



М. А. Меленцов



А. А. Меленцов

DOI: 10.34831/EP.2023.64.75.005
УДК 621.311

О методиках подтверждения экономического эффекта оптимизации энергетических режимов тепловых электростанций

МЕЛЕНЦОВ М. А., m.melentsov@servicemodel.ru
МЕЛЕНЦОВ А. А., a.melentsov@servicemodel.ru
ООО «Сервис-модель»
620144, г. Екатеринбург, ул. Фрунзе, 96, офис 201

Рассмотрены вопросы, связанные с подтверждением экономического эффекта, возникающего за счёт оптимизации энергетического режима работы генерирующего оборудования.

Освещены следующие моменты:

- примеры недобросовестных подходов к оценке эффекта, разбираются основные приёмы, приводящие к завышению эффекта;
- набор критериев, позволяющих подтвердить качество оптимизационных алгоритмов и оптимизационной модели;
- авторская методика, позволяющая наиболее точно оценить фактический экономический эффект от оптимизации энергетических режимов и определить наличие «недополученного» эффекта.

Ключевые слова: экономический, эффект, оптимизация, оптимальный, энергетический, режим, методика, оценка.

Статья посвящена оценке качества оптимизационного программного обеспечения (ПО). Именно в вопросе оценки экономического эффекта от использования ПО наблюдается большое количество манипуляций, дефектов и недобросовестных подходов.

Оптимизационное ПО предназначено для решения следующих задач: отыскание оптимального состава генерирующего оборудования, отыскание оптимального режима загрузки генерирующего оборудования путём перераспределения тепловых и электрических (или только электрических) нагрузок.

При написании статьи авторы ставят следующие задачи:

- описать основные приёмы, используемые для манипуляций с размерами экономического эффекта.
- ввести и обосновать набор критериев, гарантирующих качественную работу оптимизационных алгоритмов.

- предложить универсальную методику, позволяющую:
 - выполнить оценку экономического эффекта от использования программного обеспечения;
 - определить наличие недополученного эффекта.

Необходимые термины

- **Оптимизационная модель** — расчётная модель ТЭС, на основании которой для любого заданного энергетического режима должен рассчитываться модельный расход топлива (затраты на расходуемые энергоресурсы).
- **Фактический режим** — энергетический режим, который существовал в какой-то момент времени. Для фактического режима имеется фактический расход топлива (рассчитан по прямому балансу в соответствии с моделью на основании показаний приборов учёта) и может быть рассчитан модельный расход топлива.

• **Оптимальный режим** — расчётный режим, который формируется в результате работы оптимизационного алгоритма на основании первоначально заданного режима. Фактический расход топлива в этом случае не определён, но определён модельный расход топлива.

• **Оптимально-фактический режим** — фактический режим, который ведётся в соответствии с рекомендованным ПО оптимальным режимом.

• **Близость режимов** — оценивается как расстояние в евклидовом пространстве [1, с. 698]; определяется по суммарным нагрузкам ТЭС и значениям других исходных параметров с учётом масштабных коэффициентов. Полный перечень исходных ТЭП и масштабные коэффициенты, участвующие в определении близких режимов, зависят от тепловой схемы и оборудования конкретной ТЭС.

• **Базовый режим** — фактический режим, который не является оптимально-фактическим, и наиболее близок к оптимально-фактическому режиму. Близость определяется на основе суммарных нагрузок ТЭС или генераторных групп (ГП) и не зависит от распределения нагрузок между агрегатами. Базовый режим выбирается из базы предыдущих фактических режимов, сформировавшихся без оптимальных рекомендаций.

• **Тестовый режим** — любой фактический энергетический режим, используемый в испытаниях.

• **Среднеквадратическое отклонение погрешности s** — среднеквадратическое отклонение величины абсолютной погрешности (числовое значение отклонения фактического расхода топлива V_{ϕ} от модельного расхода топлива $V_{м}$) для рассматриваемого набора фактических режимов, определяемое по формулам [2, с. 210]:

$$\Delta B = V_{\phi} - V_{м};$$

$$M = \sum \Delta B_i / n;$$

$$s^2 = \sum (\Delta B_i - M)^2 / (n - 1),$$

где n — число тестовых режимов.

