

Методика выбора компенсирующих мероприятий в исследованиях живучести топливно-энергетического комплекса страны

Наталья Береснева¹, Алексей Еделев^{1,2}

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ул. Лермонтова, д. 130, 664033, Иркутск, Россия

² Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

Аннотация

В статье рассмотрена облегченная методика выбора инвариантных мероприятий по повышению живучести (компенсирующих мероприятий) ТЭК страны. Ключевая особенность данной методики – автоматическое определение инвариантных мероприятий в рамках одноуровневой однокритериальной оптимизации. Ядро данной методики – многопериодная модель функционирования ТЭК с настраиваемой логикой комбинирования нештатных ситуаций (НС) и компенсирующих мероприятий (КМ). Оптимизация выбора мероприятий в ней реализована благодаря:

- двухуровневому временному моделированию аномальных условий функционирования ТЭК по интервалам времени, включающим технологически взаимосвязанные временные периоды;
- настройки логики формирования наборов КМ за счет бинарной активизации мероприятий в наборах, за счет задания логики совместной реализации мероприятий (правила взаимоисключения – логическое «или» и взаимодополнения – логическое «и»);
- задания в целевой функции критерия минимальных суммарных ущербов по всем временным интервалам при минимальных издержках на введение КМ.

Инструментальная реализация методики ориентирована на шаблонное задание КМ по схеме «Тип мероприятий» - «Тип объектов, подверженных данным мероприятиям» - «Критерий отбора объектов в наборы инвариантных мероприятий». Предлагаемая методика применима в условиях ограниченного множества наиболее представительных НС, в условиях достаточности однокритериальной оценки мероприятий. Апробация методики предлагается на примере оценки влияния реконструкции сети Единой систем газоснабжения РФ на конечных потребителей ТЭК страны.

Ключевые слова

Живучесть топливно-энергетического комплекса, нештатные ситуации, компенсирующие мероприятия, модель функционирования ТЭК.

1. Введение

Ключевым фактором обеспечения стабильного функционирования ТЭК страны является обеспечение его живучести, под которой понимается свойство входящих в него систем энергетики противостоять возмущениям (внутренним и внешним), не допуская нарушения энергоснабжения на обширной территории на длительное время, либо сводя к минимуму

6th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia

EMAIL beresneva@isem.irk.ru (A. 1); flower@isem.irk.ru (A. 2)

ORCID: 0000-0002-0003-947X (A. 1); 0000-0003-2219-9754 (A. 2)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2024 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.11

катастрофические последствия таких нарушений [1]. Важная составляющая живучести - способность восстановления ТЭК своей производительности до исходного (до момента возникновения НС) или приближенном к нему объеме.

На практике оценка живучести ТЭК сводится к отслеживанию и сравнению изменений между его состояниями на протяжении времени его выживания. Данная оценка определяется в рамках модельных вычислительных экспериментов с различных точек зрения (функциональной, топологической, экономической), требует многокритериального анализа рассчитанных сводных метрик [2]. Такой вариант исследований универсален в предметном (может быть применим к любой оптимизационной модели ТЭК) и вычислительном (предусматривает высокопроизводительные вычисления большого количества сценариев) отношении. Но он не целесообразен в случаях актуальности быстрых решений по выбору КМ. Для этих случаев предлагается облегченная методика определения наборов инвариантных наборов КМ для аномальных ситуаций функционирования ТЭК с серьезными системными последствиями. Данная методика позволяет на базе оптимизационной многопериодной модели ТЭК автоматически получать наборы инвариантных мероприятий, эффективных для рассмотренных НС. Основные положения этой методики, результаты ее апробации приведены в следующих разделах публикации.

2. Методика однокритериального выбора набора инвариантных компенсирующих

Предлагаемая облегченная методика выбора мероприятий по повышению живучести отвечает следующим ключевым моментам:

1. Облегченный характер методики, ее базирование на многопериодной модели функционирования ТЭК. Особенности модели:

- двухуровневая временная схема задания сценариев исследования - рассматриваются изолированные временные интервалы, включающие временные схемы функционирования ТЭК;
- оптимизация по критерию максимуму обеспечения потребностей при минимальных затратах на ввод КМ по всем временным интервалам;
- применение для оценки КМ трех типов переменных:
- дискретных переменных для идентификация оптимизатором статуса инвариантности мероприятий по всем временным интервалам;
- непрерывных переменных для оценки эксплуатационных затрат мероприятий, их интенсивности по отдельным временным интервалам.

