

Определение влияния параметров системы нечеткого логического вывода на точность построения модели установки распределенной генерации

К.Е. Короткова^а, А.Д. Ульянов^б

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а kseniakorotkovs@yandex.ru, ^б coberul@gmail.com

^а <https://orcid.org/0009-0009-8937-9603>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-4776-5030>

Статья поступила 30.10.2023, принята 13.11.2023

В настоящее время одним из самых быстро развивающихся направлений в электроэнергетике является использование установок распределенной генерации (РГ). Разработка цифровых двойников (ЦД) установок РГ решает актуальные задачи диагностики, прогнозирования поведения и управления в режиме реального времени. Использование системы нечеткого логического вывода является одним из методов построения ЦД. В данной работе показано влияние различных параметров системы нечеткого логического вывода на точность построения нечеткой модели «вход – выход» отдельной связи установки РГ. В качестве примера рассмотрена компьютерная модель турбогенераторной установки.

Ключевые слова: установка распределенной генерации, система нечеткого логического вывода, нечеткая модель, среднеквадратичное отклонение, методы дефаззификации, моделирование.

Determining the influence of fuzzy logical inference system parameters on the accuracy of constructing a model of a distributed generation installation

K.E. Korotkova^а, A.D. Ulyanov^б

Bratsk State University; 40, Makarenko, Bratsk, Russia ^а kseniakorotkovs@yandex.ru, ^б coberul@gmail.com

^а <https://orcid.org/0009-0009-8937-9603>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-4776-5030>

Received 30.10.2023, accepted 13.11.2023

Currently, one of the fastest growing areas in the electric power industry is the use of distributed generation units. The development of digital twins of generation units installations solves the actual problems of diagnostics, forecasting behavior and management in real time. Using a fuzzy inference system is one of the methods of building a data center. This paper shows the influence of various parameters of a fuzzy logical inference system on the accuracy of constructing a fuzzy “input-output” model of a separate connection of a distributed generation installation. As an example, a computer model of a turbo generator set is considered.

Keywords: distributed generation installation, fuzzy inference system, fuzzy model, standard deviation, defuzzification methods, modeling.

Введение. Одним из актуальных направлений современной электроэнергетики является использование установок распределенной генерации (РГ), работающих на возобновляемых источниках энергии и находящихся в непосредственной близости от потребителей электроэнергии [1–5].

Ввиду цифровизации электроэнергетики [6; 7], актуальны задачи разработки цифровых двойников [8; 9] элементов электроэнергетических систем и сетей [10], в том числе установок РГ [11; 12].

Диагностика, прогноз поведения и управление физическими установками РГ в режиме реального времени — данные задачи позволяют использовать технологии ЦД.

Существуют различные методы построения цифровых двойников: методы математической физики; нейронные сети [13; 14]; технологии машинного обучения [15]; системы нечеткого логического вывода [11; 12] и др.

Данная работа позволяет определить влияние параметров системы нечеткого логического вывода на точность построения нечеткой модели «вход – выход» отдельной связи установки РГ. Также производится сравнение экспериментальных данных компьютерной модели установки РГ [16], реализованной в системе *MatLab*, с данными, полученными с использованием построенной нечеткой модели.

Описание установки РГ. Установкой РГ в данной работе является синхронный генератор малой мощности, ротор которого приводится во вращение с помощью тепловой турбины [17]. В состав рассматриваемой установки РГ (рис. 1), также входят тиристорный возбудитель, автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и скорости (АРС), в которых реализованы пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) законы [18].