Схематичное описание методик оценки эффекта

До перехода к анализу методик оценки экономического эффекта кратко сформулируем суть любой адекватной методики. Возможен один из двух подходов.

1. Анализ на основе данных прошлых периодов.

Для фактических режимов прошлых периодов строятся оптимальные режимы. Проводится сравнение затрат в фактических и в оптимальных режимах.

2. Анализ на основе результатов практического ведения режимов в соответствии с оптимальной рекомендацией.

В течение контрольного периода ведение режима осуществляется в соответствии с рекомендациями ПО. Сравнение затрат проводится между оптимально-фактическими и близкими к ним режимами за прошлые периоды.

Ключевые недочёты применяемых методик, приёмы манипуляций

Случай несостоятельности ПО

Назовём ситуации, когда исследование эффекта не имеет смысла, а соответствующее ПО авторы предлагают считать несостоятельным. Таких случаев два:

1) оптимизатор не обеспечивает расчёт модельного расхода топлива для произвольного энергетического режима;

2) существуют энергетические режимы, для которых погрешность расчёта модельного расхода топлива превышает заявленный эффект от оптимизации¹.

Что с чем сравнивать?

Одним из приёмов, позволяющих получать видимость устойчивого экономического эффекта от оптимизации при его отсутствии, представляется сравнение между собой фактических затрат в оптимально-фактическом режиме с фактическими затратами в близком базовом режиме, имеющем несколько отличный набор исходных данных.

Энергетический режим определяется большим числом исходных данных — параметров основного и вспомогательного оборудования и внешних условий. Фактические расходы топлива в режимах, исходные данные для которых различаются между собой менее чем на 1 %, могут различаться на несколько процентов. Часто для фактического неоптимального режима можно найти близкий, который по затратам на топливо будет на 2 – 3 % хуже. Объясняется это тем, что незначительные изменения в большом числе исходных данных могут приводить к значимым изменениям в расходе топлива. Этой физической особенностью недобросовестные подрядчики пользуются, подбирая «нуж-

ные» режимы для сравнения с оптимально-фактическим режимом.

Имеется способ исключить влияние отклонений исходных данных при расчёте эффекта. Для этого достаточно **сравнивать не фактические затраты в оптимально-фактическом и базовом режимах, а модельные затраты** для базового режима и соответствующего ему оптимального режима.

Ещё один приём: в процессе оптимизации не учитывать изменение параметров, зависящих от нагрузок агрегатов, например, давления в регулируемых отборах турбин или температуры и расходы на ПСГ. Если в оптимальном режиме часть параметров не менять в соответствии с физическими законами, а зафиксировать, то можно получать «оптимальные» режимы, обеспечивающие экономию в несколько процентов, но на практике такие режимы не будут достижимы ввиду того, что не учитываются технологические ограничения и зависимости.

Из этого примера видно, что при анализе эффекта **необходимо подтверждать достижимость оптимального режима**.

Анализ эффекта на избранных режимах

Следующий недобросовестный приём — проверка эффекта на «избранных» режимах. Этот приём используется для исключения проблем, возникающих с точностью модельного расчёта расхода топлива. Использование для решения оптимизационных задач методов линейного (выпуклого) программирования приводит к необходимости линеаризовать расчётную модель. Из графического представления энергетических характеристик оборудования любой ТЭС очевидно, что расчётная модель ТЭС является существенно нелинейной. Линеаризация расчётной модели ТЭС приводит к потере точности расчётов на произвольных режимах. В качестве «выхода» компания-разработчик предлагает заранее выбрать набор режимов для калибровки модели и добивается точности расчётов именно на этих режимах. В дальнейшем обязательным для заказчиков требованием становится проверка оптимизационных алгоритмов на «избранных» откалиброванных режимах.

