

УДК 621.311.22

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.008

Анализ эффективности применения нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей

Пискунова Виктория Михайловна¹, Крупенёв Дмитрий Сергеевич²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск, vita.piskunova98@gmail.com

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск

Аннотация. В данной работе представлен сравнительный анализ эффективности использования линейной и нелинейной моделей ТЭС при исследовании надежности энергоснабжения территории. В моделях представлены различные типы генерирующего оборудования, описанные в виде аналитических зависимостей, полученных путем аппроксимации графиков и диаграмм типовых характеристик и руководящих документов. Это позволяет учитывать изменение расхода топлива в зависимости от производимого объема тепла и электроэнергии. Результаты вычислительного эксперимента показали, что применение нелинейных моделей позволяет более точно оценить уровень надежности энергоснабжения, что может быть полезно при планировании и проектировании энергетических систем.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, теплоэлектростанция, моделирование, расходные характеристики, надёжность, энергетическая безопасность

Цитирование: Пискунова В.М. Анализ эффективности применения нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей / В.М. Пискунова, Д.С. Крупенёв // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 86-93. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.008.

Введение. Нарушение надёжности топливо- и энергоснабжения потребителей может приводить к экономическому ущербу и даже нарушению безопасности государства. Тепловые электростанции, благодаря возможности производить большие объемы тепловой и электрической энергии, являются важным, иногда единственным источником централизованной энергоснабжения для крупных территорий. В настоящее время в России доля ТЭС в балансе генерации электроэнергии составляет более 60 %, что показывает важность надежной и бесперебойной работы этих объектов.

Для оценки надежности энергоснабжения потребителей необходима разработка математических моделей разных видов ТЭС с учетом технологических процессов. Целью данной работы является сравнение применения нелинейных и линейных моделей ТЭС для анализа надежности энергоснабжения потребителей.

1. Характеристика подходов к моделированию ТЭС. Математическое моделирование работы ТЭС должно отражать топливную, электроэнергетическую и теплоснабжающую подсистемы объекта. Для корректного моделирования топливоснабжения необходимо учитывать зависимости расхода топлива от генерации тепло- и электроэнергии на ТЭС. Это может быть сделано с использованием разных подходов. Во-первых, использование упрощенной модели, агрегирующей вышеуказанные зависимости совокупности ТЭС, находящихся в одной энергозоне. Основной проблемой при этом является низкая точность результата. Положительной стороной подхода является относительная простота при реализации и интерпретации результатов [1-4]. Во-вторых, использование модели, построенной по точным параметрам работы и паспортным данным оборудования ТЭС. Этот подход является наиболее точным и детальным, так как учитывает состояние энергоносителя на каждом этапе производства тепло- и электроэнергии. Трудности связаны с необходимостью иметь детальную информацию по каждому генерирующему объекту, которая часто труднодоступна [5-12]. Третий подход основан на по-

строении модели путем аппроксимации диаграмм режимов работы оборудования. При моделировании топливоснабжения ТЭС в предыдущих работах авторов [13] для получения зависимости расхода топлива от производимого ими объема тепла и электроэнергии был реализован третий подход. Основным его преимуществом является учет состояния энергоносителей на каждом этапе процесса производства тепла и энергии.

Для моделирования технических процессов производства электроэнергии и тепла были рассмотрены основные типы станций, включая конденсационные электростанции (КЭС), тепловые электростанции (ТЭЦ), газотурбинные установки (ГТУ) и парогазотурбинные станции (ПГУ). Аналитические зависимости, необходимые для их математического моделирования, были получены методом наименьших квадратов путем аппроксимации графиков и диаграмм из типовых характеристик и руководящих документов. Сравнение результатов четырех способов аппроксимации, таких, как среднее значение, линеаризованный, квадратичный и кубический, позволило определить оптимальные зависимости. Были получены аналитические зависимости между потреблением топлива и тепловой и электрической нагрузкой для различных типов тепловых агрегатов на тепловых электростанциях. Для паровых турбин получены зависимости количества тепла, подводимого к турбине, от нагрузки (электрической или тепловой, в зависимости от типа турбины) с помощью метода наименьших квадратов для аппроксимации типовых диаграмм. Для котлоагрегатов были применены четыре способа аппроксимации зависимости коэффициента полезного действия от тепловой нагрузки: усреднение, линейная регрессия, квадратичная регрессия и кубическая регрессия. После аппроксимации было определено, что только линейная зависимость имеет практически одинаковый коэффициент детерминации для всех методов, поэтому для моделирования работы тепловых электростанций целесообразно использовать линейную зависимость между КПД и тепловой нагрузкой. Для ГТУ и ПГУ проводилась аппроксимация зависимости КПД от нагрузки. В результате были получены полиномы второго порядка.

