

# Применение интеллектуальных технологий управления генераторными установками в системах электроснабжения нетяговых потребителей

Ю. Н. Булатов

*Братский государственный университет*

Братск, Россия

bulatovyura@yandex.ru

А. В. Крюков

*Иркутский государственный университет путей*

*сообщения; Иркутский национальный*

*исследовательский технический университет*

Иркутск, Россия

and\_kryukov@mail.ru

К. В. Суслов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

Иркутск, Россия

dr.souslov@yandex.ru

**Аннотация.** Один из главных аспектов осуществляемого в настоящее время перехода электроэнергетики на технологическую платформу интеллектуальных электрических сетей состоит в масштабном применении установок распределенной генерации (РГ). Эффективная работа таких установок не возможна без разработки новых подходов к управлению их генераторами. В современных условиях эти подходы должны базироваться на интеллектуальных технологиях. В статье рассмотрены интеллектуальные технологии управления установками РГ, использующиеся в системах электроснабжения нетяговых потребителей. Цель исследований состояла в определении возможных эффектов от применения интеллектуальных технологий в управлении установками РГ. Исследования проводились в системе MatLab. Показана работа предлагаемой системы управления настройками автоматических регуляторов установок РГ, использующая нечеткий логический вывод. Определение оптимальных настроек регуляторов выполнялось на основе использования генетического алгоритма. Приведены результаты моделирования нейросетевых регуляторов установок РГ. Результаты моделирования показали, что на основе интеллектуальных технологий управления установками РГ возможно повысить точность регулирования и улучшить показатели качества процессов регулирования.

**Ключевые слова:** железные дороги; системы электроснабжения; установки распределенной генерации; интеллектуальные технологии управления; нечеткий логический вывод; генетический алгоритм; нейросетевой регулятор

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно разрабатываются и начинают внедряться технологии smart grid [1–3], предполагающие масштабное применение в электроэнергетических системах (ЭЭС) интеллектуальных алгоритмов управления. Поэтому задачи развития таких алгоритмов приобретают особую

актуальность. На основе этих алгоритмов возможно создание кибер-физических ЭЭС [4–6], характеризующихся глубокой интеграцией силовых элементов и информационных технологий. Реализация кибер-физического подхода к созданию интеллектуальных ЭЭС с активно-адаптивными сетями предусматривает масштабное применение установок распределенной генерации (РГ) относительно небольшой мощности. Как правило, установки РГ располагаются вблизи потребителей электроэнергии [7–12] и позволяют получить широкие возможности для снижения пиковых нагрузок, стабилизации уровней напряжения, уменьшения потерь электроэнергии (ЭЭ) и улучшения ее качества [11, 13].

Установки РГ, реализованные на основе синхронных генераторов (СГ), позволяют вырабатывать достаточно большие объемы ЭЭ и могут эффективно использоваться для электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта. Управление СГ осуществляется с помощью автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и скорости (АРС), обычно использующих пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) законы регулирования.

Применению интеллектуальных технологий в задачах определения настроек ПИД регуляторов посвящено достаточно много работ, например [14–17]. Значительное число работ посвящено использованию интеллектуальных регуляторов для управления генераторами установок РГ [18–21]. Практическое применение интеллектуальных алгоритмов требует учета как особенностей установок РГ, так и систем электроснабжения, в которых они работают. Для решения вопросов о применимости данных регуляторов в кибер-физических ЭЭС требуется проведение дополнительных исследований с применением компьютерного моделирования.

В статье представлено описание интеллектуальных систем управления АРВ и АРС установки РГ, предназначенной для работы в системе электроснабжения нетяговых потребителей. В

---

Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039).

предлагаемых системах управления использовались следующие интеллектуальные компоненты: генетический алгоритм (ГА); система нечеткого логического вывода; нейронные сети. Цель исследований состояла в определении эффективности применения интеллектуальных технологий в управлении установками РГ.