Понимая, как линеаризация влияет на расчёты нелинейной модели, авторы утверждают, что в лучшем случае возникнет значительная вычислительная погрешность модельных затрат, а в худшем и более вероятном случае будет иметь место ситуация, описанная в пункте 2 раздела «Случай несостоятельности ПО», т. е. оптимизационная

модель не позволит обеспечить приемлемую точность модельного расхода топлива для произвольного энергетического режима.

Итак, ПО должно гарантировать малое отклонение модельного расхода топлива от фактического расхода для всех режимов. **Недопустима проверка оптимизационных алгоритмов только на ограниченном множестве «избранных» режимов.**

Множественный учёт эффекта

Имелись случаи расчёта совокупного экономического эффекта задач оптимизации, решаемых последовательно. Известно, что оптимизационные алгоритмы используются на разных этапах планирования режимов и в процессе оперативной оптимизации.

На этапе планирования состава оборудования и режима на несколько суток вперёд были взяты предварительные исходные данные и по ним сформирован плановый режим. Затем этот режим был оптимизирован и рассчитан эффект (разница в затратах между плановым и оптимальным режимами). Далее, исходные данные были уточнены, и сформирована заявка на рынок на сутки вперёд. Был рассчитан новый режим, проведена его оптимизация и снова определён эффект.

Когда наступило время оперативной оптимизации, для фактического режима был рассчитан оптимальный режим, и снова рассчитан эффект.

Для получения совокупного эффекта все три составляющие были просуммированы. Очевидно, что эффект был искусственно завышен.

Использование для подсчёта эффекта промежуточных плановых режимов некорректно. Совокупный эффект необходимо рассчитывать путём сравнения итогового фактического режима, который складывается без использования оптимизатора с аналогичным режимом, который формируется посредством оптимизации.

Анализ качества оптимизационной модели и оптимизационного алгоритма

В предыдущих разделах мы коснулись вопросов, связанных с методикой расчёта эффекта. Предположим, что наличие экономического эффекта подтверждено. Как понять, что полученный эффект максимален?

Сформулируем критерии, которым должны удовлетворять оптимизационная модель и оптимизационный алгоритм, чтобы обеспечивать наилучший результат.

¹ Пояснение для данного требования будет дано далее в пункте «Можно ли анализировать эффект на избранных режимах?».

Качество оптимизационной модели

Если среднеквадратическое отклонение погрешности по своему порядку сравнимо с размерами заявляемого эффекта, то увеличение точности расчёта модельного расхода топлива позволит повысить качество оптимального решения. Чтобы оптимизационная модель точно считала модельный расход топлива, необходимы:

- калибровка оптимизационной модели по фактическим данным;
- расчёт в процессе оптимизации всех ТЭП, зависящих от варьируемых параметров (например, в зависимости от тепловых и электрических нагрузок турбоагрегатов должны рассчитываться давления в регулируемых отборах, температуры и расходы воды на ПСГ, расходы свежего пара и питательной воды и т. п.).

Соблюдение условий и ограничений

В процессе оптимизации должны соблюдаться технологические условия и ограничения. Следует проверить, что выполняются суммарные задания по нагрузкам, значения рассчитанных ТЭП находятся в допустимых диапазонах, выполняются энергетические и пароводяные балансы.

Неулучшаемость оптимального режима

Обоснование неулучшаемости оптимального режима — вопрос нетривиального математического исследования. Для практической проверки неулучшаемости оптимального режима необходимо выполнить следующие действия:

- зафиксировать тестовый режим T1 и рассчитать для него оптимальный режим O1;
- убедиться, что модельные затраты в оптимальном режиме меньше, чем в тестовом;
- с привлечением опытных технологов сформировать новый режим T2: для этого для режима O1 задать приращения, увеличивающие нагрузку на наиболее экономичном оборудовании и на столько же уменьшающие её на наименее экономичном;
- модельные затраты на расходуемое топливо, полученные для режима T2, не должны уменьшиться по сравнению с модельными затратами в режиме O1.

