

УДК 681.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННЫМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЭНЕРГОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ПРИНЦИПАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Д.Г. Арсеньев

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: vicerector.int@spbstu.ru

В.П. Шкодырев

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: shkodyrev@spbstu.ru

И.В. Орлов

АО «Кольская горно-металлургическая компания»
Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК
E-mail: orlovIVa@colagmk.ru

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, многокритериальная система оптимизации, эффективное теплоснабжение.

Аннотация: Рассмотрена проблема повышения эффективности теплоснабжения энергоемких производств и производственных комплексов на принципах сбалансированности между спросом и предложением на рынке генерации тепловой энергии. В основу работы интеллектуальной системы управления положена инновационная методика когнитивного предиктивного анализа, реализующая и развивающая принцип многоцелевой многокритериальной оптимизации управления непрерывным балансом между спросом и потребностью в потреблении тепловой энергии на основе получения объективной прогнозной расчетно-экспериментальной оценки потребности и генерации оптимального объема и требуемого качества тепловой энергии по критериям многоцелевой Парето-оптимизации. Разработана методика и специализированный программный комплекс (СПК) «Советчик Оптимизации Котельного Оборудования (СОКО)», предназначенный для оптимизации режимов работы котельного оборудования ТЭЦ на основе принципа сбалансированности между спросом – объективной прогнозной оценкой потребности в требуемой тепловой энергии, и предложением – генерацией строго необходимого объема выработки требуемой энергии путем оптимизации режимов работы котельного оборудования.

1. Введение

Современные промышленные предприятия представляют собой сложный производственный комплекс, включающий совокупность технологически связанных между собой производственных подразделений, участков и технологических процессов, и является в настоящее время не только ключевым понятием с точки зрения организации промышленного производства на предприятиях, но и структурообразующим элементом экономики целого региона [5]. Проблема энергетической эффективности работы подобных производственных комплексов, и особенно - комплекса предприятий, использующих энергоемкие технологические процессы и оборудование, является одной из ключевых и приоритетных задач современной экономики России [4]. В частности, в ключевом документе Правительства РФ особо подчеркивается, что «разработка мер по энергосбережению и повышению энергетической эффективности является приоритетным направлением государственной политики в Российской Федерации» [6].

Использование классических статистических методов для структурно-сложных производственных комплексов с развитой инфраструктурой весьма ограничено в силу отсутствия эффективных современных методик объективного контроля, либо существенной неполноты или необъективности информации о всех факторах влияния на получение достоверной прогнозной оценки спроса на объем необходимой энергии [1, 10]. Решением вопросов повышения энергоэффективности горных предприятий на основе управления энергетическими ресурсами приводит не только к уменьшению энергозатрат, но и позволяет обеспечить повышение конкурентоспособности, уровня управляемости производством, вовлечение персонала в решение задач энергосбережения, а также другие преимущества [1-2].

2. Концепция и принцип оптимальной сбалансированности в стратегии эффективности энергоемких производств

Одним из перспективных ключевых принципов повышения эффективности высокотехнологичных энергоемких производств является принцип сбалансированности между спросом и предложением на потребляемую тепловую энергию, обеспечивающий как минимизацию прямых потерь от ее перепроизводства, так и от ее недополучения, приводящего к неэффективной работе, а в ряде случаев – и полной остановки производства. Особенно важным данный принцип является для энергоемкого производства предприятий горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслей, в которых доля финансовых затрат на энергоснабжение может достигать 40-60 % [4]. Под оптимальной сбалансированностью спроса и предложения на потребляемую тепловую энергию в данном случае понимается установление и поддержание оптимального равновесия между спросом – расчетно-обоснованной оценкой потребности на необходимый объем потребляемой тепловой энергии со стороны производственных участков (потребителей) и предложением - заказанным объемом генерации и отпуска такой энергии стороны энергогенерирующих подразделений тепловой электростанции. Принцип сбалансированности в этом случае предполагает достижение оптимального равновесия (баланса) между обоснованной расчетно-экспериментальной оценкой спроса на требуемый (потребляемый) продукт – тепловую энергию, и его рациональным потреблением с целью минимизации финансовых и иных производственных потерь на заказанную тепловую энергию.