## II. НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРАМИ УСТАНОВКИ РГ

Повышение качества регулирования АРВ и АРС возможно путем адаптации коэффициентов их настройки к изменениям режимов работы системы электроснабжения. Такой подход может быть реализован с помощью регулятора, использующего систему нечеткого логического вывода (рис. 1).

В основу алгоритма предлагаемой нечеткой системы управления положена идентификация режима работы СГ и изменения коэффициентов настройки АРВ и АРС при его значительных вариациях. Нечеткий регулятор, реализованный на основе системы нечеткого логического вывода, оснащен блоком автонастройки (рис. 1), а также имеет в своем составе модули идентификации объекта и настройки АРВ и АРС по ее результатам. На входы устройства поступают следующие параметры: напряжение  $U_g$ , скорость ротора  $\omega_g$ , активные и реактивные мощности  $P_g, Q_g$  генератора,

а также показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в сети нетягового потребителя. В результате работы системы определяются оптимальные для текущего режима коэффициенты настройки АРВ и АРС.

Алгоритм настройки и формирования базы знаний нечеткого регулятора для различных режимов работы системы электроснабжения включает следующие этапы, подробно описанные которых представлено в работах [9, 15]: идентификация модели СГ; оптимизация настроек АРВ и АРС с помощью ГА; расчет запаса устойчивости. Выполнение перечисленных задач с помощью специализированного программного комплекса [9] позволяет создать базу правил нечеткого регулятора, в котором реализован поиск с помощью генетического алгоритма оптимальных коэффициентов настройки.

Апробация предлагаемой нечеткой системы выполнялась на основе разработанной в среде MatLab компьютерной модели системы электроснабжения железной дороги (СЭЖД). Основное внимание при создании этой модели уделялось району электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей, сети которого были подключены к шинам 6 кВ тяговой подстанции (рис. 2). Суммарные нагрузки РЭС составляли 5 МВ·А. Предполагалось наличие установки РГ, реализованной на баз двух синхронных генераторов с мощностью по 2,5 МВ·А. Фрагмент схемы исследуемой модели в MatLab показан на рис. 3.

