

Анисимова Н.А., Варганова А.В., Мельников М.С., Петухова О.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОУЗЛОВ С СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы электроснабжения промышленных предприятий с целью обеспечения надежности электроснабжения и повышения экономичности, как правило, имеют собственную генерирующую базу и внешнее энергоснабжение. Изменение нагрузки в течение суток ставит задачу определения и прогнозирования оптимальной мощности покупаемой из энергосистемы. Важной задачей в таких условиях является также разработка плановых ремонтов основного генерирующего оборудования промышленной системы электроснабжения. Данная работа посвящена разработке алгоритма определения оптимальной мощности, покупаемой из энергосистемы, при учете собственной мощности от местных тепловых электростанций. Методика расчета учитывает основные особенности промышленных энергоузлов, а именно использование нескольких видов топлива в условиях одной электростанции, наличие нескольких крупных промышленных электростанций, передачу мощности в системе электроснабжения (потери активной мощности в системе), передаточную способность элементов, соблюдение условий по допустимым напряжениям в узлах. Алгоритм основан на методе динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования, что обеспечивает возможность поиска целого набора оптимальных управлений при множестве возможных вариантов решений. Особую сложность при расчетах представляла разработка моделей энергосистемы и собственных источников энергии. В данной работе модели источников представлены в табличном виде и имеют зависимость мощности на клеммах генератора от себестоимости тонны свежего пара. Для энергосистем модели представляют собой зависимость мощности, принимаемой из энергосистемы, от тарифа на электроэнергию. Эквивалентная модель внешних источников учитывает условия работы рынка электроэнергии. По результатам исследования определены затраты и рекомендуемые мощности на прием из энергосистемы в условиях промышленного энергоузла.

**Ключевые слова:** электроснабжение, энергоузел, промышленная электростанция, энергосистема, оптимизация, динамическое программирование, рынок электроэнергии, тариф на электроэнергию, среднесрочное планирование, технико-экономическая модель

### ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация обладает огромным потенциалом по энергосбережению. Существующий исторически сложившийся подход к ценообразованию и тарифу, а также экономически нецелесообразное использование энергетических ресурсов является, с одной стороны, важной проблемой национальной экономики, но с другой – активизирует задачи энергосбережения и увеличения эффективности [1].

Структура генерирующих мощностей России такова, что из установленной мощности существующих энергоблоков на атомных электростанциях производится 10 % всей электроэнергии, а на гидроэлектростанции приходится 20% мощности. Остальная часть генерирующих мощностей работают на не возобновляемых источниках электроэнергии. Из тепловых станций 63% – газовые и 20% – угольные, которые работают с очень низким электрическим КПД. В европейской доле России на газе вырабатывается более 80% электроэнергии.

По мировым исследованиям, Россия является лидером по количеству применяемого газа на производство единицы продукции. Для сравнения в США потребление газа в 6 раз ниже, в Германии в 8 раз. В соответствии с анализом энергоэффективности, проведенным институтом энергетического проектирования, был сделан вывод, что Россия тратит лишние 40-50 миллиардов метров кубических газа. Например, в Европе 210–250 г условного топлива приходится на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии, в России средний удельный расход

топлива на выработку электроэнергии составляет 335 и 140 г условного топлива на 1 кВт·ч.

Если выбирать между увеличением производственных мощностей генерации и осуществлением энергосберегающих мероприятий у потребителей, то последний метод потребует в 3-4 раза меньше инвестиций.

Задачи повышения эффективности режимов работы систем электроснабжения промышленных предприятий актуальны с начала восьмидесятых годов прошлого столетия. Так, авторами работы [2] Утарбаевым С.С., Яшковым В.А., Курьло Д.А., Сибикиным Ю.Д. был собран и описан опыт работы по оптимизации потребления энергоресурсов, полученный на примере Гурьевской энергосистемы.

Доктором экономических наук Денисовым В.И. был предложен метод расчёта, основанный на анализе термодинамических свойств отборного пара, с целью увеличения энергосбережения топлива, при комбинированном способе производства электрической и тепловой энергии [3]. В данном методе автором разработан упрощенный пример оценки фактической экономии топлива на действующей ТЭЦ, а также соответствующее распределение полученной экономии между производством тепла и электроэнергией. Статья содержит порядок расчета удельных расходов топлива на производство каждого вида энергии.

В статье Байбакова С.А. отражены применяемые способы распределения тепла топлива на ТЭЦ между выработкой тепла и электроэнергией, предложен алгоритм расчета текущей экономии тепла и топлива для конкретной ТЭЦ при использовании и изменении параметров ее теплофикационного отбора. Предложен

облегченный метод деления тепла и топлива, выполненный на описанном алгоритме, и приведен пример расчета с использованием рассматриваемого способа и сравнение итогов расчета по различным способам [4].

В своей работе Боровков В.М., Галковский В.А. и Михайлов В.А. предлагают метод применения собственных источников электроэнергии предприятий, основанный на эксерготопологическом анализе [5].

