

УДК 621.311

Иван Сергеевич Екимов

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», аспирант инженерной школы цифровых технологий, Россия, Ханты-Мансийск, e-mail: ekimov_is@mail.ru

Алёна Александровна Шувалова

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», кандидат технических наук, доцент политехнической школы, Россия, Ханты-Мансийск, e-mail: alena_shuvalova_360@mail.ru

Владимир Иосифович Полищук

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», доктор технических наук, профессор политехнической школы, Россия, Ханты-Мансийск, e-mail: polischuk_vi@mail.ru

Модификация методики определения предельных значений пропускной способности сетевых элементов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Развитие цифровых технологий и внедрение в систему оперативно-диспетчерского менеджмента интеллектуальных методов управления энергосистемой значительно повышает эффективность управления электроэнергетическими режимами. В то же время новые технологии ужесточают требования к качеству, скорости получения и обработки информации, в особенности в предаварийных, аварийных, послеаварийных и вынужденных режимах работы энергетической системы. Так, для эффективного управления в вынужденном режиме, т.е. при нагрузке выше номинальных параметров, но ниже предельно допустимых, необходимы актуальные данные о фактическом значении диапазона пропускной способности линии электропередачи с учетом имеющихся для конкретного времени ограничений. Цель исследования состоит в апробации искусственной нейронной сети для быстродействующей методики актуализации данных о значении предельной пропускной способности сетевых элементов.

Материалы и методы. Исследование выполнено с использованием методов оптимизации, имитационного моделирования режимов работы электрических сетей, искусственных нейронных сетей и методов оценки состояния электрической системы.

Результаты. Разработана методика адаптивной оценки пропускной способности сетевых элементов. Синтезирована система автоматизированного управления перетоками мощности в вынужденном режиме. Установлено, что применение искусственной нейронной сети значительно повышает быстродействие расчета фактического значения пропускной способности за счет использования измерений на текущий момент времени. Точность определения допустимого перетока приемлема и корректируется путем настройки весовых коэффициентов нейронной сети.

Выводы. Методика определения фактического значения пропускной способности сетевого элемента на базе искусственной нейронной сети является эффективным средством точного расчета пропускной способности в текущий момент времени.

Ключевые слова: пропускная способность сетевых элементов, искусственная нейронная сеть, методы оптимизации, допустимый переток мощности, оперативное диспетчерское управление, вынужденный режим работы энергосистемы, имитационное моделирование

Ivan Sergeevich Ekimov

Yugra State University, Post-graduate Student of Engineering School of Digital Technologies, Russia, Khanty-Mansiysk, e-mail: zyfd.ekimov@mail.ru

Alena Aleksandrovna Shuvalova

Yugra State University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Polytechnic School, Russia, Khanty-Mansiysk, e-mail: alena_shuvalova_360@mail.ru

Vladimir Iosifovich Polishchuk

Yugra State University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Polytechnic School, Russia, Khanty-Mansiysk, e-mail: polischuk_vi@mail.ru

Modification of the methodology to determine the maximum values of transfer capability of network elements

Abstract

Background. The development of digital technologies and the introduction of intelligent technique of energy system control into the operational dispatch management system significantly increases the efficiency of control of electric power

modes. At the same time, new technologies are tightening the requirements for the quality, speed of receiving and processing information, especially in pre-emergency, emergency, post-emergency and forced modes of operation of the energy system. Thus, for effective control in a forced mode, i.e. when the load is higher than the nominal parameters, but lower than the maximum admissible limits, current data on the actual value of the transmission line capacity range is required considering the restrictions for a specific time. The purpose of the study is to test an artificial neural network for a high-speed method of updating data on the value of the maximum transfer capability of network elements.

Materials and methods. The study has been carried out using optimization methods, simulation of electrical network operation modes, artificial neural networks and methods for operating mode estimation.

