

DOI:

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ТЭЦ СО СЛОЖНЫМ СОСТАВОМ ОБОРУДОВАНИЯ<sup>1</sup>

**Аракелян Э.К., Косой А.А., Андрюшин А.В., Ягупова Ю.Ю., Леонов М.С.,**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,*

*Россия, г. Москва ул. Красноказарменная д.14*

*Edik\_arakelyan@inbox.ru, KosoyAA@mpei.ru*

**Пашенко Ф.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

*Аннотация Решение задачи оптимального распределения текущей тепловой и электрической нагрузок на ТЭЦ со сложным составом оборудования связано с необходимостью учета значительного числа ограничений и обработки большого числа параметров. Предлагается вариант построения интеллектуальной системы, которая, помимо ряда интеллектуальных функций, ставит своей целью оценивать неизмеряемые или плохо измеряемые параметры количественно, идентифицировать текущее техническое состояние оборудования и рекомендовать либо имеющегося в базе данных решение, либо проведение новых расчетов.*

Ключевые слова: оптимальное распределение, тепловая и электрическая нагрузка, сложный состав, параметры, ограничения, многокритериальная оптимизация; интеллектуальные функции, генетический алгоритм, алгоритм деформируемого многогранника, требования, программное обеспечение.

### **Введение**

В настоящее время большое внимание уделяется изучению и разработке новых средств на базе искусственного интеллекта. Внедрение интеллектуальных алгоритмов, машинного обучения, нечеткой логики и т.д. очень перспективная область и также актуальна в сфере автоматизированных систем. Повышение степени автоматизации и интеллектуальности АСУ ТП может значительно улучшить эффективность и качество управления производственными процессами, а также освободить человека от рутинной деятельности, облегчить работу операторов и вместе с тем значительно снизить вероятность возникновения сбоев в работе по вине человеческого фактора. Одним из таких направлений является разработка и внедрение в программно-технические комплексы (ПТК) алгоритмы решения оптимизационных задач агрегатных, блочных и станционных уровней, в том числе задачи оптимального распределения нагрузки между генерирующими агрегатами станции. Кроме разработки алгоритма решения, важной частью так же является реализация его интеграции в прикладное программное обеспечение (ППО) ПТК и разработка способа их эффективного взаимодействия.

В современной энергетике определение оптимального режима работы оборудования электростанции остаётся очень важной задачей. Критерий оптимальности технологического процесса постепенно расширяется. К снижению себестоимости вырабатываемой электроэнергии и сокращению выбросов вредных продуктов сгорания топлива в окружающую среду добавляется рыночная составляющая дохода от продажи электроэнергии в секторе рынка на сутки вперед (РСВ). При рассмотрении долгосрочной перспективы, необходимо рассматривать вопросы надёжности оборудования и формирование сроков проведения ремонтных компаний.

Современная ТЭЦ располагает несколькими источниками дохода:

- от продажи электроэнергии на рынке на сутки вперед (РСВ) и балансирующем рынке (БР), от продажи тепла, а также продажи электроэнергии по регулируемым договорам (РД). И от продажи мощности в секторе рынка конкурентного отбора мощности (КОМ).
- за участие в рынке системных услуг (услуг по обеспечению системной надёжности)
- К затратам относятся:
- переменные затраты: оплата стоимости использованного топлива, экологический сбор; затраты на закупку электроэнергии на часть собственных нужд;
- Постоянные затраты (заработная плата персонала, траты на обслуживание оборудование и ремонтные компании)
- Штрафы за невыполнение обязательств

---

<sup>1</sup> Работа выполняется при финансовой поддержке РФФ, грант №19-38-90095

Маржинальная прибыль определяется как разница между доходом и расходом переменных затрат, при этом предполагается, что переменные затраты станция компенсирует за счёт продажи электроэнергии на рынках РСВ и БР, а также договорам РД, а постоянные затраты станция обеспечивает за счёт продажи мощности в секторе рынка КОМ.