Неулучшаемость оптимального режима следует проверять на качественно различных тестовых режимах. Неулучшаемость оптимального режима следует проверять для всех типов задач технологической оптимизации: от простых задач к более сложным. Во всех случаях проверка должна выполняться по описанной схеме.

Необходимо проверить неулучшаемость для следующих случаев оптимального распределения.

1. Тепловых нагрузок между котлами.
2. Электрических нагрузок между турбоагрегатами.
3. Тепловых и электрических нагрузок. В ходе данной проверки приращенения должны задаваться только для тепловых нагрузок турбин.
4. Тепловых и электрических нагрузок при наличии интегральных (например, суточных) ограничений. При получении решения интегральное ограничение разносится по режимам (например, суточное ограничение разносится на часы). При полученном разнесении каждый режим должен быть оптимален, это проверяется по результатам шага 3.

Дополнительной проверкой неулучшаемости оптимального режима для ТЭС с турбоагрегатами, имеющими регулируемые теплофикационные и производственные отборы, является влияние изменения электрической нагрузки на распределение тепловых нагрузок и наоборот [3, с. 235.]: существенное изменение заданной суммарной электрической нагрузки в тестовом режиме должно приводить к существенному изменению распределения тепловых нагрузок в оптимальном режиме. И наоборот, существенное изменение заданной суммарной тепловой нагрузки в тестовом режиме должно приводить к существенному изменению распределения электрических нагрузок в оптимальном режиме.

Другой дополнительной проверкой неулучшаемости оптимального режима является его детерминированность:

- решение не должно зависеть от начального распределения нагрузок;
- оптимизация ранее оптимизированного режима должна выдавать этот же оптимальный режим.

Последней дополнительной проверкой неулучшаемости оптимального режима является внешний вид характеристики относительных приростов затрат (ХОПЗ). График ХОПЗ должен иметь кусочно-непрерывный, почти всюду гладкий, глобально возрастающий вид (рис. 1). Особенности графиков ХОПЗ детально анализируются в главах 3 и 4 [4, с. 67, 84].

Если в результате выполненных проверок удалось опровергнуть неулучшаемость «оптимального» режима, значит **эффект от оптимизации может быть увеличен за счёт совершенствования оптимизационных алгоритмов.**

Непрерывность оптимального режима

Оптимальное решение должно быть кусочно-непрерывным: при небольшом изменении суммарных электрической и тепловой нагрузок в тестовом режиме в оптимальном режиме нагрузки агрегатов должны меняться незначительно ($\Delta P_{\text{агрегата}} < \Delta P_{\Sigma}$) за исключением случаев, когда разрывы обусловлены дискретным характером энергетических характеристик оборудования (включением/выключением оборудования и/или качественным изменением его режима).