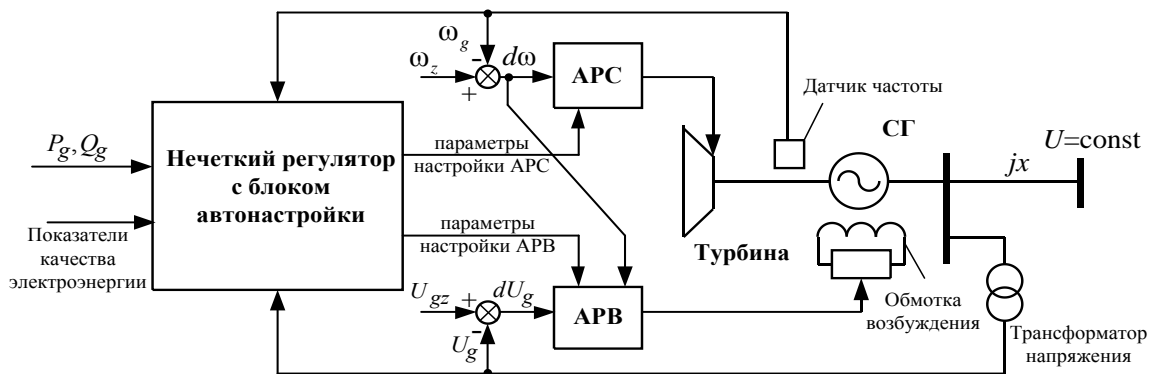


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления настройками АРВ и АРС

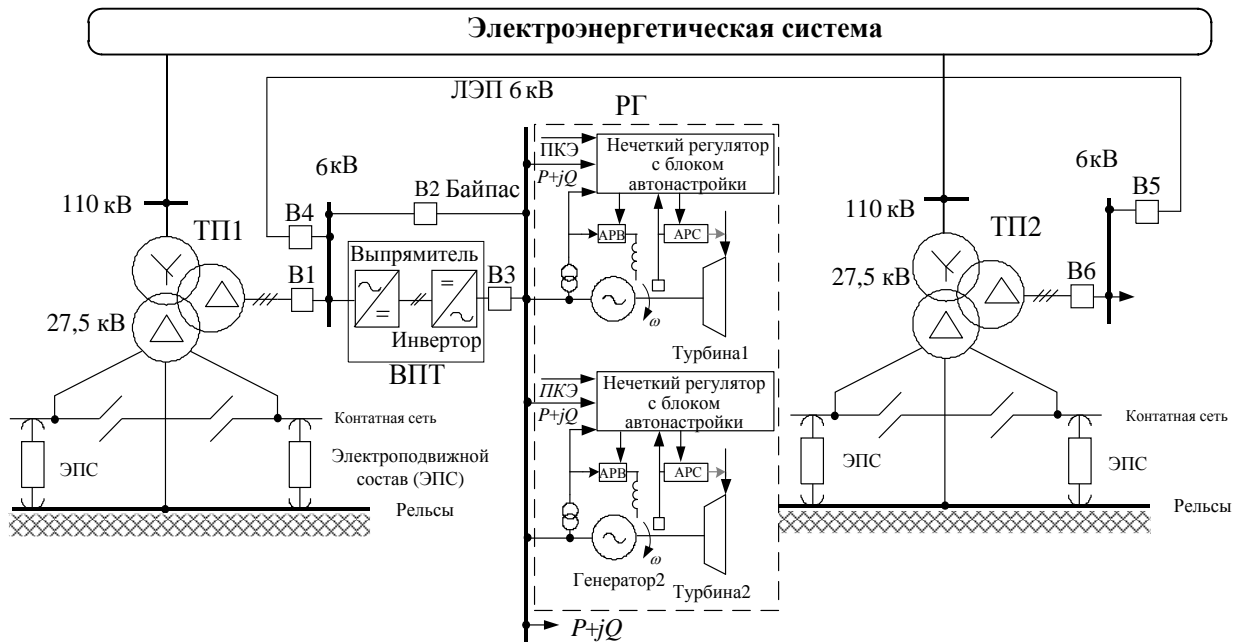


Рис. 2. Фрагмент исследуемой схемы СЭЖД: ВПТ – вставка постоянного тока

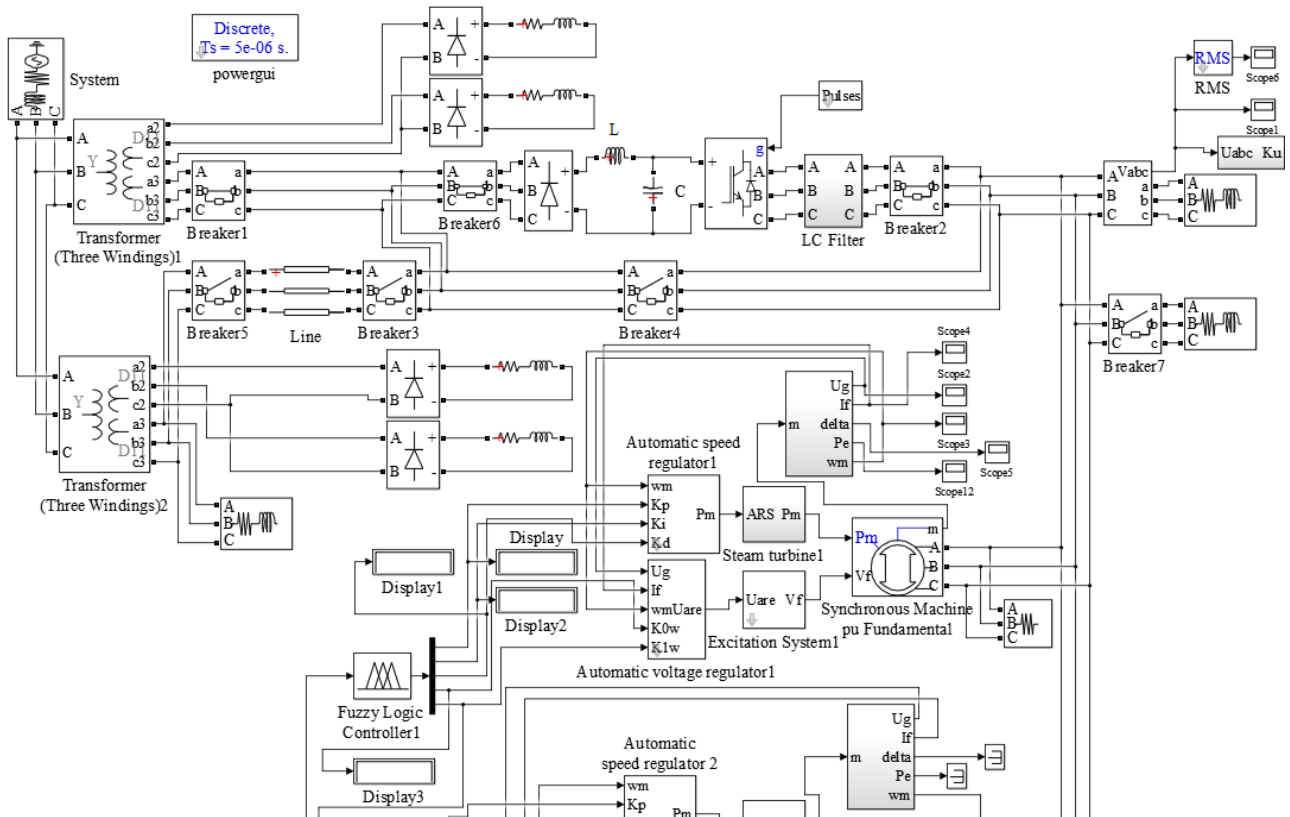


Рис. 3. Фрагмент схемы модели исследуемой СЭЖД в MatLab

Модель исследуемой СЭЖД создавалась на основе стандартных блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems системы MatLab. Параметры моделей синхронных генераторов (блок Synchronous Machine pu Fundamental на рис. 3) установки РГ приведены на рис. 4.