## 1 Потенциал и проблемы развития

Вместе с тем в современных системах управления на базе ПТК заложенные в них потенциал программных и информационных возможностей используются далеко не в полной мере, что дает большой простор и ресурсы для повышения интеллектуализации АСУ ТП. Для уменьшения человеческого фактора, облегчения работы оператора, улучшения технико-экономических параметров работы автоматизированных систем, безопасности и возрастанию эффективности выработки электроэнергии на ТЭС, необходимо прибегнуть к увеличению уровня интеллектуальности на всех иерархических уровнях управления, а также внедрить новые программные и информационные средства, в некоторых случаях задействовать возможности искусственного интеллекта. Все это позволит решать множество важных оптимизационных задач станционного и блочного уровня, которые в данный момент не автоматизированы и могут быть решены только с активным участием человека [1-3].

Ситуация усложняется тем, что к сожалению, многие разработанные алгоритмы оптимизации не нашли широкого применения, в виду недостаточной их проработанности или отсутствия возможности реализации надлежащего взаимодействия между ПТК и программами, реализующими оптимизационный алгоритм, а также большой доли ручного ввода начальных данных, выполняемого при каждом изменении задания. Следовательно, для внедрения автоматизированного управления режимами работы электростанции, необходимо усовершенствовать техническое и информационное обеспечение АСУ ТП, работающих на базе ПТК

На станционном уровне интеллектуальная АСУ ТП должна реализовывать две основные задачи [3,4]:

1. Автоматически воспринимать команды диспетчерского управления и самостоятельно выполнять их, тем самым освободив оператора от постоянной слежки за изменениями диспетчерского графика;
2. В зависимости от поставленной задачи определять необходимость перераспределения нагрузки между агрегатами. То есть, иметь возможность передавать команды и осуществлять изменение нагрузки между блоками без участия человека.

Эффект от реализации оптимизационных задач в первую очередь зависит от достоверности информации, на базе которой проводятся расчеты и одним из основных направлений интеллектуализации – повышение точности информации.

Существующие алгоритмы оптимизации и расчета теплоэнергетических показателей электростанций, реализованные в отечественных ПТК, основываются на исходной информации, которая берется со значительной погрешностью. Она возникает из-за относительно высокой неточности информации, полученной в ходе измерений и отсутствия приведения обратных и прямых балансов между друг другом на всех ранее перечисленных уровнях. Данные проблемы можно решить внедрением алгоритмов, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), направленных на оценку текущих технологических параметров по результатам измерений и включающих учет систем уравнений теплового и материального балансов всех агрегатов и технологических узлов станции. Такой подход поможет получить наиболее достоверные данные основных параметров по всей электростанции, на них, в свою очередь, будут основываться расчеты, необходимые для реализации оптимального управления режимами работы энергооборудования и регулирования всех технологических процессов, проводимых на станции. Показателем достоверности оценок в предлагаемом алгоритме с использованием нейронных технологий является выполнение материальных и энергетических балансов для заложенной в алгоритм технологической схемы производственного комплекса при минимальной сумме отклонений внутри нормированных погрешностями измерительных каналов диапазонов неопределенности искомых оценок от измеренных значений технологических параметров.

## 2 Пути решения поставленных задач

Как было отмечено выше, для оценки и расчетов показателей работы технологических схем часто требуются оценки не измеряемых технологических параметров. Эти параметры могут быть введены в балансовые уравнения и найдены их косвенные оценки предлагаемым алгоритмом вместе с множеством корректируемых измеренных параметров. Математическая процедура поиска значений таких параметров не будут отличаться от процедуры вычисления оценок параметров по результатам измерения. Для того чтобы не измеряемые параметры минимально влияли на результаты коррекции результатов измерений с установленной погрешностью, для них следует устанавливать минимальную степень доверия, например, класс точности 4 или выше. Начальные их значения могут быть взяты из опыта эксплуатации или из паспортных или регламентных документов. Число введенных в задачу оценок не измеряемых параметров не должно быть больше числа балансовых уравнений [5,6].

Современные возможности архивирования информации в АСУТП открывает перспективы использования результатов измерения технологических параметров, значений их сбалансированных оценок и периодически вычисляемых технико-экономических показателей производства для создания интеллектуальных алгоритмов диагностирования систематических ошибок технических средств измерения, оперативного распределения нагрузок между агрегатами и уточнения режимных карт и других задач оперативного и перспективного управления.