Results. A method for adaptive capacity assessment has been developed. An automated control system for power flows in forced mode has been synthesized. It has been established that the use of an artificial neural network significantly increases the speed of calculating the actual value of transfer capacity due to the use of measurements for the time being. The accuracy of the permissible flow is acceptable and is configured by adjusting the weight coefficients of the neural network.

Conclusion: The method to determine the actual value of the transfer capability of a network element based on an artificial neural network is an effective means to accurately calculate the transfer capability for the time being.

Key words: transfer capability of network elements, artificial neural network, optimization methods, permissible power flow, operational dispatch control, forced mode of operation of the power system, simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.044-049

Введение. В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации¹ до 2035 года определена важность совершенствования системы оперативно-диспетчерского управления электроэнергетической системой (ЭЭС). Одним из важнейших направлений развития оперативно-диспетчерской службы в условиях повсеместного внедрения цифровизации стала разработка новых методов обработки измерительной и телеметрической информации, что позволяет вырабатывать управляющие воздействия в режиме реального времени [1]. Для этого создаются цифровые подстанции, совершенствуется арсенал технических средств противоаварийной автоматики, автоматического диспетчерского управления и ужесточаются требования к скорости принятия управленческих решений оперативно-диспетчерского персонала.

При управлении утяжеленными режимами, а к таким, как правило, можно отнести предаварийный, аварийный, послеаварийный и вынужденный режимы, диспетчеру требуется информация не только о текущих измеряемых параметрах, но и актуальные точные данные о предельных значениях пропускной способности сетевых элементов.

Особенно строгим является требование к скорости принятия решений для вынужденного режима, вследствие ограниченности времени на выработку и реализацию необходимых управленческих решений. В данном режиме загрузка в контролируемом сечении превышает номинальные значения, хотя и ниже максимального-допустимого предела [2], что позволяет ограниченный период времени работать с перегрузкой на линиях электропередачи (ЛЭП).

Однако, поскольку оперативная обстановка является быстроменяющейся, для эффективного управления диспетчеру требуется информация о значении пропускной способности ЛЭП на текущий момент времени.

Существующие для определения пропускной способности линии детерминированный [3] и вероятностный [4, 3, 5] методы позволяют достаточно точно рассчитывать значения пропускной способности [6] с учетом всех имеющихся ограничений. Их общим недостатком является объемность и сложность проводимых вычислений, что затрудняет актуализацию в режиме реального времени значений пропускной способности сетевых элементов. В силу широкого распространения в электроэнергетике цифровых технологий научно-техническая задача повышения быстродействия алгоритмов расчета пределов пропускной способности сетевых элементов путем использования искусственных нейронных сетей является актуальной.

Целью исследования является апробация искусственной нейронной сети для методики быстродействующей актуализации данных о значении предельной пропускной способности сетевых элементов.

Материалы и методы. Анализ научных работ по теме исследования [7–12] выявил, что наиболее перспективной для определения пропускной способности в реальном времени является методика адаптивной оценки пропускной способности (АОПС).

Вследствие ограниченности времени на выработку управляющих воздействий методику АОПС наиболее перспективно применять для оперативного управления в вынужденном режиме работы сетевых элементов. При этом возможно создание автоматизированной системы управления [2, 13], где в качестве входных данных используется оперативная информация, полученная от системы измерения

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 №1523-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4lgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения 25.01.2024).

(оперативно-измерительных комплексов (ОИК), автоматизированных систем учета (АСУ) или системы телеизмерений (ТИ)), а также заданное значение пропускной способности линии, намеренно превышающее значение реальной пропускной способности (P_{\max} – максимально-допустимый переток мощности (МДП)). Входные данные можно представить в виде вектора измерений:

$$\bar{X} = [P_i; Q_i; P_{ij}; Q_{ij}; U; I; \delta], \quad (1)$$

где P_i, Q_i – активная и реактивная мощность в узле; P_{ij}, Q_{ij} – перетоки активной и реактивной мощности в линиях; U – напряжение в узле; δ – фаза напряжения в узле.