Благодаря этому набор инвариантных КМ определяется в рамках одного вычислительного эксперимента по всем возможным НС.

2. Включение в сценарии исследований набора наиболее критичных НС (каждая НС моделируется на отдельном временном интервале). По КМ – задание избыточного множеств мероприятий определенного типа. Каждая КМ может быть задана графиком ее ввода в эксплуатацию по временным диапазонам для всех временных интервалов. Таким образом по всем временным интервалам создается единый избыточный набор мероприятий. За счет этого достигается фактор инвариантности оптимальных КМ.

3. Учет территориального аспекта в выборе инвариантных мероприятий за счет гибкости задания целевой функции модели (возможности учета штрафов за недопоставку энергоресурсов по различным территориям. Возможность ранжирования мероприятий внутри набора КМ путем анализа удельной эффективности мероприятий. Как следствие, возможность апостериорного анализа множества наборов инвариантных мероприятий при условии задания единого множества НС.

4. Возможность задания логики ввода мероприятий с помощью правил взаимоисключения мероприятий (логическое «или», логическое «и»), позволяющая учесть особенности реализации комплексной реализации мероприятий. Мероприятия, включенные в данные правила, автоматически исключаются по всем временным интервалам путем изменения флага бинарной переменной мероприятий.

Концепция методики однокритериального выбора набора инвариантных КМ приведена на рис. 1. Этапность решения задачи выбора КМ в методике практически не отличается от стандартной схемы проведения вычислительного эксперимента, в рамках отдельного исследования включает следующую последовательность действий:

1. Поэтапное задание множества НС. Для каждой НС автоматически создается новый временной интервал.
2. Выбор типа КМ (например, новые участки магистральных газопроводов), критерия отбора объектов (например, длина вводимого участка магистрального газопровода) в наборы инвариантных мероприятий.
3. Оптимизация потокораспределения многопериодной модели исследования;
4. Вывод выбранного оптимизатором набора инвариантных КМ.
5. Апостериорный анализ полученных результатов.

Математическая формализация многопериодной модели функционирования ТЭК приведена ниже.