Копцев Л.А., Зуевский В.В. и Седельников С.В. опубликовали статью о возможностях по энергосбережению ресурсов в ПАО «ММК» [6]. На предприятии применяются меры по энергосбережению при изменяющихся условиях, что обусловлено колебаниями объема производства продукции, связанными с изменением состава производственных мощностей и структуры производимой продукции, а также ситуацией на рынках сбыта.

Веников В.А., Будзко И.А., Левин М.С., Блохина Е.Л., Петров В.А. рассмотрели методы решения электроэнергетических многокритериальных оптимизационных задач с неопределенными величинами [7].

В статье Манусова В.З. и Павлюченко Д.А. представлено применение генетических алгоритмов для нахождения оптимума режима энергосистем по активной мощности. Рассмотрены традиционные подходы решения. Проанализированы основные принципы эволюционных вычислений. Проведён сравнительный анализ метода нелинейного программирования и предложенного генетического алгоритма [8].

На Международной конференции по европейскому энергетическому рынку в 2017 году в документе [9] был опубликован подробный анализ рыночных структур в Европе, Северной Америке и Австралии, а также определены препятствия и возможности для полной рыночной интеграции возобновляемых и распределенных источников энергии. Сравнение правил и принципов работы рынка с разных континентов, разработанных на примерах наиболее развитых рынков, показывает, как различные технологии могут выиграть от предложения рыночных продуктов на основе нескольких временных рамок. В этой связи недавние европейские документы устанавливают рамки для недискриминационного доступа к рынку для всех организаций. Поскольку максимальные преимущества для новых участников гарантируются в случае совместной оптимизации участия на нескольких рынках, в документе обсуждается, как внедрение сегментов и концепций рынков США и Австралии может помочь в достижении этого в Европе.

Статья [10] посвящена роли и влиянию законодательства и политики в развитии рынка электроэнергии. В Китае проводится реформирование рынка электроэнергии, введены новые рыночные субъекты, такие как продавцы электроэнергии, усилилась конкуренция на рынке электроэнергии. Появление новых субъектов рынка и усиление рыночной конкуренции привели к возникновению новых взаимоотношений и новых проблем между различными субъектами рынка, и для обеспечения стабильного развития и упорядоченного функционирования рынка электроэнергии необходима соответствующая правовая система. Однако соответствующая правовая система рынка электроэнергии Китая недостаточно надежна, чтобы соответствовать

требованиям реформирования рынка электроэнергии. В этой статье, сочетающей в себе процесс маркетинга электроэнергии в США, принимая ключевые законы и распоряжения, структуру рынка электроэнергии и конкретные правила рынка электроэнергии в качестве объектов исследования, анализируется взаимосвязь между развитием рынка электроэнергии и созданием правовой системы. Основываясь на реформировании рынка электроэнергии Китая, в статье выдвигаются некоторые предложения по правовой базе рынка электроэнергии Китая.

В работе [11] также отражается процесс реформ рынка электроэнергии в Китае. Реструктуризация электроэнергетики началась с розничного рынка, а именно созданием спотового рынка электроэнергии и долгосрочной торговли электроэнергией. Задачей реформы китайского рынка электроэнергии является переход от планового экономического режима к рыночному и применение изменений в централизованной электроэнергетике.

Инвестиции и ценообразование в условиях неопределенности поставок на рынке электроэнергии, общий взгляд на оптовый и розничный рынок были проведены в работе [12]. В этой статье электроэнергия на рынке подразделяется на два типа: электроэнергия со стабильным снабжением и электроэнергия с нестабильным снабжением. Исследуются инвестиционные и ценовые стратегии в условиях неопределенности поставок электроэнергии на оптовом и розничном рынке электроэнергии. В частности, авторы разработали модель, которая объединяет оптовый и розничный рынок и фиксирует доминирующих игроков, то есть потребителей, электростанцию (энергооператора) и поставщика электроэнергии. Чтобы вывести рыночное поведение этих игроков, авторы сформулировали задачи рыночных решений в виде многоэтапной игры Штакельберга. Решая игровую модель, была получена оптимальная в закрытой форме стратегия оптового инвестирования и розничного ценообразования для оператора. Также был получен максимально выгодный ценовой механизм поставщика энергии в числовом виде при определенном допущении.

В статье [13] было проведено прогнозирование нагрузки рынка электроэнергии на нейронной сети с выгодной коррелированной регуляризацией. На рынке на сутки вперед организации, обслуживающие потребителей, должны предоставлять оператору рынка свой будущий график загрузки. В результате расчета стоимости авторы обнаружили несоответствие между точностью нагрузки и стоимостью покупки электроэнергии. Это означает, что более точная модель прогнозирования нагрузки может, наоборот, привести к повышению стоимости покупки электроэнергии. Точность модели прогнозирования нагрузки может не соответствовать решению с оптимальной выгодой. Столкнувшись с такой проблемой, в этой статье инициируется полезная коррелированная регуляризация для прогнозирования нагрузки нейронной сети. Учебная цель нейронной сети содержит как раздел точности, так и раздел стоимости мощности. Кроме того, в этой статье устанавливаются виртуальный нейрон и модифицированный алгоритм Левенберга-Марквардта для обучения нейронной сети.

