

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭС ПУТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕКУЩИМИ ТЭП ОБОРУДОВАНИЯ И СТАНЦИИ В ЦЕЛОМ

Аракелян Э.К.¹, Пашенко Ф.Ф.², Мезин С.В.¹, Андришин А.В.¹, Косой А.А.¹

¹ *Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва ул. Красноказарменная д.17*

² *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65
edik_arakelyan@inbox.ru*

Аннотация.: Рассматривается проблема расчета и анализа текущих и нормативных энергетических показателей (ТЭП) каждого агрегата, блока и станции в целом, определяется причины появления расхождения между ними и даются рекомендации по их оперативному устранению; Показано, что существующие алгоритмы расчета ТЭП ограничиваются фиксацией значений ТЭП со значительной погрешностью, обусловленной погрешностью исходной информации и невозможностью сведения прямых и обратных балансов отдельных агрегатов, блока и станции между собой. Для повышения достоверности исходной информации предлагается использовать интеллектуальный алгоритм решения задачи получения оценок значений технологических параметров по результатам измерений с использованием системы материальных и тепловых балансовых уравнений агрегатов, участков и всей станции. Предлагается подход, обеспечивающий необходимую достоверность расчета ТЭП и проведения всех необходимых расчетов по оптимальному управлению технологическими процессами и режимами работы на всех иерархических уровнях управления 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 искомым оценок от измеренных значений технологических параметров. Приведены описание алгоритма выбора переменного оперативного интервала расчета ТЭП и методика выработка рекомендаций по устранению разницы между текущими и нормативными ТЭП.

Ключевые слова: управление, энергетические показатели, нормативные, текущие, исходная информация, достоверность, нейронные технологии, переменный интервал расчета, повышение, энергетическая эффективность.

Для повышения эффективности работы станции в рыночных условиях путем интеллектуализации АСУТП в первую очередь необходимо поставить и решить оптимизационные задачи станционного уровня. С другой стороны, как утверждают разработчики ПТК, отсутствие в прикладном программном обеспечении (ППО) алгоритмов решения оптимизационных задач обусловлено в том числе отсутствием готовых к интеграции в ППО методических подходов и алгоритмов с учетом особенностей технических, информационных и программных средств ПТК. Сложность заключается в том, что современные ПТК ориентированы на решение задач в рамках относительно автономно функционирующего энергоблока, а решение оптимизационных задач станционного уровня потребует группового управления с соответствующими требованиями к информационному обеспечению.

Организовать новый качественный анализ и управление ТЭП – перманентный и многофакторный процесс, который способен частично или полностью исключить существующие недостатки при традиционном подходе к расчету и анализу ТЭП, но это возможно только при условии его автоматизации. Однако автоматизация анализа показателей электростанций в настоящее время практически полностью отсутствует, вопреки интенсивному внедрению современных модернизированных средств вычислительной техники на ТЭС, и в большей степени на АЭС.

Работа выполнена с финансовой поддержкой Российского научного фонда, грант №19-19-00601

Такое отставание обусловлено недостаточной оценкой влияния анализа как мощного инструмента воздействия на экономику производства и используемых методов его проведения. Очевидно, что существует прямая зависимость между достигнутыми ТЭП тепловых электростанций и уровнем их анализа. Если уровень анализа выше, то, в конечном счете имеем более низкие удельные расходы топлива. В этой области наиболее значительных результатов достигли энергетики из Франции, считающие разумным бороться за экономию топлива, в отдельных случаях равную 1 ккал на 1 кВт/ч, или около 0,04%. На всех электростанциях высокого давления Франции с совместной выработкой электроэнергии около 96% устроен всесторонний экономический контроль за расходом топлива, составляющим около 70% всех расходов. С этой целью каждый месяц проводят сравнение

фактического удельного расхода тепла по каждому отдельному блоку с минимально возможным. Причины, которые в течение рассматриваемого периода могли бы повлиять на эксплуатацию оборудования, подвергаются подробному исследованию. Всего исследуется около 50–60 факторов, наиболее определяющими из которых являются заданный график нагрузки, неблагоприятные атмосферные условия, нестандартное качество топлива, состояние оборудования, процесс сжигания топлива, параметры пара, расход 18 электроэнергии на собственные нужды, потери воды и пара. В результате на ТЭС Франции происходит непрерывное сближение фактического и оптимального удельных расходов условного топлива. Добиться таких результатов французские энергетики смогли в результате внедрения автоматизированных систем анализа ТЭП [1]. В конечном счете можно утверждать, что расчет ТЭП является одной из принципиальных задач анализа эффективности производства энергии электростанции.