Авторами сформулирована [3] и впоследствии развита [7, 8] стратегия управления энергоемкими предприятиями как задача многоцелевой – многокритериальной оптимизации баланса между спросом на необходимый объем тепловой энергии (ТЭ) и

оптимальным объемом ее генерации со стороны ТЭЦ исходя из оптимизации выделенных ресурсов управления работой ТЭЦ. С этой целью определен вектор целевых показателей $Q_{\text{потр}}$ и критериев эффективности сбалансированной генерацией ТЭ как задача определения таких параметров управления $u_1, u_2, \dots, u_n \in U$ из множества допустимых параметров $U \in \mathfrak{R}^N$ управления, которые обеспечат минимум ошибки их рассогласования:

$$U_{opt} := \min_{U \in \mathfrak{R}^N} J(\|Q_{\text{потр}} - Q_{\text{генер}}\|),$$

по всему множеству выделенных ресурсов управления, где: $Q_{\text{потр}} = f(u_1^{\text{потр}}, \dots, u_m^{\text{потр}})$ – объем потребления на заданный период ТН, $Q_{\text{генер}} = f(u_1^{\text{генер}}, \dots, u_p^{\text{генер}})$ – объем требуемой генерируемой мощности на заданный период.

Одним из ключевых положений реализации сформулированной стратегии оптимизации сбалансированного теплоснабжения является объективный оперативный контроль прогнозной оценки $Q_{\text{генер}} = Q_{\text{генер}}(t, u, \varepsilon)$ спроса на ТЭ, зависящей от многих факторов, включая время t , параметры управления u , случайных факторов ε реализуемого технологического процесса. Был проведен сравнительный анализ и разработаны наиболее эффективные когнитивные нейро-сетевые модели прогнозной аналитики предиктивного анализа многомерных временных рядов, включая модели линейной и логистических регрессий, LSTM [11], RNN [12-13], позволившие добиться удовлетворительной точности и глубины прогноза в потребности ТЭ.

Такая сбалансированность между спросом и производством тепловой энергии наиболее эффективно может быть достигнута созданием автоматизированных систем оптимизацией процесса выработки строго необходимого объема генерируемой тепловой энергии, рассчитанной по обоснованным прогнозным моделям оценкам спроса, учитывающим максимально полный перечень факторов влияния на точность и глубину прогнозной оценки требуемого (необходимого) объема тепловой энергии. Проведен анализ и обоснован выбор методики формирования расчетно-экспериментальной оценки прогноза потребляемой тепловой энергии на основе класса нейросетевых прогнозных моделей и принципов когнитивного управления на платформе киберфизических систем [9]. В качестве наиболее перспективных рассмотрен класс нейро-сетевых прогнозных моделей, включая широко применяемые модели LSTM, RNN, регрессионные и др. В приведенной таблице приведены результаты сравнительного анализа применения некоторых из перечисленных нейро-сетевых моделей прогноза, иллюстрирующие точность на глубину суточного прогноза потребления энергии при регулярности проведении 60 замеров на один час.

Таблица: Сравнение точности моделей прогнозирования потребления тепловой энергии	
Модель	Погрешность
Линейная регрессия	9.6%
Дерево решений	8.9%
Случайный лес	6.3%
RNN	3.3%
LSTM	3.1%

3. Гибридная нейро-сетевая модель управления по векторному критерию многоцелевой оптимизации

Возможность получения оперативных прогнозных оценок $Q_{\text{генер}}(t, u, \varepsilon)$ объективной потребности ТЭ стало основой формирования эффективной модели и алгоритма оптимизации процессов генерации требуемого объема энергии $Q_{\text{генер}}$ как с точки зрения числа задействованных котельных агрегатов ТЭЦ, так и оптимизации

выделенных ресурсов на процессы управления каждым агрегатом. Очевидно, что как мощность потребляемого теплоносителя $Q_{\text{потр}} = f(u_1^{\text{потр}}, \dots, u_m^{\text{потр}})$, так и мощность генерации ТН $Q_{\text{ген}} = f(u_1^{\text{ген}}, \dots, u_p^{\text{ген}})$ зависят от многих факторов, разработка системы оптимизации процессов управления предполагает детальный анализ моделей указанных процессов как объектов управления, итак и построение стратегии и системы оптимального управления ими. Для сформулированного принципа оптимизации управления сбалансированностью генерацией ТЭ исходя из прогноза в ее потребности, зависящих от высокоразмерного комплекса параметров управления, определена целесообразность использования соответствующего – векторного критерия многоцелевой - многокритериальной оптимизации, основой которого является выделение системы целевых производственных показателей, по которым формируется общий интегральный критерий оптимизации процессов управления.