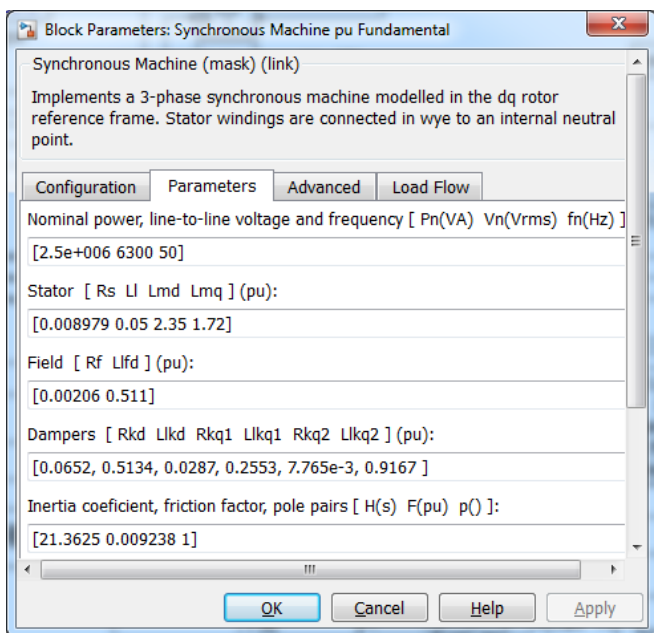


Рис. 4. Окно параметров модели СГ

Тиристорный возбудитель СГ (блок Excitation System на рис. 3) моделировался аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом  $k_e = 1$  и постоянной времени  $T_e = 0,025$  с. Описание используемых моделей АРВ и АРС приведено в работах [11, 17]. Структурная схема используемой модели паровой турбины (блок

Steam turbine на рис.3) представлена передаточной функцией  $\frac{1}{0,2s + 1}$ , где  $s$  – оператор Лапласа.