2. Вычислительный эксперимент. Ранее выполненные исследования [13] стали основой для сравнительного анализа эффективности применения линейных и нелинейных моделей тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения потребителей. Исследуемая условная (тестовая) энергетическая система (рис. 1) содержит три энергетических района, которые могут обмениваться друг с другом следующими энергоресурсами: электричеством, газом и углем. Каждый район имеет свои собственные системы теплоснабжения, которые отражаются в модели как производство и потребление тепловой энергии. В районе 1 имеется источник газа, а в районе 3 – источник угля. ТЭС во всех районах представлены угольными, газовыми или парогазовыми ТЭЦ и КЭС.

Целевой функцией модели является минимизация дефицита энергии. Весовые коэффициенты функции цели определяются экспертно:

$$\min q = c_1 \cdot \sum \Delta P_i + c_2 \cdot \sum \Delta T_i + c_3 \cdot \sum \Delta S_i + c_4 \cdot \sum \Delta C_i + c_5 \cdot \sum \Delta G_i, \quad (1)$$

где $c_1 \dots c_5$ – весовые коэффициенты дефицитов энергоресурсов. Они показывают размер штрафов за недопоставку энергоресурсов, ΔP_i – дефицит электроэнергии, ΔT_i – дефицит тепловой энергии, ΔS_i – дефицит промышленного пара, ΔC_i – дефицит угля, ΔG_i – дефицит газа.

