

*Диб Али*¹,

студент;

*Орлов Илья Вадимович*²,

соискатель;

*Скороварова Светлана Андреевна*³,

студент;

*Хохловский Владимир Николаевич*⁴,

доцент, канд. техн. наук, доцент

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

^{1,2,3,4} Россия, Санкт-Петербург,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

¹ dib.a@edu.spbstu.ru, ² orlov.iv@edu.spbstu.ru,

³ skorovarova.sa@edu.spbstu.ru, ⁴ hohlovskij_vn@spbstu.ru

Аннотация. Проблема динамической эколого-экономической диспетчеризации (DEED – Dynamic Ecology Economic Dispatch) состоит в выборе стратегии генерации энергии в объеме, необходимом потребителю, при существовании двух противоречивых целевых функций: минимизации затрат на производство энергии и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Важность решения этой проблемы со временем возрастает. В работе для решения задачи DEED используется система имитационного моделирования AnyLogic. Рассматривается пример построения разных сценариев генерации насыщенного пара в зависимости от разных режимов работы котельного оборудования для анализа изменения экономических и экологических параметров объекта: в результате экспериментов с моделью приводятся примеры оценки затрат топлива и выбросов продуктов сгорания в окружающую среду.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, проблема DEED, имитационное моделирование, система AnyLogic.

*Ali Deeb*¹,
Student;
*Iliya V. Orlov*²,
Competitor;
*Svetlana A. Skorovarova*³,
Student;
*Vladimir N. Khokhlovskiy*⁴,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

MODEL AND SIMULATION FOR DYNAMIC ECOLOGY ECONOMIC DISPATCH

^{1,2,3,4} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
¹ dib.a@edu.spbstu.ru, ² orlov.iv@edu.spbstu.ru,
³ skorovarova.sa@edu.spbstu.ru, ⁴ hohlovskij_vn@spbstu.ru

Abstract. The problem of dynamic ecology-economic dispatch (DEED) is to select a strategy for generating energy in the volume required by a consumer, considering two conflicting objective functions: minimizing energy production costs and minimizing the negative impact on the environment. The importance of solving this problem is increasing. In this paper, the AnyLogic simulation tool is used to solve the DEED problem, an example of constructing different scenarios for generating saturated steam depending on different operating modes of boiler equipment is considered to analyze changes in the economic and environmental parameters of the facility. As a result of experiments with the model, examples of assessing fuel costs and emissions of combustion products into the environment are given.

Keywords: multicriteria optimization, DEED problem, simulation, AnyLogic tool.

1. Введение и обзор

Потребность в источниках энергии, особенно в ископаемом топливе, продолжает увеличиваться; изменение роли топлива в современной энергетике является сложным: тепловые электростанции, работающие на ископаемом топливе, продолжают играть жизненно важную роль в производстве энергии [1]. По этой причине растущий спрос на энергию приводит к увеличению использования ископаемого топлива, что приводит к увеличению выбросов в атмосферу таких вредных веществ, как монооксид углерода и оксиды азота. Выбросы загрязняющих веществ негативно сказываются на здоровье людей и вызывают глобальные экологические проблемы, включая глобальное потепление, увеличение числа туманных дней, кислотные дожди и фотохимический смог [2]. Несмотря на то, что для использования энергосистемами доступны несколько типов возобновляемых источников энергии, надежность и ценовая доступность позволяют тепловым станциям занимать видное место среди других источников, производящих электроэнергию [3].

Проблема DEED представляет собой многомерную сложную задачу оптимизации с ограничениями, которая определяет выработку заданной величины энергии путем минимизации двух противоречивых целевых функций: стоимости топлива и воздействия на окружающую среду [1–3]. За последние несколько десятилетий для решения этой проблемы был разработан ряд подходов к решению. Не претендуя на исчерпывающую полноту, укажем в первую очередь на эволюционные алгоритмы [4]. Для повышения производительности алгоритмов применяются специальные механизмы, эффективность которых продемонстрирована на ряде динамических задач экономической диспетчеризации для 24-часового цикла. Результаты работы сравниваются друг с другом, что показывает, что предлагаемый в [4] метод имеет преимущества с точки зрения качества и надежности решения. В статье [5] предлагается решение проблемы DEED для ветряных, солнечных ВИЭ и подключаемых к сети электромобилей. Комбинированная модель, получившая название Wind-Solar-Plug in Electric Vehicle (WSPEV) DEED, использует метод оппозиционного оптимизатора равновесия для моделирования ветровых и солнечных ресурсов. В модели также учитываются схемы зарядки и разрядки электромобилей. В статье предлагаемый подход оценивается с помощью нескольких сценариев, включающих ВИЭ, а результаты моделирования демонстрируют эффективность предлагаемой модели в создании устойчивой и экономически эффективной энергетической системы.

Основные области применения динамической диспетчеризации можно определить следующим образом:

- 1) генерация и использование тепловой энергии с производственными целями;
- 2) генерация и использование электрической энергии с производственными целями;
- 3) ветряные, солнечные источники энергии и подключаемые к сети электромобили; комбинированная модель получила название Wind-Solar-Plug in Electric Vehicle (WSPEV);
- 4) жилищно-коммунальное хозяйство.