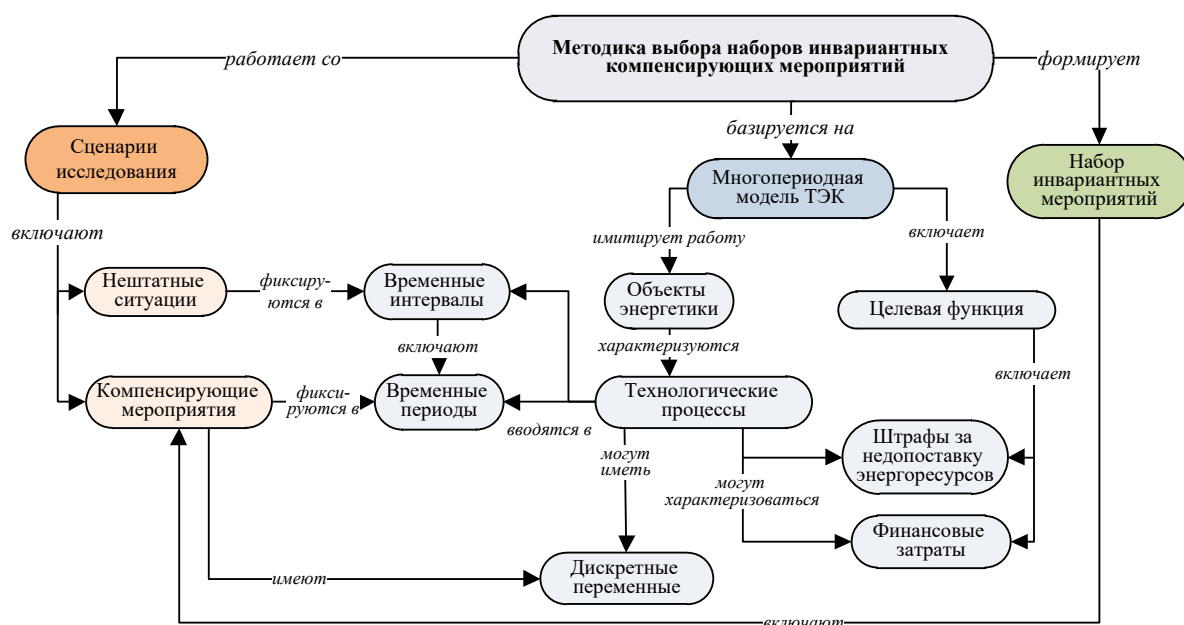


Рисунок 1: Концепция методики однокритериального выбора компенсирующих мероприятий

Если сценарий крупного возмущения $v \in V$ разбит на T^v периодов, то общая постановка задачи функционирования ТЭК при воздействии крупного возмущения v в период времени $t=1, \dots, T^v$ может быть описана в следующем виде:

$$\sum_{v \in V} \sum_{t=1}^{T^v} [(cx_t^v + bs_t^v) + p(R_t - y_t^v) + hw] \rightarrow \min \quad (2.1)$$

$$s_{t-1}^v + A^v x_t^v + Uq_t^v - y_t^v - s_t^v \geq 0, \quad (2.2)$$

$$x_t^v \leq D_t^v, \quad (2.3)$$

$$y_t^v \leq R_t \quad (2.4)$$

$$q_t^v \leq wQ_t, \quad (2.5)$$

$$s_t^v \leq S_t^v, \quad (2.6)$$

$$s_0^v = S_0, \quad (2.7)$$

где x_t^v – искомый вектор, элементы которого характеризуют интенсивность применения технологических способов функционирования элементов СЭ (добычи, переработки,

преобразования и транспорта энергоресурсов); y_t^v – искомый вектор, элементы которого характеризуют объёмы потребления отдельных видов энергоресурсов; q_t^v – искомый вектор, описывающий интенсивность проведения мероприятий по повышению адаптивности; s_t^v – искомый вектор, компоненты которого характеризуют объёмы запасов топлива; A^v – матрица, описывающая технологии производства и передачи энергоресурсов, значения элементов которой зависят от воздействия возмущения v ; D_t^v – вектор, определяющий технически возможные интенсивности применения отдельных технологических и производственных способов, значения элементов которого зависят от воздействия возмущения v ; R_t – вектор, элементы которого демонстрируют потребности в отдельных видах энергоресурсов; U – матрица, отражающая локализацию проведения мероприятий по повышению адаптивности; Q_t – вектор, задающий пределы интенсивности проведения мероприятий по повышению адаптивности; S_t^v – вектор, определяющий ёмкость хранилищ, значения элементов которого зависят от воздействия возмущения v ; c – вектор, элементы которого определяют удельные затраты по каждому технологическому способу функционирования элементов СЭ; b – вектор удельных затрат на эксплуатацию хранилищ; p – вектор удельных ущербов, возникающих вследствие недопоставки отдельных видов энергоресурсов потребителям; h – вектор, задающий удельные затраты на подготовку и проведение мероприятий по повышению адаптивности.

Целевая функция (2.1) является свёрткой трёх критериев. Первый критерий отражает издержки, связанные с функционированием ТЭК. Второй критерий оценивает ущерб от дефицита энергоресурсов из-за воздействия возмущения v . Затраты на подготовку и проведение мероприятий по повышению адаптивности характеризуются третьим критерием.

Воздействие возмущения v реализуется элементами матрицы A^v и векторов D_t^v , S_t^v в уравнениях (2.2), (2.3) и (2.6) соответственно. Их элементы характеризуют степень деформации различных компонентов СЭ вследствие воздействия возмущения в период времени t .

Уровень необходимого снабжения потребителей отдельными видами энергоресурсов задаётся уравнением (2.4). Технические ограничения на проведение мероприятий по повышению адаптивности определяется в (2.5).