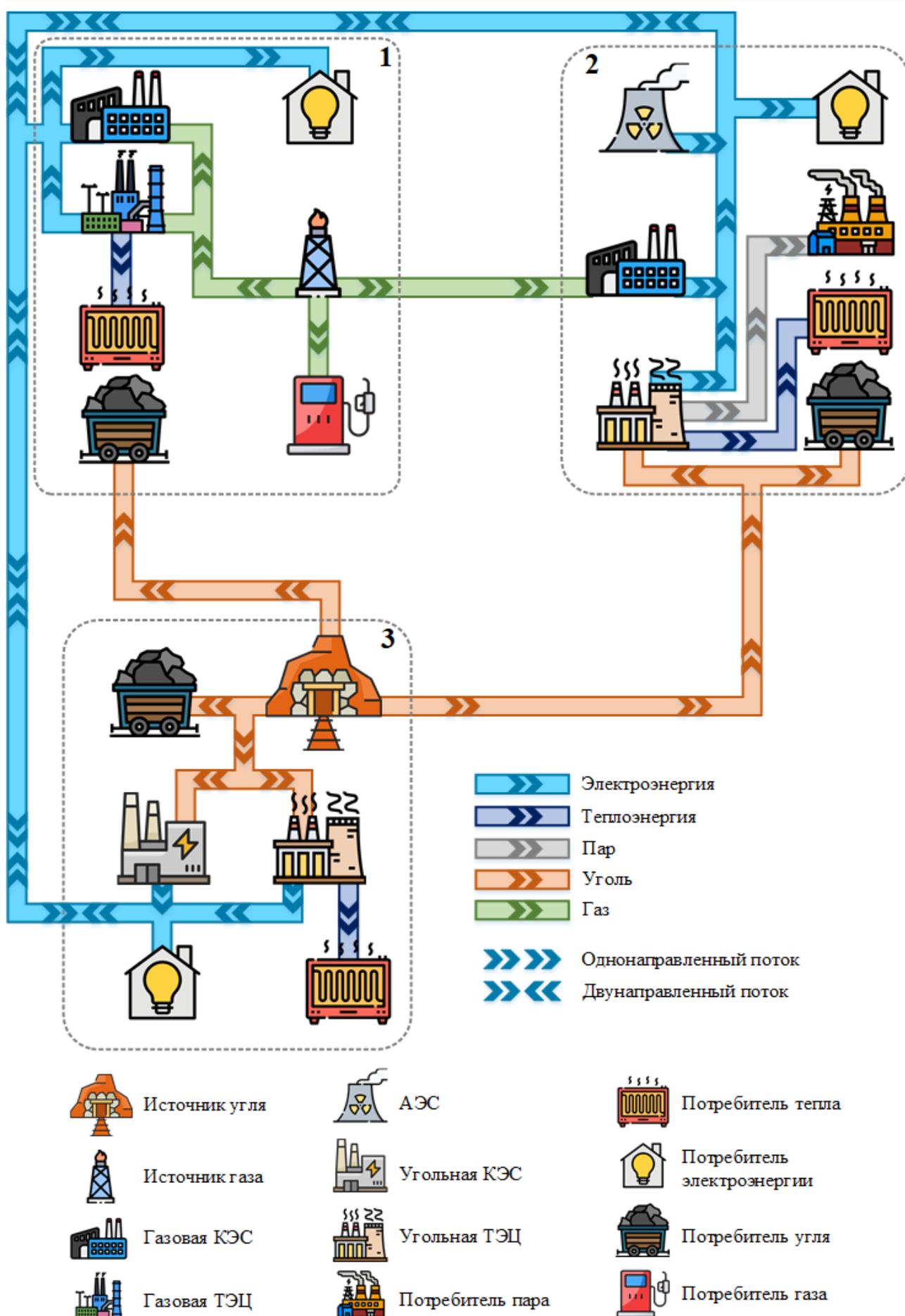


Рис. 1. Схема тестовой трехузловой энергосистемы

Балансовые уравнения модели имеют следующий вид.

Балансовое уравнение электроэнергии:

$$\sum_{k=1}^K (P_{CHP\ g\ ik} + P_{CHP\ c\ ik} + P_{CPP\ g\ ik} + P_{CPP\ c\ ik}) + P_{ji} - \frac{P_{ij}}{k_p} - Cons_{Pi} + \Delta P_i = 0, \quad (2)$$

где k – порядковый номер агрегата на тепловой электростанции района i .

Балансовое уравнение тепловой энергии:

$$\sum_{k=1}^K (T_{CHP\ g\ ik} + T_{CHP\ c\ ik}) - Cons_{Ti} + \Delta T_i = 0. \quad (3)$$

Балансовое уравнение промышленного пара:

$$\sum_{k=1}^K (S_{CHP\ g\ ik} + S_{CHP\ c\ ik}) - Cons_{Si} + \Delta S_i = 0. \quad (4)$$

Балансовое уравнение угля:

$$C + C_{ji} - \frac{C_{ij}}{k_c} - \sum_{k=1}^K (C_{CHP\ ik} + C_{CPP\ ik}) - Cons_{Ci} + \Delta C_i = 0, \quad (5)$$

где $C_{CHP\ ik} = \frac{k_1 \cdot P_{CHP\ c\ ik} + k_2 \cdot S_{CHP\ c\ ik} + k_3 \cdot T_{CHP\ c\ ik} + k_4}{\eta_c \cdot Q_c}$ – количество угля, потребляемого котельным агрегатом k на ТЭЦ района i , $C_{CPP\ ik} = \frac{k_1 \cdot P_{CPP\ c\ ik} + k_2}{\eta_c \cdot Q_c}$ – количество угля, потребляемого котельным агрегатом k на КЭС района i , $\eta_c = f(P_{CHP/TPP\ c\ ik})$ – линейное уравнение, описывающее зависимость КПД котлагрегата от нагрузки, Q_c – теплотворная способность угля, k_c – коэффициент, учитывающий потери при транспортировке угля.

Балансовое уравнение газа:

$$G + G_{ji} - \frac{G_{ij}}{k_g} - \sum_{k=1}^K (G_{CHP\ ik} + G_{CPP\ ik}) - Cons_{gi} + \Delta G_i = 0, \quad (6)$$

где $C_{CHP\ ik} = \frac{P_{CHP\ g\ ik} + k_1 \cdot P_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_2 \cdot S_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_3 \cdot T_{CHP\ g\ i(k+1)} + k_4}{\eta_g \cdot Q_g}$ – количество газа, потребляемое турбиной k на ТЭЦ районат i , $C_{CPP\ ik} = \frac{P_{CPP\ g\ ik}}{\eta_g \cdot Q_g}$ – количество газа, потребляемое турбиной k на КЭС района i , $\eta_g = f(P_{CHP/CPP\ g\ ik})$ – нелинейное уравнение, описывающее зависимость КПД турбины от нагрузки, Q_g – теплотворная способность газа, k_g – коэффициент, учитывающий потери при транспортировке газа.

