

# О методиках подтверждения экономического эффекта от решения оптимизационных задач

А. Меленцов, М. Меленцов

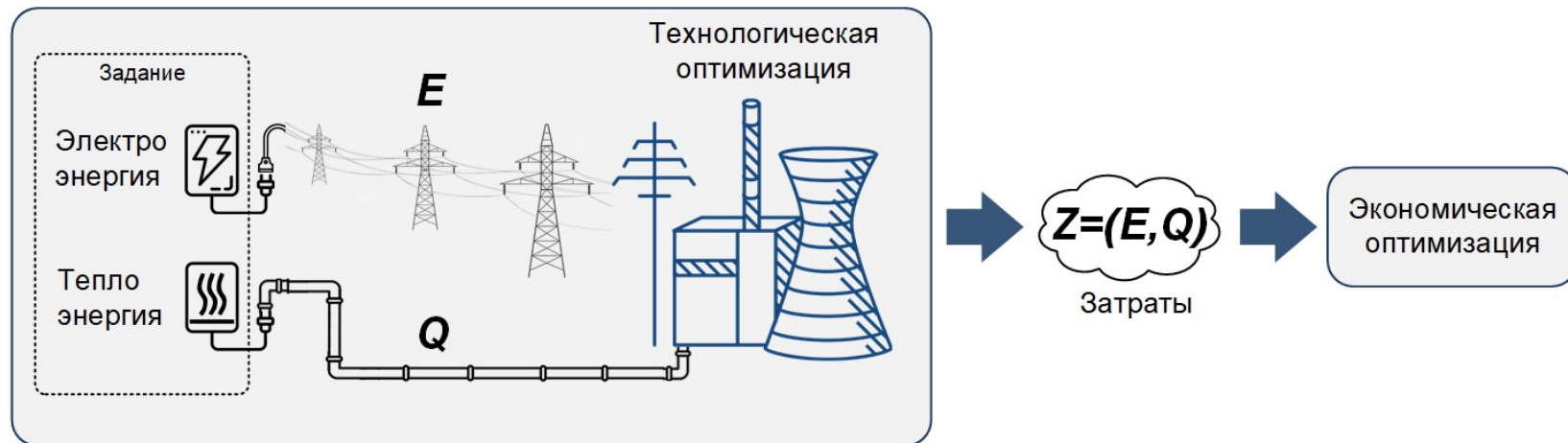
# Уровни оптимизации

## Экономическая оптимизация

- Среднесрочное планирование в масштабе ГК
- Планирование ремонтов
- Оптимальная работа на ОРЭМ

## Технологическая оптимизация

- Оптимальное распределение нагрузок между агрегатами при заданных тепловой и электрической нагрузках
- Распределение нагрузок агрегатов с учётом интегральных ограничений
- Оптимальное ведение режима в темпе процесса.



# Терминология

Термин	Определение
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
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 (ГГ) и не зависит от распределения нагрузок между агрегатами. Базовый режим выбирается из базы предыдущих фактических режимов, сформировавшихся без оптимальных рекомендаций

# Случаи, когда ПО следует считать несостоятельным

Исследование эффекта не имеет смысла, а ПО несостоятельно в случаях:

- Оптимизатор не обеспечивает расчёт модельного расхода топлива для произвольного режима
- Не обеспечивается полнота и достоверность исходных данных, влияющих на энергетический режим
- Существуют режимы, для которых погрешность расчёта модельного расхода топлива превышает заявленный эффект от оптимизации

Способ проверки условий несостоятельности (выполняется до анализа эффекта):

- Формируется выборка из произвольных фактических режимов за прошлые периоды (не менее 10 штук).
- Для этих режимов с использованием оптимизационной модели рассчитываются модельные затраты.
- Выполняется оценка среднеквадратического отклонения погрешности модельного расхода к фактическому.
- Если оценка не укладывается в установленные рамки (заявленный эффект), то **дальнейшее проведение испытаний данного ПО не имеет смысла.**

Прохождение проверки условий несостоятельности позволяет перейти к исследованию эффекта, но его не гарантирует

# Принципиальные подходы к расчёту эффекта

## На данных прошлых периодов

- Внедрение системы и настройка оптимизационной модели, накопление данных о фактических режимах за прошлые периоды.
- На контрольном периоде выбирается набор тестовых режимов, для которых рассчитываются оптимальные режимы.
- Анализируются затраты в фактических и в оптимальных режимах.