Представленные ниже результаты соответствуют первой из указанных областей.

2. Постановка задачи

В данной работе задача эколого-экономической диспетчеризации рассматривается применительно к группе котлоагрегатов ТЭЦ и заключается в поиске оптимального баланса между двумя конфликтующими факторами: экономической эффективностью и экологической устойчивостью. На установке в пределах допустимых значений выставляется нагрузка, которая будет надежно и стабильно обеспечивать потребителей энергией; в то же время важно сократить затраты на производство. Работа на высоких

мощностях с целью достижения наиболее эффективных экономических показателей может негативно сказаться на экологичности производства. Согласно Программе развития энергетики России [6], подраздел по экологии, на предприятии должны соблюдаться нормы ПДВ (предельно допустимых выбросов). В данной работе рассматривается путь решения проблемы эколого-экономической диспетчеризации с помощью имитационного моделирования. Модель производства пара на ТЭЦ позволит в контролируемой среде предсказать поведение системы и оптимизировать рабочие процессы, при этом будут сбалансированы экологические и экономические показатели.

3. Упрощенная схема обеспечения потребителя паром

Процесс обеспечения паром потребителя разбит на следующие основные этапы: (1) подготовка (очистка) воды, (2) нагрев и подача топлива, (3) производство пара котлоагрегатом, (4) итоговая подготовка пара и его доставка до потребителя по паропроводу. Таким образом, на вход системы поступают вода и топливо, выходными характеристиками выступают выброс дыма при сжигании топлива, выработанное количество перегретого пара и его температура. Котлоагрегат должен выдавать необходимое потребителю количество тепла, при этом уровень выбросов не должен превышать предельно допустимых значений. Экономический фактор DEED также можно описать с помощью затрат на производство пара, в простейшем случае будем учитывать стоимость сжигаемого топлива.

Основные подходы для создания модели в данной работе – агентное и дискретно-событийное моделирование, для практической реализации выбрана инструментальная система Anylogic [7, 8]. Общая схема обеспечения потребителя теплом представлена с помощью следующих типов агентов: потребитель; диспетчер; котлоагрегат; редуционно-охлаждающая установка; коллектор; паропровод. Потребитель формирует запрос на тепло и отправляет его диспетчеру, где выставляется режим работы котлоагрегатов. Диспетчер отправляет котлам задание на необходимое для выработки количество тепла. В начальном состоянии котел не производит тепло и ожидает запрос от диспетчера. Когда диспетчер отправляет заявку, агент переходит в состояние выхода на режим. По истечении времени на подготовку котел начинает производство и передачу пара. Если приходит новое задание по производительности, котлоагрегат изменяет режим работы, после чего продолжает производство и передачу пара. При получении от диспетчера сообщения об остановке агент завершает работу и переходит в режим ожидания дальнейших команд.

4. Проведение экспериментов с моделью

Ранее было отмечено, что для решения проблемы эколого-экономической диспетчеризации в исследуемой системе необходимо отслеживать

количество выбросов в атмосферу (показания дымомера котла) и количество сжигаемого топлива, из которого рассчитывается стоимость производства. Задача – уменьшить затраты поставщика, не превышая при этом предельно-допустимые нормы выбросов.

В таблице 1 представлены некоторые показательные результаты экспериментов с моделью.

Таблица 1

Результаты эксперимента по сравнению режимов работы

Режимы работы, т/ч	Стоимость производства, руб.	Показания дымомера, у. е.
Вариант 1: запрос на тепло 68 т/ч, длина паропровода 4 км		
30 и 38	189000	124,5
33 и 35	189000	124,5
34 и 34	192000	121
Вариант 2: запрос на тепло 67 т/ч, длина паропровода 5 км		
30 и 37	193200	121
32 и 35	189000	124,5
33 и 34	189000	124,5
Вариант 3: запрос на тепло 65 т/ч, длина паропровода 3 км		
28 и 37	168000	142
32 и 33	172000	138,5
Вариант 4: запрос на тепло 132 т/ч, длина паропровода 3 км		
28, 28, 38, 38	344400	277
28, 35, 35, 38	348600	273,5
33, 33, 33, 33	352800	270
Вариант 5: запрос на тепло 114 т/ч, длина паропровода 4 км		
38, 38, 38	340200	139,5
28, 28, 28, 30	277200	333
28, 28, 29, 29	277200	333

По составленной таблице можно проследить, что при выборе режимов с высоким расходом пара уменьшаются показания дымомера, но возрастает стоимость производства. Помимо этого, отмечены следующие особенности:

– для потребителей, находящихся от ТЭЦ на расстоянии 4 км и больше (варианты 1 и 2), при изменении производительности котлов исследуемые показатели оставались без изменения; можно сделать предположение, что в этих случаях теплотери на паропроводе оказывают более значительное влияние на исследуемые параметры, чем особенности работы котлоагрегатов (ср. с вариантом 3);

– при режимах, показанных в 4-м варианте, удалось получить средние значения для стоимости и объема выбросов;

– при проведении эксперимента с варьированием количества обслуживающих потребителя котлов (вариант 5) исследуемые показатели значительно изменяли свои значения: при использовании меньшего количества котлов с высокой производительностью стоимость производства пара возрастала, при этом уменьшались показания дымомера, в то же время при работе большего количества котлов с минимальной производительностью стоимость производства уменьшилась незначительно по сравнению с объемом выбросов, выросших в два раза.

