ [23–25].

Алгоритм методики оптимизации настроек АРВ и АРЧВ показан на рис. 3. В основу алгорит-

ма положен метод стандартных коэффициентов, суть которого заключается в приближении коэффициентов характеристического полинома исследуемой системы к стандартным (желаемым) формам, априори обладающим требуемыми параметрами переходного процесса и необходимым запасом устойчивости.

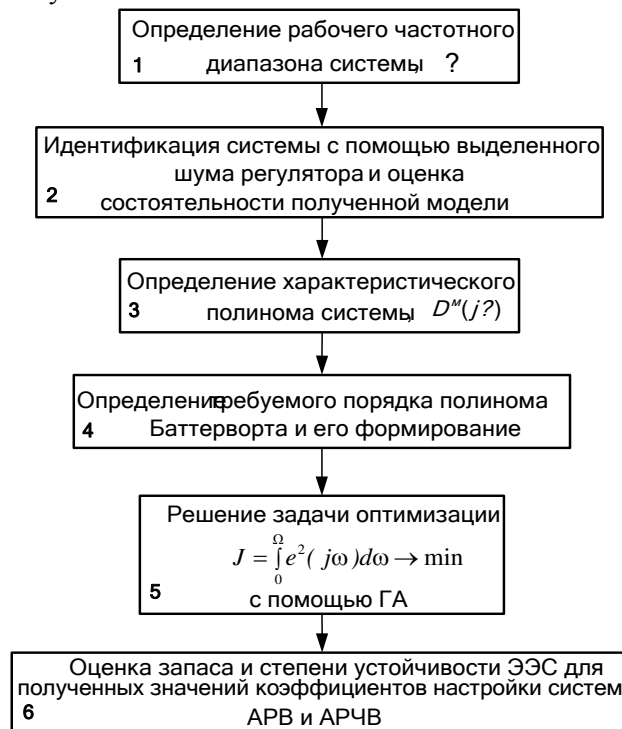


Рис. 3. Алгоритм методики оптимальной настройки систем АРВ и АРЧВ



В качестве желаемых наборов таких коэффициентов лучше всего подходят коэффициенты полиномов Баттерворта. Выбор этих полиномов по сравнению с другими аргументирован следующими факторами, определяемыми свойствами фильтра Баттерворта: он имеет только полюса (все нули передаточной функции расположены на бесконечности), что существенно упрощает задачу нахождения желаемого характеристического уравнения; фильтр любого порядка устойчив и имеет гладкую переходную характеристику.

Определение оптимальных коэффициентов регулирования систем АРВ и АРЧВ согласно приведенному алгоритму (рис. 3) предполагает получение математического описания исследуемой ЭЭС в виде характеристического полинома. Для этого используется метод непараметрической идентификации, согласно которому система рассматривается как «чёрный ящик», и на базе априорной информации о процессе определяются численные значения частотных характеристик (ЧХ) как отношение спектров выходных и входных сигналов объекта [26–28]. Для достаточно точной оценки динамики системы целесообразно использовать при идентификации тестовые широкополосные сигналы. Поскольку нарушение нормального процесса эксплуатации ЭЭС нежелательно, применяется пассивный подход, при котором в качестве тестового воздействия на систему используется выделенный с помощью вейвлет-преобразования шум регулятора [14].

Определение оптимальных коэффициентов настройки систем АРВ и АРЧВ производится путём решения задачи оптимизации с помощью ГА, сводящего к минимуму следующий квадратичный критерий:

$$J = \int_0^{\Omega} e^2(j\omega) d\omega \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $e(j\omega) = D^{jc}(j\omega) - D^m(j\omega)$ – рассогласование между желаемым набором значений $D^{jc}(j\omega)$ и модельным набором $D^m(j\omega)$ характеристических полиномов.

Выбор ГА как средства решения задачи оптимизации обусловлен тем, что критерий (1) представляет собой сложную функцию, имеющую множество локальных экстремумов. Главным достоинством ГА является возможность получения глобального решения, что трудно, а иногда невозможно достичь с помощью классических методов оптимизации.

При использовании в СЭЖД установок РГ с несколькими параллельно работающими турбогенераторами, идентификацию и согласованную настройку систем АРВ и АРЧВ предлагается проводить в два этапа. На первом этапе предлагается определять настройки регуляторов частоты, являющейся общесистемным параметром. При этом систему необходимо рассматривать как многосвязную. Передаточные функции генератора W_G и турбины W_T определяются экспериментально в виде ЧХ с помощью алгоритма, реализованного в специализированном программном комплексе [29].

На втором этапе предлагаемой методики согласования настроек АРВ и АРЧВ параллельно работающих турбогенераторов необходимо провести идентификацию подсистем «турбина – генератор» установки РГ с настройками АРЧВ, полученными на первом этапе. При этом отдельная подсистема «турбина – генератор» представляется в виде комплексных передаточных функций основных каналов и перекрестных связей регуляторов и генератора (рис. 4). Метод идентификации ориентирован на пассивный подход с применением аппарата дискретного преобразования Фурье и технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора, используемого в качестве тестового воздействия на систему.