## По результатам практического ведения режимов в соответствии с оптимальным расчётом

- Внедрение системы и настройка оптимизационной модели, накопление данных о фактических режимах за прошлые периоды.
- Для контрольного периода каждый предстоящий режим оптимизируется в системе, и фактический режим ведётся в соответствии с данными рекомендациями.
- Для оптимально-фактических режимов контрольного периода в базе данных системы осуществляется поиск наиболее близких фактических режимов за прошлые периоды.
- Эффект рассчитывается на основе сравнения затрат в оптимально-фактических и в базовых режимах.



**Кажется, что всё просто, но тонкости в деталях**

# Недочёты методик и приёмы манипуляций с эффектом (1 / 2)

Сравнение факт. затрат в оптимально-фактическом режиме с факт. затратами в близком базовом режиме

- Факт. расходы топлива в режимах с близкими исходными данными могут различаться на несколько процентов
- Часто для факт. неоптимального режима можно найти близкий, уступающий по затратам на топливо на 2-3%



Для исключения влияния исходных данных надо сравнивать модельные затраты для базового режима и соответствующего ему оптимального режима

При оптимизации может не учитываться изменение параметров, зависящих от нагрузок агрегатов

- Если в оптимальном режиме часть параметров не менять в соответствии с физическими законами, а зафиксировать, то получим «оптимальные» режимы, обеспечивающие экономию в несколько процентов
- На практике такие режимы не будут достижимы



При анализе эффекта необходимо подтвердить достижимость оптимального режима

# Недочёты методик и приёмы манипуляций с эффектом (2 / 2)

## Проверка эффекта на «избранных» режимах

- Приём используется для исключения проблем с точностью модельного расчёта расхода топлива.
- Использование для оптимизации методов линейного программирования приводит к необходимости линеаризовывать расчётную модель, что влечёт потерю точности расчётов на произвольных режимах.
- В качестве «выхода» предлагается заранее выбрать набор режимов для калибровки модели и добиваться точности расчётов на этих режимах.
- В дальнейшем обязательным для заказчиков требованием является проверка оптимизационных алгоритмов на «избранных» режимах.



**ПО должно гарантировать малое отклонение модельного расхода топлива от фактического расхода для всех режимов. Недопустима проверка оптимизации на «избранных» режимах**

## Многokратный учёт эффекта от задач оптимизации, решаемых последовательно

- Оптимизация используется на разных этапах планирования режимов и в процессе оперативной работы.
- На этапе планирования состава оборудования на несколько суток вперёд строится и оптимизируется плановый режим. Рассчитан эффект от оптимизации
- Исходные данные были уточнены и сформирована заявка на РСВ. Рассчитан новый режим, проведена его оптимизация и снова определён эффект.
- В рамках оперативной работы для фактического режима был рассчитан оптимальный и снова рассчитан эффект.
- Для получения совокупного эффекта все три составляющие были просуммированы.
- Эффект был искусственно завышен.



**Совокупный эффект должен рассчитываться сравнением итогового фактического режима, который складывается без использования оптимизатора, с аналогичным режимом, формируемым посредством оптимизации**

# Оценка результатов оптимизации

Как понять, достигнут ли максимальный эффект?

## Качество оптимизационной модели

- Если величина среднеквадратического отклонения погрешности модельного расхода топлива по порядку сравнима с величиной заявляемого эффекта, то увеличение точности расчёта модельного расхода топлива позволит повысить качество оптимального решения.