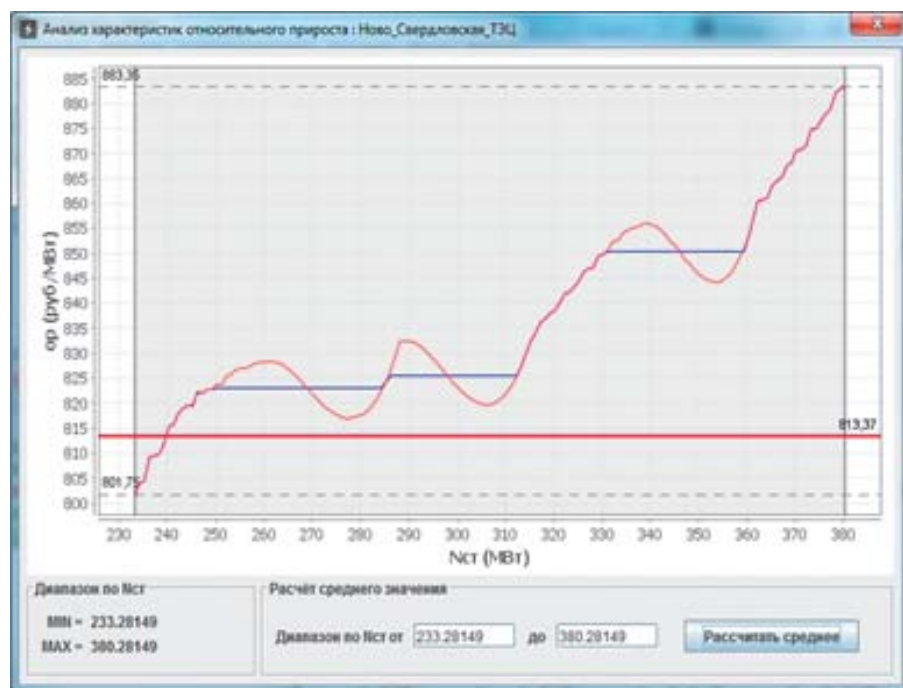


Рис. 1. График характеристики относительных приростов затрат (ХОПЗ)

Если данное требование не выполнено, то оптимизатор невозможно использовать для оперативной оптимизации, так как оптимальные рекомендации будут приводить к постоянным существенным изменениям режима, что недопустимо при оперативном управлении. Под оперативной оптимизацией понимается построение оптимального режима путём перераспределения нагрузок и формирование рекомендаций по изменению режима для оперативно-го персонала в темпе процесса (с дискретностью 1 раз в минуту).

Авторская методика расчёта экономического эффекта

В разделе приведена авторская методика расчёта экономического эффекта от использования ПО. Она предназначена для варианта, описанного в пункте 2 «Анализ на основе результатов практического ведения режимов в соответствии с оптимальной рекомендацией» раздела «Схематичное описание методик оценки эффекта».

Надеемся, что методика станет практическим инструментом технологов и позволит им определить соотношение реального эффекта от использования ПО с заявленным компанией-производителем.

Начальные условия

Должны быть выполнены следующие начальные условия.

- Исследуемое ПО развёрнуто на ТЭС и находится в промышленной эксплуатации.
- Накоплена база данных фактических энергетических режимов за прошлые периоды, для этих режимов получены фактические расходы топлива.
- Имеется инструментарий для отыскания фактических режимов, наиболее близких к заданному режиму.

Проведение испытаний

Испытания должны проводиться в следующей последовательности.

1. Исключается исследование заведомо неприменимых (некорректных) алгоритмов, описанных в разделе «Случай несостоятельности ПО». Для этого формируется выборка из различных фактических режимов за прошлые периоды (не менее 10). Для этих режимов рассчитываются модельные затраты. Выполняется оценка среднеквадратического отклонения погрешности модельного расхода к фактическому. Если оценка не укладывается в установленные рамки (заявленный компанией-производителем эффект), то дальнейшее проведение испытаний не имеет смысла.

2. Определяется контрольный период, в течение которого будет выпол-

няться испытание. Готовится нормативный документ, который:

- а) фиксирует сроки проведения испытаний;
- б) на время проведения испытаний персоналу ТЭС вменяет в обязанности обеспечить ведение оптимально-фактического режима на основе рассчитываемых системой оптимальных рекомендаций.

3. В течение контрольного периода работа ведётся в соответствии с требованиями нормативного документа.

4. На сформированном наборе оптимально-фактических режимов проводятся проверки качества оптимизационного алгоритма:

- а) анализируется качество оптимизационной модели (см. «Качество оптимизационной модели»): на основе оптимально-фактических режимов оценивается среднеквадратическое отклонение погрешности модельного расхода к фактическому. Если значение среднеквадратического отклонения имеет порядок, сравнимый с заявленным эффектом, то оптимизационная модель нуждается в уточнении;

- б) фиксируются случаи невозможности выполнения рекомендаций путём сравнения оптимальных и оптимально-фактических режимов. Анализируется соблюдение условий и ограничений (см. «Соблюдение условий и ограничений»). Если проведённый анализ подтверждает отсутствие реальных возможностей по выполнению оптимальных рекомендаций, значит оптимизационный алгоритм не является корректным либо оптимизационная модель требует уточнения;

в) анализируется неулучшаемость оптимального режима (см. «Неулучшаемость оптимального режима»);

г) фиксируются случаи, когда при ведении режима в соответствии с оптимальными рекомендациями возникало существенное перераспределение нагрузок между агрегатами. Проводится анализ ситуации, если изменения не связаны со значительным изменением исходных условий и заданий, то они означают нарушение условия непрерывности (см. «Непрерывность оптимального режима»).