Механизм и практика раскрытия информации при регулировании рынка электроэнергии были отражены в материалах [14], представленных в 2022 году на Китайской международной конференции по распределению электроэнергии. Улучшение механизма раскрытия информации о рынке электроэнергии в рамках регулирования рынка электроэнергии поможет предоставить участникам рынка достаточно информации, направит участников рынка к рациональному участию в торгах и будет способствовать оптимальному распределению ресурсов. Авторский механизм раскрытия информации о рынке электроэнергии создан для постепенного определения объема и метода раскрытия информации на рынке электроэнергии. С постепенным развитием спотового рынка частота сделок будет выше и информация о сделках будет увеличиваться, а субъекты рынка будут предъявлять более высокие требования к раскрытию информации.

На Международном симпозиуме по силовой электронике для систем распределенной генерации в 2018 году в своей работе авторы [15] описали структуру рынка электроэнергии с индивидуальным механизмом ценообразования. Последние тенденции на современных рынках электроэнергии включают активную трансформацию программ регулирования спроса в так называемое интеллектуальное реагирование на спрос. Это в основном обеспечивается наличием и более широким внедрением передовых инструментов управления спросом, включая различные технологии интеллектуального измерения, датчиков и автоматизации. Более широкое проникновение данных систем влечет за собой более высокую гибкость спроса, что создает благоприятную среду для рынков электроэнергии с высоким использованием возобновляемых источников энергии. Однако оценить и измерить реальный эффект гибкости нагрузки в контексте действующих рыночных механизмов непросто. В частности, вклад гибких потребителей в формирование цен на электроэнергию четко не отражен. В этой статье авторы предлагают новый механизм рынка электроэнергии с централизованным пулом, что отражено в предлагаемой схеме индивидуального выставления счетов. Предлагаемое решение позволяет заранее определить вклад каждого потребителя в достижение целей системы. Проведено подробное сравнение эффективности разработанной модели рынка электроэнергии на сутки вперед с традиционными рыночными схемами в условиях разного уровня наличия гибких нагрузок, отражены в предлагаемой индивидуальной схеме выставления счетов.

Проанализировав статью [16] о достижениях в области сенсорных технологий для умных городов и электросетей, можно сделать вывод о том, что совершенствованные системы датчиков и интеллектуальные датчики используются для повышения эффективности работы электросетей и городских служб. Цель статьи состоит в описании новых функций и идей в области датчиков и систем датчиков, предназначенных для интеллектуальных электрических сетей, сетей электропитания и интеллектуальных систем города.

Главная цель статьи [17] состоит в описании структуры автоматического управления генерацией

для интеллектуальных электрических сетей. Интеллектуальные электрические сети с высоким количеством неравномерных, нерегулируемых распределенных энергоресурсов и электроэнергетические сети с ценообразованием в режиме реального времени требуют новых инструментов для автоматического управления генерацией. Основными недостатками дискретности являются повышенное использование резервов, агрегатов, обычно работающих на газе, и их износ из-за пульсирующих режимов работы турбин паровых агрегатов для регулирования нагрузки. В этой статье представлена новая структура автоматического управления генерацией для преодоления недостатка неравномерности потребления в интеллектуальных электрических сетях. Паровые турбины, гидрогенераторы управляются так, чтобы следовать низкочастотной динамике нагрузки на основе целевого значения нагрузки на один шаг вперед.

На сегодняшний день подавляющее большинство промышленных предприятий имеют собственные источники электроэнергии, что позволяет им снизить зависимость от государственной энергосистемы, а также себестоимость электроэнергии. Однако при включении в систему электроснабжения (СЭС) собственных источников электроэнергии это так или иначе приводит к её усложнению, вызывает необходимость контроля и анализа режима работы с учётом перетоков мощности, возможному увеличению эксплуатационных расходов и потерь электроэнергии, снижению эффективности работы СЭС.

Таким образом, анализ эксплуатационных режимов работы промышленных СЭС с собственными источниками является актуальным и востребованным направлением, затрагивающим области энергоэффективности и энергосбережения промышленных предприятий.

#### МЕТОДИКИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Алгоритм определения оптимальной мощности и распределения собственной выработки на промышленных тепловых электростанциях основан на методе динамического программирования. Более подробно данный алгоритм рассмотрен в работах [18-20]. В работе [21] приведено подробное описание алгоритма внутристанционной оптимизации в условиях промышленных систем электроснабжения.

С целью оптимального распределения покупаемой электроэнергии необходимо сформировать функцию затрат. В качестве оптимизируемой функции затрат будем рассматривать оплату электроэнергии, приобретаемой из энергосистемы, потери активной мощности в электрических сетях.

При прямом ходе оптимизационной задачи определяется эквивалентная характеристика объема электроэнергии для внешних источников (1).

На обратном ходе находятся рекомендуемая мощность каждого внешнего источника и стоимость затрат при заданном значении суммарного объема покупаемой электроэнергии. И, таким образом, рекомендуемая мощность каждого следующего источника определится как

$$Z = (Z_{ЭС} + Z_{\Delta W} + Z_{пр}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $Z_{ЭС}$  – затраты на производство электроэнергии собственными электростанциями;  $Z_{\Delta W}$  – затраты на потери мощности в электроэнергетической системе;  $Z_{пр}$  – затраты на прием мощности из энергосистемы.