Не менее важной проблемой является разработка интеллектуальной автоматизированной системы диагностирования текущего технического состояния основного оборудования и его ресурсных характеристик. Необходимо разработать методику анализа и применения нечеткой информации при идентификации состояния и параметров энергоустановок, в процессе эксплуатации, разработке моделей нечеткой идентификации для прогнозирования и управления энергоустановкой. Исследовать эффективность таких моделей с использованием их в экспертной системе, с применением плохо формализуемых нечетких знаний для диагностики состояния функционирующих энергоустановок, и создания системы интеллектуального диагностического контроля, анализа состояния и оптимизации долгосрочных режимов работы оборудования. Это позволит повысить эффективность и качественный уровень технического обслуживания энергоустановок ТЭС, их надежность, увеличить срок эксплуатации и межремонтные периоды за счет более гибкого («мягкого») выполнения режимов работы и вывода в ремонты по фактическому состоянию. В результате, это сэкономит существенные энергоресурсы и даст значительный народнохозяйственный эффект за счет повышения коэффициента готовности оборудования, дополнительной выработки энергии и сокращения затрат на ремонтное обслуживание [1,6].

Решение задачи по оптимальному распределению нагрузки между энергоблоками станции с целью максимизации прибыли можно изложить в нескольких пунктах:

1. Для начала работы программы должны быть известны расходные характеристики оборудования, зависимость для всех блоков при разных значениях давления теплофикационного отбора. Также необходимо иметь информацию об общей мощности, тепловой нагрузке и расходе сетевой воды энергоблоков, входящих в одну группу поставки.

2. Далее, с помощью любых из представленных ранее методов, для каждого блока необходимо найти значения при которых расход топлива будет минимальным, а прибыль максимальна, с учетом всех технологических ограничений и регулировочных диапазонов оборудования.

3. По результатам нахождения величин, полученных на предыдущем этапе, проводится процесс поиска оптимальных значений расхода сетевой воды в сетевых подогревателях по каждому блоку, с учетом величин недогрева воды до температуры насыщения отборного пара.

Учитывая все вышесказанное, алгоритм работы программы оптимального распределения нагрузки для ТЭЦ с турбинами типа Т-250/300-240 включает в себя следующие этапы:

1. Определение режима работы турбоагрегатов (конденсационный, с одно- или двухступенчатым подогревом сетевой воды) и состава оборудования.

2. Поиск и выбор из отдельного архива оцифрованных расходных характеристик, рассчитанных по нормативно-технической документации и максимально приближенных к нынешнему режиму работу оборудования. Также, уточнение характеристик с помощью поправок, в случае отклонения ключевых параметров.

3. Построение по данным, передающимся в режиме реального времени через прокси-сервер, линеаризованных расходных характеристик турбоагрегата, с учетом всех технологических ограничений. Далее, происходит наложение характеристик, полученных во 2 пункте и характеристик в режиме онлайн друг на друга. В случае превышения максимально допустимого отклонения,

задаваемого пользователем, оптимальное распределение нагрузки проводится с использованием характеристик, полученных в режиме реального времени. При возникновении ошибки в построении расходной характеристики из архива, в котором хранятся ранее использованные данные, извлекается и аппроксимируется максимально приближенная к текущему режиму работы характеристика и сравнивается с данными из пункта 2.

4. Применение оцифрованных расходных характеристик для поиска оптимальных значений распределения и расходов сетевой воды при текущем режиме работы ТЭЦ.

Третий шаг необходим начальном этапе внедрения для определения точности работы алгоритма и соответствия характеристикам, построенным по НТД. Он может быть исключен, в случае стабильного соответствия характеристик на длительном промежутке времени.