5. По результатам контрольного периода для каждого оптимально-фактического режима, в котором работало оборудование ТЭС, отыскивается ближайший по суммарным нагрузкам ТЭС (ГГ) и исходным параметрам базовый режим:

- а) рассчитывается погрешность ΔB_1 , которая возникает при расчёте модельного расхода топлива $B_{м.оф}$ по сравнению с фактическим расходом $B_{ф.оф}$ в оптимально-фактическом режиме

$$\Delta B_1 = B_{ф.оф} - B_{м.оф};$$

- б) проводится оптимизация базового режима, оценивается насколько уменьшится фактический расход топлива за счёт оптимизации ΔB_2 :

$$\Delta B_2 = B_{ф.б} - (B_{м.б} + \Delta B_1),$$

где $B_{ф.б}$ — фактический расход топлива в базовом режиме; $B_{м.б}$ — модельный расход топлива в оптимальном режиме, который соответствует базовому режиму.

6. Итоговый эффект от оптимизации ΔB для рассматриваемого базового набора режимов вычисляется как среднеарифметическое значение величин

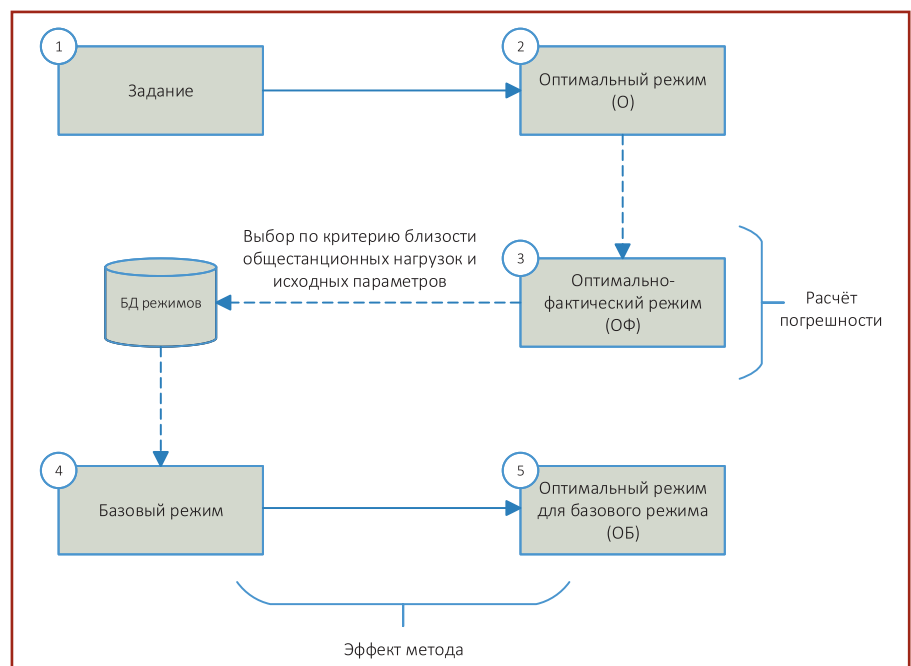


Рис. 2. Шаговая схема оценки эффекта

ΔV_2 . Эффект в процентах вычисляется как $\Delta V/V_{ф.ср} \cdot 100$, где $V_{ф.ср}$ — среднеарифметическое значение величин $V_{ф.б}$.