## Соблюдение условий и ограничений.

- Следует проверить, что выполняются суммарные задания по нагрузкам, величины рассчитанных ТЭП находятся в допустимых диапазонах, выполняются энергетические и паро-водяные балансы

## Неулучшаемость оптимального режима

- С привлечением технологов задать приращения, увеличивающие нагрузку на наиболее экономичном оборудовании и на ту же величину уменьшающие на менее экономичном. Затраты не должны уменьшиться
- 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.

## Непрерывность оптимального режима

- При изменении суммарных электрической и тепловой нагрузок нагрузки агрегатов в оптимальном режиме должны меняться непрерывно ( $\Delta P_{\text{агрегата}} < \Delta P_{\Sigma}$ )

## Влияние электрической нагрузки на распределение тепловых и наоборот

- Существенное изменение заданной электрической нагрузки должно приводить к существенному изменению распределения тепловых нагрузок

## ХОПЗ

- График должен иметь непрерывный, почти всюду гладкий, возрастающий вид

## Детерминированность

- Решение не должно зависеть от начального распределения нагрузок, оптимизация оптимального режима не должна приводить к изменениям режима



# Начальные условия для качественного анализа эффекта

## Начальные условия

- Исследуемое ПО развёрнуто на ТЭС (настроена оптимизационная модель)
- Настроен расчёт фактических расходов топлива для режимов
- Оптимизационная модель должна быть настроена для расчёта модельного расхода топлива **для любого режима**
- Имеется база данных фактических энергетических режимов за прошлые периоды
- Имеется инструментарий для отыскания фактических режимов, наиболее близких к заданному режиму

## Для чего такие начальные условия?

- Для оптимально-фактических режимов потребуется считать фактические расходы топлива
- База данных фактических режимов необходима для нахождения режимов близких к тем, которые будут оптимизироваться. Фактические расходы топлива необходимы для сверки с модельными
- Инструментарий для отыскания близких режимов необходим для человеконезависимого поиска наиболее близких режимов к тем, которые будут оптимизироваться и исследоваться

## Что из этого следует?

- Серьёзное исследование эффекта возможно **при условии практически полного внедрения ПО:**
- В идеале, в системе должны быть настроены модель для расчёта факта, оптимизационная модель, должны быть накоплены данные о фактических режимах; для расчёта факта необходим автоматизированный сбор данных.
- **Упрощение начальных условий для анализа эффекта делает возможными манипуляции (слайды 5 и 6)**

# Методика расчёта эффекта (1 / 2)

## Определяется контрольный период

- Фиксируются сроки проведения испытаний;
- Персонал должен обеспечить оптимально-фактический режим по рекомендациям ПО в течение контрольного периода

## На сформированных оптимально-фактических режимах проверяется качество оптимизационного алгоритма:

- Оценивается среднеквадратическое отклонение погрешности модельного расхода к фактическому. Если величина отклонения имеет порядок, сравнимый с заявленной величиной эффекта, то ПО несостоятельно.
- Фиксируются случаи невозможности выполнения рекомендаций путём сравнения оптимальных и оптимально-фактических режимов. Анализируется соблюдение условий и ограничений. Если подтверждается невозможность выполнения оптимальных рекомендаций, значит ПО несостоятельно.
- Анализируется неулучшаемость оптимального режима (слайд 7).
- Фиксируются случаи, когда при ведении режима в соответствии с оптимальными рекомендациями, возникало существенное перераспределение нагрузок между агрегатами.

## Методика расчёта эффекта (2 / 2)

Для каждого оптимально-фактического режима отыскивается близкий базовый режим по суммарным нагрузкам ТЭС (ГГ) и исходным параметрам

- Рассчитывается погрешность  $\Delta B_1$  при расчёте модельного расхода топлива  $V_{м\_оф}$  по сравнению с фактическим  $V_{ф\_оф}$

$$\Delta B_1 = V_{ф\_оф} - V_{м\_оф}$$

- Базовый режим оптимизируется, оценивается уменьшение фактического расхода топлива за счёт оптимизации  $\Delta B_2$ .