Можно сделать вывод, что при обслуживании потребителя с использованием двух котлоагрегатов для уменьшения стоимости производства с незначительным увеличением выбросов дыма стоит выставить наиболее отличающиеся друг от друга задания для котлов. При работе трех котлов с целью уменьшения затрат на топливо для двух котлоагрегатов необходимо выставить малую производительность, а для третьего – высокую. При возможности изменения количества обслуживающих потребителя котлов в пределах одного запроса имеет смысл оставить в работе меньшее количество котлов, так как при увеличении количества котлоагрегатов показания дымомера значительно возрастают.

Также при выборе задания котлов нужно учитывать метеорологические условия (ср. [9]): при распространении дыма от ТЭЦ в сторону населенного пункта, если уменьшение стоимости топлива приводит к превышению норм выбросов дыма, необходимо выставить режим, соответствующий более высокой стоимости производства, что снизит количество выбросов. Помимо этого, важным показателем является температура окружающего воздуха: в холодное время года теплопотери на паропроводе возрастают, что уменьшит пределы настройки режимов работы с учетом исследуемых показателей.

Заключение

Эксперименты с разработанной моделью в системе Anylogic использованы для решения задачи эколого-экономической диспетчеризации группы котлоагрегатов. Составленная модель содержит параметры, необходимые для представления логики работы объекта управления и отражения проблемы DEED; среди них расходы топлива и воды в котел, расход и температура перегретого пара от котла, показания дымомера. Цель экспериментов заключалась в проверке подхода для поиска баланса между экономическими и экологическими характеристиками при формировании заданий для объекта управления. С моделью проведена серия экспериментов, показывающих возможности модели и исследующих изменения затрат на производство пара (стоимости сжигаемого топлива) и выбросов дыма для разных режимов работы котлов; предложены рекомендации по составлению заданий для генерации пара котлоагрегатами.

Развитие системы может быть связано с включением в модель и исследованием эффекта использования алгоритмов, автоматизирующих различные этапы решения задачи диспетчеризации (см., например, предложения [10]), с использованием формальных методов проектирования [11] и с включением рассматриваемых средств в цифровой двойник системы котлоагрегатов (по аналогии с [12]) для решения задачи эколого-экономической диспетчеризации.

Список литературы

1. Marzbani F., Abdelfatah A. Economic dispatch optimization strategies and problem formulation: a comprehensive review // *Energies*. – 2024. – Vol. 17(3). – Pp. 550–586.
2. Ostergaard P. A., Duic N., Noorollahi Y., Kalogirou S. Renewable energy for sustainable development // *Renew. Energy*. – 2022. – Vol. 199. – Pp. 1145–1152.
3. Yao L. New energy utilization in environmental design and realization // *Energy Rep.* – 2022. – Vol. 8. – Pp. 9211–9220.
4. Zaman M. F., Elsayed S. M., Ray T., Sarker R. A. Evolutionary algorithms for Dynamic Economic Dispatch Problems // In: *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2015. – Vol. 31. – No. 2. – Pp. 1486–1495. – DOI:10.1109/TPWRS.2015.2428714.
5. Lingling L., Jiarui P., Qiang S. A review of research on dynamic and static economic dispatching of hybrid wind-thermal power microgrids // *Energies*. – 2023. – Vol. 16(10). – Pp. 3985–4004.
6. Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России). – URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/government-program> (дата обращения: 17.05.2024).
7. Григорьев И. AnyLogic за три дня: практическое пособие по имитационному моделированию. – СПб., 2017. – 273 с.
8. Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Разработка мультиагентной модели энергоснабжающей системы в программной среде AnyLogic // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – № 5. – С. 1080–1092.
9. Антонова А. М., Воробьев А. В., Воробьев В. А., Дутова Е. М. Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса “SKAT” // *Известия Томского политехнического университета*. – 2019. – № 6. – С. 174–186.
10. Vennila H., Giri N. C., Nallapaneni M. K., Sinha P. Static and dynamic environmental economic dispatch using tournament selection based on lion optimization algorithm // *Frontiers in Energy Research*. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 29–57.
11. Shkodyrev V. P., Khokhlovskiy V., Oleinikov V. Development of control automation for energy objects based on the unified process approach // A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov (eds.) *Advances in Automation II. RusAutoConf 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 729. – Pp. 822–831. – DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-71119-1_80.
12. Shkodyrev V. P., Khokhlovskiy V., Oleinikov V. Building a digital twin for local heating housing services // D. G. Arseniev, N. Aouf (eds.) *Cyber-Physical Systems and Control II. CPS&C 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 460. – Pp. 119–130. – DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-20875-1_11.