Объём запасов топлива в хранилищах в период времени t ограничен их доступной ёмкостью согласно неравенству (2.6). Уравнение (2.7) предполагает, что в начале шага сценария возмущения v (в период времени $t=0$) все хранилища имеют некоторый начальный запас энергоресурсов, описываемый вектором S_0 .

3. Апробация методики выбора компенсирующих мероприятий в исследованиях живучести ТЭК страны

Апробация заявленной методики выполняется на примере задачи реконструкции Единой системы газоснабжения (ЕСГ) России [3-4]. Апробируется многопериодная оптимизационная модель функционирования ТЭК в постановке (2.1 - 2.7).

Эта модель представлена тремя топливными отраслями (угольной, газовой, нефтеперерабатывающей), электро- и теплоэнергетикой. Объекты всех отраслей представлены на агрегированном уровне с суммарными значениями технологических показателей по территории. Газовая отрасль в модели представлена реальной расчетной схемой ЕСГ России с включением таких объектов, как магистральные газопроводы (486 объектов), компрессорные станции (24 объекта), подземные хранилища данных (24 объекта), источников газа (28 объектов). Потребители топлива в модели представлены объектами электро- и теплоэнергетики, прочими внутренними потребностями, странами-экспортерами. Потребители вторичных энергоресурсов (электроэнергии и тепла) – суммарными потребностями территорий, экспортерами. Элементами учета живучести в модели являются запасы топлива на начало расчетного периода, диверсификация топлива (замена газа на топочный мазут и обратно) на тепловых электростанциях и в котельных. Временной аспект исследований – сутки, территориальный аспект – субъекты РФ.

В рамках апробации для условий январской пиковой нагрузки моделируется отключение критически-важных объектов газовой отрасли (элементов, чья неработоспособность способна привести к серьезным сбоям поставок энергоресурсов). Устранение последствий этих отключений реализуется путем реконструкции сети ЕСГ. Определяются новые участки магистральных газопроводов между узлами сети, прежде не связанные между собой. В качестве критериев отбора вводимых элементов сети используется ограничение по длине участков сети. Элементы логической взаимозависимостей КМ пока не рассматриваются. Рассматриваются отключения, приводящие к существенным дефицитам тепла по стране в целом.

4. Заключение

Предложена методика однокритериального выбора набора инвариантных КМ. Методика строится на оптимизации многопериодной модели функционирования ТЭЖ в рамках одного ВЭ. Данная модель позволяет по временным интервалам моделировать комбинации каждой НС с полным набором типовых КМ, что обеспечивает инвариантность мероприятий. Оптимальность выбора мероприятий гарантируется конкуренцией штрафов за недопоставку энергоресурсов с суммарными капитальными вложениями на ввод КМ по всем временным интервалам. Методика применима для исследований с относительно небольшой расчетной частью, ее безусловным преимуществом является возможность получения уже готового набора инвариантных мероприятий в рамках рассматриваемых НС. Основным недостатком методики является невозможность задания критерия выбора мероприятий, «защитного» в целевой функции модели.

5. Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 (рег. номер: АААА-А21-121012090014-5).

6. Список источников

- [1] Методы и модели исследования живучести систем энергетики / Антонов Г. Н., Черкесов Г. Н., Криворуцкий Л. Д. и др. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. 285 с.
- [2] Еделев А.В., Береснева Н.М., Костромин Р.О. Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур // Системы анализа и обработки данных. 2023. № 4 (92). С. 97-129.
- [3] Воробьев С. В., Еделев А. В., Сендеров С. М. Проблемы поиска критически важных объектов газовой отрасли с позиций энергетической безопасности России // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018. 2018. С. 44-49.
- [4] Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей с позиции обеспечения энергетической безопасности / С.М. Сендеров [и др.]; отв. ред. Н.И. Воропай; Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева. – Новосибирск: СО РАН, 2022. 132 с.
- [5] Сендеров С.М., Крупенёв Д.С., Воробьев С.В., Береснева Н.М., Бояркин Д.А. Методический подход к оценке уровня значимости критически важных объектов энергетики при взаимосвязанной работе энергетических отраслей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 2. С. 31-45.