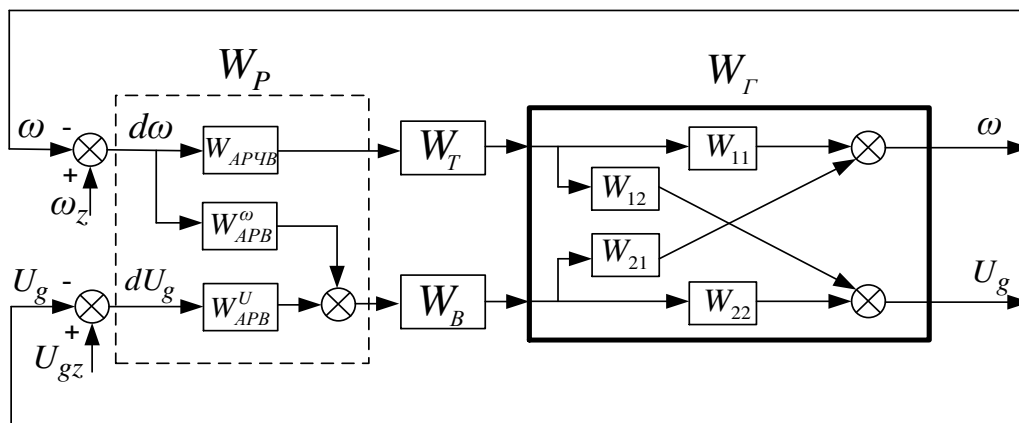


Рис. 4. Структурное представление регулируемой системы «турбина – генератор»



Матричная передаточная функция «общего регулятора», отражающего взаимосвязь систем АРВ и АРЧВ по частотному каналу, представляется следующим образом:

$$W_p(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{АРЧВ}^\omega & W_{АРВ}^\omega \\ 0 & W_{АРВ}^U \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $W_{АРЧВ}$ – комплексная передаточная функция АРЧВ; $W_{АРВ}^\omega$ – комплексная передаточная функция канала АРВ по частоте; $W_{АРВ}^U$ – комплексная передаточная функция канала АРВ по напряжению.

Предлагаемые алгоритмы методики согласованной настройки АРВ и АРЧВ параллельно работающих турбогенераторов установки РГ реализованы в специализированном программном комплексе [29].

Необходимо также отметить, что идентификацию и согласованную настройку систем АРВ и АРЧВ турбогенераторов установки РГ целесообразно проводить для нескольких режимов работы СЭЖД (например, для режимов минимальных и максимальных нагрузок) и получить соответственно набор оптимальных настроек для всех прогнозируемых режимов, что позволит создать базу правил работы адаптивного регулятора установки РГ. Такая адаптивная система управления может быть основана на технологии нечёткой логики и искусственных нейронных сетей, позволяющей определять режим работы СЭЖД и менять

коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ на оптимальные для текущего режима. Как показали исследования [25], адаптивная система согласованной настройки АРВ и АРЧВ позволяет повысить качество регулирования переходных процессов, обеспечить необходимый запас устойчивости и живучесть ЭЭС.

Исследования проводились применительно к структурной схеме СЭЖД, представленной на рис. 5. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей, включающий два параллельно работающих генератора, питающих группу нагрузок с суммарной мощностью 5,55 МВ·А, объединённых в сетевой кластер, выполненный на основе ВПТ. Мощность каждого генератора установки РГ равнялась 3 МВ·А. Автоматическое регулирование активной и реактивной мощностей синхронных турбогенераторов осуществляется с помощью АРВ и АРЧВ.

Моделирование осуществлялось на основе пакетов Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB. Генераторы установки РГ моделируются высоковольтными синхронными машинами мощностью 3 МВ·А и номинальной частотой вращения ротора 3000 об/мин, приводимыми во вращение паровыми турбинами, математическая модель которых может быть представлена следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{P_m}{\mu} = \frac{1}{T_m s + 1}, \quad (3)$$