Анализ работы существующих, традиционных методов расчета ТЭП показывает ряд недостатков, которые существенно влияют на конечный результат. Наиболее слабым звеном является исходная информация. Имеющиеся алгоритмы расчета ТЭП фиксируют значения ТЭП с существенной погрешностью, обусловленной погрешностью исходных данных, а также невозможностью сведения прямых и обратных балансов между собой, вследствие чего расчет ТЭП ведется со значительными отрывом по времени, что ставит под сомнение актуальность полученных данных.

Конечно, рассчитать ТЭП в режиме on-line очень привлекательно, но вряд ли практически реализуемо ввиду инерционности систем регулирования и каналов передачи информации, очень большого числа операций при расчете и ряда других причин, а также низкой степени автоматизации технологического процесса на станции. В связи с этим речь может идти о максимально возможном приближении расчета ТЭП к оперативному режиму.

Существующая отчетность по ТЭП станции обычно формируется на интервале -декада-месяц, как итог, из-за отсутствия актуальной и оперативной информации по состоянию оборудования, эксплуатирующий персонал может принимать ошибочные решения по изменению технологического процесса в целях достижения максимальной эффективности, что в свою очередь приводит к дополнительным убыткам.

Следует так же отметить, что современные методы расчета базируются на усредненных и определенном интервале значениях параметров, далее применяющиеся для выявления характеристик основываясь на нормативно-технической документации по топливо использованию. Данная процедура позволяет обеспечить высокую помехоустойчивость, а так же снижает затраты машинного времени. Вместе с тем расчет ТЭП по усредненным показателям может также приводить к значительным погрешностям ввиду сильной нелинейности нормативных графиков. Погрешность конечного результата может быть еще выше, с учетом того, что нелинейных нормативных энергетических характеристик более сотни, а также то, что при увеличении интервала усреднения, погрешность результата вычисления может стать еще выше. Следует отметить так же, что при принятом интервале усреднения за 15мин. при расчете текущих ТЭП «сглаживаются» дополнительные потери топлива, связанные с нестационарностью переходных быстротекущих процессов в режимах разгрузки-нагрузки энергоблоков [2].

Еще одним существенным недостатком существующих методов расчета ТЭП является высокая степень «ручного» ввода значений основных измеряемых величин, необходимых для контроля экономичности и надежности режима работы оборудования. Это обусловлено тем, что в подавляющем большинстве измерительных приборов отсутствует цифровой выход, дающий возможность автоматизировать процесс сбора технологических данных. Так же в письменной форме фиксируются причины нарушения нормального режима работы оборудования. Все параметры вносятся в ведомость персоналом станции, работающий на электроустановках. Суточные ведомости так же ведутся дежурным персоналом, на обратной стороне которых так же ведутся записи всех совершенных за смену переключений, отмечается время пуска и останова основного и вспомогательного оборудования, а также недостатки в работе оборудования и вынужденные отклонения от нормальных режимов, установленных инструкциями и режимными картами. Несмотря на то, что вся информация ведется с особой тщательностью, а так же проходит множественную проверку, ошибки фиксирования данных, сделанные дежурным персоналом могут в дальнейшем повлиять на надежность и безотказность работы оборудования и экономические потери станции в целом. Важно отметить, что существующие недостатки традиционных методов расчета ТЭП являются следствием того, на момент разработки Типового алгоритма, а также большинства конкретных алгоритмов расчета ТЭП, а именно 70 и 80 – е годы прошлого столетия отсутствовали средства вычислительной техники [3,4].

Как было показано выше, существующие алгоритмы оптимизации и расчета ТЭП 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 базироваться 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].