На целевую функцию накладываются ограничения:

$$\begin{cases} \sum P_{ист} + \sum P_{G_N} = P_{нагрузки} + \Delta P_{СЭС}; \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}; \\ S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sum P_{ист}$  – суммарная мощность источников распределенной генерации, кВт;  $\sum P_{G_N}$  – активная мощность собственных генерирующих мощностей системы электроснабжения, кВт;  $P_{нагрузки}$  – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, кВт;  $\Delta P_{СЭС}$  – потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом мощности, принимаемой от внешнего источника, кВт;  $U_{i\max}, U_{i\min}$  – предельно допустимые потери напряжения в узле ( $\pm 10\%$  от номинального значения согласно ГОСТ 32144-2013), кВ;  $S_{i\min}, S_{i\max}$  – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью, кВА.

Получая эквивалентную функцию затрат, обязательно сохраняем результаты всех шагов эквивалентирования, данная функция полностью учитывает топологию сети, технико-экономические характеристики собственных источников электроэнергии и внешних источников, а также вклад каждого источника в потери мощности. Эквивалентная функция приведена на рис. 1. На данной структурной схеме  $P_{пр}$  – мощность, принимаемая из энергосистемы,  $\Delta P_{пр}$  – потери мощности в сети внешнего источника электроэнергии при

передаче  $P_{пр}$ ,  $n$  – порядковый номер источника электроэнергии.

Блок-схема алгоритма среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии приведена на рис. 2. В алгоритме предусмотрен запуск трех циклов. Если запускается цикл по формированию эквивалентной характеристики турбогенераторов, то  $n$  – количество турбогенераторов. Если осуществляется цикл по формированию эквивалентной характеристики внешних источников, то  $n$  – количество точек присоединения к внешним источникам электроэнергии. В последнем цикле  $n$  – любой источник в эквивалентной характеристике в соответствии с рис. 1. На рис. 3 изображена блок-схема методики среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных предприятий с собственными ЭС.

Разработанная методика реализована в оригинальном программном продукте «КАТРАН-OptActivePower» [22].

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С использованием разработанного алгоритма получены затраты на прием, передачу и потери мощности в условиях промышленного энергоузла, располагающего тремя собственными электрическими станциями и тремя точками подключения к энергосистеме.

Результаты расчета (табл. 1) определены для различных нагрузок энергоузла и исходя из оптимального распределения мощностей между отдельными источниками электроэнергии, как внешними, так и собственными.

На рис. 4 в качестве примера приведено оптимальное распределение мощностей между различными внешними источниками электроэнергии, соответствующее результатам, рассмотренным в табл. 1.

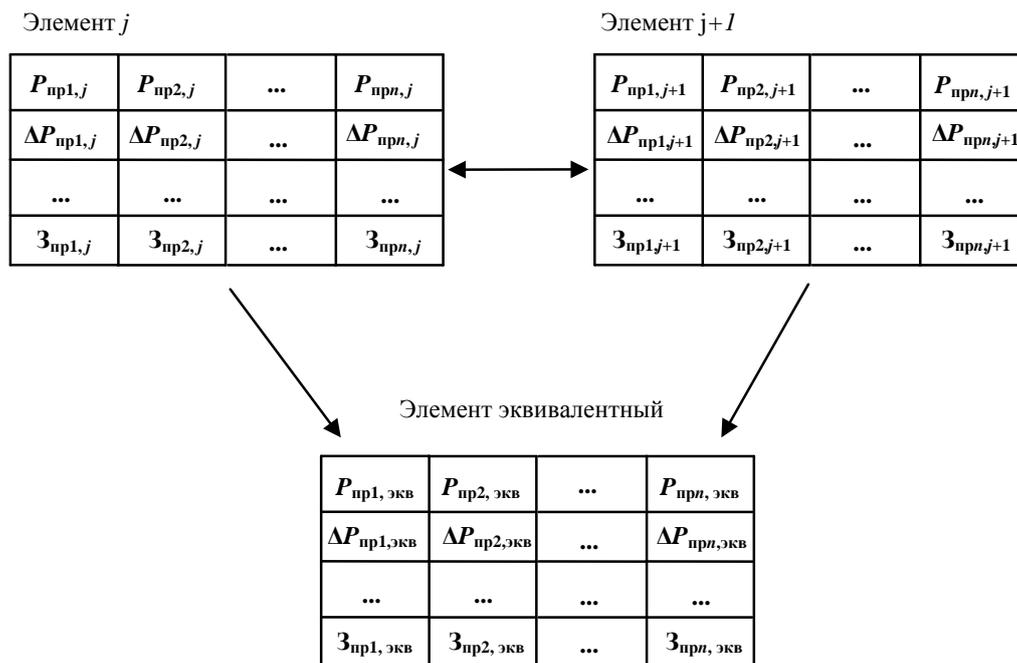


Рис. 1. Определение эквивалентной характеристики внешнего источника электроэнергии