Для режимов ТЭЦ применяются различные методы оптимизации, а выбор математического аппарата зависит от типов турбоустановок, способов представления энергетических характеристик турбин, структуры отпуска тепла со станции. Аналитические методы поиска оптимальных решений для ТЭЦ со сложным составом оборудования непригодны ввиду большого числа переменных и ограничений на них. Для эффективного решения оптимизационной задачи распределения нагрузок необходимо корректно применять тот или иной метод оптимизации, соответствующий решаемой задаче как с точки зрения возможности его применения, так и с точки зрения трудоемкости расчетов, сложности программирования и универсальности применения. Для практического применения в задачах оперативного управления со сложными ограничениями рекомендуется использовать два программы пакета – генетический алгоритм и алгоритм деформируемого многогранника. Программы отличаются по быстродействию. Длительность поиска оптимума эволюционной генетической программой случайного поиска более чем на два порядка больше, чем эволюционной программой регулярного поиска. Однако достоинство ее состоит в том, что она при соответствующем формировании функции цели с множеством ограничений в состоянии найти допустимые области в многомерном гиперпространстве.

Алгоритм деформируемого многогранника с использованием решений, полученных на базе генетического алгоритма, успешно находит глобальный оптимум. При рассмотрении очередной популяции генетического алгоритма следует рассматривать не значения функции в точках этой популяции, а результаты работы симплекс-метода, который для инициации деформируемого многогранника использует эти точки. То есть из каждой точки популяции раскрывается свой многогранник и перемещается к экстремуму. Данный модифицированный генетический алгоритм, реализованный доцентом кафедры АСУ ТП Сабаниным Владимиром Романовичем, гарантирует нахождение глобального экстремума оптимизационной функции в  $n$ -мерном пространстве. Размерность наших задач, при оптимальном распределении нагрузок на ТЭЦ со сложным составом оборудования, позволяет использовать для своего решения данный алгоритм в оперативном режиме, то есть в режиме реального времени. Данный алгоритм имеет множество настроек, позволяющих дополнительно сократить время расчётов при необходимости. Выбор адекватных значений коридора изменения и шага изменений переменных на этапе наладки лежит на человеке-специалисте, а уже во время эксплуатации системы – на интеллектуальном узле оптимизации. Являясь одной из функций этого узла, выбор оптимальных настроек для работы модифицированного генетического алгоритма решается путём привязки времени работы алгоритма к выбранным настройкам через матрицу опыта искусственного интеллекта.

### **3 Использование искусственного интеллекта**

С каждым годом роль искусственного интеллекта и его влияние на мир информационных технологий, в том числе в сфере автоматизации значительно возрастает. Множество работ и исследований направлено на изучение возможностей повышения интеллектуализации и автоматизации, внедрении «умных» и прогностических алгоритмов на основе машинного обучения, баз знаний и нечеткой логики. Применение таких интеллектуальных средств возможно и при решении задачи оптимального распределения нагрузки. Одним из вариантов является применение машинного обучения (МО) для прогнозирования различных технологических показателей. Например, если расчет нагрузок при использовании алгоритма занимает много времени, то объект начинает уходить от своего первоначального состояния, при котором было получено задание от оператора. Это значительно затормаживает процесс и точность решения оптимизационной задачи. Как раз для решения этой проблемы можно использовать методы МО. С помощью прогностических алгоритмов возможно реализовать предсказание будущего состояния объекта. И в дальнейшем использовать эти данные в

качестве в качестве исходных для алгоритма по распределению нагрузки. Это значительно увеличит эффективность работы ПО. Однако разработка такой системы достаточно объемная и сложная задача, требующая опыта в работе с технологиями машинного обучения и такими алгоритмами предсказания как: логистическая и линейная регрессия, деревья принятия решений, метод k-средних и т.д. Кроме того, необходим большой объем формализованных и обработанных данных, с помощью которых будет проводиться обучение с учителем.

Еще одним вариантом интеллектуализации является разработка постоянно обновляемой библиотеки, состоящей из: (базы знаний - совокупности закономерностей, устанавливающих связь между вводимой и выводимой информацией), формализованных данных, модели их представления и механизма логического вывода. Ее можно будет использовать для сохранения в базе данных готовых оптимальных решений по распределению нагрузки. То есть использовать готовые решения при совпадении, установленной системным оператором нагрузки, и состояния, в котором находятся энергоблоки. Для этого необходимо выбрать несколько ключевых показателей работы оборудования, по которым можно судить о состоянии, в котором находился объект при реализации распределения нагрузки, результаты оптимального расчета и сохранять их в базе готовых решений. Это позволит в дальнейшем использовать, полученные значения по нагрузкам без необходимости проведения расчета. Представленные направления достаточно сложны в реализации, однако очень перспективны. На текущий момент их проблематично осуществить на базе ПТК, ввиду отсутствия поддержки и среды для разработки подобного типа задач. Однако, уже сейчас необходимы совместные усилия разработчиков алгоритмов оптимизации и программистов ПТК для устранения данного недостатка, чтобы предусмотреть возможность использования интеллектуальных средств в будущем.