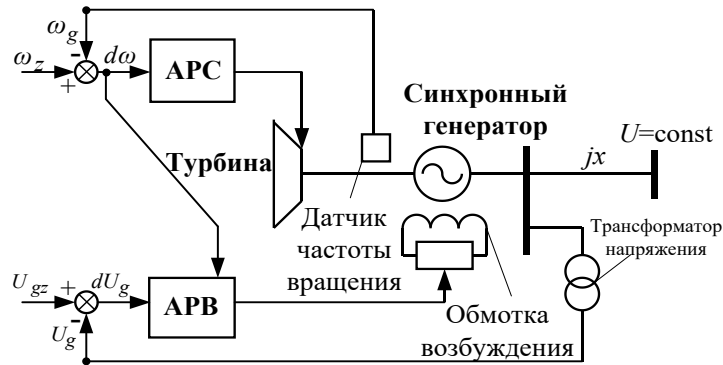


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления АРВ и АРС установки РГ: ω_z, ω_g — заданное и текущее значения скорости вращения ротора генератора; $d\omega$ — отклонение скорости вращения ротора от заданного значения; U_{gz}, U_g — заданное и текущее значения напряжения генератора; dU_g — отклонение напряжения генератора от заданного значения; P_g, Q_g — активная и реактивная мощности генератора

Для построения нечетких моделей используются экспериментальные данные о напряжении генератора U_g , напряжении возбуждения U_f , токе генератора I_g , механической мощ-

ности на валу синхронной машины P_m , активной и реактивной мощности генератора P_g и Q_g , скорости вращения ротора ω_m , регулятора скорости и возбуждения V_{asr} и V_{avr} .

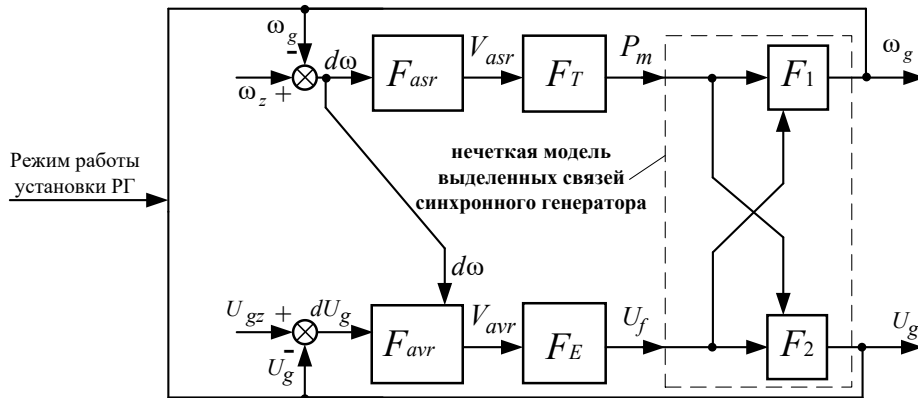


Рис. 2. Структура цифрового двойника установки РГ: V_{asr}, V_{avr} — сигналы управления от АРС и АРВ; P_m — механическая мощность на валу турбины; U_f — напряжение на обмотке возбуждения генератора; F_{asr} — нечеткая модель АРС; F_{avr} — нечеткая модель АРВ; F_T — нечеткая модель турбины; F_E — нечеткая модель возбудителя генератора; F_1 и F_2 — нечеткие модели выделенных связей генератора

Нечеткие модели строились следующими парами данных «вход – выход»:

1. Вход: P_m — механическая мощность; Выход: ω_m — скорость вращения ротора.
2. Вход: U_f — напряжение возбуждения; Выход: U_g — напряжение генератора.
3. Вход: P_m — механическая мощность; Выход: P_g — активная мощность генератора.
4. Вход: U_f — напряжение возбуждения; Выход: Q_g — реактивная мощность генератора.
5. Вход: V_{asr} — регулятор скорости; Выход: P_m — механическая мощность.
6. Вход: V_{avr} — регулятор возбуждения; Выход: U_f — напряжение возбуждения.
7. Вход: P_m — механическая мощность; Выход: I_g — ток генератора.

Описание модели в MatLab. Рассматриваемая установка РГ представляется в виде цифрового двойника (ЦД), в котором

применяется представление объекта в виде многосвязной структуры, некоторые входные и выходные параметры и связи которой формируются на основе экспериментальных данных.

Схема модели построена в пакете пакетов Simulink и SimPowerSystems программной среды MatLab представлена на рис. 3.

Паровая турбина турбины (блок Steamturbine на рис. 3) имеет следующую структурную схему (рис. 4) и характеризуется следующей передаточной функцией:

$$W = \frac{0,2}{0,4s + 1} + \frac{0,2}{0,8s^2 + 4,2s + 1}$$

Тиристорный возбудитель (блок Excitation System на рис. 3) моделировался аperiodическим звеном 1-го порядка, характеристики которого представлены на рис. 5.