Исходные данные и ограничения переменных в модели задавались таким образом, чтобы энергосистема могла обеспечить всех потребителей необходимыми энергоресурсами. Соответственно, следующим шагом вычислительного эксперимента стало моделирование аварийных ситуаций при передаче энергоресурсов, сокращении или прекращении производства топлива и выводе из строя электростанций. Для этого мы изменили ограничения на верхнюю границу соответствующей переменной, тем самым уменьшив количество доступных энергоресурсов.

Для анализа недостатков системы мы провели вычислительные эксперименты для шести сценариев:

- 1) отказ линии электропередачи между районами 1 и 2;
- 2) отключение железной дороги между районами 2 и 3;
- 3) сокращение вдвое добычи угля в районе 3;
- 4) сокращение на 1/4 добычи газа в районе 1;
- 5) нарушение работы газовой КЭС района 1;

б) нарушение работы угольной ТЭЦ в районе 3.

Для анализа эффективности предложенных линейной и нелинейной математических моделей тепловых электростанций мы сравнили результаты минимизации дефицита. Сравнение проводилось с одними и теми же исходными данными в сценарии отсутствия дефицита, а также в 6 сценариях, описанных выше. Для формирования линейной модели ТЭС зависимости КПД от коэффициента загрузки энергоблока были заменены на среднее значение КПД. Таким образом, балансовые уравнения и ограничения модели остались неизменными.

Результаты расчетов. Эксперимент проводился с использованием двух методов: метода внутренних точек для линейной модели, реализованной в MATLAB и метода Франка-Вольфа для нелинейной модели, реализованной в Excel. Поскольку исходные данные для обеих моделей были одинаковыми, разница в значениях целевой функции (рис. 2) объясняется более точным расчетом необходимого количества топлива для ТЭС в нелинейной модели. Разница в значениях целевых функций в сценариях 2 и 6 незначительна, поэтому трудно оценить эффективность нелинейной модели.

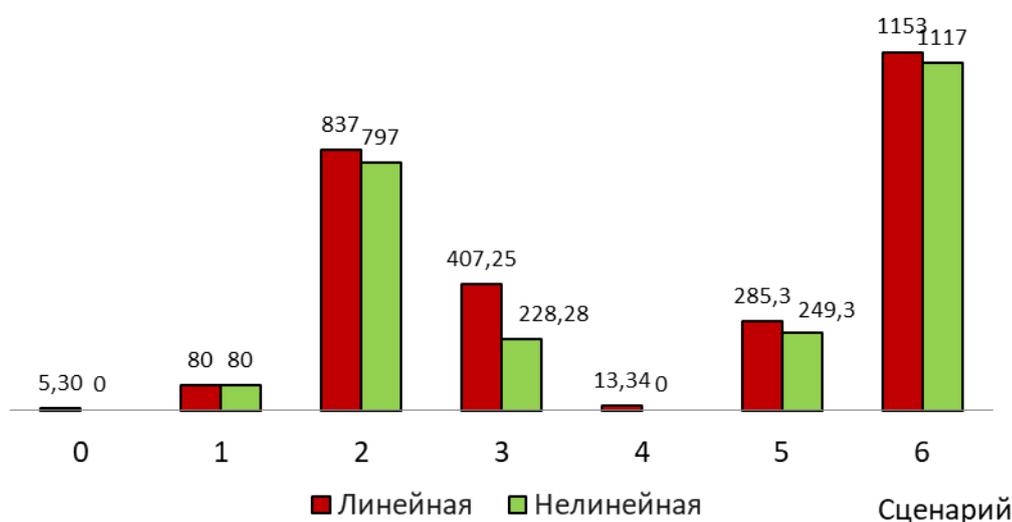


Рис. 2. Сравнение полученных значений целевой функции (в у.е.) в линейной и нелинейной моделях

В нелинейной модели в сценарии 4 и бездефицитном сценарии дефицит отсутствует, тогда как в линейной модели он есть (рис. 3). Наибольшая разница в моделях проявляется в сценарии 3, где объективная функция линейной модели в 1,8 раза выше, чем объективная функция нелинейной модели. Это связано с тем, что в данном сценарии моделировалось снижение добычи угля, а так как в линейной модели потребление топлива на ТЭС завышено, то пропорционально увеличивается дефицит вырабатываемого тепла и электроэнергии. Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости использования нелинейной модели.