7. Формируется отчёт о проведении испытаний, который включает следующую информацию:

а) о предложенных алгоритмом оптимальных режимах (включая модельный расход топлива);

б) выполненных персоналом ТЭС оптимально-фактических режимах (включая модельный и фактический расход топлива);

в) найденных в базе данных системы базовых режимах, близких к оптимально-фактическим;

г) обо всех отклонениях, выявленных в ходе проверок качества оптимального режима;

д) результирующем достигнутом эффекте.

Представленный алгоритм, начиная с шага 5, схематично изображён на рис. 2. Прокомментируем данный рисунок по шагам:

1) имеется задание по тепловой и электрической нагрузкам для ТЭС (в разрезе ГП);

2) по заданию с использованием ПО вычисляется оптимальный режим работы О;

3) персонал прилагает усилия для ведения оптимального режима, получая на выходе оптимально-фактический ре-

жим работы оборудования ОФ. Для оптимально-фактического режима рассчитывается погрешность расчёта модельного и фактического расхода топлива;

4) для оптимально-фактического режима в базе данных режимов за прошлые периоды выбирается близкий базовый режим;

5) для базового режима рассчитывается оптимальный режим ОБ; эффект рассчитывается путём сравнения затрат в базовом режиме и в оптимальном режиме, построенном для базового режима.

Вариант методики без проведения испытаний

Приведённая методика может быть обобщена для варианта, описанного в пункте 1 «Анализ на основе данных прошлых периодов.» раздела «Схематичное описание методик оценки эффекта».

В этом случае вместо базовых режимов рассматриваются тестовые. Производится оценка среднеквадратического отклонения погрешности. Достижимость оптимальных режимов оценивается экспертно с привлечением технолога.

Выводы

Резюмируя материал, изложенный в статье, ещё раз приведём минималь-

ные необходимые требования к оптимизатору, которые с использованием приведённой методики могут быть подтверждены либо опровергнуты (в случае несостоятельности исследуемого ПО).

- Оптимизатор должен обеспечить расчёт модельного расхода топлива для произвольного энергетического режима.

- Погрешность расчёта модельного расхода топлива на любых фактических режимах не должна превышать заявленный эффект от оптимизации.

- Для оценки эффекта следует сравнивать модельные затраты в фактическом и соответствующем оптимальном режимах, при этом следует учитывать погрешность расчёта модельного расхода, и должна подтверждаться достижимость оптимального режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коэн Д. Предварительное исчисление: проблемно-ориентированный подход. — 6-е изд. — М.: Cengage Learning, 2004.

2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.

3. Лосев С. М. Паровые турбины и конденсационные устройства. — М.: Энергия, 1964.

4. Горнштейн В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др. — М.: Энергоиздат, 1981.

Вышли в свет в 2021 году следующие выпуски журнала «Библиотечка электротехника» — приложения к журналу «Энергетик»

№ 1. **Алехнович А. Н.** Распределение воздуха и топлива в энергетических котлах. Часть 2

№ 2. **Куликов А. Л.** Методы совершенствования дифференциальной релейной защиты

№ 3. **Неуймин В. М.** Эффективность лабиринтных уплотнений проточных частей паровых турбин электростанций России

№ 4 – 5. **Воротницкий В. Э., Могиленко А. В.** Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях. Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта (в 3-х частях). Часть 1

№ 6, № 7. **Хренников А. Ю., Вахнина В. В., Кувшинов А. А., Александров Н. М.** Силовые трансформаторы в электрических сетях: испытания, нормативные документы. Части 1 и 2

№ 8. **Илюшин П. В., Ковалев С. П., Куликов А. Л., Небера А. А., Непша Ф. С.** Методы интеллектуального управления распределёнными энергоресурсами на базе цифровой платформы

№ 9. **Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г.** Векторные и гипервекторные измерения в электроэнергетике

№ 10. **Шульга Р. Н., Хренников А. Ю.** Обеспечение надёжной работы электрооборудования с учетом предыдущих и перспективных разработок ВЭИ (к 100-летию ВЭИ)

№ 11 – 12. **Воротницкий В. Э., Могиленко А. В.** Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях. Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта (в 3-х частях). Часть 2