Турбогенератор моделировался стандартным блоком Synchronous Machine (рис. 6) пакета SymPowerSystems.

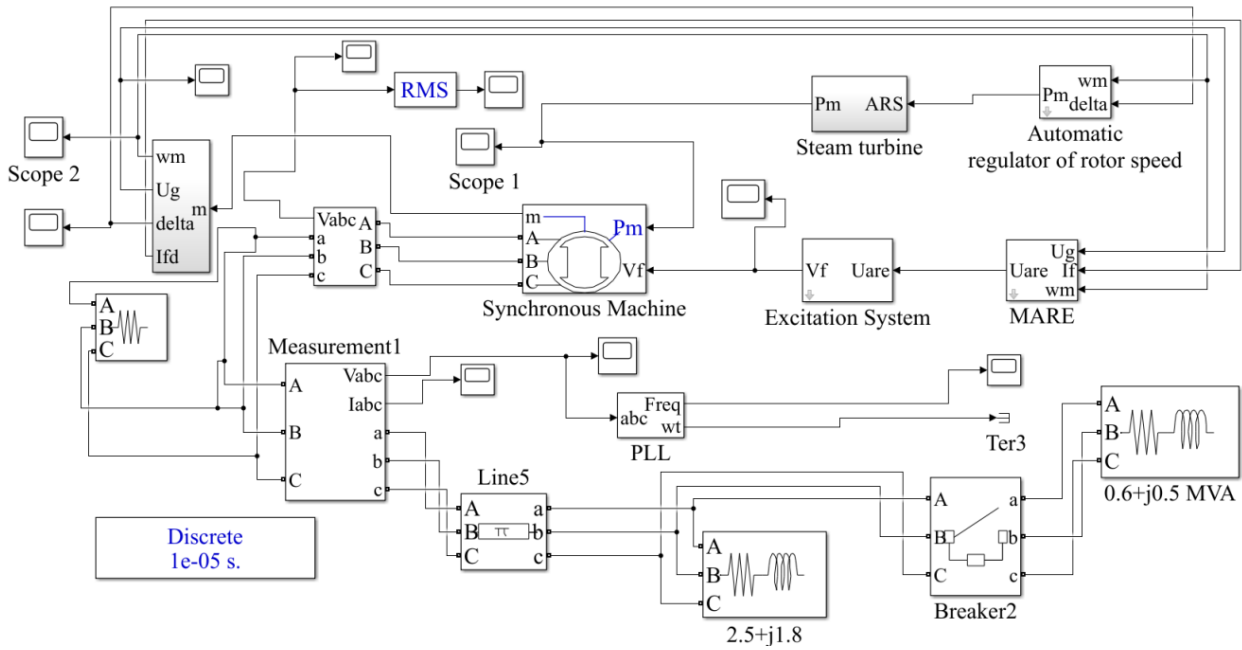


Рис. 3. Схема исследуемой модели установки РГ в MatLab

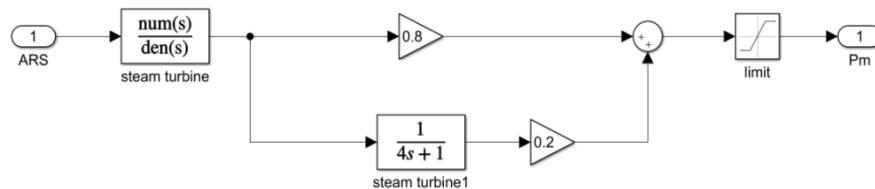


Рис. 4. Структурная схема паровой турбины

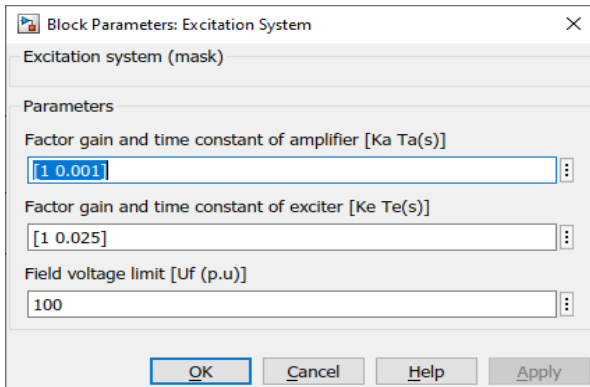


Рис. 5. Характеристики тиристорного возбудителя

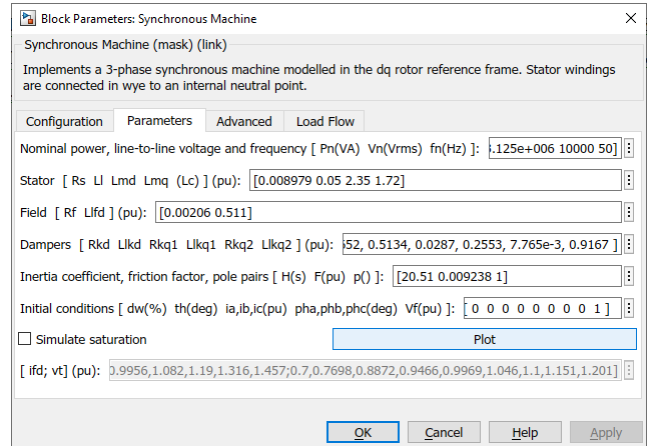


Рис. 6. Характеристики турбогенератора

В данной установке РГ использованы прогностические АРВ и АРС (блоки *MARE* и *Automatic regulator of rotor speed* на рис. 3), описание моделей которых представлено в работах [19; 20].

В исходном режиме турбогенератор работал на нагрузку $2,5+j1,8$ МВ·А и при подключении через 10 с дополнительной нагрузки мощностью $0,6+j0,3$ МВ·А через линию электропередачи длиной 1,8 км (блок *Line* на рис. 3).

Экспериментальные данные получены в результате работы установки РГ в аналогичном режиме. А также в режиме короткого замыкания (КЗ) (блок *Three-Phase Fault1* на рис. 3).

Результаты моделирования. Во время исследования компьютерной модели турбогенераторной установки был рассмотрен метод формирования нечеткой модели на основе экспериментальных данных в следующих режимах:

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

Для нахождения оптимальных настроек ЦД и получения параметров построения нечеткой модели, были рассмотрены различные комбинации моделей:

1. Функция реализации алгоритма нечеткого логического вывода:

– *Anfis* — генерирует нечеткую систему вывода (FIS) *Sugeno* одного выхода и настраивает системные параметры с помощью заданных обучающих данных ввода/вывода. Объект FIS автоматически сгенерирован с помощью разделения сетки. Алгоритм настройки использует комбинацию наименьших квадратов и методов градиентного спуска обратной связи, чтобы смоделировать обучающий набор данных.