где P_m – мощность турбины; μ – открытие регу-

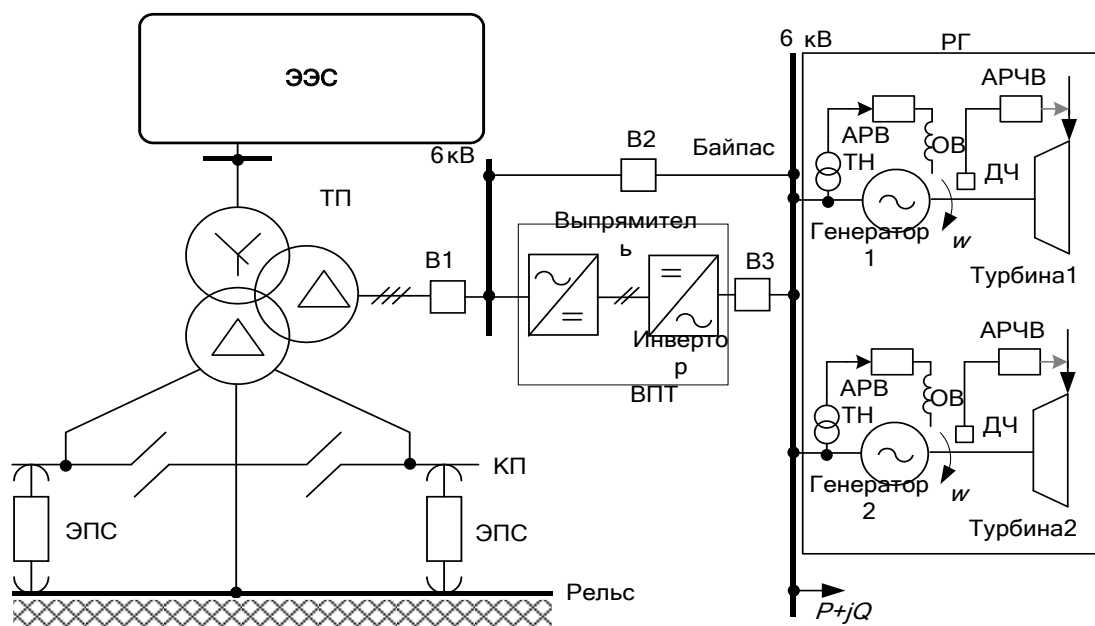


Рис. 5. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги:

АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; ДЧ – датчик частоты; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения; В – выключатель



лирующего органа; T_m – постоянная времени турбины, определяемая запаздыванием в преобразовании энергии пара в механическую энергию (в среднем T_m составляет 0,2 с); s – оператор Лапласа.

Модель тиристорной системы возбуждения была создана на основе уравнений, описывающих тиристорный преобразователь и входной усилитель. Для последнего можно принять допущение о его линейной характеристике с коэффициентом усиления k_a и постоянной времени T_a . Тиристорный возбудитель моделируется аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения (рис. 6). При моделировании принимались следующие числовые значения параметров: $k_a = 1$; $T_a = 0,001$; $k_e = 1$; $T_e = 0,025$.

Для регулирования частоты и напряжения турбогенераторов используются модели микропроцессорного АРВ и АРЧВ, описание которых приведено в [20, 30]. Согласование настроек АРВ и АРЧВ турбогенераторов установки РГ осуществлялось с помощью программного комплекса «Оптимизация коэффициентов стабилизации си-

стем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций» [29]. В результате работы программного комплекса были определены частотные характеристики основных каналов и перекрестных связей турбогенераторов, а также коэффициенты настройки регуляторов и запас устойчивости системы, представленные в табл. 1.

Ниже приведены результаты исследования переходных процессов в системе электроснабжения нетяговых потребителей при подключении мощной тяговой нагрузки. Полученные результаты показали эффективность методики согласованной настройки АРВ и АРЧВ турбогенераторов установки РГ, заключающейся в обеспечении необходимого запаса устойчивости и в способности системы поддерживать нормативное напряжение и качество электроэнергии у потребителей при больших возмущениях. При отсутствии регуляторов у турбогенераторов установки РГ система теряет устойчивость. Результаты моделирования, подтверждающие данные выводы, представлены на рис. 7, 8 и в табл. 2.

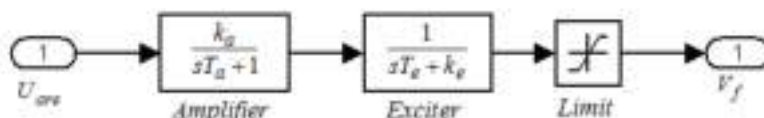


Рис. 6. Структурная схема модели тиристорной системы возбуждения в MATLAB:

U_{ave} – сигнал, поступающий от АРВ; V_f – сигнал, поступающий на обмотку возбуждения генератора; *Amplifier* – усилитель; *Exciter* – тиристорный возбудитель; *Limit* – блок ограничения напряжения

Таблица 1

Результаты согласованной настройки АРВ и АРЧВ турбогенераторов установки РГ

Коэффициенты настройки АРВ	Коэффициенты настройки АРЧВ	Запас аperiodической устойчивости
$k_{0u} = 10, k_{1u} = 5,$ $k_{0w} = 13,86, k_{1w} = 66,44$	$k_p = 571,57, k_i = 54,49,$ $k_d = 101,14$	307,8