Алгоритм коррекции измеряемых параметров предназначен для вычисления корректирующих поправок к результатам измерения технологических параметров. Поправки корректируют результаты измерений таким образом, чтобы комплексное их использование в расчетах ТЭП обеспечивало выполнение всех балансовых соотношений технологического процесса.

Система, обеспечивающих информационную избыточность балансовых соотношений для исследуемого технологического процесса может быть записана в виде:

$$F_j(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где- $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ вектор размерности (n) оценок измеренных значений технологических параметров; m – число уравнений балансов.

На практике балансы, как правило, не сходятся. Убедительным подтверждением присутствия ошибок измерения являются нарушения балансовых соотношений при подстановке в них усредненных на достаточно длительном интервале времени результатов измерения при условии отсутствия технологических отказов. Появившиеся небалансы F_j могут быть устранены целевым сдвигом значений измеряемых величин внутри диапазонов их неопределенности, обусловленных погрешностью измерения.

Уравнения системы балансовых соотношений (1) выполняются только при подстановке в них оценок скорректированных значений технологических параметров:

$$x_i = x_{iu} + \Delta x_i \quad (2)$$

где: x_{iu} - значение i – го параметра, полученные по результатам измерений и обработки в соответствующих процедурах усреднения и интегрирования при подготовке информации для расчета балансов; Δx_i - вычисленное по алгоритму коррекции поправка к i – му параметру, обеспечивающая вместе с другими скорректированными параметрами сходимость всех уравнений системы (.1).

Значения Δx_i , способные скорректировать уравнения балансов, могут быть найдены из решения задачи оптимального распределения величин корректирующих поправок при ограничениях на балансовые соотношения (1) в соответствии с критерием

$$\sum_1^K x_{ik \max} P_k \rightarrow \min \quad \text{при} \quad \sum_1^K P_k = 1, \quad k=1,2,\dots, \quad (3)$$

где $x_{i \max}$ - верхний предел диапазона измерения, P_k -весовые коэффициенты, K - число искомых поправок

Наличие достоверных показателей текущих ТЭП позволяет в интеллектуальной АСУТП ставить и решить задачу управления ТЭП. На основе полученных достоверных показателей рассчитываются ТЭП по каждой производственной единице в текущем и базовом (нормативном или согласованном с эксплуатацией) режимах, выявляется первопричина отклонения текущего показателя от базового и вырабатываются рекомендации по его максимальному сокращению. По результатам предварительных расчетов можно ожидать, что предлагаемый подход к управлению ТЭП позволяет

снизить удельный расход топлива на выработку электрической энергии в конденсационном цикле на 2-3 %. 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 [4,5].

Как было показано выше, одним из недостатков традиционного алгоритма расчета ТЭП заключается в относительно длинном временном интервале усреднения измеряемых для расчета ТЭП параметров -15 минут, что приводит в том числе большой погрешности относительной динамической погрешности расчета ТЭП в переходных и нестационарных режимах. Исследования, проведенные на базе анализа расчета ТЭП в реальных условиях работы ТЭС, предложенное в работе сокращение оперативного интервала расчета ТЭП энергоблока с пятнадцати до трех минут обеспечивает снижение относительной динамической погрешности расчета ТЭП энергоблока в переходных режимах энергоблока на 0,69%. [7].

Для исследования важности выбора оптимального интервала расчета ТЭП был проведен опыт на тренажере энергоблока ПГУ=450 по сбору параметров, отражающих работу ПГУ на интервале 5400 с в стационарных и переменных режимах. Усреднения данных по мощности ПГУ были сделаны по различным оперативным интервалам 180, 600 и 900 с. Анализ результатов показали, что с точки зрения результата данного показателя в зависимости от времени усреднения можно утверждать, что при переменных режимах работы энергоблока целесообразно рассчитывать ТЭП на максимально возможном меньшем интервале усреднения, исходя из существующих автоматизированных средств, позволяющих осуществлять данные расчеты предлагается рассчитывать ТЭП при усреднении данных на интервале в 3-4 минуты, поскольку кривая более четко отражает поведение энергоблока при наборе нагрузке.