Наибольший дефицит во всех сценариях наблюдался в первой энергетической зоне. Подача электроэнергии в этой энергозоне снижается или прекращается почти во всех смоделированных аварийных ситуациях. Это связано с тем, что, согласно исходным данным, в районе 1 существует отрицательный баланс электроэнергии (потребление в районе превышает выработку), поэтому он зависит от поставок электроэнергии из районов 2 и 3. Район 2 не имеет собственного источника топлива, поэтому в случае перебоев с поставками топлива возникает дефицит тепла и электроэнергии. Район 3 полностью покрывает собственные потребности в энергоресурсах, а также экспортирует уголь и электроэнергию, поэтому дефицит возникает только в чрезвычайных ситуациях внутри энергетического района.

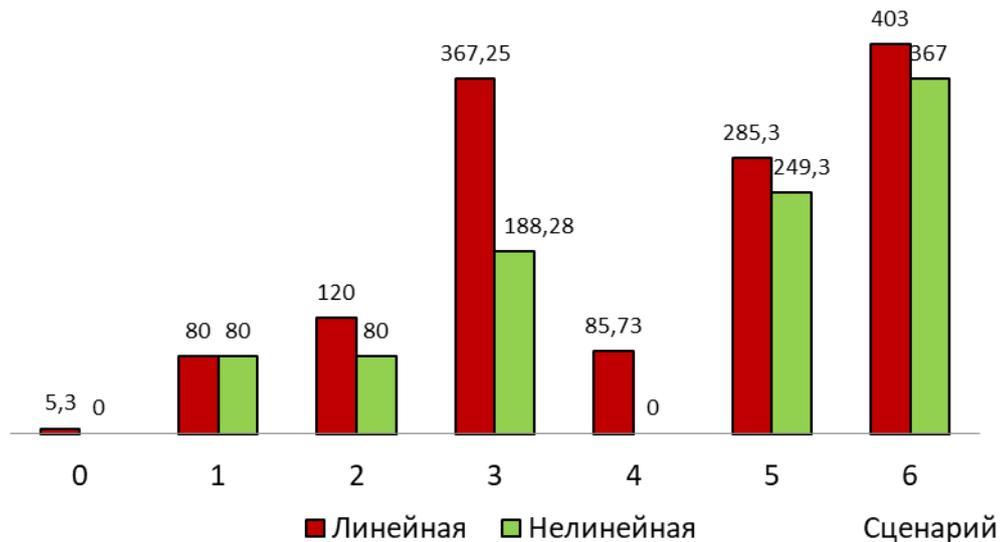


Рис. 3. Сравнение полученных суммарных дефицитов (в у.е.) в линейной и нелинейной моделях

Заключение. Изучение проблем обеспечения надежного энергоснабжения и снабжения топливом является неотъемлемой составляющей процесса планирования развития энергетических систем. Это обусловлено, прежде всего, высокой стоимостью отказа энергооборудования, а также ущербом для потребителей в результате прерывания поставок энергии.

В рамках статьи был описан метод, используемый для моделирования работы ТЭС на основе использования параметров работы оборудования. Этот способ описания тепловых электростанций является наиболее пригодным для анализа надежности топливо- и энергоснабжения, так как он дает необходимую точность расчетов и учитывает специфику различного генерирующего оборудования, не опускаясь при этом на уровень микропараметров. Далее эти взаимосвязи были интегрированы в модель условной энергосистемы.