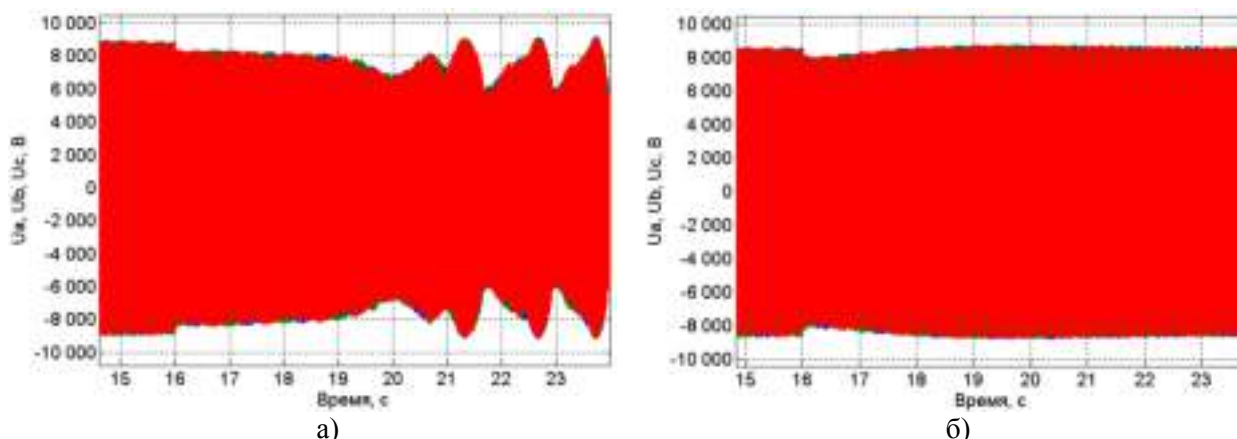


Рис. 7. Осциллограммы изменения напряжения у нетягового потребителя при подключении мощной тяговой нагрузки в момент времени 16 с:

a – без использования регуляторов; *b* – применение согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

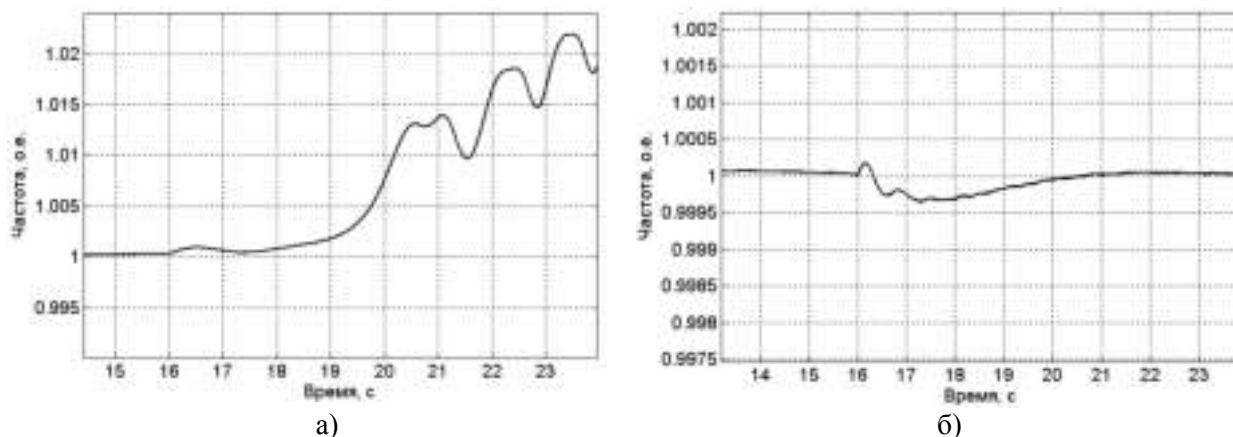


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора при подключении мощной тяговой нагрузки в момент времени 16 с:
 а – без использования регуляторов; б – применение согласованно настроенных АРВ и АРЧВ

Таблица 2

Показатели качества электроэнергии в системе при подключении мощной тяговой нагрузки

Место измерения показателей качества электроэнергии	k_{UAB}	k_{UBC}	k_{UCA}	k_{2U}
На обмотке 6 кВ трансформатора тяговой подстанции	10,78	13,54	12,6	10,05
На шинах нетягового потребителя с использованием согласованно настроенных АРВ и АРЧВ установки РГ	1,13	1,09	1,44	0,48

Примечание: k_U – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения; k_{2U} – коэффициент несимметрии по обратной последовательности

Результаты компьютерного моделирования показывают, что управление мощностью установки распределённой генерации с помощью согласованно настроенных АРВ и АРЧВ позволяет обеспечить устойчивость и живучесть системы электроснабжения железной дороги, нормативное качество электроэнергии и высокую надёжность электроснабжения потребителей.

Интеллектуальные регуляторы для ветрогенерирующих установок

В последнее время возрос интерес к использованию возобновляемой, экологически чистой энергии ветра. Установленная мощность ветрогенерирующих установок (ВГУ), подключённых к электрическим сетям за период, с 2001 по 2014 год, по данным технического комитета Всемирной ветроэнергетической ассоциации (WWEA), выросла в мире с 24 ГВт до 370 ГВт [31]. Кроме этого, во многих странах существуют амбициозные планы развития ветроэнергетики на среднесрочную перспективу 2020...2030 гг. Основным препятствием для использования ветра в качестве источника энергии является непостоянство его скорости. Однако конструкции ВГУ постоянно совершенствуются.