При стационарном режиме работы, когда кривая принимает линейный характер, выбор интервала расчета ТЭП предлагается отдать интеллектуальному алгоритму на основе анализа данных, которые внесены в его базу данных. Реализовать данную программу предлагается следующим образом: мы не задаем интервал усреднения для каждого режима работы энергоблока а создаем базу данных по усредненным значениям за длительный период времени с несколькими интервалами усреднения и для текущего состояния и ищем его, анализируя базу данных по нейросетевой технологии...

Исходя из того, что исходные данные представляют собой количественные характеристики работы энергоблока в различных режимах работы, в процессе работы программы предлагается сохранение истории работы в базу данных, Анализируя полученные на входе значения текущего состояния энергоблока, необходимо выбрать наиболее оптимальный интервал расчета ТЭП, для текущего состояния, для чего проводится сравнение полученных текущих значений со значениями, имеющимися в базе данных системы по усредненным значениям ТЭП за длительный период времени с несколькими интервалами усреднения. Предлагается задаться минимальным, максимальным и промежуточными интервалами в соответствии с которыми в дальнейшем будет производиться расчет ТЭП. Как было показано выше, целесообразным считается усреднение на интервалах: 4 минуты – если режим переменный, например, разгрузка или нагрузка блока поскольку в таком случае мы наиболее точно можем получить сведения о работе энергоблока, тем самым в последствии сделать процесс выработки электричества наиболее экономичном при максимально возможном достижимом КПД энергоблока; 15 минут- стационарный режим, без какого-либо изменения нагрузки и параметров, если при стационарной нагрузке имеется какое либо большое возмущение, то интервал должен быть между первыми двумя вариантами – 7-8 минут. Учитывая достаточно сильное изменение состояния энергоблока в кратковременный промежуток времени при переходных процессах, предлагается, чтобы программа работала в опережающем режиме, экстраполируя полученные данные и на основе полученной экстраполяции выдавать выходное значение по интервалу расчета ТЭП. Так же, для оптимизации расчётов, предлагается сделать анализ влияния входных параметров на погрешность расчета ТЭП, тем самым отсеивая те, которые оказывают наименьшее влияние, но это не будет означать, что они не будут участвовать в расчете ТЭП.

Предлагается исключить из алгоритма расчета интервала усреднения, что позволит оптимизировать процесс расчета ТЭП, не теряя точности конечного результата. Процедура выбора типа нейросети и ее обучения стандартная. целесообразным считается использовать многослойную сеть с последовательными связями, а именно многослойный персептрон прямого распространения сигнала, поскольку обладает высокой гибкостью и обеспечивает крайне эффективное нелинейное отображение пространства входов на пространство выходов. Выбирая структуру анализируемой нейронной сети, мы будем подразумевать выбор количества скрытых слоев, а также числа нейронов в этих слоях и выбором функции активации этих нейронов. Для обучения нашей нейронной сети предлагается использовать алгоритм с учителем. Обучение происходит при помощи обучающей пары, т.е. для каждого входного вектора предусматривается целевой вектор характеризующий собой требуемый выход. На практике мы должны увидеть, что при подаче на вход нейронной сети значений параметров энергоблока при определенном режиме работы, сеть, анализируя полученные данные с имеющейся информацией по различным усредненным параметрам работы блока должна верно определить его режим работы и оперативный интервал усреднения расчета ТЭП текущего состояния энергоблока. При предъявлении входного вектора, рассчитывается выход сети и сравнивается с требуемым выходом сети, разность (ошибка) с помощью обратной связи подается в сеть, после чего меняются веса в соответствии с алгоритмом, стремящимся свести ошибку к минимуму. Данная процедура повторяется до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет допустимого низкого уровня. На старте программы предлагается обучать нейросеть используя статистические данные, полученные по конкретному энергоблоку на длительном периоде. Общую выборку предлагается разделить на две части, 70% данных, использовать для обучения сети, а 30% использовать в качестве контрольной выборки, определяющей качество обучения нейросети [8].