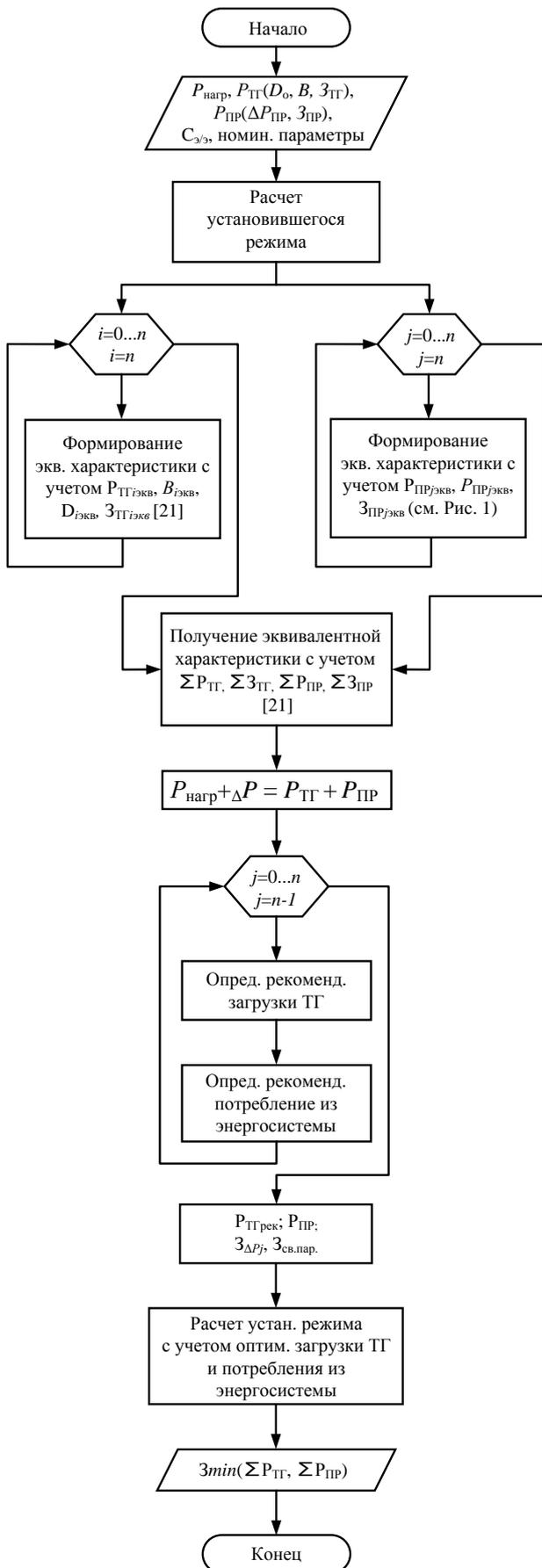


Рис. 2. Блок-схема алгоритма среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии

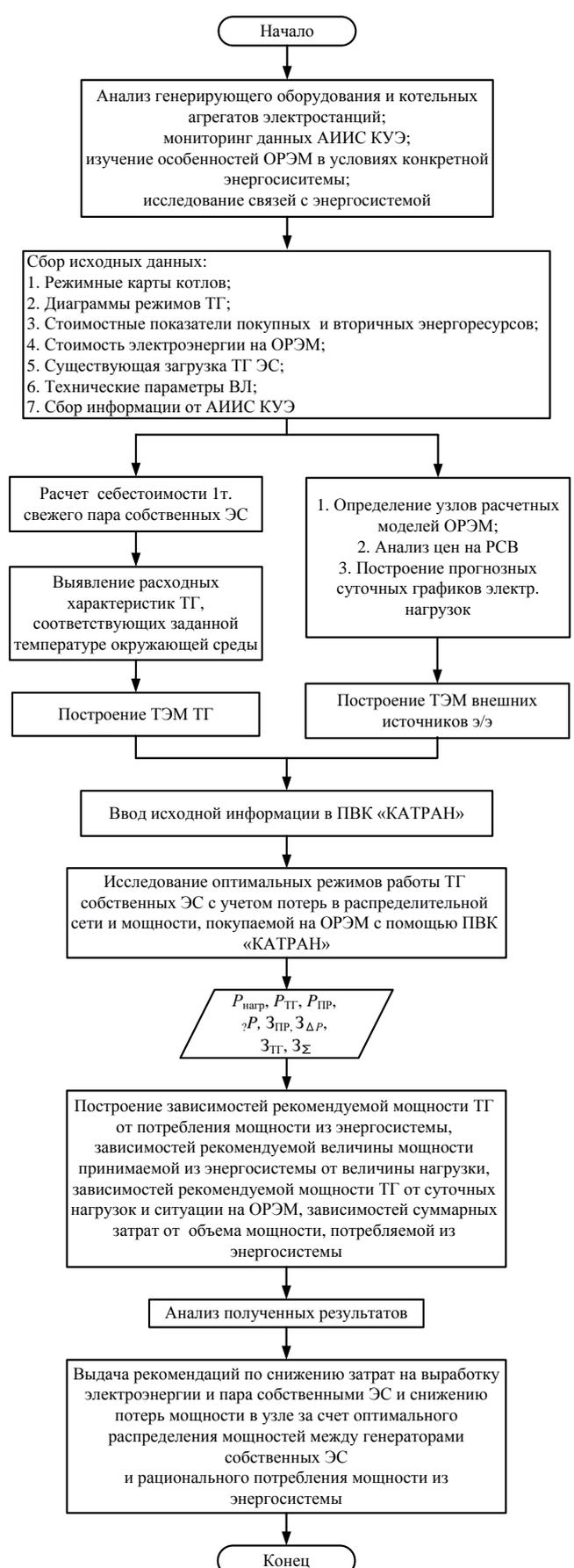


Рис. 3. Блок-схема методики среднесрочного планирования оптимального режима работы промышленных систем электроснабжения с внешними и собственными источниками электрической энергии

Таблица 1

Результаты расчета затрат, выполненного с помощью алгоритма оптимизации

$\Sigma P_{нагр}$ , МВт	$Z_{прим}$ , руб.	$Z_{ДР}$ , руб.	$Z_{ЭС}$ , руб.	$Z_{\Sigma}$ , руб.
1046,4	2624746	32301,48	1761017	4418064
1043,1	2613464	32279,27	1761014	4406757
1042,0	2607644	32257,05	1761013	4400914
1039,8	2596668	32257,05	1761010	4389935
1039,0	2592074	32234,84	1761010	4385318
1037,8	2586101	32257,05	1761007	4379365
1035,7	2575227	32212,62	1761005	4368445
1033,5	2563996	32212,62	1761002	4357211
1033,2	2562618	32190,4	1761002	4355810
1032,6	2559351	32190,4	1761001	4352542
1028,3	2536838	31923,82	1761004	4329765
1026,8	2529639	32012,68	1761003	4322655
1025,2	2520553	31590,58	1761004	4313147
1023,6	2512895	31901,6	1761000	4305797
1023,0	2509679	31879,39	1761001	4302559

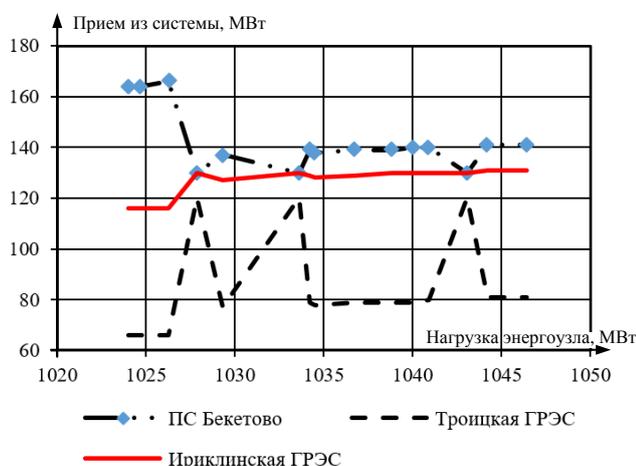


Рис. 4. Определение эквивалентной характеристики внешнего источника электроэнергии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика среднесрочного планирования основана на сочетании методов последовательного эквивалентирования и динамического программирования. Расчеты проводились в ПК «КАТРАН-OptActivePower» с модулем «Оптимизация», позволяющим определять оптимальную работу генераторов собственных электростанций промышленного предприятия и прием мощности из энергосистемы.

По результатам исследований были даны рекомендации по экономически целесообразным приемам мощности из энергосистем при оптимальном распределении нагрузок между агрегатами местных электростанций. Программно-вычислительный комплекс предназначен для диспетчерских служб промышленного предприятия с целью среднесрочного планирования нагрузок источников энергоузла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Improving Efficiency of Electric Energy System and Grid Operating Modes: Review of Optimization Techniques // Energies. 2022. Vol. 15. 7177. doi: 10.3390/en1519717
- Из опыта работы по экономии энергоресурсов / С.С. Утарбаев, В.А. Яшков, Д.А. Курьло, Ю.Д. Сибикин // Электричество. 1988. №2. С. 4-7.

- Денисов В.И. Основы метода расчета экономии топлива при комбинированном способе производства электрической и тепловой энергии // Электрические станции. 2010. №9. С. 41-44.
- Байбаков С.А. О расчете экономии топлива и оценке эффективности комбинированной выработки электрической и тепловой энергии // Электрические станции. 2011. №6. С. 9-12.
- Боровков В.М., Галковский В.А., Михайлов В.А. Возможности энергосбережения в ПАО «ММК»: энергоёмкость продукции и экономическая эффективность // Промышленная энергетика. 2006. № 11. С. 6-9.
- Копцев Л.А. Энергосбережение и повышение экономической эффективности предприятия путем управления нагрузкой производственных агрегатов // Промышленная энергетика. 2011. №11. С. 24-27.
- О методах решения многокритериальных оптимизационных задач электроэнергетики с неопределёнными величинами / В.А. Веников, И.А. Будзко, М.С. Левин, Е.Л. Блохина, В.А. Петров // Электричество. 1987. № 2. С. 1-7.
- Манусов В.З., Павлюченко Д.А. Эволюционный алгоритм оптимизации режимов электроэнергетических систем по активной мощности // Электричество. 2004. № 3. С. 2-8.
- Market participation possibilities for renewable and distributed energy resources / I. Pavic, M. Beus, H. Pandzic, T. Capuder, I. Stritof // 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2017.7981917
- Role and Inspiration of Legal and Policy in the Development of U.S. Electricity Market / T. Wei, H. Jianping, Y. Chunhua, Caoyang // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018. Pp. 2846-2851. doi: 10.1109/CICED.2018.8592334
- Electricity Market Design and Operation in Guangdong Power / X. Zhang, W. Liu, Y. Chen, Y. Bai, J. Li, J. Zhong // 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2018.8469826
- Investing and pricing with supply uncertainty in electricity market: A general view combining wholesale and retail market / X. Li, L. Gao, G. Wang, F. Gao, Q. Wu // China Communications. 2015. No. 3. Pp. 20-34. doi: 10.1109/CC.2015.7084360
- Power Market Load Forecasting on Neural Network With Beneficial Correlated Regularization / F.Y. Xu, X. Cun, M. Yan, H. Yuan, Y. Wang, L.L. Lai // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. No. 11. Pp. 5050-5059. doi: 10.1109/TII.2017.2789297
- Liu X., Zhou N., Wu D. Information Disclosure Mechanism and Practice under Electricity Market Regulation // China International Conference on Electricity Distribution (CICED). IEEE, 2022. Pp. 19-24. doi: 10.1109/CICED56215.2022.9929097
- Electricity Market Structure with Individual Pricing Mechanism / A. Mnatsakanyan, A.H. AlMazrooqi, E.B. Muruaga, P.A. Banda // 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDG.2018.8447757
- Advances on Sensing Technologies for Smart Cities and Power Grids: A Review / R. Morello, S.C. Mukhopadhyay, Z. Liu, D. Slomovitz, S.R. Samantaray // IEEE Sensors Journal. 2017. No. 23. Pp. 7596-7610. doi: 10.1109/JSEN.2017.2735539
- Keyhani A., Chatterjee A. Automatic Generation Control Structure for Smart Power Grids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 3. Pp. 1310-1316. doi: 10.1109/TSG.2012.2194794
- Varganova A.V., Khrumshin V.R., Radionov A.A. Operating

Modes Optimization for the Boiler Units of Industrial Steam Plants // *Energies*. 2023. Vol. 16. 2596. doi: 10.3390/en16062596

19. Варганова А. В., Джагаров Н.Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. №4(49). С. 11-16. doi: 10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16
20. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей за-

дачи // *Главный энергетик*. 2011. №3. С. 54-57.

21. Кочкина А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными генерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии // *Наука и производство Урала*. 2012. №8. С. 204-209.
22. А.с. 2019618397 Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». №2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.2019.

Поступила в редакцию 25 июля 2023 г.

Принята к печати 01 сентября 2023 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### METHODOLOGY FOR OPTIMIZING OPERATING MODES OF INDUSTRIAL POWER UNITS WITH IN-HOUSE GENERATION AND EXTERNAL SOURCES OF ELECTRIC POWER

Natalia A. Anisimova

Post Graduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ec091@mail.ru

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of a Department, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aleksandra-khlamova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Mikhail S. Melnikov

Undergraduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andruxa645@mail.ru

Olga I. Petukhova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, petuhova-olg@mail.ru

Power supply systems for industrial enterprises in order to ensure reliability of power supply and increase efficiency, as a rule, has its own generating base and external power supply - connection to the electrical power system. Changing the load during the day poses the task of determining and predicting the optimal power purchased from the power system. An important task in such conditions is also the development of planned repairs of the main generating equipment of the industrial power supply system. This work is devoted to the development of an algorithm for determining the optimal power purchased from the energy system, taking into account the in-house power from local thermal power plants. The calculation methodology takes into account the main features of industrial power units, namely, the use of several types of fuel in a single power plant, the presence of several large industrial power plants, power transmission in the power supply system (losses of active power in the system), the transfer ability of elements, compliance with permissible voltage conditions in nodes. The algorithm is based on the dynamic programming method in combination with the sequential equivalence method, which makes it possible to search for a whole set of optimal controls with many possible solutions. Models of power systems and in-house energy sources presented particular difficulty in the calculations. In this work, source models are presented in tabular form. For power systems, there is a dependence of the power received from the power system on the tariff within the specified power. An equivalent model of external sources takes into account the operating conditions of the electricity market. Based on the results of work in the conditions of an industrial power center, the recommended capacities are

given for receiving power from the power system and the corresponding costs for receiving and in-house power generation.