Блок-схема системы автоматизированного управления перетоками мощности в вынужденном режиме состоит из 4 основных блоков (рис. 1).

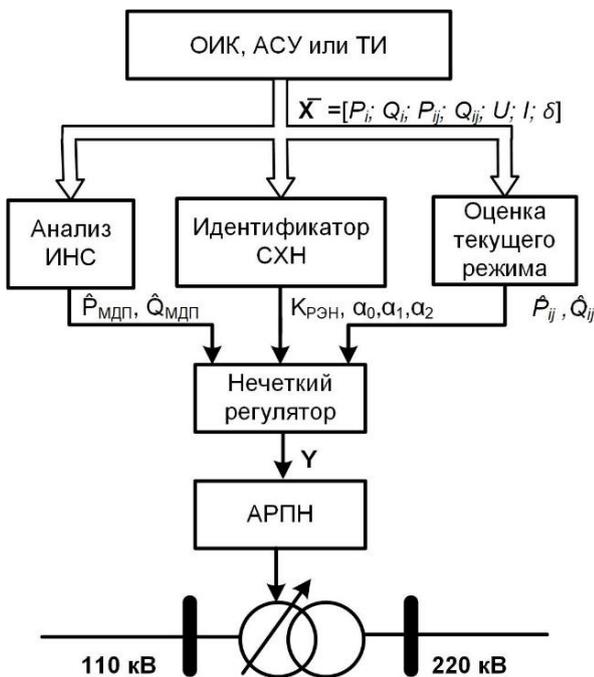


Рис. 1. Блок-схема работы система автоматизированного управления перетоками мощности в вынужденном режиме

1. АОПС – блок анализа МДП, базирующийся на искусственной нейронной сети (ИНС). При этом используется ИНС Кохонена, состоящая из двух слоев нейронов. Количество входных нейронов равно количеству входных параметров. Количество выходных нейронов равно количеству классов, на которые классифицируются рассматриваемые режимы [14].

С использованием вектора входных данных \bar{X} при помощи ИНС проводится классификация режимов работы ЭЭС и определяются:

- текущие параметры режима;
- текущая конфигурация электрической сети;
- текущие ограничения сети.

На основе полученных данных режима ИНС выполняются следующие этапы работы:

- определение P_{\max} исходя из ограничения пропускной способности с учетом термической стойкости, статической устойчивости систем, ограничений по напряжению;
- установление ограничений регулируемых параметров режима;
- выработка результирующих значений

МДП ($\hat{P}_{\text{МДП}}, \hat{Q}_{\text{МДП}}$).

2. Блок идентификации статических характеристик нагрузки (СХН), базирующийся на подпрограмме «Идентификатор СХН», производится при помощи программы «Сопоставление и анализ статических характеристик нагрузки» [13].

3. Блок «оценки текущего режима», в котором определяется текущее значение перетока мощности в линии.

4. Нечеткий регулятор, который выполняет функцию формирования управляющего воздействия на систему (в данном примере на контроллер РПН или БСК), которое изменяет необходимый параметр, в данном случае напряжение. Нечеткий регулятор реализован через программу «Система управления перетоками активной мощности по линиям электропередачи в режиме перегрузки» [15].

В целях проверки адекватности работы методики АОПС проведен расчет пропускной способности ЛЭП на тестовой схеме ЭЭС с 7 узлами (рис. 2).