Использование ВГУ в составе сетевого кластера [9] позволит осуществлять стабилизацию напряжения в часы пиковых нагрузок, а также уменьшать

техногенное воздействие на окружающую природную среду. Эффективность работы ВГУ в составе сетевых кластеров можно повысить с помощью систем автоматического регулирования. Однако при решении задач управления режимами работы ВГУ появляются трудно разрешимые традиционными методами проблемы. Ветроэнергетический агрегат является нелинейным и нестационарным объектом, для управления которым можно использовать нечёткие (fuzzy) регуляторы (НР) [32–37]. Однако в настоящее время не существует единой методики настройки таких регуляторов для ВГУ.

Ниже рассматриваются вопросы моделирования и настройки нечёткой системы управления горизонтально-осевой тихоходной ВГУ, работающей как автономно на выделенную нагрузку, так и в составе сетевого кластера.

Неотъемлемыми частями любого НР являются: система нечёткого логического вывода, состоящая из блоков фазификации (приведение чётких переменных к нечётким) и дефазификации (приведение нечётких переменных к чётким), а также база знаний, содержащая базу правил и блок вывода (рис. 9).

Информация, поступающая на вход системы нечёткого вывода, соответствует переменным процесса управления. На выходе системы формируются управляющие сигналы. Для управления



Рис. 9. Система нечёткого логического вывода

частотой и мощностью ВГУ предлагается использовать алгоритмы нечёткого логического вывода Мамдани и Сугено [38], предполагающие выполнение следующих этапов:

1. *Формирование базы правил системы нечёткого вывода.* Наиболее часто база правил представляется в форме ЕСЛИ «Условие», ТО «Заключение» (F). Здесь F определяет весовой коэффициент соответствующего правила и может принимать значения из интервала $[0, 1]$. При формировании базы необходимо определить следующие множества: правил нечётких продукций, входных и выходных лингвистических переменных.

2. *Фазификация входных переменных.* Целью этого этапа является установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма.

3. *Агрегирование подусловий в нечётких правилах продукций.* Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечёткого вывода.

4. *Активизация или композиция подзаключений в нечётких правилах продукций* представляет собой процедуру нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечётких продукций. В предлагаемом нечётком регуляторе используется метод \min -активизации:

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\},$$

где c_i – значения степеней истинности подзаключений для каждого из правил, входящих в рассматриваемую базу; $\mu(y)$ – функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной, заданной на универсальном множестве Y .

5. *Аккумуляция заключений нечётких правил продукций.* Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить все степени истинности

заключений (подзаключений) для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных. Причина необходимости выполнения этого этапа состоит в том, что подзаключения, относящиеся к одной и той же выходной лингвистической переменной, принадлежат различным правилам системы нечёткого вывода. Аккумуляция выполняется методом \max -объединения нечётких множеств. Необходимо отметить, что для алгоритма Сугено этот этап отсутствует, поскольку расчёты осуществляются с обычными действительными числами.

6. *Дефазификация выходных переменных.* Цель дефазификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к системе нечёткого вывода. В предлагаемой системе нечёткого вывода используется метод центра тяжести [38].

Для настройки НР не требуется математическое описание объекта управления. Достаточно иметь представление о его поведении. На основе этих знаний необходимо составить базу правил по форме «Если-то». Это обстоятельство является главным преимуществом НР перед классическими регуляторами. Синтез нечёткого регулятора в соответствии с этапами алгоритма нечёткого логического вывода предполагает определение диапазонов изменения входных и выходных величин, выбор функций принадлежности нечётких переменных и проведение их лингвистической оценки. На вход НР для управления мощностью и частотой ВГУ предлагается подавать следующие сигналы: отклонение частоты вращения ротора от номинального значения $d\omega$; заданное значение мощности ВГУ P_z (можно также использовать текущее значение электрической мощности генератора P_e); скорость ветра V ; приращение механической



мощности ветротурбины dP_m , определяемое как разница между текущим значением механической мощности и мощностью в предыдущий момент времени: $dP_m = P_m(n) - P_m(n-1)$. Выходным сигналом НР является сигнал задания угла поворота лопастей.

В предлагаемой нечёткой системе управления ВГУ используются следующие нечёткие термножества:

1) для лингвистической переменной «отклонение частоты вращения ротора $d\omega$ »: *NB* – отрицательное большое; *NS* – отрицательное малое; *Z* – нулевое; *PS* – положительное малое; *PB* – положительное большое;

2) для лингвистической переменной «заданное значение мощности ВГУ P_z »: *VS* – очень малое; *S* – малое; *A* – среднее; *B* – большое; *M* – максимальное;

3) для лингвистической переменной «скорость ветра V »: *W* – слабая; *B* – базовая; *S* – сильная;

4) для лингвистической переменной «приращение механической мощности dP_m »: *N* – отрицательное; *Z* – нулевое; *P* – положительное;

5) для лингвистической переменной «угол поворота лопастей *Angle*»: *Z* – нулевой; *VS* – очень малый; *S* – малый; *A* – средний; *B* – большой; *VB* – очень большой; *L* – предельный.