Настройка нечеткого регулятора (блок Fuzzy Logic Controller на рис. 3) ограничивалась только основными режимами работы представленной СЭЖД и установки РГ, для которых были созданы соответствующие правила типа «ЕСЛИ-ТО». В качестве базовых режимов работы исследуемой установки РГ рассматривались:

- автономный режим работы установки РГ на выделенную нагрузку мощностью 5 МВ·А;
- параллельная работа РГ и ЭЭС через ВПТ и ТП1;
- параллельная работа РГ и ЭЭС через ВПТ и ТП2;
- параллельная работа РГ и ЭЭС через байпас и ТП1;
- параллельная работа РГ и ЭЭС через байпас и ТП2.

При анализе качества процессов управления моделировались следующие коммутации: отключение вставки постоянного тока и включение через 0,5 с шунтирующей связи (байпаса) выключателем В2 (рис. 2). Идентификация режима проводилась по следующим показателям ПКЭ: коэффициентам гармоник и несимметрии напряжений на шинах 6 кВ нетягового потребителя. Результаты моделирования показали высокую эффективность работы предлагаемой системы; при этом наблюдалось уменьшение времени переходного процесса; снижалась величина перерегулирования напряжения и скорости вращения ротора СГ (рис. 5 и 6). Наибольший эффект имел место по времени переходного процесса для отклонения скорости ротора генератора (рис. 6). Этот показатель уменьшился в два с половиной раза.

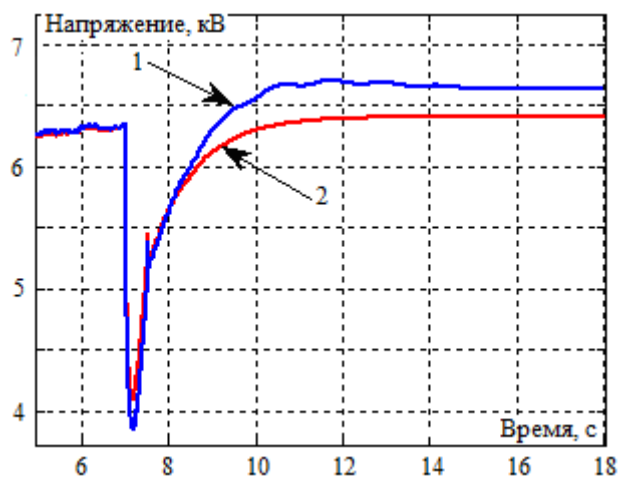


Рис. 5. Действующие значения напряжения на шинах 6 кВ: 1 – без вариации настроек регуляторов; 2 – с использованием нечеткого регулятора



Рис. 7. Осциллограммы скорости ротора СГ при кратковременном КЗ: 1 – без вариации настроек АРВ и АРС; 2 – с использованием нечеткого регулятора



Рис. 6. Отклонение скорости вращения ротора генератора: 1 – без вариации настроек регуляторов (время переходного процесса  $t_p=10$  с); 2 – с использованием нечеткого регулятора ( $t_p=4$  с)

Кроме того, анализировались переходные процессы, обусловленные возникновением трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах 6 кВ, которое отключалось через 0,5 с по сигналам релейной защиты. Предполагалось, что в исходном режиме включена ВПТ и питание нетяговых потребителей осуществлялось от ТП1 и установки РГ (рис. 2). Полученные временные зависимости скорости ротора СГ показаны на рис. 7, из которого видно, что изменение настройки регуляторов обеспечивает устойчивую работу в аварийном режиме.