При сравнении результатов оптимизации линейной и нелинейной моделей энергоснабжения территории видно, что в линейной модели практически во всех сценариях суммарные дефициты значительно больше, чем в нелинейной (рис. 3). Среднее отклонение значений для всех сценариев равно 39,6%, что показывает эффективность и точность нелинейной модели. Значения целевых функций в моделях также различно (рис. 2). В сценариях 0 и 4 целевая функция в нелинейной модели принимает нулевое значение, тогда как в линейной модели есть дефициты энергоресурсов, за которые накладываются штрафы. Среднее отклонение целевой функции для всех сценариев равно 12,53%.

Нелинейная модель показала меньший дефицит, чем линейная модель во всех сценариях. Таким образом, в ходе вычислительного эксперимента было установлено, что нелинейная модель с высокой степенью точности находит минимальное значение дефицита энергоресурсов в различных чрезвычайных ситуациях.

Список источников

1. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения / В.И. Зоркальцев. – М.: Наука, 1988. – 144с
2. Надежность систем энергетики и их оборудования / под общей редакцией Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
3. Антонов Г.Н. Методы и модели исследования живучести систем энергетики / Г.Н. Антонов, Г.П. Черкесов, Л.Д. Криворучкий [и др.] – Новосибирск: Наука, 1990. – 285 с.
4. Иерархическое моделирование систем энергетики / под. ред. Воропая Н.И., Стенникова В.А. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 314 с. – DOI:10.21782/B978-5-6043021-9-4.

5. Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock's approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 22.
6. Santos M., Andre J., Mendes R., et al. Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology. *Energy Procedia*, 2017, vol. 129, pp. 676-683.
7. Wang Y., Wehrle L., Banejee A., et al. Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. *Renewable Energy*, 2021, vol. 163, pp. 78-87.
8. Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part A: Power and process engineering*, 1987, vol. 201, no. 3, pp. 193-200.
9. Новосёлов В.Б. Повышение эффективности работы электростанций путём организации дополнительных отборов пара от паровых турбин / В.Б. Новосёлов, Ю.М. Бродов, Е.В. Литвинов, и др. // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*, 2018. – Т. 20. – № 1-2. – С. 90-99.
10. Клер А.М. Математическое моделирование установок комбинированного производства жидких углеводородов и электроэнергии на основе угля / А.М. Клер, Э.А. Тюрина, А.С. Медников // *Химия твердого топлива*, 2020. – № 3. – С. 14-26.
11. Клер А.М. Эффективная методика настройки математических моделей теплоэнергетического оборудования на его фактическое состояние / А.М. Клер, В.Э. Алексеюк // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2019. – № 31. – С. 136-158.
12. Клер А.М. Оптимизация режимов работы ТЭЦ для максимизации прибыли в условиях балансирующего рынка электроэнергии / А.М. Клер, А.С. Максимов, А.В. Чалбышев [и др.] // *Известия Российской Академии Наук. Энергетика*, 2014. – № 2. – С. 71-80
13. Крупенев Д.С. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности / Д.С. Крупенев, В.М. Пискунова, А.Г. Гальфингер // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2023. – Т. 25, № 2. – С. 12-25. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25. – EDN QVZNGU.

Крупенёв Дмитрий Сергеевич. Канд. техн. наук, заведующий лабораторией "Надёжности топливо- и энергоснабжения" ИСЭМ СО РАН. AuthorID: 668302, SPIN: 4408-2996, ORCID: 0000-0002-3093-4483, krupenev@isem.irk.ru

Пискунова Виктория Михайловна. Аспирант ИРНИТУ, ассистент кафедры теплоэнергетики. AuthorID: 921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472, vitapiskunova98@gmail.com

UDC 621.311.22

DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.008

Analysis of the efficiency of non-linear models of thermal power plants in the study of the reliability of the power supply to the consumers security and reliability of power supply to consumers

Victoria M. Piskunova¹, Dmitry S. Krupenev²

¹ National Research Irkutsk State Technical University,
Russia, Irkutsk, vitapiskunova98@gmail.com

² Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, vitapiskunova98@gmail.com

Abstract. This paper considers the modeling of a test power system with three nodes to analyze the effectiveness of using nonlinear models of thermal power plants in the study of energy security and reliability of power supply. Within the framework of the modeling, experiments were conducted using various types of generating equipment and loads, as well as calculations based on nonlinear models. The results of the simulation showed that the use of nonlinear models makes it possible to more accurately assess the level of energy security and energy supply reliability, which can be useful in planning and designing energy systems.