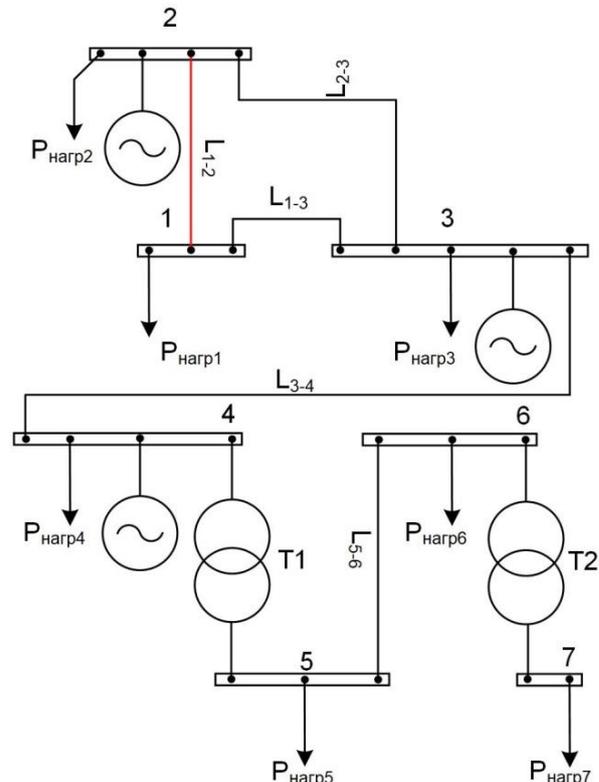


Рис. 2. Тестовая схема 7-узловой ЭЭС

Характеристика схемы:

- 3 уровня напряжения (330, 500, 750 кВ)
- и две трансформаторные связи;
- 3 генераторных узла (2, 3, 4);
- 4 нагрузочных узла (1, 5, 6, 7).

Контрольными приняты линии L₂₋₃ и L₁₋₃. Для создания вынужденного режима рассматривалась ситуация с аварийным отключением линии L₁₋₂.

Для расчета режима работы ЭЭС по предложенной тестовой модели (рис. 2) в программном комплексе MathLab сформирована имитационная модель (рис. 3).

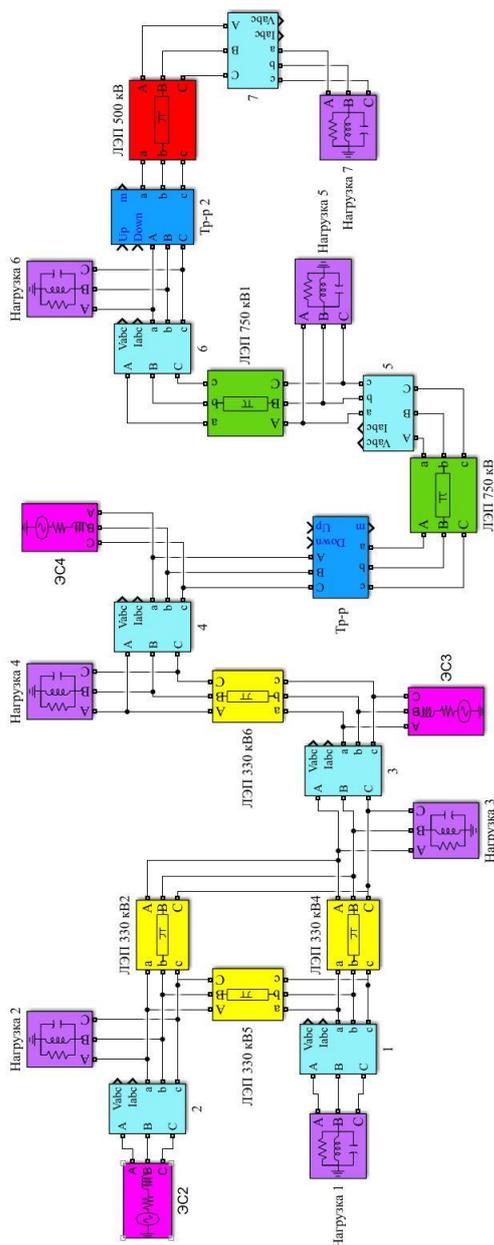


Рис. 3. Имитационная модель тестовой 7-узловой схемы

Результаты. Адекватность методики АОПС проверялась на 7-узловой тестовой модели (рис. 2) путем сравнения значений расче-