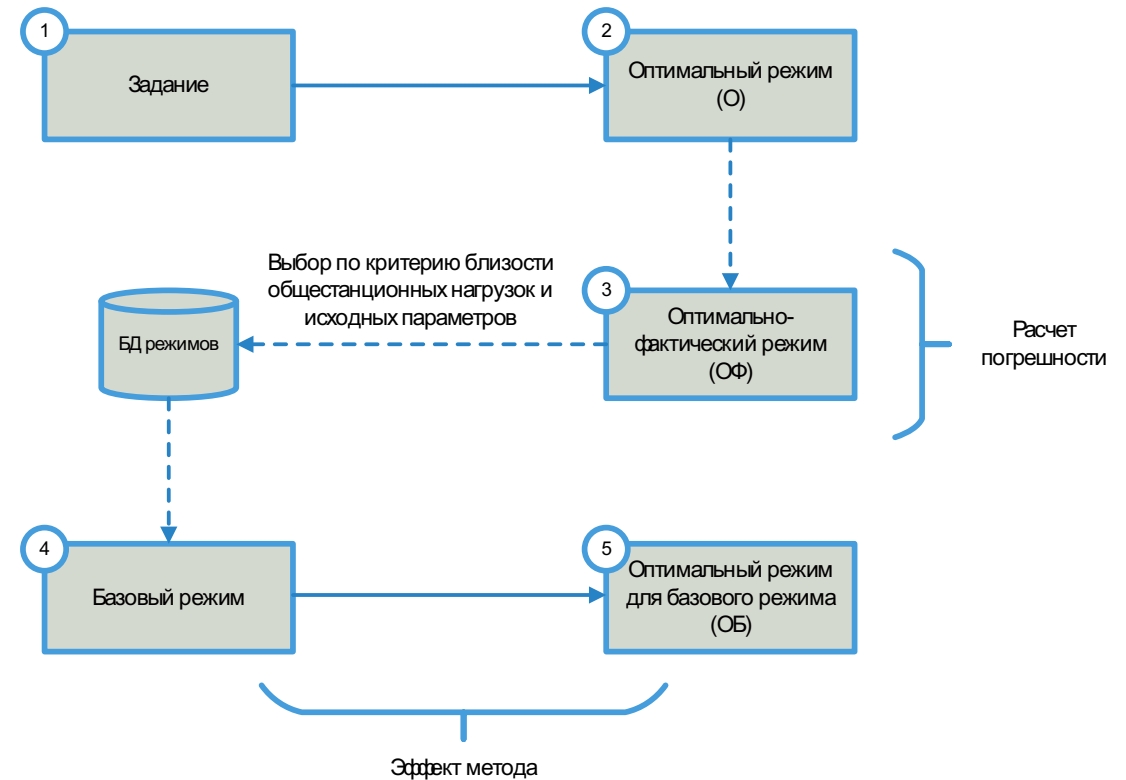
$$\Delta B_2 = V_{ф\_б} - (V_{м\_о} + \Delta B_1), \text{ где}$$

$V_{ф\_б}$  – фактический расход топлива в базовом режиме

$V_{м\_о}$  – модельный расход топлива в опт. режиме

Итоговый эффект от оптимизации  $\Delta B$  для базового набора режимов - среднеарифметическое величин  $\Delta B_2$ .

Эффект в процентах, вычисляется как  $\Delta B / V_{ф\_ср} * 100$ , где  $V_{ф\_ср}$  - среднеарифметическое величин  $V_{ф\_б}$ .



- 1) Есть задание по нагрузке для ТЭС (в разрезе ГГ);
- 2) По заданию вычисляется оптимальный режим работы О;
- 3) Обеспечено ведение режима О, на выходе оптимально-фактический режим ОФ; для ОФ рассчитывается погрешность расчёта модельного и фактического расхода топлива;
- 4) для ОФ в базе режимов выбирается близкий базовый режим;
- 5) для базового режима рассчитывается оптимальный режим ОБ; эффект рассчитывается путём сравнения затрат в базовом режиме и в ОБ.