С этой целью выделены ключевые показатели $Q_{\text{ген}1}(U), \dots, Q_{\text{ген}M}(U)$ эффективности генерации ТЭ, по которым сформирован векторный критерий $Q_{\text{ген}}^*(U) = (Q_{\text{ген}1}(U), \dots, Q_{\text{ген}M}(U))^T$ многоцелевой многокритериальной оптимизации, подчиняющийся набору условий $h_k(U)$ и ограничений $g_j(U)$ на ресурсы управления U :

$$\begin{cases} \min/\max Q_{\text{ген}m}(U) & m = 1, 2, \dots, M; \\ g_j(U) \geq 0 & j = 1, 2, \dots, J; \\ h_k(U) = 0 & k = 1, 2, \dots, K; \\ U_i^L \leq U_i \leq U_i^N & i = 1, 2, \dots, I; \end{cases}$$

Развернутая предиктивная аналитика, как математически обоснованная методика анализа прогнозных оценок потребности производства в тепловой энергии, использующая алгоритмы машинного обучения и статистического моделирования для оптимизации управления процессами генерации энергии, позволяет строить максимально объективные и обоснованные оценки потребности в тепловой энергии. Такой правильно обоснованный объективный прогноз позволяет также обеспечить оптимальное управление производством и распределением тепловой энергии между производственными объектами энергосистемы [10]. В свою очередь, это позволяет правильно управлять операционными расходами при генерации тепловой энергии путем регулирования загрузки генерирующего оборудования, переводя, основные объемы генерации энергии в места и периоды с максимальной эффективностью.

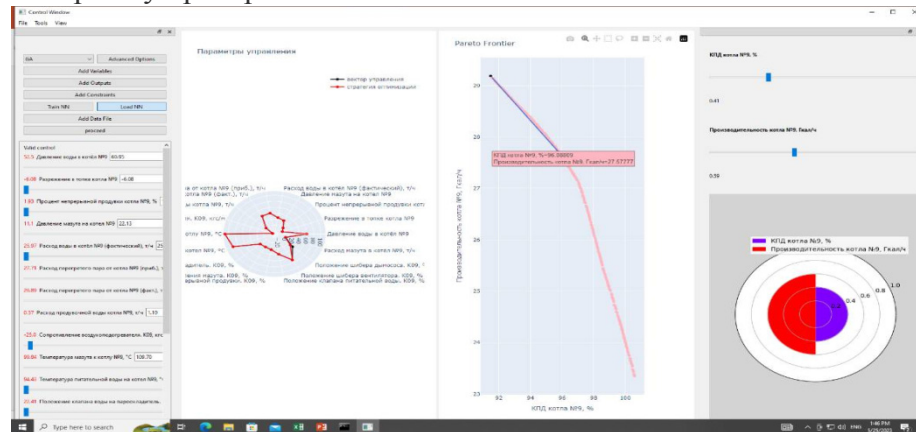
4. Программный комплекс «Интеллектуальный советчик поддержки принятия оптимальных управляющих решений»

Разработан специализированный программный комплекс (СПК) «Советчик Оптимизации Котельного Оборудования (СОКО), предназначенный (решающий задачу) оптимизации режимов работы котельного оборудования ТЭЦ на основе принципа сбалансированности между спросом – объективной прогнозной оценкой потребности в требуемой тепловой энергии, и предложением – генерацией строго необходимого объема выработки требуемой энергии путем оптимизации режимов работы котельного оборудования. Функционал программного комплекса включает предиктивную аналитику формирования объективной расчетно-прогнозной оценки спроса в потребности в тепловой энергии со стороны производственных участков с учетом всего комплекса факторов влияния на такую потребность, а также многоцелевую оптимизацию режимов работы котельного оборудования, задействованного в генерации требуемой тепловой энергии на планируемый временной

горизонт производственного процесса. Подсистемы управления программного комплекса обеспечивают:

- Расчетно-прогнозное планирование заказа на спрос (потребление) требуемого объема тепловой энергии Q_G , определяемого как целевое состояние процесса генерации основного продукта управляемого технологического процесса;
- Управление по базовому инновационному алгоритму многоцелевой многокритериальной оптимизации (МКО) рабочими режимами котельного оборудования по векторному критерию МКО.