та пропускной способности, полученных при помощи методики АОПС и метода непрерывного утяжеления. Для этого моделировалась аварийная ситуация с отключением линии L₁₋₂ и повышением перетока мощности по линиям L₁₋₃ и L₂₋₃. Значения пропускной способности сведены в таблицу.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что разница пропускной способности для контролируемых сечений (L₂₋₃ и L₁₋₃) между значениями, полученными методом АОПС и методом непрерывного утяжеления, составляет ± 5 МВт (0,56 %).

Значения пропускной способности, полученные при моделировании

| Метод/методика | Максимальное значение перетока мощности, МВт | |
|------------------------|--|-------|
| | L 1-3 | L 2-3 |
| АОПС | 445,7 | 455,7 |
| Непрерывное утяжеление | 441,8 | 454,8 |

Адекватность работы системы автоматизированного управления перетоками мощности в вынужденном режиме проверялась на тестовой модели согласно [2]. В результате моделирования автоматический регулятор произвел 5 переключений РПН и снизил напряжение со 115 до 109,5 кВ. При этом переток активной мощности снизился на 0,8 МВт и перехода системы в аварийный режим удалось избежать.

Согласно нормативно-технической документации по выполнению оперативных переключений, время на выработку управляющего воздействия не должно превышать 40 мин. Введение системы автоматизированного управления перетоками мощности в вынужденном режиме позволило снизить полное время переключения до 1,5–2 мин. При этом учитывалось время работы исполнительных механизмов РПН, которое составило 10–12 с на каждой ступени регулирования.

Выводы. Сравнительный анализ предложенной модификации методики адаптивного определения максимального значения пропускной способности сетевых элементов с результатами расчета пропускной способности, полученными методом непрерывного утяжеления, показал приемлемую точность расчетов модифицированной методики, которая корректируется путем настройки весовых коэффициентов нейронной сети. При этом трудоемкость расчетов методом АОПС значительно меньше, что позволяет сократить время принятия решений диспетчером и повысить общую эффективность диспетчерского управления за счет снижения времени на выработку управляющего воздействия.

Список литературы

1. **Silva B.N., Khan M., Han K.** Футуристическое устойчивое управление энергией в интеллектуальных средах: обзор стратегий снижения пиковой нагрузки и реагирования на спрос, проблем и возможностей // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 14. – P. 5561. DOI: 10.3390/su1214556. – EDN OZXERP.

2. **Шувалова А.А., Полищук В.И.** Синтез интеллектуальной системы автоматизированного управления перетоком активной мощности по электросетевым элементам в пределах заданной пропускной способности. – Барнаул: Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2023. – 94 с. – EDN DHZPBQ.

3. **Aghaebrahimi M.R., Golkhandan R.K., Ahmadnia S.** Probabilistic calculation of total transfer capability (TTC) for power systems with wind farms using evolutionary algorithms // 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia 63 Convention Center, Seoul, 1–5 June 2015. – Seoul (Korea), 2015. P. 2135–2140.

4. **Audomvongseeree K., Yokoyama A.** Consideration of an appropriate TTC by probabilistic approach // *IEEE Transactions on Power Systems*. – February 2004. – Vol. 19, Issue 1.

5. **Li W., Wang P., Guo Z.** Определение оптимальной суммарной пропускной способности с использованием вероятностного подхода // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2006. – Vol. 21, Issue 2.

6. **Обоскалов В.П., Герасименко А.А.** Определение предела мощности, передаваемой по линии электропередачи, при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем // *Электричество*. – 2023. – № 7. – С. 6–19. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-6-19. – EDN XAJNES.