Промежуточный опыт работ нашего научного коллектива в данном направлении показывает, что использование методов искусственного интеллекта позволяет перенести класс динамических задач по оптимальному распределению тепловой и электрической нагрузки на ТЭЦ со сложным составом оборудования в разряд задач оперативного решения внутри ПТК АСУ ТП ТЭЦ. Эффект от внедрения интеллектуального узла оптимизации в состав ПТК АСУ ТП является накопительным по отношению ко времени его эксплуатации. Это объясняется тем, что в продвинутых структурах искусственного интеллекта используются матрицы слоёв для накопления человеческого аналога опыта. При корректном совмещении этих возможностей и многолетних архивов сигналов АСУ ТП станции (при внедрении на работающую станцию) возможно сокращение времени выхода на максимальную эффективность [1]. Если же внедрение искусственного интеллекта происходит в ПТК АСУ ТП вновь возводимой станции, то на первоначальном этапе результаты оптимизационных задач из интеллектуального узла не идут напрямую в задатчики регуляторов, а носят рекомендательный характер для операторов станции. Аналогичная ситуация происходит при возведении дополнительной очереди новых блоков на действующую станцию.

#### **4 Техническая реализация**

Для реализации описанного выше взаимодействия, программное обеспечение, на котором работает алгоритм оптимального распределения нагрузки, должен поддерживать ряд функций и возможностей, которые представлены ниже:

1. Поддержка нескольких стандартных протоколов передачи данных: OPC UA, OPC DA, HART, Modbus и т.д.
2. Буферизация, хранение и анализ информации в отдельном архиве по выбранным параметрам за заданный промежуток времени. Такая информация включает в себя: ключевые параметры работы блока, оцифрованные расходные характеристики, полученные в режиме онлайн и по НТД.
3. Возможность автоматического получения утвержденных диспетчерских графиков, служащих в качестве сходных данных для реализации расчета.
4. Генерация отчетов и графиков, составленных по полученным данным с оценкой степени точности решения задачи.
5. Внедрение процесса аутентификации, с входом только по зарегистрированным учетным записям. Необходимо для ограничения доступа и предотвращения несанкционированного изменения логики функционирования программы.
6. Разработка с оглядкой на кроссплатформенность, в связи со сложившимися тенденциями на промышленном рынке.

Описанным выше требованиям в настоящее время удовлетворяет большинство современных ПТК, в том числе и отечественных. Это значит, что для технической реализации данного алгоритма и

интеграции его в АСУ ТП станции не потребуются закупка и наладка нового оборудования. Достаточно виртуально обособить неиспользуемые мощности ПТК, создав виртуальный функциональный узел для решения интеллектуальных задач. В этот узел, всё также виртуально, то есть не затрачивая средства на закупку и прокладку новых кабельных связей, завести из ПТК уже существующие сигналы от датчиков и программ. Выходные сигналы из интеллектуального узла оптимизации легко подключить как непосредственно дополнительными сигналами в подпрограммы АСР мощностей блогов, так и в виде рекомендательной информации на мнемосхемы оператору.

Ожидаемой сложностью технической реализации является распределение вычислительной мощности ПТК между решением оптимизационных и текущих задач. Не смотря на то, что разработчики АСУ ТП проектируемых станций закладывают большой резерв свободной вычислительной мощности ПТК, нельзя исключать ситуации, при которых уже на работающей станции возможно повышение нагрузки на технические ресурсы ПТК в следствии комбинирования срабатывания множества отдельных неопасных факторов. Это может быть как рутинное повышение температуры в помещении шкафов автоматизации, наложение запланированных служебных задач технического ПО(дефрагментация дисков, актуализация бекапов), работа тяжелых алгоритмов ПТК, так и неопасная в отдельности деградация резервирования контроллеров в случае отказа одного из них, вызывающая временную дополнительную нагрузку на ПТК, после восстановления работы отдельного модуля, для возврата к синхронизированной работе резервных пар контроллеров.