– *Genfis3* — генерирует FIS, использующий нечеткие с-средние-значения (FCM), кластеризирующиеся путем из-

влечения ряда правил, который моделирует поведение данных. Функция требует отдельных наборов входных и выходных данных. Метод экстракции правила сначала использует FCM функции, чтобы определить количество правил и функций принадлежности для антецедентов и следствий.

2. Объединение FIS данных полученных при моделировании работы установки РГ на выделенную нагрузку в переходном режиме, вызванном подключением дополнительной нагрузки и FIS данных полученных при моделировании в режиме КЗ.

3. Изменение диапазона входных и выходных переменных FIS построенной на данных при подключении нагрузки, на диапазон данных режима КЗ и наоборот.

4. Изменение данных нечеткого логического вывода (функция *evalfis*).

5. Изменение количества правил при построении FIS в диапазоне от 10 до 400. Также было произведено моделирование при 1 000 правил, но из-за большого времени проведения моделирования 1 000 правил было решено не использовать.

В качестве средства оценки близости нечеткой модели с экспериментальными данными было принято среднее квадратичное отклонение (СКО), которое в идеальных условиях должно быть близко к нулю.

Среднее квадратичное отклонение вычисляется путем нахождения суммы квадратов отклонений каждого значения от

среднего значения, деленной на количество значений в выборке, а затем извлечения квадратного корня из этой суммы:

$$\sigma = \sqrt{(\sum (x - \mu)^2) / N},$$

где σ — среднее квадратичное отклонение Σ ; сумма x , значение μ , среднее значение N — количество значений в выборке.