Для функционирования математической модели нечёткого логического вывода необходимо сформировать экспертную базу знаний нечётких правил. Для этого предлагается снимать с ВГУ

зависимости механической мощности от частоты вращения ротора при различных углах поворота лопастей и скорости ветра. На основе полученных зависимостей строится соответствующая база правил, например: если $d\omega$ нулевое (*Z*) и P_z большое (*B*) и V базовая (*B*) и dP_m нулевое (*Z*), то *Angle* малый (*S*).

Пакет Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB имеет в своём составе программу FIS Editor, позволяющую разрабатывать системы нечёткого логического вывода и проводить анализ созданной системы управления [38]. С помощью этой программы по описанной выше методике были разработаны системы нечёткого логического вывода для управления ВГУ, использующие алгоритмы Мамдани и Сугено.

Исследования проводились применительно к структурной схеме СЭЖД, представленной на рис. 10. Моделировался отдельный район электропитания нетяговых потребителей (РЭС), включающий установку РГ, питающую группу нагрузок с суммарной активной мощностью 5 МВт, объединённую в сетевой кластер. Мощность установки РГ равнялась 2,5 МВт. Ветрогенерирующая установка, максимальная мощность которой при моделировании принималась равной 1 МВт, подключалась к шинам постоянного тока сетевого кластера.

Для регулирования напряжения у ВГУ и установки РГ использовалась модель микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения (АРВ-М), разработанная в БрГУ [20]. Настройка АРВ-М и АРЧВ турбогенератора уста-

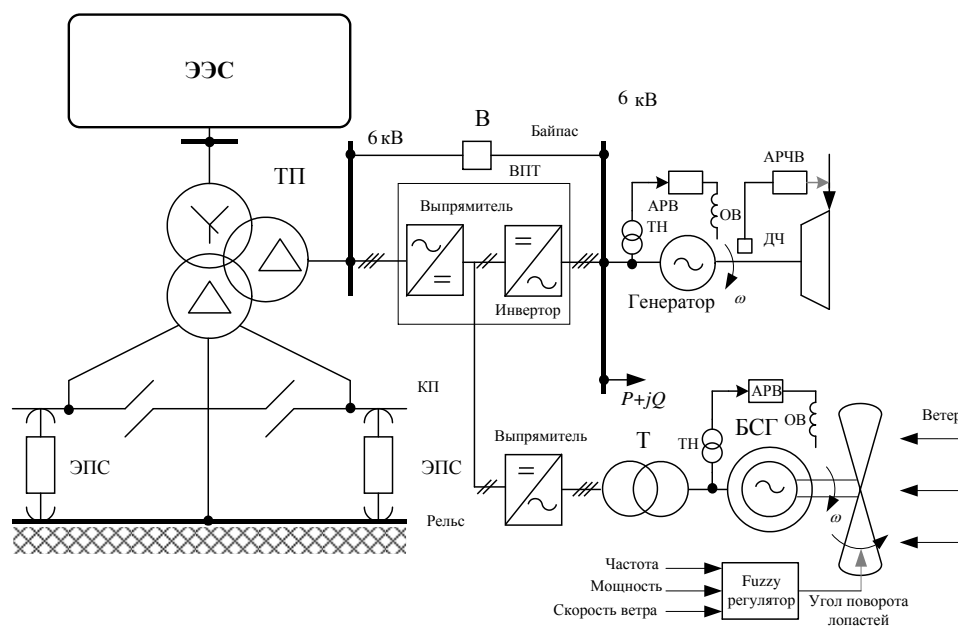


Рис. 10. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги:
БСГ – безредукторный синхронный генератор; Т – трансформатор



новки РГ была выполнена с помощью программного комплекса, реализующего методы, предложенные в работах [11–14]. В качестве возмущения использовалось отключение основного питания на время 0,8 с, в результате чего генератор установки РГ и ВГУ с суммарной мощностью 3,5 МВт работает на нагрузку мощностью 5 МВт, что вызывает падение напряжения у потребителя. При этом совместная работа установки РГ и ВГУ с нечётким регулятором позволила сохранить напряжение на шинах нетяговых потребителей на уровне, близком к номинальному, и сгладить возникшие колебания. Если ВГУ отключена, то напряжение поддерживать на номинальном уровне не удаётся, и качество электроэнергии значительно снижается. Соответствующие осциллограммы, подтверждающие данные выводы, представлены на рис. 11.

Проведённые исследования на модели ВГУ, работающей автономно на выделенную нагрузку [37], также показали эффективность работы настроенного по предлагаемой методике нечёткого регулятора, которая заключается в поддержании заданного значения мощности, частоты и напряжения у потребителя электроэнергии при подключении дополнительной нагрузки.

Заключение

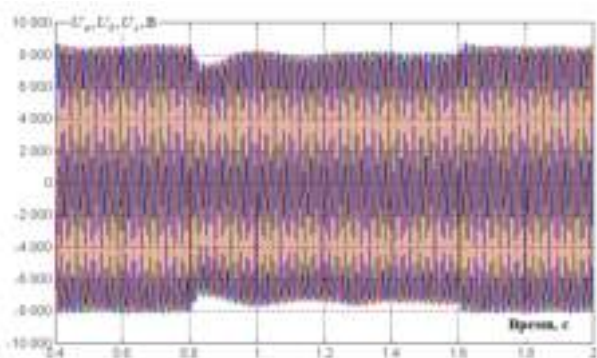
1. Управление мощностью установки распределённой генерации с помощью согласованно настроенных АРВ и АРЧВ, использующих интеллектуальные технологии и алгоритмы, позволяет обеспечить устойчивость и живучесть системы электроснабжения железной дороги, нормативное качество электроэнергии и высокую надёжность электроснабжения потребителей.