# Послесловие

К разработке методики и написанию статьи нас побудили манипуляции с эффектом в российских ГК

Декларация величины эффекта априори, до внедрения ПО, может говорить о недобросовестности поставщика:

- Величина эффекта зависит от качества ведения режимов, которое достоверно можно оценить только в рамках проекта (после настройки оптимизационной модели и модели для расчёта фактических ТЭП)

Обоснование стоимости проекта на основании не подтверждённого эффекта – сомнительный подход:

- Как показывалось выше, для качественного расчёта эффекта необходимо выполнить 70% работ по внедрению ПО
- Помимо оптимизации, результатом внедрения ПО является расчёт ТЭП и пережогов, который обеспечивает эффект только в комплексе с мерами по анализу режимов и поддержанию эффективного состояния оборудования, но является трудозатратным для Исполнителя и значимым результатом для Заказчика
- Неявный эффект от реализации расчёта ТЭП может быть больше, чем явный эффект от оптимизации
- Существуют ТЭС, где возможности для оптимизации за счёт перераспределения нагрузок отсутствуют (например, ТЭЦ «Академическая»)

# Послесловие 1. Про отладчик оптимизации

Пошаговый визуальный отладчик оптимизационных алгоритмов – инструмент проверки оптимальности режима

Наличие отладчика перевешивает любой эффект, подтверждённый с использованием недобросовестной методики

⚡ Файл
✕

Режим: COPMPLEX\_RESULT

Котел/Коллектор

Критерий:  Параметры

	ТГ1.N	ТГ1.Q_T	ТГ1.Q_T(ТГ1.N)	ТГ2.N	ТГ2.Q_T	ТГ2.Q_T(ТГ2.N)	ТГ3.N	ТГ3.Q_T	ТГ3.Q_T
C	5.813	+∞	+∞	5.568	+∞	+∞	2.849	+∞	7.314
P	68.53	0.0	0.0	68.53	0.0	0.0	15.206	52.69	52.69
Z'	827.703	129.687	+∞	792.846	124.925	+∞	405.719	+∞	454.73
Pmin	68.53	0.0	0.0	68.53	0.0	0.0	15.206	52.69	52.69
Pmax	119.869	130.312	180.0	120.0	128.33	180.0	15.208	0.0	200.0
Pgin	289.326	52.69	52.69	289.326	52.69	52.69	289.326	52.69	52.69
Pgout	431.711	580.719	580.719	431.711	580.719	580.719	431.711	580.719	580.71
Pw	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
N			68.53			68.53			15.206
N'			+∞			+∞			0.437
Nmin			68.53			68.53			15.206
Nmax			119.869			120.0			15.208
Ngin			289.326			289.326			289.32
Ngout			431.711			431.711			431.71
Nw			1.0			1.0			1.0

ТГ1.Q\_T: Pw = 0 ⇒ C = ∞  
 ТГ2.Q\_T: Pw = 0 ⇒ C = ∞  
 ТГ3.Q\_T: ≠ Z'(P) ⇒ C = ∞

График

Производная

Минимум производной

№ шага:  1 7 13 19 25 31

## Послесловие 2. Про модельный расхода топлива

Эффект возникает только при соответствии модельного расхода фактическому

Существует два способа уточнения модельного расхода топлива (приведения к фактическому):

- Автоматизированное уточнение модельных расчётов по фактическим данным
- Проведение полноценных испытаний оборудования, построение актуальных энергетических характеристик

Оба способа требуют полноты и точности исходных данных, описывающих энергетические режимы

Точный модельный расчёт обеспечивает оптимизацию режимов и построение ХОПЗ с учётом фактического состояния оборудования

## Аудит

На основании предложенной методики мы предлагаем проведение аудита, в результате которого будут рассчитаны и проверены:

- Средняя погрешность модельного расхода топлива
- Оптимальность предлагаемого режима
- Эффект от оптимизации энергетических режимов посредством внедрённого ПО

# Спасибо!

**Антон Меленцов**

Генеральный директор ООО «Сервис–модель»

[a.melentsov@servicemodel.ru](mailto:a.melentsov@servicemodel.ru)

[www.servicemodel.ru](http://www.servicemodel.ru)

+7 (922) 203–43–04