Обобщая вышесказанное, можно утвердить, что их реализация в рамках интеллектуальной АСУТП качественно позволит улучшить процесс управления энергоблоком, основываясь на более точной информации, которую, персонал будет получать о его текущем состоянии работы. Надежная система по получению точных параметров состояния энергоблока по его текущему состоянию, а также наличие достоверных показателей текущих ТЭП позволяет ставить и решать задачи по их управлению. На основе полученных достоверных показателей рассчитываются ТЭП по каждой производственной единице в текущем и нормативном режимах, выявляется первопричина отклонения текущего показателя от базового и вырабатываются рекомендации по его максимальному сокращению путем проведения управляющих воздействий – техническое обслуживание, ремонт и т.д.

При этом возникает актуальная проблема оценки времени и целесообразности их реализации. Определение целесообразности и сроков проведения восстановительных работ с целью устранения или сведения к возможному минимуму отклонения текущего исследуемого показателя экономичности от нормативного его значения зависит от соотношения требуемых затрат на восстановительные мероприятия и ущерба станции, как следствие от величины отклонения. В качестве оценки такой возможности воспользуемся понятием удельных затрат станции за единицу времени эксплуатации блока, предложенного в [9.10] для определения оптимального срока эксплуатации между очередными восстановительными или ремонтными работами, исходя из фактической картины снижения экономичности энергоблока во времени и необходимых затрат на проведение восстановительных или ремонтных работ.

Предлагаемую методику для наглядности рассмотрим на примере необходимости оценки целесообразности проведения очистки поверхностей охлаждения конденсатора для устранения текущего постоянного повышенного давления в конденсаторе по отношению к нормативному его значению при тех же условиях, что привело к нарушению баланса тепла между конденсирующимся паром и охлаждающей водой, и, как следствие – к росту удельного расхода топлива на выработку электроэнергии.

Применительно к поставленной нами задаче удельные затраты представим в виде:

$$z(t) = \frac{Z(t)}{t} = \frac{\Delta\Pi(t) + z_{II}(t_{oc}, m) + \Delta\Pi(t_{oc})}{t}, \quad (4)$$

где t – длительность работы энергоблока в период от последнего восстановительного ремонта или техобслуживания и текущим временем; $Z(t)$ -интегральные затраты за время (t) работы рассматриваемого аппарата; $\Delta\Pi(t)$ - потеря прибыли станции за время (t) за счет загрязнения поверхностей нагрева; $z_{II}(t_{oc}, m)$ - величина постоянных затрат на чистку или восстановительный

ремонт; $t_{оч}$ - длительность процесса чистки или восстановительного ремонта; m - условное число, определяющее тип чистки или ремонта; $\Delta\Pi(t_{оч})$ - потери прибыли станции в период проведения чистки или ремонта.

Для упрощения расчетов потерь прибыли станции за счет ухудшения экономичности работы энергоблока примем следующие исходные условия и предпосылки:

- уменьшение прибыли станции при работе рассматриваемого энергоблока с повышенном давлении в конденсаторе конденсационного энергоблока при постоянной электрической мощности связано с увеличением расхода топлива, и при постоянной мощности – ростом удельного расхода топлива на выработку электроэнергии и соответственного увеличения стоимости поставляемого на рынок электроэнергии;
- принимается, что объем электроэнергии, заявленный станцией по рассматриваемому энергоблоку для продажи на рынке электроэнергии, реализуется частично на конкурентном, частично – на балансовом рынке, при этом вероятность продажи электроэнергии в полном объеме на каждом из этих секторов рынка меньше или равно единице, а фактические объемы продажи составят:

- на конкурентном рынке

$$\mathcal{E}_\tau^{kp} = \mu_\tau^{kp} \mathcal{E}_\tau, \quad (5)$$

- на балансовом рынке

$$\mathcal{E}_\tau^{bp} = (\mathcal{E}_\tau - \mu_\tau^{kp} \mathcal{E}_\tau) \mu_\tau^{bp} = \mathcal{E}_\tau (1 - \mu_\tau^{kp}) \mu_\tau^{bp}. \quad (6)$$

Тогда общий объем продажи электроэнергии составит:

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = \mu_\tau^{kp} \mathcal{E}_\tau^{kp} + \mu_\tau^{bp} \mathcal{E}_\tau^{bp} = \mu_{\text{э}\tau} \mathcal{E}_\tau = (\mu_\tau^{kp} + \mu_\tau^{bp} - \mu_\tau^{kp} \mu_\tau^{bp}) \mathcal{E}_\tau, \quad (7)$$