7. **Волков А.В.** Анализ реализованных в программном обеспечении подходов к автоматизации расчета МДП/АДП. Применение программного обеспечения и необходимость его развития // *Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 09–13 ноября 2015 г.* – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 79–82. – EDN VJZSIN.

8. **Interpretable Neighborhood Deep Models for Online Total Transfer Capability Evaluation of Power Systems / Zh. Wang, Ya. Zhou, Q. Guo, H. Sun** // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2022. – Vol. 37, No. 1. – P. 260–271. DOI: 10.1109/tpwrs.2021.3091710. – EDN CZRKKC.

9. **Glazunova A.M., Aksaeva E.S.** A method for total transfer capability estimation for generation of a trade-off solution on using available transfer capability of the controlled cutsets // *Energy Systems Research*. – 2018. – Vol. 1, No. 2(2). – P. 5–12. DOI: 10.25729/esr.2018.02.0001. – EDN YODPCX.

10. **Киселев А.Ю., Львов А.П., Васильев П.Ф.** Актуальные проблемы эксплуатации и способы повышения пропускной способности объектов электроэнергетики Республики Саха (Якутия) // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2024. – № 2(83). – С. 48–61. – EDN AEAXAC.

11. **Бацева Н.Л., Сухоруков В.А.** Определение допустимых перетоков мощности на основе адаптивной траектории утяжеления // *Вестник МЭИ*. – 2021. – № 6. – С. 20–30. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-20-30.

12. **Glazunova A.** Development of a Day-Ahead Demand Side Management Strategy to Improve

the Microgrid Efficiency // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, No. 9. – P. 256–261. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.045. – EDN HHOZOZ.

13. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617730 Российская Федерация. Сопоставление и анализ статических характеристик нагрузки: № 2021616764: заявл. 28.04.2021: опубл. 19.05.2021 / В.И. Полищук, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, А.А. Шувалова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

14. **Аксаева Е.С.** Методика оценивания максимально допустимого перетока активной мощности в режиме реального времени // *Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН*. Вып. 47. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2017. – С. 7–14. – EDN QHYQBF

15. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021681429 Российская Федерация. Система управления перетоком активной мощности по линии электропередачи в режиме перегрузки: № 2021680502: заявл. 10.12.2021: опубл. 21.12.2021 / В.И. Полищук, К.Ю. Постоянкова, А.В. Панкратов, А.А. Шувалова.

References

1. Silva, B.N., Khan, M., Han, K. Futuristicheskoe ustoychivoe upravlenie energiyey v intellektual'nykh sredakh: obzor strategiy snizheniya pikovoy nagruzki i reagirovaniya na spros, problem i vozmozhnostey [Futuristic Sustainable Energy Management in Smart Environments: A Review of Peak Load Shaving and Demand Response Strategies, Challenges, and Opportunities]. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 14, p. 5561. DOI: 10.3390/su1214556. EDN OZXERP.

2. Shuvalova, A.A., Polishchuk, V.I. *Sintez intellektual'noy sistemy avtomatizirovannogo upravleniya peretokom aktivnoy moshchnosti po elektrosetevym elementam v predelakh zadannoy propusknoy sposobnosti* [Synthesis of an intelligent automated control system for the flow of active power through electric grid elements within a given capacity]. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. I.I. Polzunova, 2023. 94 p. EDN DHZPBQ.

3. Aghaebrahimi, M.R., Golkhandan, R.K., Ahmadnia, S. Probabilistic Calculation of Total Transfer Capability (TTC) for Power Systems with Wind Farms using Evolutionary Algorithms. 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia 63 Convention Center, Seoul, 1–5 June, 2015. Seoul (Korea), 2015, pp. 2135–2140.

4. Audomvongseeree, K., Yokoyama, A. Consideration of an appropriate TTC by probabilistic approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, February 2004, vol. 19, issue 1.