### III. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ УСТАНОВКИ РГ

Применение нейросетевых регуляторов [18] позволяет учитывать специфические особенности систем электроснабжения железных дорог, а именно: многорежимность и динамичность; возможность возникновения отказов и аварий, а также уникальных и нестандартных ситуаций; неосуществимость одновременного управления всеми устройствами, влияющими на режим СЭЖД.

Эти особенности можно учесть на основе следующих свойств искусственных нейронных сетей (ИНС): обучение дает им способность к самостоятельному принятию верных решений; имеется возможность прогнозирования поведения системы; выполняется адаптация к изменению свойств объекта управления и внешней среды. ИНС характеризуется высокой степенью устойчивости к повреждению собственных элементов и пригодностью для синтеза эффективных регуляторов.

Модель СЭЖД с нейросетевыми регуляторами, реализующими функции АРВ и АРС для схемы, аналогичной показанной на рис. 2, но включающей одну ТП, была также выполнена в среде MATLAB. Результаты моделирования работы при кратковременном удаленном трехфазном КЗ в сравнении с типовыми ПИД регуляторами представлены на рис. 8 и 9.

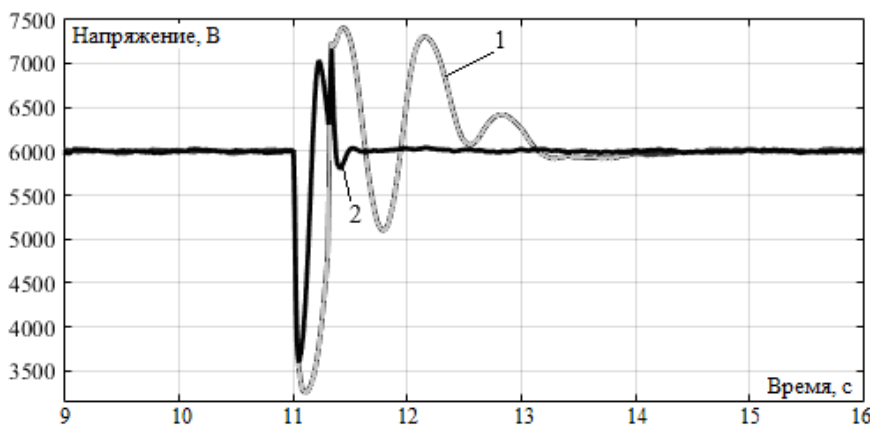


Рис. 8. Действующие значения напряжения СГ при удаленном трехфазном КЗ длительностью 0,3 с: 1 – применение типовых АРВ и АРС ( $t_p=2,5$  с); 2 – применение нейросетевых АРВ и АРС ( $t_p=0,5$  с)



Рис. 9. Отклонение скорости ротора генератора при удаленном трехфазном КЗ длительностью 0,3 с: 1 – применение типовых АРВ и АРС (перерегулирование  $\sigma=2,5\%$ ,  $t_p=3$  с); 2 – применение АРВ и АРС на основе обученных нейронных сетей ( $\sigma=0,8\%$ ,  $t_p=2,5$  с)

Результаты моделирования показали достаточно высокую эффективность нейросетевых АРВ и АРС. По сравнению с типовыми регуляторами при использовании нейросетевых устройств уменьшалось время переходного процесса для напряжения и скорости ротора, на 1,7 % снижалось перерегулирование скорости ротора СГ при удаленном кратковременном трехфазном КЗ (рис. 8 и 9).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены интеллектуальные технологии управления установками распределенной генерации, предназначенными для электроснабжения нетяговых потребителей. Предложена нечеткая система управления настройками автоматических регуляторов установок РГ, работающих на базе СГ. Определение оптимальных настроек АРВ и АРС осуществлялось с помощью генетического алгоритма.