а вероятность $\mu_{\text{э}\tau} = \mu_\tau^{kp} + \mu_\tau^{bp} - \mu_\tau^{kp} \mu_\tau^{bp} \leq 1, 0;$ (8)

В (5)-(8): $\mu_{\text{э}\tau}$ - вероятность продажи электроэнергии на рынке в полном объеме; $\mu_\tau^{kp} \leq 1, \mu_\tau^{bp} \leq 1$ - вероятности продажи электроэнергии на конкурентном и балансовом рынках (их можно оценить на основе анализа статистических данных); \mathcal{E}_i - объем электроэнергии, заявленного станцией по рассматриваемому блоку для продажи на рынке электроэнергии «на сутки вперед»; $\mathcal{E}_i^{kp}, \mathcal{E}_i^{bp}$ - объемы продажи электроэнергии на конкурентном и балансовом рынках.

С учетом принятых условий изменение прибыли станции во времени при ухудшении экономичности работы энергоблока при постоянной его мощности можно считать по выражению:

$$\frac{d}{dt}(\Pi(t)) = \frac{d}{dt}(\Pi_\tau^{kp} + \Pi_\tau^{bp}). \quad (9)$$

или

$$\frac{d}{dt}(\Pi(t)) = \mathcal{E}_\tau \frac{d}{dt}(\mu_\tau^{kp} \Delta c_{\text{э}\tau}^{kp} + (1 - \mu_\tau^{kp}) \mu_\tau^{bp} \Delta c_{\text{э}\tau}^{bp}). \quad (10)$$

Так как на рынке электроэнергии конкуренция идет по топливной составляющей в себестоимости электроэнергии, то при постоянных значениях составляющих себестоимости электроэнергии, кроме топливной, прибыль от продажи можно рассчитывать как разность между «равновесной» цены электроэнергии в τ -м часу и топливной составляющей.

Тогда величины $\Delta c_{\text{э}\tau}^{kp}, \Delta c_{\text{э}\tau}^{bp}$ можно рассчитать по выражениям:

$$\Delta c_{\text{э}\tau}^{kp} = c_\tau^{pk} - u_{\text{ум}} b_{\text{э}\tau}; \quad (11)$$

$$\Delta c_{\text{э}\tau}^{bp} = c_\tau^{pb} - u_{\text{ум}} b_{\text{э}\tau}, \quad (12)$$

где c_τ^{pk}, c_τ^{pb} - средняя величина «равновесной» цены электроэнергии в текущий время на конкурентном и балансирующем рынках электроэнергии; $u_{\text{ум}}$ - стоимость условного топлива; $b_{\text{э}\tau}$ - удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии в текущем состоянии энергоблока.

Для упрощения дальнейших расчетов примем следующие условия и допущения:

- вероятности продажи электроэнергии на конкурентном и балансовом рынках в полном объеме не зависят от времени и от величины изменения удельного расхода топлива во времени;
- цена условного топлива постоянная величина;
- усредненные значения равновесной цены на электроэнергию на конкурентном и балансовом рынках известны и тоже не зависят от величины удельного расхода топлива.

В этих условиях из (10) после несложных преобразований для расчета интегральной величины потери прибыли станции во временном интервале времени (0-t) получим:

$$\Delta\Pi(t) = \int_0^t \mu_0^{kp} \mu_0^{\delta p} u_{ym} \mathcal{E}(t) \Delta b(t) dt = u_{ym} \mu_0^{kp} \mu_0^{\delta p} \int_0^t \Delta B(t) dt \quad (13)$$

где $\mathcal{E}(t), \Delta B(t), \Delta b(t)$ - функции выработки электроэнергии, изменения расхода и удельного расхода условного топлива во времени. Последние две функции определяются как функции от изменения давления в конденсаторе.