2. Управление мощностью ВГУ позволяет сохранить устойчивость её работы не только при вариациях скорости ветра, но и в случае изменения нагрузки потребителей. Предложенная методика настройки регулятора ВГУ, использующего

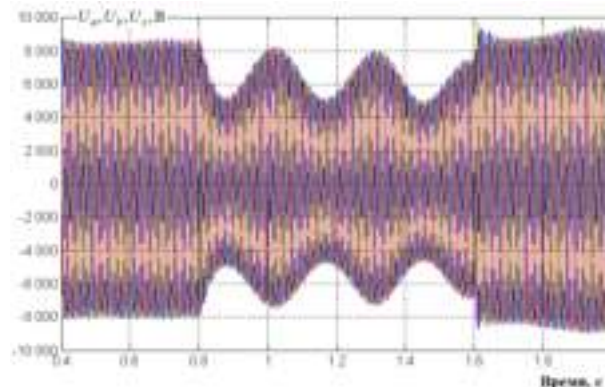
алгоритмы нечёткого логического вывода, позволяет сформировать универсальную базу правил для эффективной работы ВГУ как в автономном режиме, так и в составе сетевых кластеров, предназначенных для повышения надёжности электроснабжения стационарных потребителей железнодорожного транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Витол Э.А. Интеллектуализация техники – главный вектор современной эволюции // *Философия и космология*. 2013. С. 65–92.
2. Башмаков А.И., Башмаков И.А. Интеллектуальные информационные технологии. М. : МГТУ, 2005.
3. Лопота В.А., Юревич Е.И. Миниатюризация и интеллектуализация техники – глобальная тенденция XXI века // *Микросистемная техника*. 2003. № 1.
4. Санто Б. Интеллектуализация общества [Электронный ресурс] // *Институт эволюционной экономики (ИЭЭ)* : сайт. URL: <http://iee.org.ua/ru/publication/79/>. (Дата обращения 05.02.2015).
5. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.А. Ушаков, В.А. Алексеенко. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. 129 с.
6. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог / М.О. Арсентьев., О.В. Арсентьев, А.В. Крюков, Чан Зюй Хынг. Иркутск : ИрГУПС, 2013. 164 с.
7. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // *Вестник ИрГТУ*. № 1 (37). 2009. С. 190–195.
8. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. В 2 т. Т. 2. Иркутск : ИрГУПС, 2012. С. 75–81.
9. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение техноло-



а)



б)

Рис. 11. Осциллограммы изменения напряжения на шинах нетяговых потребителей при отключении основного питания: а – в составе сетевого кластера работают РГ и ВГУ; б – ВГУ отключена



- гий сетевых кластеров в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Ч. 1. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2013. С. 115–120.
10. Крюков А.В., Ушаков В.А., Чан Зюй Хынг. Снижение провалов напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х т. Т. 2. Иркутск: ИрГУПС, 2014. С. 52–57.
 11. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генератора // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. В 2 т. Т.1. Братск : БрГУ, 2009. С. 3–7.
 12. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Влияние согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций на устойчивость электроэнергетических систем // Системы. Методы. Технологии. 2011. №2(10). С. 85–90.
 13. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В., Стародубцев А.А. Методика повышения запаса устойчивости межсистемных связей электроэнергетических систем // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3(11). С. 101–105.
 14. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций : автореф. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 22 с.
 15. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Автоматические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3(23). С. 108–116.
 16. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации. 2014. № 4(24). С. 73–79.
 17. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Применение алгоритмов согласованной настройки регуляторов турбогенераторов установки распределенной генерации // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т.2. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. С. 130–139.
 18. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Настройка АРВ-СД генератора методом стандартных коэффициентов с применением генетического алгоритма // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. В 2 т. Т. 1. Братск: БрГУ, 2008. С. 18–24.
 19. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В., Аксеновский А.В. Разработка модели АРВ-СДП в среде MATLAB и его настройка с помощью генетического алгоритма // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. В 2 т. Т.1. Братск: БрГУ, 2010. С. 19–25.
 20. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Разработка модели микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения в среде MATLAB и оптимизация его настроек // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т. 2. Братск : Изд-во БрГУ, 2011. С. 3–8.
 21. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Решение оптимизационных задач электроэнергетики с помощью адаптивного генетического алгоритма // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т. 2. Братск : Изд-во БрГУ, 2012. С. 94–99.
 22. Игнатъев И.В., Булатов Ю.Н. Адаптивная оптимизация настроек систем управления агрегатами электростанций // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т. 3. Братск : Изд-во БрГУ, 2012. С. 119–131.
 23. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Разработка блока автонастройки АРЧМ на основе нечёткой логики // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2 (6). С.91–95.
 24. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Программный комплекс адаптивной настройки системы автоматического регулирования частоты и активной мощности // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т. 1. Братск : Изд-во БрГУ, 2013. С. 221–224.
 25. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Адаптивный блок согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т.1. Братск : Изд-во БрГУ, 2014. С. 265–269.
 26. Булатов Ю.Н., Дьяконица С.А. Алгоритм непараметрической идентификации ЭЭС для получения оптимальных коэффициентов стабилизации АРВ генераторов // Тр. Братск. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. В 2 т. Т. 1. Братск : БрГУ, 2009. С. 7–11.
 27. Булатов Ю.Н. Игнатъев И.В. Определение оптимальных коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ по непараметрическим моделям турбогенераторов электростанций // Системы. Методы. Технологии. 2009. №3. С.70–74.
 28. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Алгоритм сглаживания эмпирической оценки комплексной передаточной функции при идентификации электроэнергетических систем // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте : сб. науч. трудов / под ред. Ю.Ф. Мухопода. Иркутск, 2010. Вып. 17. С. 18–23.
 29. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации



- автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4 (8). С. 106–113.
30. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Моделирование гидротурбин и автоматических регуляторов частоты и активной мощности в среде MATLAB // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 67–70.
31. World Wind Resource Assessment Report 2014 [Electronic resource] // World Wind Energy Association : [site]. URL: <http://www.wwindea.org/wwea-publishes-world-wind-resource-assessment-report/>. (Access date: 12.02.2015).
32. Piao Haiguo Simulation Research of Fuzzy-PID Synthesis Yaw Vector Control System of Wind Turbine / Piao Haiguo, Wang Zhixin // Manuscript received June 27, 2007. P. 469–476.
33. Jahmeerbacus I. Fuzzy Control of a Variable-speed wind Power Generating System / Jahmeerbacus I., Bhurtun C.: Energize. August 2008. P. 41–45.
34. Jianzhong Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines / Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6-9 April, 2008.
35. Evgenije Adzic et al. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control / Evgenije Adzic, Zoran Ivanovic, Milan Adzic, Vladimir Katic // Acta Polytechnica Hungarica. 2009. Vol. 6. No. 1. P. 131–149.
36. Kung Chris Wu et al. Evaluation of classical and fuzzy logic controllers for wind turbine yaw control / Kung Chris Wu, Rony K. Joseph, Nagendra K. Thupili // Mechanical and Industrial Engineering Department The University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968-0521, IEEE, March 11, 2009. P. 254–258.
37. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 60–69.
38. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. БХВ Петербург, 2003. 736 с.

УДК 517.949.8

Чье Ен Ун,

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации и системотехники,
Тихоокеанский государственный университет, тел. (4212) 37-51-91, e-mail: chye@ais.khstu.ru

Шейн Александр Борисович,

к. т. н., доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет,
тел. (83540) 2-23-44, e-mail: shabishzl@yandex.ru

МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

E. U. Chye, A. B. Shein

METHOD OF SOLVING INHOMOGENEOUS DIFFERENTIAL EQUATION FOR ELECTRONIC DEVICES MODELING

Аннотация. При решении задач анализа динамических процессов в электронных и электротехнических устройствах используют как нормальные системы дифференциальных уравнений первого порядка, так и неоднородные дифференциальные уравнения n -го порядка. Поэтому разработка простых, быстрых, надежных и эффективных методов их решения остается актуальной задачей. В данной статье описывается метод решения неоднородных дифференциальных уравнений n -го порядка, который отличается общностью подхода и может быть применен при любых значениях показателей степеней левой и правой частей. При использовании метода не нужно специально брать производные от функции входного воздействия, что значительно упрощает решение задачи, так как эта операция часто бывает затруднительной из-за сложной функциональной зависимости входного воздействия на объект от времени. Предложенный метод отличается простотой, наглядностью и удобством для реализации на ЭВМ.

Ключевые слова: неоднородное дифференциальное уравнение, метод решения, моделирование, электронное устройство.

Abstract. Solving dynamic processes in electronic and electrical engineering devices analysis problems both normal systems of differential equations of first-order and heterogeneous differential equations of n th order are used. Therefore, development of simple, rapid, reliable and effective methods of their decision remains an actual problem. The article describes a method for solving inhomogeneous differential equations of n th order which is characterized by a community approach and can be applied for any values of the exponents of the left and right sides. The method does not demand to take intentionally derivatives of the input action which greatly simplifies the solution of the problem, because this is often difficult due to the complex functional dependence of the input influence on the object of the time. The proposed method is characterized by simplicity, clarity and easiness of implementation on a computer.

Keywords: inhomogeneous differential equation, solution method, modeling, electronic device.

Введение

При схемотехническом моделировании электронных устройств (ЭУ) наилучшим образом зарекомендовали себя математические модели

в виде нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и неоднородных дифференциальных уравнений n -го порядка для переменных состояния ЭУ. Для полу-