Комбинация всех этих рутинных проблем вкуче с работой нового виртуального интеллектуального узла в составе ПТК может вызвать недопустимые сбои в работе всей системы. Для недопущения возникновения таких ситуаций предлагается связать сигнал процента загрузки ресурсов ПТК с узлом интеллектуализации ПТК, введя ступенчатую шкалу выполняемых узлом функций. Градацию функций реализовать с помощью расстановки приоритетов решаемых задач интеллектуальным узлом, что выходит за границы данной статьи. Подчеркнём только, что в аварийном случае критической нехватки свободной вычислительной мощности ПТК должна происходить предельная деградация узла решения интеллектуальных задач оптимизации. Очевидно, что таком тяжелом для АСУ ТП станции случае – временное отключение виртуального интеллектуального узла для высвобождения вычислительных мощностей под штатные задачи является первостепенным и естественным решением.

## Заключение

1. Рассмотрен текущий потенциал и проблемы развития интеллектуальности алгоритмов оптимального распределения нагрузки на ТЭЦ со сложным составом оборудования.

2. Для повышения интеллектуальности алгоритмов оптимального распределения нагрузки было предложено использовать методы машинного обучения и искусственного интеллекта. Предложены подходы по использованию современных методов машинного обучения к специфике задач распределения мощностей ТЭЦ.

3. В статье представлен способ интеграции разрабатываемого узла интеллектуализации в состав ПТК АСУ ТП ТЭЦ, который позволит сэкономить ресурсы на закупке и установке нового оборудования. Рассмотрены потенциальные проблемы интеграции этого узла в состав действующего ПТК и способы их решения.

## Литература

1. *Аракелян Э.К., Андрюшин А.В. Мезин С.В., Сабанин В.Р., Косой А.А.* «Подходы к повышению интеллектуальности АСУТП крупных электростанций путем решения оптимизационных задач блочного и станционного уровней» MLSD'2018. В книге: Управление развитием крупномасштабных систем. Материалы одиннадцатой международной конференции. В 2-х томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2018. – С. 434-436.
2. *Тверской Ю.С.* «Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУ ТП ТЭС» / Ю.С. Тверской, С.А, Таламанов // Теплоэнергетика, 2010. – №10. – С.37-44.
3. *Аракелян Э. К., Васильев Е. Д., Хуришудян С. Р.* «Проблемы современных автоматизированных систем управления технологическим процессом на базе программно-технических комплексов и возможный путь их решения» Статья в «Вестник МЭИ» М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 15-20
4. *Ибрагимов И. М.* Использование систем искусственного интеллекта при эксплуатации энергетических объектов // Научно технический журнал Надёжность и безопасность энергетики. – М.:НПО Энергобезопасность. 2008. – С.51-55

5. *Gorlach I. and Wessel O.* «Optimal Level of Automation in the Automotive Industry» Engineering Letters, vol. 16, no. 1, pp. 141-149, 2008.
6. *Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И., Аракелян Э.К., Макаров О.Н., Андреев С.Н.* Математическое и программное обеспечение алгоритма коррекции измеряемых параметров для расчета технико-экономических показателей на ТЭЦ// Вестник МЭИ. 2003. №1. С. 21-27.
7. *Аракелян Э.К., Андрюшин А.В., Мезин С.В., Косой А.А.* «Оценка оптимального уровня интеллектуальности АСУТП энергоблоков большой мощности на баз современных ПТК» MLSD'2019. В книге: Управление развитием крупномасштабных систем. Материалы двенадцатой международной конференции. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2019. – С. 574-576.
8. *Дайманд И.Н., Козловский В.Г., и др.* Синтез интеллектуальных автоматизированных систем управления сложными технологическими процессами Автоматизация в промышленности. 2013. №7