На рисунке приведено окно визуализации параметров управления одним из котельных агрегатов, обеспечивающих переход с суб-оптимального на оптимальный режим работы



агрегата, генерирующего необходимый объем тепловой энергии на основе прогнозных оценок спроса и потребления тепловой энергии. Интерпретатор визуализирует параметры оптимального по критерию МКО управления U_t , переводя их в рекомендации – «советы» U_t по выбору оптимальных параметров управления котельным оборудованием для конкретного момента времени t .

5. Заключение

Внедрение нового поколения отечественных импортозамещающих технологий и систем промышленной автоматизации и управления энергоэффективностью современных предприятий, разработанных на принципах объективного прогноза и оптимизации баланса спроса и предложения рынка энергоносителей современными методами объективной прогнозной аналитики и управления, является мощным перспективным ресурсом повышения эффективности всего промышленного производства. Полученные результаты позволяют также развивать более сложные и эффективные алгоритмы интеллектуальной автоматизации и управления на основе современных цифровых моделей и анализа больших данных, сложных онтологических структур знаний и семантического анализа объективной оперативной информации.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00551 от 13.01.2023 «Методы и алгоритмы построения интеллектуальных киберфизических систем для обеспечения семантической интероперабельности».

Список литературы

1. Арсеньев Д.Г., Шкодырев В.П. Эволюция кибернетики: системы управления, основанные на знаниях // Материалы 15 мультikonференции по проблемам управления «МТУиП-2022». С.Пб, 2022.
2. Арсеньев Д.Г., Шкодырев В.П. Семантическая интероперабельность киберфизических систем как технологической платформы систем промышленной автоматизации // Материалы XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2023. Волгоград, Россия, 2023. Т. 2. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54698705&pf=1>.

3. Арсеньев Д.Г., Баскаков Д.Е., Шкодырев В.П. Многокритериальное Парето-эффективное обучение с подкреплением // Материалы XVI Всероссийской мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2023. Волгоград, Россия, 2023. Т. 2. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54698705&pff=1>.
4. Волтковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. № 3.
5. Соловейчик К.А. Производственный комплекс как структурообразующий элемент экономики региона // Экономика и управление. 2009. № 11 (60).
6. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 09.10. 2020 № 1523-р.
7. Arseniev D.G., Malykhina G.F., Shkodyrev V.P. Industrial Process Control Using DPCA and Hierarchical Pareto Optimization // Processes. 2023. Vol. 11. P. 3329. <https://doi.org/10.3390/pr11123329>.
8. Arseniev D.G., Nabil A. Cyber-Physical Systems and Control II // Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, 2023. Vol. 460.
9. Arseniev D.G., Overmeyer L., Kalvianen H., Katalinic B. Cyber-Physical Systems and Control // Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, 2022. Vol. 95,
10. Allan Gomez-Flores, Sadia Iyas, Graeme W. Heyes, Hyunjung Kim. A critical review of artificial intelligence in mineral concentration // Minerals Engineering. 2022. Vol. 189. P. 107884.
11. Leonid I. Perlovsky, Vyacheslav P. Shkodyrev. Physics of Mind // A Cognitive Approach to Intelligent Control Theory // Lecture Notes in Networks and System. Cyber-Physical Systems and Control, Springer, 2020. Vol. 95. <https://link.springer.com/bookseries/15179>.
12. G. Shmueli and O. R. Koppius. Predictive analytics in information systems research // MIS Q. 2011. P. 553-572.
13. Sachin M.M., Melvin Paily Baby, Abraham Sudharson Ponra. Analysis of energy consumption using RNN-LSTM and ARIMA Model // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1716.