Приведены результаты моделирования нейросетевых регуляторов, позволяющих наиболее адекватно учитывать специфические особенности систем электроснабжения железных дорог.

Результаты моделирования показали, что на основе интеллектуальных технологий управления установками РГ возможно получить следующие положительные эффекты:

- повышение точности регулирования;
- улучшение качественных показателей процессов управления за счет снижения времени переходного процесса и уменьшения величин перерегулирования;
- повышение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies, IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009, no.3(2), pp. 16–23.

[2] Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013, <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>

[3] Bernd M.B., Zbigniew A.S. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.

[4] Wang S., Wu Z., Su A., Jin S., Xia Y. and Zhao D., Reliability Modeling and Simulation of Cyber-Physical Power Distribution System Considering the Impacts of Cyber Components and Transmission Quality, 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018, pp. 6166-6171, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483971

[5] Lin D., Liu Q., Li Z., Zeng G., Wang Z., Yu T., Zhang J. Elaborate Reliability Evaluation of Cyber Physical Distribution Systems Considering Fault Location, Isolation and Supply Restoration Process, in IEEE Access, vol. 8, pp. 128574-128590, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007477

[6] Buason P., Choi H., Valdes A. and Liu H.J. Cyber-Physical Systems of Microgrids for Electrical Grid Resiliency, 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), 2019, pp. 492-497, doi: 10.1109/ICPHYS.2019.8780336

[7] Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010, 223 p.

[8] Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, no.39, pp.748-764.

[9] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.H. Reduction in microgrids voltage dips based on power accumulators and controlled distributed generation plants, International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), IEEE Conference Publications, 2019, pp.24-28, <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877687>

[10] Suslov K.V., Shushpanov I.N., Buryanina N.A., Ilyushin, P.V. Flexible power distribution networks: New opportunities and applications, Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS), 2020, pp. 57-64, <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>

[11] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Network clusters in the electricity supply systems of railways. Irkutsk: ISTU, 2015. 205 p.

[12] Saleh M.S., Althaibani A., Esa Y., Mhandi Y., Mohamed A.A. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts, in Proc. 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), pp. 195-200.

[13] Sikorski T. and Rezmer J. Distributed Generation and Its Impact on Power Quality in Low-Voltage Distribution Networks, Power Quality Issues in Distributed Generation, Dr. Jaroslaw Luszcz (Ed.), InTech, 2015, DOI: 10.5772/61172

[14] Varsek A., Urbacic T., Filipic B. Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning, IEEE Trans. Sys. Man and Cyber., 1993, vol. 23, no. 5, pp. 1330-1339.

[15] Slavov T., Roeva O. Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control, Electronic journal: WSEAS Transactions on Systems, 2012, vol. 11, no.7, pp. 223-233.

[16] Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization, Telkomnika, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524-1530.

[17] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm, 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE Conference Publications. 2016, pp. 1-6.

[18] Kennedy D.C., Quintana V.H. Neural Network Regulators for Synchronous Machines, IFAC Proceedings Volumes, 1993, vol. 26, Part 4, pp. 731-736, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)48566-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)48566-1)

[19] Bhim Singh, Gaurav Kumar Kasal, Neural network-based voltage regulator for an isolated asynchronous generator supplying three-phase four-wire loads, Electric Power Systems Research, 2008, vol. 78, pp. 985-994, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.07.005>

[20] Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H., Tran D.H. Fuzzy Controller of Rotation Angle of Blades of Horizontal-Axial Wind Power Generation Plant. In: Murgul V., Pasetti M. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, vol. 983. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8\\_88](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_88)

[21] Adolfo Perusquia, Wen Yu, Identification and optimal control of nonlinear systems using recurrent neural networks and reinforcement learning: An overview, Neurocomputing, 2021, vol. 438, pp. 145-154, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.01.096>