Критерий оптимизации (4) при принятых условиях и допущениях примет вид:

$$z(t) = \frac{u_{ym} \mu_0^{kp} \mu_0^{\delta p} \int_0^{t_p} \Delta B(t) dt + \mathcal{Z}_\Pi(t_{oc}) + \Delta\Pi(t_{oc})}{t} \quad (14)$$

Как показали расчеты, функцию интегральных потерь топлива $\int_0^t \Delta B(t) dt$ предлагается (после ее расчета, исходя из графика роста удельного расхода топлива во времени, можно с большой точностью аппроксимировать в виде нелинейной функции вида

$$\int_0^t \Delta B(t) dt = (b_0 + b_1 t) t \quad (15)$$

где $b(0,1)$ – коэффициенты регрессионного уравнения (15), рассчитанного на базе обработки статистических данных (в том числе можно с применением нейросетевой технологии).

Исходя из того, что минимум функции (14) соответствует условию $\frac{dz(t)}{dt} = 0$, после преобразований получим

$$u_{ym} \mu_0^{kp} \mu_0^{\delta p} b_1 = \frac{\mathcal{Z}_p}{t^2}, \quad (16)$$

где $\mathcal{Z}_p = \mathcal{Z}_\Pi(t_{oc}) + \Delta\Pi(t_{oc})$ - стоимость затрат в период чистки или ремонта.

Из (16) получим оценочное значение целесообразного времени эксплуатации между очередными чистки или восстановительного ремонта с целью устранения дефектного состояния конденсатора.

$$t_{onm} = \left(\frac{\mathcal{Z}_p}{u_{ym} \mu_0^{kp} \mu_0^{\delta p} b_1} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Таким образом, если время эксплуатации конденсатора от момента последней чистки или ремонта до текущего момента больше, чем полученное значение по (17), то конденсатор подлежит очередной чистки, а если нет, то можно его эксплуатировать дальше.

Очевидно что создание системы управления ТЭП на всех иерархических уровнях электростанции актуально по многим причинам: это дает возможность значительного повышения энергетической эффективности производства энергии; приводит к экономии средств на техническое и ремонтное обслуживание; достоверная информация о реальном состоянии оборудования и станции в целом является основой для принятия оптимальных решений при выходе на рынок электроэнергии и мощности.

Литература

1. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных системы / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский - СПб.: Питер, 2001. - 384 с.
2. Аракелян, Э.К., Старишинов, В.А. Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций // М. : МЭИ, 1993. – 328 с.
3. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками ТЭС и АЭС / М. А. Дуэль. – Харьков: ЧП «КиК», 2006. – 284 с.
4. Методические указания по подготовке и передаче информации о тепловой экономичности работы электростанций и энергосистем МУ 34-70-065-84*. М.: СПО Союзтехэнерго, 1984.
5. Sabanin V.R., Starostin A.A., Repin A.I., Popov A.I. Study of Connected System of Automatic Control of load and Operation Efficiency of a Steam Boiler with Extremal Controller on a Simulation Model //Thermal Engineering. 2017 Vol. 64, No. 2 pp. 151-160. ISSN 0040-6015.
6. E.K Arakelyan, A.V. Andryushin, S.V. Mezin, V.R. Sabanin, A.A. Kosoy // Approaches to improving Intelligence control systems of large power plants by solving optimization problems block and station levels/ Managing the development of large scale systems (MLSD-2018) proceedings of the 11-t Intern. Conf. 1-3 oct. 2018 y. Moscow, part 1, p.434-436.
7. Горбань Ю.А. Исследование и оптимизация периода расчета технико-экономических показателей энергоблока ТЭС. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – М. : МЭИ, 2019. – 20 с.
8. Аракелян Э.К., Евсеев К.В., Болдырев И.А., Султанов М.М., Юров В.А. Методика повышения точности расчёта ТЭП генерирующих систем с применение машинного обучения//Материалы III Международной конференции "Современные проблемы теплофизики и энергетики", С.471-472.
9. Аракелян Э. К., Хоссаин М. Г. Методика определения оптимального срока очистки наружных поверхностей нагрева котла // Вестник МЭИ – М.: Изд. Дом МЭИ – 2010 - №2 – С. 26 – 29.
10. Аракелян Э.К. Выбор оптимальных сроков ремонта энергоблоков с учетом изменения их надежности и экономичности / Э.К. Аракелян, А.В. Андрюшин, Н.Т.Амосов // Изв. Вузов. Энергетика. 1987.№7 .С.38-41.