**Keywords:** power supply, power unit, industrial power plant, power system, optimization, dynamic programming, electricity market, electricity tariff, medium-term planning, technical and economic model

#### REFERENCES

1. Varganova A.V., Khramshin V.R., Radionov A.A. Improving Efficiency of Electric Energy System and Grid Operating Modes: Review of Optimization Techniques. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 7177. doi: 10.3390/en1519717
2. Utarbaev S.S., Yashkov V.A., Kurylo D.A., Sibikin Y.D. From experience in saving energy resources. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1988, no. 2, pp. 4-7. (In Russian).
3. Denisov V.I. Fundamentals of the method for calculating fuel economy for a combined method of producing electrical and thermal energy. *Elektricheskie stantsii* [Electrical stations], 2010, no. 9, pp. 41-44. (In Russian)
4. Baibakov S.A. On calculating fuel economy and assessing the efficiency of combined generation of electrical and thermal energy. *Elektricheskie stantsii* [Electrical stations], 2011, no. 9, pp. 9-12. (In Russian)
5. Borovkov V.M., Galkovskii V.A., Mikhailov V.A. Opportunities for energy saving at PJSC MMK: energy intensity of products and economic efficiency. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2006, no. 11, pp. 6-9. (In Russian)
6. Koptsev L.A. Energy saving and increasing the economic efficiency of the enterprise by managing the load of produc-

- tion units. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2011, no. 11, pp. 24-27. (In Russian)
7. Venikov V.A., Budzko I.A., Levin M.S., Blokhina E.L., Petrov V.A. On methods for solving multicriteria optimization problems in the electric power industry with uncertain values. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1987, no. 2, pp. 1-7. (In Russian)
  8. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A. Evolutionary algorithm for optimizing the modes of electric power systems based on active power. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2004, no. 3, pp. 2-8. (In Russian)
  9. Pavić I., Beus M., H. Pandžić H., Capuder T., Štrifof I. Market participation possibilities for renewable and distributed energy resources. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2017.7981917
  10. Wei T., Jianping H., Chunhua Y., Caoyang. Role and Inspiration of Legal and Policy in the Development of U.S. Electricity Market. China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018, pp. 2846-2851. doi: 10.1109/CICED.2018.8592334
  11. Zhang X., Liu W., Chen Y., Bai Y., Li J., Zhong J. Electricity Market Design and Operation in Guangdong Power. 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEM.2018.8469826.
  12. Li X., Gao L., Wang G., Gao F., Wu Q. Investing and pricing with supply uncertainty in electricity market: A general view combining wholesale and retail market. *China Communications*. 2015, vol. 12, pp. 20-34. doi: 10.1109/CC.2015.7084360
  13. Xu F.Y., Cun X., Yan M., Yuan H., Wang Y., Lai L.L. Power Market Load Forecasting on Neural Network With Beneficial Correlated Regularization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 14, pp. 5050-5059. doi: 10.1109/TII.2017.2789297
  14. Liu X., Zhou N., Wu D. Information Disclosure Mechanism and Practice under Electricity Market Regulation. China International Conference on Electricity Distribution (CICED). IEEE, 2022, pp. 19-24. doi: 10.1109/CICED56215.2022.9929097
  15. Mnatsakanyan A., AlMazrooqi A. H., Muruaga E. B., Banda P.A. Electricity Market Structure with Individual Pricing Mechanism. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDG.2018.8447757
  16. Morello R., Mukhopadhyay S. C., Liu Z., Slomovitz D., Samantaray S. R. Advances on Sensing Technologies for Smart Cities and Power Grids: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2017, vol. 17, pp. 7596-7610. doi: 10.1109/JSEN.2017.2735539
  17. Keyhani A., Chatterjee A. Automatic Generation Control Structure for Smart Power Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012, vol. 3, pp. 1310-1316. doi: 10.1109/TSG.2012.2194794
  18. Varganova A.V., Khramshin V.R., Radionov A.A. Operating Modes Optimization for the Boiler Units of Industrial Steam Plants. *Energies*. 2023, vol. 16, pp. 2596. doi: 10.3390/en16062596
  19. Varganova A.V., Djagarov N.F. Integrated optimization of industrial thermal power plants conditions. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 11-16. (In Russian)
  20. Malafeev A. V., Khlamova A. V., Krasnov M. I. Optimization of generator loading at OJSC MMK in-house power plants, taking into account active power losses in the distribution network by decomposing the general problem. *Glavnyi energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no. 3, pp. 54-57. (In Russian)
  21. Kochkina A. V. Application of the dynamic programming method to solve problems of optimal distribution of active capacities between heterogeneous generating sources of own power plants of ferrous metallurgy enterprises. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and production of the Urals], 2012, no. 8, pp. 204-209. (In Russian)
  22. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-OptActivePower [KATRAN-OptActivePower]. Computer program RF, no. 2019618397, 2019.

Методика оптимизации режимов работы промышленных энергоузлов с собственной генерацией и внешними источниками электроэнергии / Н.А. Анисимова, А.В. Варганова, М.С. Мельников, О.И. Петухова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 3(60). С. 15-22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-15-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-15-22)

Anisimova N.A., Varganova A.V., Melnikov M.S., Petukhova O.I. Methodology For Optimizing Operating Modes Of Industrial Power Units With In-house Generation And External Sources Of Electric Power. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 3(60), pp. 15-22. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3\(60\)-15-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-3(60)-15-22)