5. Li, W., Wang, P., Guo, Z. Opredelenie optimal'noy summarnoy propusknoy sposobnosti s ispol'zovaniem veroyatnostnogo podkhoda [Determination of optimal total transfer capability using a probabilistic approach]. *IEEE Transactions on Power Systems*. May 2006, vol. 21, issue 2.

6. Oboskalov, V.P., Gerasimenko, A.A. Opredelenie predela moshchnosti, peredavaemoy po linii elektroperedachi, pri otsenke balansovoy nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem [Determination of the limit of power transmitted via a power transmission line when assessing the balance reliability of electric power systems]. *Elektrichestvo*, 2023, no. 7, pp. 6–19. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-6-19. EDN XAJHES.

7. Volkov, A.V. Analiz realizovannykh v programnom obespechenii podkhodov k avtomatizatsii rascheta MDP/ADP. Primenenie programmnogo obespecheniya i neobkhodimost' ego razvitiya [Analysis of approaches implemented in software to automate the calculation of MDP/ADP. Application of software and the need for its development]. *Trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi", Ivanovo, 09–13 noyabrya 2015 g.* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Electric power industry through the eyes of youth", Ivanovo, November 09–13, 2015]. Ivanovo, 2015, vol. 1, pp. 79–82. EDN VJZSIN.

8. Wang, Zh., Zhou, Ya., Guo, Q., Sun, H. Interpretable Neighborhood Deep Models for Online Total Transfer Capability Evaluation of Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, vol. 37, no. 1, pp. 260–271. DOI: 10.1109/tpwrs.2021.3091710. EDN CZRKKC.

9. Glazunova, A.M., Aksaeva, E.S. A method for total transfer capability estimation for generation of a trade-off solution on using available transfer capability of the controlled cutsets. *Energy Systems Research*, 2018, vol. 1, no. 2(2), pp. 5–12. DOI: 10.25729/esr.2018.02.0001. EDN YODPCX.

10. Kiselev, A.Yu., L'vov, A.P., Vasil'ev, P.F. Aktual'nye problemy ekspluatatsii i sposoby povysheniya propusknoy sposobnosti ob"ektov elektroenergetiki Respubliki Sakha (Yakutiya) [Actual problems of operation and ways to increase the capacity of electric power facilities in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Elektroen-*

ergiya. Peredacha i raspredelenie, 2024, no. 2(83), pp. 48–61. EDN AEAXAC.

11. Batseva, N.L., Sukhorukov, V.A. Opredelenie dopustimyykh peretokov moshchnosti na osnove adaptivnoy traektorii utyazheleniya [Determination of permissible power overflows based on adaptive weighting trajectory]. *Vestnik MEI*, 2021, no. 6, pp. 20–30. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-20-30.

12. Glazunova, A. Development of a Day-Ahead Demand Side Management Strategy to Improve the Microgrid Efficiency. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 9, pp. 256–261. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.045. EDN HHOZOZ.

13. Polishchuk, V.I., Pankratov, A.V., Batseva, N.L., Shuvalova, A.A. Sopostavlenie i analiz staticheskikh kharakteristik nagruzki [Comparison and analysis of static load characteristics]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM in Russia [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2021617730, 2021.

14. Aksaeva, E.S. Metodika otsenivaniya maksimal'no dopustimogo peretoka aktivnoy moshchnosti v rezhime real'nogo vremeni [Methodology for estimating the maximum allowable active power flow in real time]. *Trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN «Sistemnye issledovaniya v energetike»*. Vyp. 47 [The Works of young scientists of ISEM SB RAS "System research in the energy sector". Issue 47]. Irkutsk, 2017, pp. 7–14. EDN QHYQBF.

15. Polishchuk, V.I., Postoyankova, K.Yu., Pankratov, A.V., Shuvalova, A.A. Sistema upravleniya peretokom aktivnoy moshchnosti po linii elektroperedachi v rezhime peregruzki [Control system for the flow of active power along power transmission lines in overload mode]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM in Russia [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2021681429, 2021.