Keywords: energy sector, thermal power plant, modeling, consumption characteristics, reliability, energy security

References

1. Zorkal'cev V.I. Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funkcionirovaniya sistemy toplivosnabzheniya [Methods for forecasting and analyzing the efficiency of the fuel supply system]. M.: Nauka [Science], 1988, 144 p.
2. Rudenko YU.N. et al. Nadezhnost' sistem energetiki i ih oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment]. M.: Energoatomizdat, 1994, 480 p.
3. Antonov G.N. CHerkesov G.P., Krivoruckij L.D. [et al.] Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]. Novosibirsk: Nauka [Science], 1990, 285 p.
4. Voropay N.I., Stennikov V.A. [et al.] Ierarhicheskoe modelirovanie sistem energetiki [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo" [Academic publishing house "Geo"], 2020, 314 p, DOI: 10.21782/V978-5-6043021-9-4.
5. Qian Z., Agnew B. An assessment of Horlock's approximate analysis of feed and district heating cycles for steam and CHP plant. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, vol. 22.
6. Santos M., Andre J., Mendes R. [et al.] Design and modelling of a small scale biomass-fueled CHP system based on Rankine technology. Energy Procedia, 2017, vol. 129, pp. 676-683.
7. Wang Y., Wehrle L., Banejee A. [et al.] Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. Renewable Energy, 2021, vol. 163, pp. 78-87.
8. Horlock J.H. Approximate analyses of feed and district heating cycles for steam combined heat and power plant. Proceedings of the Institution of mechanical engineers, Part A: Power and process engineering, 1987, vol. 201, no. 3, pp. 193-200.
9. Novoselov V.B., Brodov Y.M., Litvinov E.V. [et al.] Povysheniye effektivnosti raboty elektrostantsiy putom organizatsii dopolnitel'nykh otborov para ot parovykh turbin [Increase efficiency of electric power stations by way of organization of additional choice of steam from steam turbines]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI [Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS], 2018, no. 20(1-2), pp. 90-99.
10. Kler A.M., Tyurina E.A., Mednikov A.S. Matematicheskoe modelirovanie ustanovok kombinirovannogo proizvodstva zhidkikh uglevodorodov i elektroenergii na osnove uglya [Mathematical modeling of plants for the combined production of liquid hydrocarbons and electricity based on coal]. Solid fuel chemistry [Khimiya tverdogo topliva], 2020, no. 3, pp. 14-26.
11. Kler A.M., Alekseyuk V.E. Effective adjustment technique of mathematical models of thermal power equipment on its actual condition [Effektivnaya metodika nastroyki matematicheskikh modelei teploenergeticheskogo oborudovaniya na ego fakticheskoe sostoyanie]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2019, no. 31, pp. 136-158.
12. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshv A.V. [et al.] Optimizatsiya rezhimov raboty TETs dlya maksimizatsii pribyli v usloviyakh balansiruyushchego rynka elektroenergii [Optimization of cogeneration plant operation for maximization of profit in balancing electricity market]. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika [Proceedings of the RAS. Power engineering], 2014, no. 2, pp. 71-80.
13. Krupenev D.S., Piskunova V.M., Galfinger A.G. Modelirovaniye teplovykh elektrostantsiy pri issledovanii nadozhnosti energosnabzheniya i energeticheskoy bezopasnosti [Modelling the combined heat and power plants with steam turbines in the study of energy security problems]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Problemy energetiki [Power engineering: research, equipment, technology], 2021, no. 25(1), pp. 816-828, DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25, EDN QVZNGU.

Krupenev Dmitry Sergeevich. Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory of reliability of fuel and energy supply, ISEM SB RAS. AuthorID: 668302, SPIN: 4408-2996, ORCID: 0000-0002-3093-4483, krupenev@isem.irk.ru

Piskunova Victoria Mikhailovna. Postgraduate student of IRNITU, assistant of the department of heat engineering. AuthorID: 921278, SPIN: 6951-4829, ORCID: 0000-0003-4019-8472, vitapiskunova98@gmail.com

Статья поступила в редакцию 21.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 08/21/2023; approved after reviewing 09/05/2023; accepted for publication 09/25/2023.