По результатам экспериментов с использованием алгоритма нечеткого логического вывода типа Сугено была получена модель «вход – выход», определяющая зависимость скорости вращения ротора генератора ω_m от механической мощности генератора P_m .

Функция реализации алгоритма нечеткого логического вывода *genfis3*, использование данных, полученных при моделировании работы установки РГ в режиме КЗ, нечеткий логический вывод на основе данных при подключении дополнительной нагрузки, диапазон входных переменных данных кз, диапазон выходных переменных данных подключения дополнительной нагрузки при 400 правилах. Среднее квадратичное отклонение отклика нечеткой модели от экспериментальных данных составило $7,08 \cdot 10^{-5}$. Результаты сравнения экспериментальных данных и полученной нечеткой модели показаны на рис. 7.

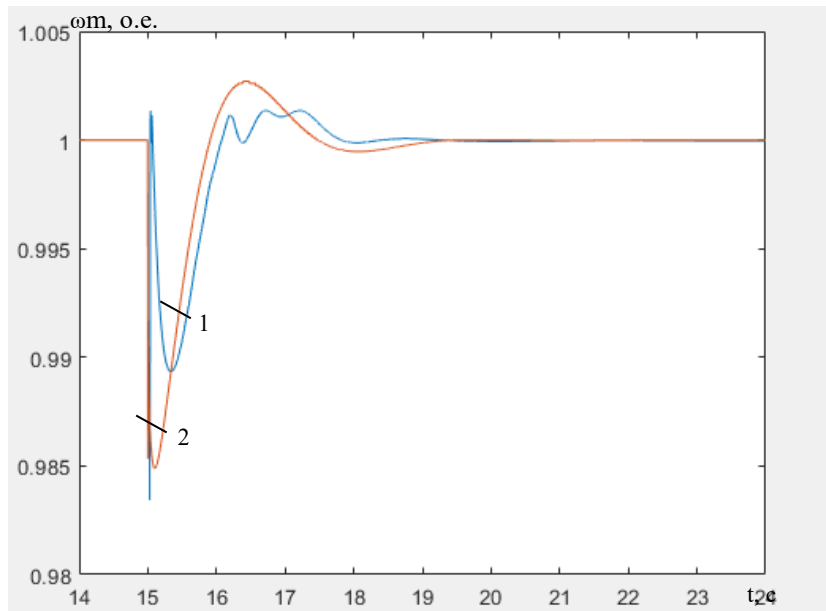


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных (1) и отклика нечеткой модели (2)

Заключение. На примере компьютерной модели турбогенераторной установки рассмотрен метод формирования нечеткой модели на основе экспериментальных данных. Метод может использоваться для построения цифровых двойников отдельных связей установки РГ.

На основе результатов расчета и моделирования можно сформулировать следующие выводы:

1. Построена модель установки РГ представляется в виде цифрового двойника (ЦД), в котором применяется представление объекта в виде многосвязной структуры.

2. Произведено сравнение различных комбинаций моделей для нахождения оптимальных настроек ЦД и получения параметров построения нечеткой модели.

3. Получены оптимальные настройки нечеткой модели установки РГ.

Литература

1. Pruggler W., Kupzog F., Bletterie B., Helfried B. Active Grid Integration of Distributed Generation Utilizing Existing Infrastructure more Efficiently - an Austrian Case Study, in Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European, May 2008. P. 1-6.
2. Lopes J., Hatzigiorgiou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, Electric Power Systems Research. 2007. V. 77, № 9. P. 1189-1203.

3. Ehsan A., Yang Q. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // Appl. Energ. 2018. V. 210. P. 44-59.
4. Pilavachi P.A. Mini - and micro-gas turbines for combined heat and power, Appl. Therm. Eng. 2002. V. 22, № 18. P. 2003-2014.
5. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.

6. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе: материалы Всерос. науч.-практической конф. (12 апр. 2019 г.). М., 2020. С. 105-111.
7. Воротницкий В.Э. Цифровизация в экономике и электроэнергетике // Энергетик. 2019. № 12. С. 6-14.
8. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - LLC, 2014. 7 p.
9. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
10. Tomin N., Kurbatsky V., Borisov V., Musalev S. Development of Digital Twin for Load Center on the Example of Distribution Network of an Urban District // E3S Web Conf. 209 02029 (2020).
11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Korotkova K.E. Digital Twin of the Distributed Generation Plant // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 976. P. 1-7.
12. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации // Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2020. № 13 (6). С. 677-689.
13. Флах П. Машинное обучение. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.
14. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Малихина Г.Ф. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 3. С. 521-532.
15. Lazovskaya T., Tarkhov D. Multilayer neural network models, based on grid methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158, № 1. P. 012061.
16. Булатов Ю.Н., Короткова К.Е. Определение влияния параметров системы нечеткого логического вывода на точность построения модели установки распределенной генерации // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2022. Т. 1. С. 77-82.
17. Булатов Ю.Н., Короткова К.Е. Применение технологий цифровых двойников в энергетике // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 103-112.
18. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation, Far East // Journal of Electronics and Communications. 2017. № 17 (5). P. 1127-1140.
19. Jin Wei, Kundur D. Two-tier hierarchical cyber-physical security analysis framework for smart grid // IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 22-27, 2012. 5 p.
20. Khaitan S.K., McCalley J.D. Cyber physical system approach for design of power grids // IEEE PES General Meeting, Vancouver, Canada, July 21-25, 2013. 5 p.
- A review of drivers, challenges and opportunities, Electric Power Systems Research. 2007. V. 77, № 9. P. 1189-1203.
3. Ehsan A., Yang Q. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // Appl. Energ. 2018. V. 210. P. 44-59.
4. Pilavachi P.A. Mini - and micro-gas turbines for combined heat and power, Appl. Therm. Eng. 2002. V. 22, № 18. P. 2003-2014.
5. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
6. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12 apr. 2019 g.). M., 2020. P. 105-111.
7. Vorotnickij V.E. Digitalization in the economy and electric power industry // Energetik. 2019. № 12. P. 6-14.
8. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - LLC, 2014. 7 p.
9. Prohorov A., Lysachev M. Digital twin. Analysis, trends, world experience. M.: ООО «Al'yansPrint», 2020. 401 p.
10. Tomin N., Kurbatsky V., Borisov V., Musalev S. Development of Digital Twin for Load Center on the Example of Distribution Network of an Urban District // E3S Web Conf. 209 02029 (2020).
11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Korotkova K.E. Digital Twin of the Distributed Generation Plant // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 976. P. 1-7.
12. Bulatov YU.N., Kryukov A.V. Algorithms for constructing a digital twin of a distributed generation installation // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. № 13 (6). P. 677-689.
13. Flah P. Machine learning. M.: DМК Press, 2015. 400 p.
14. Vasil'ev A.N., Tarhov D.A., Malykhina G.F. Methods of creating digital doubles based on neural network modeling // Modern Information Technologies and IT-Education. 2018. V. 14, № 3. P. 521-532.
15. Lazovskaya T., Tarkhov D. Multilayer neural network models, based on grid methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158, № 1. P. 012061.
16. Bulatov YU.N., Korotkova K.E. Determination of the influence of the parameters of the optimized fuzzy model on the accuracy of the construction of the RG installation // Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2022. V. 1. P. 77-82.
17. Bulatov YU.N., Korotkova K.E. Application of digital twin technologies in the energy sector // Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2021. V. 1. P. 103-112.
18. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation, Far East // Journal of Electronics and Communications. 2017. № 17 (5). P. 1127-1140.
19. Jin Wei, Kundur D. Two-tier hierarchical cyber-physical security analysis framework for smart grid // IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 22-27, 2012. 5 p.
20. Khaitan S.K., McCalley J.D. Cyber physical system approach for design of power grids // IEEE PES General Meeting, Vancouver, Canada, July 21-25, 2013. 5 p.

References

1. Pruggler W., Kupzog F., Bletterie B., Helfried B. Active Grid Integration of Distributed Generation Utilizing Existing Infrastructure more Efficiently - an Austrian Case Study, in Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European, May 2008. P. 1-6.
2. Lopes J., Hatzigiorgiou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: