ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.31+338

А. В. БУБНОВ
И. В. ФЁДОРОВ
Л. Г. ПОЛЫНЦЕВ

Омский государственный технический университет

ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИКИ

В статье рассматриваются вопросы создания концептуальной модели устойчивого развития электроэнергетики на основе теории саморганизации во взаимосвязи с экономикой. Предлагается энтропийная модель долгосрочного планирования производства, распределения и потребления мощности в электроэнергетической системе.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, энтропийная модель, взаимосвязь энергетики и экономики.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения 14.B37.21.0332 от 27 июля 2012 г.

Постановка задачи. Развитие электроэнергетики и связанные с этим теоретические исследования электроэнергетических систем (ЭЭС) в нашей стране до последнего времени базировалось на использовании хорошо разработанной методологии системных исследований в энергетике (СИЭ), соответствующих методов прогнозирования, проектирования и планирования, которые были достаточно эффективными для централизованной планово-директивной системы управления [1].

Сегодня они во многом не адекватны существующей системе электроэнергетики, многоукладной по форме собственности и без вертикальной интеграции по виду организации. Однако в СИЭ заключен достаточно мощный потенциал, который может и должен быть использован при разработке современных систем управления развитием электроэнергетики. Необходимо признать, что проблема развития электроэнергетики во многом не решена и за рубежом, хотя в странах с либеральной экономикой она воз-

никла намного раньше. Ориентация на методы стратегического менеджмента, который предназначен решать задачи устойчивого развития компаний и обеспечивать высокий уровень организации во многом не дает желаемого результата.

Если рассматривать электроэнергетику в соответствии с Законом об электроэнергетике как систему экономических отношений составляющих ее субъектов, то ЭЭС сегодня стала системой их производственных отношений. Существующие недостатки в части построения системы производственных отношений проявляется снижением эффективности и надежности ЭЭС. Можно наблюдать противоречия интересов субъектов электроэнергетики, которые нарастают и обнажаются, что сопровождается отказами от решений, заложенных в «Генеральной схеме размещения объектов энергетики» и «Программе перспективного развития электроэнергетики» как основы проектирования развития ЭЭС, более того, отсутствует устойчивое развитие электроэнергетики [2].

Произошедшие преобразования электроэнергетики привели к ее превращению из производственной в социотехническую систему, принципиально отличающуюся тем, что развитие может осуществляться только на основе самоорганизации за счет внутренних сил, формирующихся под влиянием внешних условий, таким образом, имеет место смена парадигмы развития электроэнергетики. В рамках новой парадигмы предлагается концептуальная модель развития, построенная на основе теории самоорганизации, в соответствии с которой устойчивое развитие электроэнергетики обеспечивается непрерывным поддержанием в ней триединых процессов: стабилизации, упорядочивания и детерминированного хаоса, создающего многообразие и свободу выбора путей развития.

Управление изменениями и управление развитием — принципиально разные виды деятельности. Управление изменениями — «внутренний» процесс, который при определенных условиях может привести к развитию системы, а управление развитием — «внешний» процесс, который при определенных условиях может привести к изменению направления и хода развития.

Предлагаемые механизмы развития призваны обеспечить взаимосвязь и согласованность социальной, экономической и технической политики в электроэнергетике, кроме того, представлены их структура и состав задач, решение которых определяет появление синергетического эффекта. В связи с этим необходимо разработать модели и методы интегрального описания режимов работы ЭЭС, позволяющие определять:

— оптимальный размер и структуру резервов мощности и энергии в ЭЭС с учетом особенностей режимов гидроэлектростанций для компенсации пиковых нагрузок;

— размещение резервов мощности в ЭЭС с учетом ограничений пропускной способности межсистемных связей;

— режимные характеристики ЭЭС в виде узловых небалансов по активной мощности для анализа ее устойчивоспособности;

— области допустимых режимов (ОДР) с учетом нелинейного характера их границ на основе необходимых и достаточных условий существования режимов.

В прикладном плане СИЭ были направлены на решение конкретных задач управления функционированием и развитием. На основе методологии СИЭ осуществлялось управление развитием энергетики в СССР: разрабатывались стратегии развития энергетики, схемы развития электроэнергетики страны, отдельных регионов и т. д. В последний период существования СССР из-за предположения идеальности систем управления в энергетике и стране стал проявляться основной недостаток СИЭ — слабая реализуемость выработанных с помощью СИЭ решений. Причина этого заключалась в том, что СИЭ не учитывали социопсихологический аспект больших систем энергетики, в частности, реальные свойства систем управления. В менеджменте, к сожалению, нет методов и критериев, которые гарантировали бы то, что идет процесс развития, а не движение к краху организации. Видимо, это и является причиной того, что многие предприятия в результате такого «развития» через некоторое время исчезают с поля своей деятельности [3].

Примерно такое же положение имело место с понятием «развитие» в СИЭ. С одной стороны, утверждается, что задачей СИЭ является исследование тенденций и закономерностей развития систем энергетики, т. е. признается, что развитие присуще системам энергетики естественным образом и существует объективно, его можно исследовать. С другой стороны, управление в энергетическом хозяйстве, в том числе развитием, выступает основным предметом СИЭ.

Не лучше ситуация и с понятиями «управление» и «управление развитием». Под управлением понимается выработка управляющих решений (на основе прогнозирования, планирования, проектирования и т.д.) и их реализация путем воздействия управляющей подсистемы на управляемую систему, направленных на изменения ее параметров. Однако если развитие системы — объективный, естественный и закономерный процесс, то что означает управление этим процессом? Как это возможно? Может быть, все современные проблемы управления и заключаются в том, что мы вмешиваемся в естественный процесс развития и разрушаем его?

Наконец, о понятии «системная надежность». Сегодня оно тоже требует развития. Для электроэнергетики, представлявшей собой единый производственно-хозяйственный комплекс, системная надежность определяла надежность этого комплекса по отношению к потребителям электроэнергии и обеспечивалась единым управляющим субъектом — ЭЭС. Для электроэнергетики, представляющей собой множество хозяйствующих субъектов, ЭЭС уже не является таким субъектом. Исчез субъект, обеспечивающий системную надежность при развитии электроэнергетики.

Развитие — естественный процесс, присущий самоорганизующимся объектам, которые, как системы, являются открытыми, неравновесными, диссипативными, но операционально-замкнутыми. Известно определение понятия «развитие» как «необратимого, направленного и закономерного изменения материальных и идеальных объектов», где только одновременное наличие триединых процессов, указанных ранее, выделяет процесс развития в среде других изменений. Исследование данного понятия позволило сформулировать следующие тезисы:

направленность — освоение «потенциала развития», которым обладает (наделяется) самоорганизующаяся система;

необратимость — наличие диссипации, которая определяет «невозможность» вернуться в исходное состояние, положение и т.д.;

закономерность — наличие механизма развития, который не познан в полной мере, но о котором

есть некоторое представление, в частности, что его работа определяется критерием невозрастания энтропии системы.

Не всегда изменения, происходящие в открытых, неравновесных, диссипативных и операционально-замкнутых искусственных системах являются процессом развитая, хотя могут обеспечивать достижение определенной цели. Развитием они становятся, если в результате изменений расширяется пространство, и (или) увеличивается время существования системы, что проявляется в увеличении спроса на результаты ее работы, снижается объем потребляемых ею ограниченных ресурсов.

Структурно самоорганизующиеся системы могут быть двух типов:

— системы, включающие в себя организующий центр и организуемый объект (системы по Эшби);

— системы без организующего центра, где проявляется синергетический эффект (системы по Хакену).

С системных позиций развитие как процесс можно представить состоящим из трех подпроцессов: детерминированного хаоса, упорядочивания и стабилизации.

Детерминированный хаос определяет расширение конфигурационного пространства системы, обусловленного переходом к новому «странному» аттрактору, т.е. к новому состоянию. Хаос порождается изменением потенциала развития системы. Этот подпроцесс направлен на изменение системы, он повышает ее сложность и расширяет ее возможности.

Упорядочивание обеспечивает установление новых связей, порядка в системе на основе сложившейся в результате хаотического подпроцесса структуры отношений. Этот процесс ведет к росту организованности и возможностям выполнения новых функций.

Стабилизация обеспечивает повышение степени использования образовавшихся связей в рамках сложившейся структуры отношений и связей, проявляющихся в виде роста выполняемых системой функций [4].

С развитием рыночных механизмов в России резко возросла роль ценовых и финансовых взаимосвязей энергетики и экономики, принципиально изменились способы государственного управления отраслями ТЭК, усилились противоречия между интересами государства и отдельных энергетических предприятий и компаний. Перспективное планирование развития ТЭК по схеме: долгосрочный прогноз — комплексная программа НТП на 15—20 лет — предложения к основным направлениям плана — пятилетний план, сменились другой схемой: долгосрочный прогноз — энергетическая стратегия — энергетическая политика — конкретные программы, реализующие энергетическую политику — мониторинг реализации политики. При этом приходится учитывать необходимость и способы совмещения интересов государства, регионов и субъектов ТЭК (акционеров и персонала энергетических компаний и предприятий) и вносить коррективы в энергетическую политику.

В области системных исследований принципиально изменились представления об иерархии систем энергетики, роли их управляющих подсистем и особенно о значимости вертикальных (абсолютно доминировавших в плановой системе) и горизонтальных (преобладающих в рыночных условиях) взаимосвязей систем. Намного сложнее стали задачи информационного обеспечения перспективных энергетических решений из-за отсутствия централизованных планов развития экономики.

Математические модели энергетических систем сделались практически обязательным инструментом обоснования государственных прогнозов и бизнес-планов развития компаний и требования к ним резко повысились. Планы и прогнозы теперь приходится непосредственно увязывать с финансовыми показателями деятельности компаний и обусловленными ими возможностями аккумулирования собственных и привлечения внешних инвестиций. Все это принципиально усложнило проблему моделирования взаимосвязей энергетики и экономики.

Учитывая актуальность проблемы разработки современных математических моделей взаимосвязей энергетики и экономики, рассмотрим эволюцию подходов и методов их формирования. Важную роль в исследовании связей отраслей ТЭК с другими отраслями долгое время играли модели межотраслевого баланса. Развитие этих моделей шло путем включения механизмов обратной связи между первичными факторами (трудом, капиталом, энергией) и конечным потреблением, а также представления коэффициентов межотраслевых связей в виде неоклассической производственной функции.

Подавляющее большинство моделей, применяемых в странах с рыночной экономикой для оценки макроэкономических последствий ценовых и других изменений в энергетике, базируются на неоклассических принципах общего равновесия. Большие прикладные модели этого типа (CGE — Computable General Equilibrium models) — системы поведенческих уравнений, определяющих через изменение относительных цен экономическое равновесие между производством и потреблением товаров и услуг в условиях совершенной конкуренции. Потребители максимизируют прибыль через производственную функцию, описывающую связь между затратами ресурсов и выпуском продукции. Ресурсами являются капитал, труд и другие производственные факторы (в том числе и энергия); они обеспечиваются потребителями, максимизирующими свою полезность с учетом бюджетных ограничений. Точке пересечения кривых спроса и предложения соответствуют цены равновесия. В ней уравнения, описывающие поведение производителей и потребителей, являются эконометрическими и нелинейными.

Включение в модели экономического роста наряду с трудом и капиталом энергии, а в модели межотраслевого баланса дезагрегирование энергетики стало широко практиковаться при исследовании взаимосвязей энергетики и экономики. При этом происходило усложнение макроэкономических моделей, учет в них экологических и других факторов.

Наиболее сложная и интересная модель, учитывающая взаимосвязи между производством и потреблением энергоресурсов, была разработана в 1974 г. Федеральной энергетической администрацией США как инструмент оценки альтернативных стратегий достижения энергетической независимости. Модель, названная PAES [5], состоит из трех подмоделей. Первая — эконометрическая модель потребностей. Она описывает зависимость спроса на отдельные виды топлива и энергии от цен по девяти агрегированным районам США. Вторая — подмодель энергоснабжения используется для построения характеристик затрат на добычу и транспорт нефти, газа и угля в функции от размеров дополнительного вовлечения этих ресурсов в энергетический баланс страны и других факторов. Третья, интегрирующая, подмодель

с помощью специальной итеративной процедуры ищет равновесное состояние рынка энергии.

По мере расширения состава задач и усложнения рассматриваемых энергетических проблем все четче вырисовывается тенденция к интеграции энергетических и экономических моделей. Это объясняется тем, что имеющиеся энергетические и экономические модели, исследуемые раздельно, дают неполную, а часто и неправильную оценку взаимосвязей между энергетикой и экономикой. С одной стороны, энергетические модели, реалистически учитывая взаимозаменяемость различных энергоносителей, принимают все связи с экономикой как заданные, фиксированные, с другой — макроэкономические модели и модели поведения потребителей энергии рассматривают энергетическую систему чрезмерно агрегированно. Поэтому естественно стремление связать энергетические и экономические модели в один вычислительный комплекс. Это можно сделать двумя принципиально разными способами. Первый — создание единой «супермодели» экономики, достаточно подробно описывающей внешние и внутренние связи энергетики. Второй способ — использование системы самостоятельных энергетических и экономических моделей, увязываемых с помощью итеративных (необязательно формальных) методов.

Хотя в настоящее время нет принципиальных математических и вычислительных ограничений на создание гигантских моделей, эффективность их практического применения вызывает сомнение. В самом деле, такие модели не только трудно отлаживать, но, что более важно, на них трудно анализировать роль отдельных факторов и интерпретировать получаемые результаты. Неформализованный подход, где информация, получаемая из одной модели, анализируется специалистами и служит входом в другую модель, существенно облегчает исследования долгосрочных проблем развития энергетики и экономики.

Обобщая краткий обзор состояния моделирования и исследований взаимосвязей энергетики и экономики за рубежом можно выделить следующие тенденции:

а) усиление внимания к оценке зависимости потребностей в топливе и энергии от их цены;

б) расширение круга анализируемых внешних связей ТЭК и стремление учесть комплексное влияние стратегий развития энергетики на экономику;

в) переход от использования отдельных экономических и энергетических моделей к их синтезу;

г) создание сложных модельно-компьютерных комплексов. Создание таких комплексов — длительный, поэтапный процесс, в ходе которого меняется приоритетность и состав решаемых задач, совершенствуются (по мере постижения изменяющейся реальности) способы описания взаимосвязей энергетики и экономики, включаются в систему новые модели, разрабатываются новые способы их взаимодействия.

В отличие от зарубежных стран, в СССР основным принципом функционирования экономики того периода на макроуровне являлось централизованное перспективное планирование и административное управление. Отсюда основной задачей моделирования взаимосвязи энергетики и экономики служила необходимость оптимизации и балансировки основных характеристик, под которыми понимались материально-вещественные аспекты экономики, без учета ценовых и финансовых факторов.

К прикладным моделям предъявляются достаточно строгие требования, основными из которых являются: информационная обеспеченность модели, технологичность, пользовательская доступность. Поэтому из всего многообразия теоретических межотраслевых моделей к практическому использованию в планировании методическими указаниями к разработке народнохозяйственных планов были рекомендованы лишь две из них: модель натурально-стоимостного баланса и укрупненная стоимостная динамическая мо-дель.

Экономическое развитие России с 1990-х годов сопровождалось все более сильным влиянием товарно-денежных отношений на макроэкономические пропорции и динамику. Многократно возросла роль денег. Именно поэтому прежний модельный инструментарий не может в должной мере соответствовать экономической действительности. Кроме того, значительно расширился диапазон поведения экономических агентов. Это дает основания для построения и использования поведенческих регрессионных уравнений, что нашло отражение в разработанной в Институте экономического прогнозирования РАН межотраслевой модели RIM (Russian Interindustry Model) [6]. Строго говоря, модель RIM пока не является моделью общего равновесия — в ней отсутствует блок эндогенных расчетов равновесия на денежном рынке. Отчасти это объясняется информационными трудностями.

Формирование и развитие топливно-энергетического комплекса страны вызвали острую необходимость создания методологии и современных средств его изучения и управления. Базой для этого послужила методология системных исследований в энергетике [7, 8], являющаяся дальнейшим органическим развитием и практическим воплощением идей и методов, накопленных советской школой энергетиков и экономистов, начиная с работ плана ГОЭЛРО.

Разработка моделей для оптимизации развития ТЭК шла во взаимосвязи с уточнением задач исследования, планирования и прогнозирования. Цели перспективного планирования ТЭК и входящих в него подсистем на уровне Госплана СССР в общем виде сформированы в «Методических положениях оптимизации развития топливно-энергетического комплекса» [9], подготовленных сотрудниками СЭИ, ГВЦ Госплана СССР, ВГПИ и НИИ Энергосетьпроекта (ЭСП), ИВТАНа, Центрального научно-исследовательского института экономики и научно-технической информации (ЦНИЭИУголь), ВНИИ Нефтепереработки. Цели долгосрочного прогнозирования энергетики широко обсуждались в 1970-х годах, когда в ее развитии все четче начали проявляться новые тенденции. Эти цели нашли свое отражение в «Методических положениях долгосрочного прогнозирования топливно-энергетического комплекса» [8].

По мере расширения состава решаемых задач и усложнения рассматриваемых энергетических проблем все четче вырисовывались следующие направления и тенденции в развитии моделирования ТЭК:

1. Интегрирование моделей ТЭК с экономическими моделями для более полного учета внешних связей энергетики.

2. Построение систем моделей как иерархически соподчиненных в производственном и временном аспектах; все более широкое использование имитационного подхода.

Разработанная в СЭИ СО АН СССР в 1970-х годах прошлого века схема долгосрочного прогнозирования ТЭК [7], а затем и система моделей [8] (рис. 1) начали использоваться при исследовании проблем долгосрочного развития энергетики СССР.

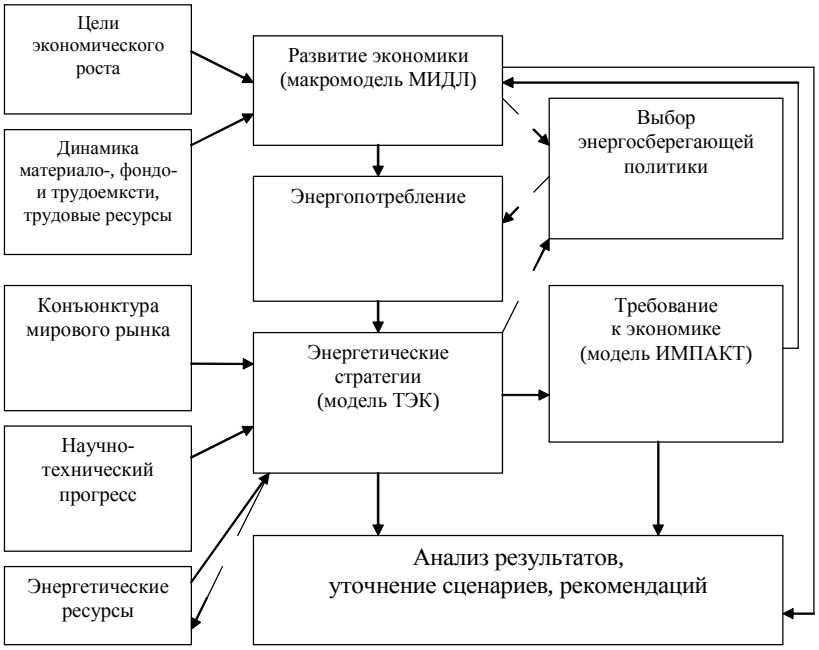


Рис. 1. Система моделей СЭИ СО АН СССР долгосрочного прогнозирования энергетики СССР

Одним из подходов исследования вопросов развития многоотраслевых комплексов и отраслей во взаимодействии с народным хозяйством в целом являлся проект СОНАР (Согласование отраслевых и народнохозяйственных решений) и его составная часть — СОНАР-ТЭК [9]. Этот проект продолжает развиваться. В настоящее время в него входит агрегированная оптимизационная межотраслевая межрайонная модель (ОМММ), включающая равноправное описание всех основных отраслей промышленности и народного хозяйства, и специализированная модель с «акцентированным» описанием энергетических производств. Первая является одной из координирующих моделей во всей системе СОНАР: через нее осуществляются увязка и согласование разработок, проводимых в рамках данного проекта, с разработками, осуществляемыми в рамках другого системного проекта СИРЕНА (СИстема РЕгиональных и НАроднохозяйственных моделей), нацеленного на исследование межрегиональных и региональных аспектов общественного производства.

Вторая модель, получившая название ОМММ-ТЭК, одна из основных в модельном комплексе СОНАР-ТЭК. Ее роль определяется двумя функциями. Во-первых, на ее основе происходит «включение» исследований в области энергетики в общую схему обоснований народнохозяйственного плана за счет взаимодействия ОМММ-ТЭК с агрегированной ОМММ, специализированными народнохозяйственными моделями других «ветвей» проекта СОНАР (машиностроительной, химической, лесопромышленной и др.). Во-вторых, она выполняет функции координирующей для моделей собственно энергетических систем. Таким образом, модели объектов и подсистем ТЭК обеспечивают выход на конечные народнохозяйственные показатели, осуществляют информационное наполнение ОМММ-ТЭК, повышая достоверность получаемых на ее основе результатов.

Оригинальная экономико-математическая модель разработана в ИНЭИ РАН — Модель энергетики в экономики (МЭНЭК) [10, 11]. Это динамическая модель межотраслевого баланса типа Неймана с более подробным описанием отраслей ТЭК и топливно-энергетических ресурсов. Она может использоваться как для ретроспективного анализа на основе верификации по статистическим данным последних лет отчетного периода, так и для прогнозирования развития экономики на перспективу до 7 – 10 лет.

Структурной основой модели служат 23 баланса производства и распределения продуктов (в том числе 9 видов энергоносителей), 17 финансовых балансов отраслей, финансовые балансы государственных учреждений и двух групп домашних хозяйств (в зависимости от уровня доходов), баланс просроченных кредиторской и дебиторской задолженностей. Почти все эти балансы соответствуют требованиям системы национальных счетов. Кроме основных балансовых ограничений МЭНЭК содержит ряд специальных требований, отражающих рыночный характер функционирования экономики, а также группы целевых ограничений, которые гарантируют соблюдение на минимальном уровне интересов всего общества и каждого субъекта экономики в процессе поиска рациональных компромиссных решений. Для каждого расчетного года общее количество ограничений составляет 347 равенств и неравенств, не считая числовых диапазонных ограничений для большинства переменных модели. Кроме статических ограничений МЭНЭК содержит большую группу динамических ограничений, определяющих согласованность решений на соседних временных интервалах.

Искомыми в модели являются следующие группы показателей: интенсивности использования отраслевых производственных мощностей, объемы экспорта и импорта продуктов, объёмы изменения запасов готовых продуктов, индексы цен производителей на товары и услуги, ставки основных налогов и экспортных таможенных пошлин, среднеотраслевые уровни зарплаты, объемы государственных дотаций отраслям из числа социально опекаемых, объемы просроченных задолженностей отраслей и госучреждений, объемы убытков в составе сальдо распределяемой прибыли отраслей, объемы финансовых

остатков и эмиссии акций отраслей, отраслевые нормы дивидендов, объемы государственного и отраслевых займов. Всего 330 переменных.

Сценарный макроэкономический анализ краткосрочной перспективы проводится на основе решений модели, полученных с помощью последовательности взаимосогласованных статистических расчетов. При этом производственные мощности и параметры матриц выпуска и промежуточного потребления отраслей поставлены в зависимость от капиталовложений предыдущих периодов, а для топливно-энергетических отраслей принимаются согласно прогнозным расчетам, сделанным на соответствующих отраслевых моделях [12].

Модель может использоваться в оптимизационном и имитационном режимах. В оптимизационном режиме производится автоматический поиск переменных по разным критериям оптимальности с помощью оригинального метода полилинейного программирования. В рамках имитационного режима часть переменных может фиксироваться, а остальные — вычисляться по дополнительным алгоритмам при заданных возмущениях либо в рамках дополнительных ограничений. В частности, этот режим используется в процессе верификации модели по статистическим данным последнего отчетного года, а также при дезагрегировании внешних макроэкономических решений. Модель МЭНЭК является важным элементом модельно-компьютерного комплекса, разрабатываемого в ИНЭИ РАН для анализа стратегических и оперативных проблем развития энергетики России.

Таким образом, объективное моделирование взаимосвязей энергетики и экономики в современных условиях рынка требует применения модельно-компьютерных комплексов (МКК). При этом, данные МКК не должны быть излишне требовательны к составу статистических данных, так как это усложняет применение моделей на практике. Последнее особенно актуально для моделирования взаимовлияния энергетики и экономики на региональном уровне.

Учитывая российскую специфику сбора статистической информации региональный МКК энергетики и экономики должен состоять из имитационных отраслевых моделей, учитывающих технологические, транспортные, человеческие, рыночные и другие территориальные ограничения, и сводной оптимизационной модели оценки влияния отраслевых сценариев на макроэкономику рассматриваемого региона в целом, которую целесообразно создавать на основе моделей межотраслевого баланса.

При этом входной информацией для МКК энергетики и экономики будут являться данные таблиц, сгруппированные в следующие блоки: «Энергоресурсы», Преобразование энергоресурсов», «Транспорт энергоресурсов и энергоносителей», «Потребность в конечных энергоносителях», «Экспорт и импорт энергоресурсов», «Экология» [13].

В блоке «Энергоресурсы» должны описываться технико-экономические и экологические показатели, а также ограничения на добычу (производство) первичных энергоресурсов по каждому из выделенных регионов.

Блок «Преобразование энергоресурсов» должен содержать технико-экономические и экологические показатели действующих и перспективных технологий и установок энергетических объектов (НПЗ, электростанций, котельных, углеперерабатывающих предприятий и т.д.), энергосберегающих и природоохранных мероприятий.

В блоке «Транспорт энергоресурсов и энергоносителей» должны описываться типы и направления действующих и вновь сооружаемых основных транспортных потоков первичных энергоресурсов (нефть, газ, уголь) и конечных энергоносителей (электроэнергия, централизованное тепло, моторное топливо, мазут, прочие нефтепродукты, уголь), а также задаваться ограничения на их развитие. Необходимо также задать технико-экономические показатели магистральных и распределительных нефте- и газопроводов, межрегиональных и внутрисистемных линий электропередач (ЛЭП), железнодорожного транспорта.

В блоке «Потребность в конечных энергоносителях» для рассматриваемого региона необходимо задать возможные размеры потребления (с разбивкой по крупным потребителям) основных энергоносителей: электро- и теплоэнергии, моторного топлива, прочих нефтепродуктов, котельнопечного топлива с выделением газа, мазута, кузнецкого, канско-ачинского, других каменных и бурых углей. Кроме того, необходимо описать технико-экономические и экологические показатели энергосберегающих мероприятий.

В блоке «Экспорт и импорт энергоресурсов» необходимо задать прогнозные экспортные (франко-граница) и импортные цены и ограничения на экспортируемые и импортируемые энергоносители региона.

В блоке «Экология» следует задать технико-экономические показатели технологий по сокращению выбросов и предельно допустимые выбросы вредных веществ в атмосферу региона.

Выходную информацию регионального МКК энергетики и экономики пользователь должен получать в виде балансовых и других таблиц и графиков в формате Microsoft Excel по выбранному для моделирования региону (рис. 2). В их числе — балансы производства и потребления первичных энергоресурсов, балансы электроэнергии и централизованного тепла, балансы нефти и нефтепродуктов, балансы котельно-печного топлива, межрегиональные поставки топлива и электроэнергии, потребность в инвестициях по секторам энергетики, замыкающие затраты на топливо и электроэнергию, объемы эмиссии вредных веществ и парниковых газов в атмосферу по регионам страны [14].

В качестве основного критерия оптимизации в модели автором рассматривается минимум суммарных дисконтированных затрат на добычу, переработку (преобразование), транспорт, снижение вредных выбросов и энергосбережение энергоносителей) за весь расчетный период с учетом выручки от экспорта энергоносителей.

Описываемый ММК энергетики и экономики будет позволять для рассматриваемого региона оценить:

— балансы первичных энергоресурсов, электроэнергии и централизованного тепла;

— перспективную технологическую и производственную структуру отраслей ТЭК в зависимости от сценариев демонтажа действующего оборудования в отраслях ТЭК;

— масштабы и темпы внедрения новых технологий в отраслях;

— масштабы и сферы влияния крупных топливно-энергетических баз;

— межрегиональные поставки топлива и энергии в зависимости от сценариев развития экономики региона (уровней энергопотребления), масштабов

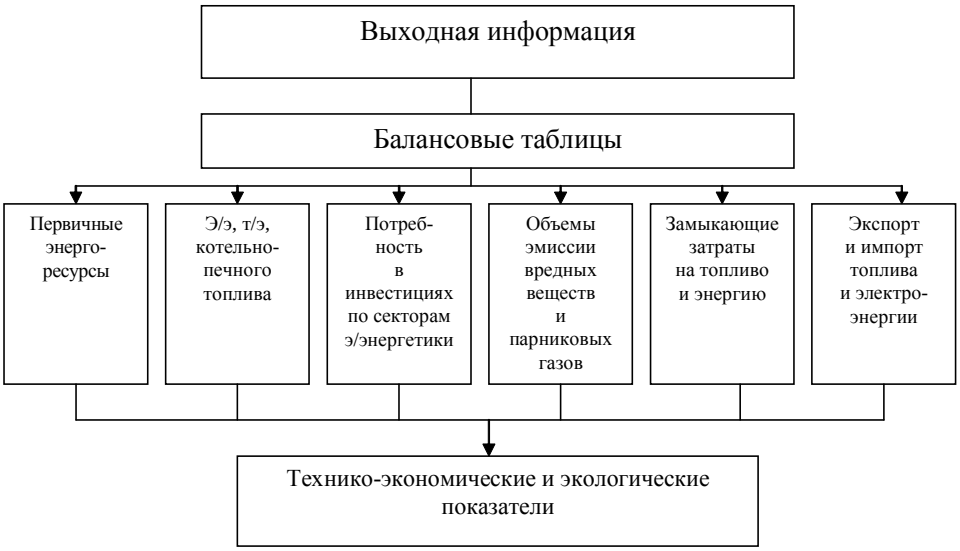


Рис. 2. Структура выходных результирующих таблиц динамической модели ТЭК России

развития местных топливных баз, затрат на добычу, производство и транспорт энергоносителей и т.д.;

— влияние экспорта и импорта топлива и электроэнергии на ТЭК;

— эмиссию парниковых газов и других вредных выбросов и набор мероприятий по их сокращению;

— ориентировочные объемы требуемых инвестиций на развитие энергетики региона.

Последовательность расчетов обусловлена решаемой задачей. Однако во всех случаях расчетам предшествует настройка всех моделей на базовый сценарий развития народного хозяйства региона. Он характеризуется прежде всего темпами экономического роста и уровнем жизни.

Настройка макроэкономической модели осуществляется главным образом путем изменения задаваемой динамики коэффициентов материало- и трудоемкости, норм выбытия производственных мощностей, а также некоторых ограничений.

Таким образом, выявленную тенденцию перехода от комплекса моделей к построению сложных интерактивных модельно-компьютерных комплексов, которые включают обширные базы данных и рассчитаны на использование мощной вычислительной техники и новейших информационных технологий, облегчающих обработку и анализ огромных массивов информации, автор предлагает использовать для исследования взаимосвязей энергетики и экономики на региональном уровне. Основу МКК должны составить имитационные отраслевые модели и сводная модель межотраслевого баланса, что позволит решить задачу определения рациональной региональной ценовой политики и тарифов энергетических компаний на основе оценки и учета негативных социально-экономических последствий от роста стоимости топлива и энергии и угрозы их дефицита при недостаточных ресурсах для инвестиций

Прогресс предполагает повышение эффективности системы и, следовательно, снижение ее диссипации и энтропии. В развивающейся системе увеличение энтропии из-за роста системы с избытком компенсируется снижением энтропии параллельно идущими подпроцессами детерминированного хаоса и упорядочивания. В совокупности энтропия развивающейся системы снижается.

Движущей силой развития является механизм развития, работающий только в определенных условиях. Человек может ускорять или замедлять ход развития, т. е. оказывать влияние на темпы развития во избежание кризиса, для обеспечения эволюционного развития социотехнических систем.

Управление развитием может осуществляться только через изменения среды существования самоорганизующихся систем. Это управление направлено на актуализацию нужного для внешней среды потенциала развития системы и таким образом оказывает влияние на направление развития самой системы.

Это может быть одним из инновационных путей решения проблемы надежности. При отсутствии субъекта надежности остается рассчитывать на использование традиционных, известных способов, на обострение противоречий субъектов электроэнергетики при разработке нормативов и технологических регламентов, на дополнительные затраты, в том числе на соответствующие контролирующие органы и прочее. В конечном итоге это ведет к повышению цены на электрическую мощность и энергию, что противоречит интересам потребителей и будет сдерживать развитие экономики страны. Таким образом, можно утверждать, что надежность ЭЭС, как технико-технологической системы, в рамках которой осуществляются производство и передача электроэнергии, обусловливается не только ненадежностью оборудования и управления, но и организационно-экономической сферой, где должен найти место специализированный субъект надежности.

Переходя к проектированию ЭЭС, имеем в виду проектирование изменений ЭЭС, которые должны обеспечить не только техническую надежность электроснабжения, но и надежность для производителей электроэнергии строить свои экономические отношения и связи в условиях расширяющегося оптового рынка, возможностей заключать прямые двухсторонние договоры. При складывающейся организации электроэнергетики здесь также возникают терминологические осложнения. Открытым остается вопрос — кто тот субъект, который обеспечивает проектирование развития ЭЭС в интересах всех действующих и новых субъектов элекроэнергетики?

В существующей организации развивать ее могут лишь субъекты в рамках своей собственности. ЭЭС, в частности ЕЭС России, не является субъектом и поэтому целенаправленно развиваться не может. Она лишь меняется в зависимости от развития субъектов электроэнергетики. В этом плане ЭЭС уже не является синонимом электроэнергетики. В то же время такая система, состоящая из отдельных самостоятельно развивающихся субъектов, является потенциально самоорганизующейся. В ней имеются синергетические силы, обеспечивающие развитие энергетики в целом и соответствующие изменения ЭЭС. Такими силами являются рыночные силы, формирующие и запускающие в работу различные механизмы и институты. Очевидно, что на этапе реформирования заблуждением была вера в достижение баланса этих сил, а тем более в их консолидацию в интересах развития электроэнергетики. Однако опыт показывает, что отсутствие этих сил, перенос ответственности и обязанностей по развитию электроэнергетики на государство ведет к росту затрат и доминированию аппаратной формы управления, что обуславливает снижение эффективности и темпов развития, росту бюрократизации.

С другой стороны, имеется и внешняя, достаточно жесткая потребность в развитии электроэнергетики. Роль электроэнергии в современной жизни также велика и существенна, как роль Солнца, воздуха, воды и прочих составляющих биосферы. Понимание и законодательное закрепление за электроэнергетикой роли жизнеобеспечивающей системы предопределяет отношение к ней как к самоорганизующейся системе, следовательно, основой ее развития является соответствующий механизм «естественного» развития.

В итоге можно сформулировать тезис. Современная электроэнергетика является потенциально самоорганизующейся, развивающейся системой, а после произошедшего ее реформирования — самоорганизующейся системой без организующего центра, т. е. развивающейся на основе синергетики в поведении ее элементов, другими словами, самоорганизующейся системой по Хакену [2].

Развитие осуществляется за счет освоения потенциала развития. Чем больше он освоен, тем менее интенсивно идет развитие. При его исчерпании возникает кризис. Сам же потенциал развития может наращиваться исключительно за счет внешней среды, в данном случае для электроэнергетики — за счет освоения научно-технических достижений в области организации и управления электроэнергетикой (организованность), в области производства и передачи электроэнергии (инновационность), ростом энерговооруженности экономики и жизнедеятельности. Если система полезна обществу, то общество в лице государства наращивает потенциал развития системы, т. е. осуществляет управление развитием, что в конечном итоге оборачивается ее инвестиционной привлекательностью. Для этого государство берет на себя функции гаранта по отношению к инвесторам.

Метод решения. Электроэнергетика как отрасль народного хозяйства характеризуется большой инерционностью развития. Строительство основных электроэнергетических объектов продолжается в среднем 10 – 15 лет, и поэтому крупные структурные сдвиги в электроэнергетике — создание новых электрических станции (ЭС), мощных линий электропередач (ЛЭП), потребителей электрической энергии (ПЭЭ) — необходимо планировать за 12 – 17 лет. Динамика производства и потребления электрической энергии определяется объективными тенденциями развития как энергопроизводящего комплекса, так и отраслей народного хозяйства [15]. Под объективными тенденциями развития понимается, например, создание тепловых ЭС вблизи залежей угля, атомных ЭС в местности, не имеющей энергетического сырья, пропорциональность развития электроэнергетики и отраслей народного хозяйства, создание ПЭЭ в густонаселенных центрах и т.д.

На объективные тенденции развития оказывает влияние множество неопределенных и случайных факторов. Неопределенные факторы отражают неполноту информации в данное время о развитии в будущем потребностей в электрической энергии по отраслям народного хозяйства. Случайные —характеризуют, например, случайные колебания количества и качества электрической энергии.

При долгосрочном планировании производства, распределения и потребления электрической энергии приходится учитывать воздействие неопределенных факторов, а случайные факторы не столь существенны. Образно говоря, долгосрочное планирование играет роль «советника», рекомендующего проводить определенную политику в формировании электроэнергетического баланса будущего.

Электроэнергетика представляет собой некоторую сложную энергетическую систему с фиксированным пространственным распределением ЭС, ПЭЭ и соединяющими их ЛЭП. Для того чтобы описать состояние такой системы по планируемому производству, распределению и потреблению электрической энергии, необходимо указать для каждой группы ЭС свою группу ПЭЭ. Иными словами, следует указать величину прогнозируемой мощности Wij, передаваемой из i-й зоны ее производства в j-ю зону потребления, $i = \overline{1,k}$; $j = \overline{1,m}$. Распределением мощности в системе будем называть матрицу $S=[W_{ij}]$, $i = \overline{1,k}$; $j = \overline{1,m}$. Распределение $S=[W_{ij}]$ характеризует макросостояние энергетической системы.

Энтропийный подход позволяет предсказать определенное макросостояние энергетической системы с нужной точностью, не изучая поведение каждой отдельной ЭС и каждого отдельного ПЭЭ, т. е. микросостояния энергетической системы. Энтропия связывает между собой микро- и макросостояния энергетической системы, при этом наиболее вероятным макросостоянием является то, к которому приводит наибольшее число микросостояний. Следовательно, в основе энтропийного подхода в определении макросостояния энергетической системы лежит принцип максимизации энтропии.

В статье рассматривается задача долгосрочного планирования наиболее вероятного распределения потоков энергии в энергетической системе, что позволит дать рекомендации при решении сложных технико-экономических проблем. Коротко поясним суть этих проблем. Динамика развития народного хозяйства приводит к быстрому увеличению ПЭЭ. Следовательно, необходимо создавать новые или реконструировать действующие ЭС. Какое число и какой мощности создавать ЭС, сколько, какой мощности и какого напряжения возводить ЛЭП, в каком районе страны создавать новую зону производства электрической энергии, и т. д. — вот те проблемы, которые возникают в долгосрочном планировании. При этом подготовка структурных сдвигов должна проводиться с учетом полученного прогноза наиболее вероятного распределения потоков энергии в системе.

Таким образом, содержательная постановка задачи включает создание энтропийной модели долгосрочного планирования производства, распределения и потребления мощности в электрической системе, которая бы корректно в зависимости от горизонта рассматриваемой перспективы описывала динамику потребления электрической энергии для всей системы в целом с учетом влияния неопределенных факторов и таких тенденций развития электроэнергетики, как инерционность, пропорциональность и т.д.

Предполагается, что известны статистические нормированные характеристики выборки потоков мощности W_{ij}, между i-й и j-й зонами для каждого года в предшествующий долгосрочному планированию период.

Для отыскания планируемого наиболее вероятного распределения потоков мощности в системе введем в рассмотрение, помимо W_{ij}; следующие переменные: A_i — величина мощности, планируемая к производству во всей i-й зоне; B_j —величина мощности, планируемая к потреблению во всей j-й зоне; r_{ij} — планируемые затраты на передачу единичной мощности в зависимости от расстояния из i-й зоны в j-ю зону; R — планируемые полные затраты на передачу мощности во всей энергетической системе. Тогда ограничения на W_{ij}, имеют вид

$$\sum_{j=1}^{m} W_{ij} = A_i,\ i = \overline{1,k}; \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{k} W_{ij} = B_j,\ j = \overline{1,m}; \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} r_{ij}\, W_{ij} = R. \qquad (3)$$

Пока не получено наиболее вероятного распределения потоков мощности в энергетической системе, будем полагать, что технологические расходы на передачу электрической энергии, зависящие от величины передаваемой мощности, учитываются по каждой зоне потребления и входят составной частью в величины B_j, $j = \overline{1,m}$. Поэтому естественно, что

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} W_{ij} = \sum_{i=1}^{k} A_i = \sum_{j=1}^{m} B_j = W,$$

где W — величина суммарной мощности, потребляемой во всей энергетической системе.

Теперь необходимо найти матрицу $S = [W_{ij}]$, с которой связано наибольшее число микросостояний энергетической системы при ограничениях (1) – (3).

В такой постановке методика получения матрицы S аналогична методике определения максимальной энтропии газовой системы, используемой в статистической механике

Определим

$$P_{ij} = \frac{W_{ij}}{W}, \qquad (4)$$

где P_{ij} — доля от W, распределенная между i-й зоной производства и j-й зоной потребления. Тогда энтропия энергетической системы представляет собой функционал

$$H(p_{11}, p_{12}, p_{ij}, \ldots, p_{km}) = -\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} P_{ij}\, \ln P_{ij}. \qquad (5)$$

Доказательство положения, что выражение (5) есть единственная однозначная мера энтропии, приведено в [4].

Для получения набора, P_{ij}, $i = \overline{1,k}$; $j = \overline{1,m}$, максимизирующего $H(p_{11}, p_{12,\ldots}\, p_{ij}, \ldots\, p_{km})$ при ограничениях (1) – (3), необходимо максимизировать лагранжиан L [3].

$$L = H(p_{11}, p_{12}..p_{ij}...p_{km} + \sum_{i=1}^{k}\alpha_i\left(a_i - \sum_{j=1}^{m} P_{ij}\right) +$$

$$+ \sum_{j=1}^{m}\beta_i\left(b_j - \sum_{i=1}^{k} P_{ij}\right) + \gamma\left(c - \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} r_{ij}P_{ij}\right), \qquad (6)$$

где $\alpha_i, \beta_j, \gamma$ — множители Лагранжа

$$a_i = \frac{A_i}{W};\ b_j = \frac{B_j}{W};\ c = \frac{C}{W}.$$

Значения P_{ij}, которые максимизируют лагранжиан L и, следовательно, являются наиболее вероятным распределением мощности в энергетической системе, представляют собой решение системы уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial P_{ij}} = 0,\ i = \overline{1,k};\ j = \overline{1,m}. \qquad (7)$$

С учетом (6) получим

$$-\ln P_{ij} - 1 - \alpha_i - \beta_j - \gamma r_{ij} = 0.$$

Откуда

$$P_{ij} = \exp(-(1 + \alpha_i + \beta_j + \gamma r_{ij})). \qquad (8)$$

Теперь определим множители $\alpha_i, \beta_j, \gamma$. Для этого подставим (8) в (1) и (2). Получим, что

$$\mathrm{Exp}(-\alpha_i) = \frac{a_i}{Q_i};\ \exp(-\beta_j) = \frac{b_j}{D_J};\quad i = \overline{1,k};\ j = \overline{1,m}, \qquad (9)$$

где

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m} \exp[-(\beta_j + \gamma r_{ij} + 1)];$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{k} \exp[-(\alpha_i + \gamma r_{ij} + 1)].$$

В более простой форме записи выражения Q_i и D_j имеют вид

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{b_j}{D_j} \exp[-(\gamma r_{ij} + 1)]; \qquad (10)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{k} \frac{a_i}{Q_i} \exp[-(\gamma r_{ij} + 1)]. \qquad (10')$$

Тогда

$$P_{ij} = \frac{a_i b_j}{Q_i D_j} \exp[-(\gamma r_{ij} + 1)]. \qquad (11)$$

Коэффициенты Q_i, и D_j определяются из выражений (10), (10') путем совместного их решения методом итераций.

Множитель γ находится из очевидного соотношения

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m} P_{ij} = 1. \qquad (12)$$

Множитель γ можно было бы определить, подставляя P_{ij} в (3). Однако величина R обычно неизвестна и поэтому (3) не решается относительно γ.

А теперь, определив P_{ij} и, зная значения r_{ij}, появляется возможность найти величину R, при этом найденные P_{ij} минимизируют планируемые полные затраты R.

Теперь, когда получено распределение потоков мощности по энергетической системе, появляется возможность в явном виде определить технологические расходы на передачу электроэнергии (потери мощности) из каждой i-й зоны производства в каждую j-ю зону потребления.

Полученное наиболее вероятное распределение потоков мощности соответствует основной тенденции долгосрочного планирования, на которую накладываются флуктуации, обусловленные неравномерностью, сезонной и кратковременной цикличностью электропотребления и т. д. Как следует из [9], флуктуации потоков мощности можно считать гауссовским стационарным процессом, полагая его числовые характеристики равными статистическим нормированным характеристикам выборок по току и мощности.

Предлагаемая методика отыскания P_{ij} в своих существенных положениях опирается на прогнозирование значений A_i, B_j, r_{ij} в долгосрочном планировании. Ограниченные рамки статьи не позволяют изложить аналогичные рассмотренной энтропийные модели прогнозирования A_i, B_j, r_{ij}. Возможность использования для этих целей энтропийных моделей не вызывает сомнений. Например, долгосрочное планирование A_i включает рациональное и экономное использование природных энергетических ресурсов, при этом приходится учитывать конечный энергетический запас i-й зоны и невозможность освоения энергетического запаса за короткое время. Отсюда следует, что существует наиболее вероятная планируемая величина A_i на любой промежуток времени.

Путем сопоставления полученного значения $W_{ij} = P_{ij}W$ с тем значением W_{ij}, что имеется в настоящее время, определяется дополнительный поток мощности из i-и зоны в j-ю зону и, следовательно, число и мощность необходимых ЛЭП, величины напряжений ЛЭП, потери электрической энергии и т.д.

Найденные значения W_{ij}, A_i, B_j по каждой зоне производства и потребления электроэнергии, отмечая основные тенденции развития электроэнергетики и способствуя решению актуальной научной проблемы улучшения электроэнергетического баланса, в то же время указывают на возможные структурные изменения электрических сетей и генерирующих мощностей. Такие структурные изменения необходимо проводить на основе оптимизационных моделей с целевой функцией в виде минимальных экономических затрат.

В заключение рассмотрим поясняющий пример, касающийся решения основной задачи — отыскания распределения потоков мощности. Долгосрочное планирование предусматривает создание электроэнергетической системы с двумя зонами производства и тремя зонами потребления электрической энергии [16].

На рис. 3 в масштабе указано расположение зон производства (заштрихованные кружки) и зон потребления. Долгосрочный прогноз показал, что:

а) производство мощности в зонах производства составляет в 1-й зоне $a_1 = 0{,}4$, во 2-й — $a_2 = 0{,}6$;

б) потребление мощности в зонах потребления составляет в 1-й зоне $b_1 = 0{,}3$, во 2-й — $b_2 = 0{,}5$, в 3-й — $b_3 = 0{,}2$.

Прогноз затрат на передачу единичной мощности с учетом расстояний $r_{11} = 0{,}1$; $r_{12} = 0{,}2$; $r_{13} = 0{,}15$; $r_{21} = 0{,}2$; $r_{22} = 0{,}l$; $r_{23} = 0{,}15$ (исходные величины даны

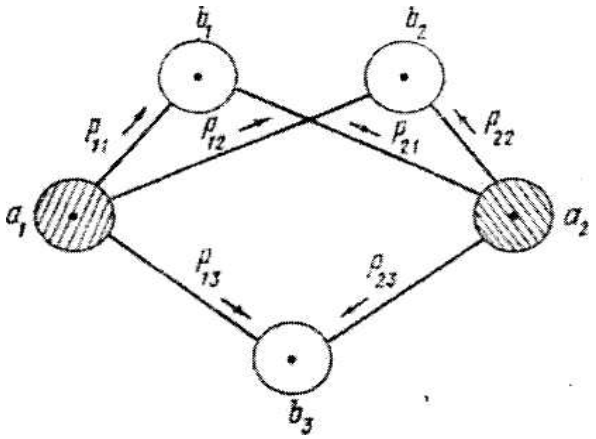


Рис. 3. ЭЭС с двумя зонами производства и тремя зонами потребления электроэнергии

в относительных единицах) показал, что наиболее вероятное распределение потоков мощности между зонами производства и потребления, определяемое по (11), получается равным $P_{11} = 0{,}24$; $P_{12} = 0{,}05$; $P_{13} = 0{,}11$; $P_{21} = 0{,}06$; $P_{22} = 0{,}45$; $P_{23} = 0{,}09$.

Библиографический список

1. Мелентьев, Л. А. Системные исследования в энергетике / Л. А. Мелентьев. — М. : Наука, 1979. — 415 с.

2. Карпов, М. В. Подходы к моделированию взаимосвязей экономики и энергетики / М. В. Карпов // Развитие социальной, экономической и промышленной сфер регионов России : сб. науч. тр. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — С. 85—98

3. Кушнир, Ю. Е. Статистическая оценка потребностей в основных энергетических ресурсах / Ю. Е. Кушнир // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1981. — № 5. — С. 96—101.

4. Вильсон, А. Энтропийные методы моделирования сложных систем / А. Вильсон. — М. : Наука, 1978. — 245 с.

5. Almon, C. The 1NFOPUM Approach to Interindustry Modeling / C. Almon // Economic Systems Research. — 1991. — № 3.

6. West, G. Comparison of Input-Output, Input-Output + Econometric and Computable General Equilibrium Impact Models at the Regional Level / G. West // Economic Systems Research. — 1995. — N 2.

7. Серебряков, Г. Р. Опыт построения динамической межотраслевой равновесной модели российской экономики / Г. Р. Серебряков // Экономика и математические методы. — 2000. — № 2. — С. 45—52.

8. Методические положения оптимизации развития топливно-энергетического комплекса. — М. : Наука, 1975. — 460 с.

9. Мелентьев, Л. А. Системные исследования в энергетике / Л. А. Мелентьев. — 2-е изд., доп. — М. : Наука, 1983. — 458 с.

10. Методические положения долгосрочного прогнозирования топливно-энергетического комплекса. — Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1977. — 128 с.

11. Иерархия моделей для управления развитием энергетики и методы согласования их решений / А. А. Макаров [и др.]. — Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1984. — 184 с.

12. Кулешов, В. В. Многоотраслевые комплексы: современные тенденции моделирования / В. В. Кулешов, А. А. Чернышов // Экономика и математические методы. — 1987. — № 6. — С. 33—39.

13. Народнохозяйственная межрегиональная модель в исследовании взаимосвязей энергетики / А. А. Чернышов [и др.]. — Новосибирск : ИОиОПП, 1988. — 390 с.

14. Малахов, В. А. Методика оценки взаимовлияния топливно-энергетического комплекса в экономики / В. А. Мала-

хов // Проблемы и методы исследования роли ТЭК / под ред. Д. В. Шапота. — М. : ИНЭИ РАН, 2001. — 320 с.

15. Инструментальные средства для количественного измерения взоаимосвязей энергетики и экономики / А. А. Макаров [и др.] // Экономика и математические методы. — 2002. — № 1. — С. 25—33.

16. Фёдоров, В. К. Энтропийная модель долгосрочного развития элетроэнергетических систем, призванная обеспечить согласование технической и экономической политики в сфере электроэнергетики / В. К. Фёдоров, И. В. Фёдоров // Энергетика и энергосбережение : межвуз. сб. науч. тр. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — С. 274—286.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий секцией «Промышленная электроника» кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ФЁДОРОВ Игорь Владимирович, старший преподаватель кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» ОмГТУ.

ПОЛЫНЦЕВ Леонид Геннадьевич, соискатель по кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, начальник отдела ООО «Сандимакс».

Адрес для переписки: omsk2010@bk.ru

Статья поступила в редакцию 27.02.2013 г.

© А. В. Бубнов, И. В. Фёдоров, Л. Г. Полынцев

УДК 621.316.1

С. Ю. ДОЛИНГЕР
А. Г. ЛЮТАРЕВИЧ
В. Н. ГОРЮНОВ
Д. Г. САФОНОВ
В. Т. ЧЕРЕМИСИН

Омский государственный технический университет

Омский государственный университет путей сообщения

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Данная статья посвящена оценке дополнительных потерь мощности в основных элементах систем электроснабжения от снижения качества электрической энергии. В статье делается анализ существующих методов определения потерь мощности от снижения качества электрической энергии. В заключение приводится алгоритм работы программы, позволяющей оценить величину потерь от снижения качества электрической энергии, и ее возможности.

Ключевые слова: потери мощности, снижение качества электроэнергии, программа для расчета потерь.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения 14.B37.21.0332 от 27 июля 2012 г.

В современных условиях одним из показателей развития электроэнергетики является качество электрической энергии, которое обуславливает нормальное функционирование электрооборудования, приборов и аппаратов [1]. К тому же в последнее время появляется все больше электроприемников и потребителей, которые предъявляют повышенные требования к качеству электрической энергии [2—4].

Снижение качества электроэнергии приводит к различным отрицательным последствиям [5]. Среди которых следует выделить:

— снижение эффективности процессов производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии вследствие дополнительных потерь;

— создание дополнительных потерь электроэнергии в основных элементах систем электроснабжения;

— ускоренное старение изоляции электрооборудования;

— ложная работа устройств релейной защиты и автоматики;

— функциональные нарушения, связанные с отказами, сокращением срока службы, выходом из строя оборудования, браком продукции и авариями;

— увеличение погрешности электроизмерительных приборов;

— повреждения средств защиты и безопасности обслуживающего персонала.

Далее рассмотрим основные элементы системы электроснабжения с точки зрения их чувствительности к качеству электрической энергии.

Влияние качества электрической энергии на вращающиеся машины, трансформаторы и линии электропередачи. Наиболее значимым эффектом, обусловленным низким качеством электроэнергии, в электрических машинах и трансформаторах являются дополнительные потери в их обмотках, которые приводят к повышению общей температуры, а также к местным перегревам, что, в свою очередь, сокращается срок службы изоляции и может привести к поражению обслуживающего персонала электрическим током [6 – 9].

Дополнительные потери электроэнергии в линиях электропередачи также приводят к дополнительному нагреву. В случае кабельных линий эти потери и, как следствие, дополнительный нагрев, воздействуют на диэлектрик. Что, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабельной линии. В воздушных линиях по той же причине возможно увеличение потерь на корону [6].

Кроме потерь вследствие нагрева, высшие гармонические составляющие тока и напряжения в электрических двигателях создают вращающие моменты, направленные противоположно основному моменту, но т.к. значение скольжения для токов всех гармоник практически одинаково, относительные вращающие моменты весьма малы, к тому же они частично компенсируются вследствие различного направления. Поэтому влияние их на основной момент мало. Вместе с тем они могут привести к значительной вибрации вала электрической машины.

Влияние качества электроэнергии на ее учёт. Класс точности счётчиков электроэнергии, гарантируемый предприятием-изготовителем, определяется при номинальных условиях: синусоидальном токе и напряжении, а также других параметрах. Но на практике счётчики эксплуатируются в условиях, отличных от номинальных, поэтому наряду основной, появляется дополнительная погрешность, в том числе и от факторов, обусловленным низким качеством электрической энергии. Исследования, представленные в работах [6, 7, 9], показывают, что индукционные счетчики под влиянием высших гармоник имеют погрешность со смещением в минус, то есть недоучитывают электроэнергию в пользу потребителей. Исследованию погрешности электронных счётчиков посвящены работы [10]. В данных работах показано, что суммарная предельная погрешность электронных счётчиков от низкого качества электроэнергии может достигать трех- или четырехкратного увеличения, по сравнению с основной погрешностью счётчика.

Влияние низкого качества электроэнергии на устройства релейной защиты, автоматики и телемеханики. Ложное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей происходит из-за дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств вследствие низкого качества электроэнергии в узлах нагрузок, обусловленного несинусоидальностью кривой тока. Исследования, проведённые испытательной лабораторией по качеству электроэнергии кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, показывают, что на практике низкое качество электроэнергии является одним из наиболее значимых факторов, приводящих к ложным срабатываниям автоматических выключателей, выбранных в соответствии с требованиями ПУЭ [5]. Кроме того, если не снижать уровень гармоник, то вероятность ложной работы релейной защиты значительно увеличивается [3, 5].

Низкое качество электрической энергии в системах электроснабжения может также являться причиной возникновения помех в сетях телекоммуникаций [3, 5, 7].

Из вышесказанного вытекает необходимость обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях электроэнергетических систем.

Рассмотрим методы оценки дополнительных потерь в элементах ЭЭС от несимметрии и несинусоидальности тока и напряжения в различных элементах систем электроснабжения.

Линии электропередачи (ЛЭП), так же как и силовые трансформаторы, являются составным элементом электрических сетей.

Потери активной мощности в ЛЭП при протекании по ней несимметричных токов [10]

$$\Delta P_{несимм} = 3I_1^2 r + 3I_2^2 r\,, \qquad \textbf{(1)}$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов прямой и обратной последовательностей.

Дополнительные потери активной мощности в ЛЭП, вызванные протеканием токов высших гармоник [10]

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = 3\sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 R_1 k_{r\nu}\,, \qquad \textbf{(2)}$$

где ν — номер гармоники;
n — число учитывающих гармоник;
I_ν — ток ν-ой гармоники;
R_1 — активное сопротивление линии на основной частоте;
$k_{r\nu}$ — коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта, как правило, его принимают равным $k_{r\nu} = 0{,}47\sqrt{\nu}$.

Ряд авторов в своих работах уделили значительное внимание уточнению параметров линий электропередачи в расчетных схемах замещения на частотах высших гармоник. Следует отметить работу [12], где опытным путем исследуется влияние высших гармоник на активное и реактивное сопротивления проводов марок АС и АСО, а также кабелей 6 – 25 кВ различного сечения. В соответствии с этим исследованием удельное активное сопротивление проводника на частоте ν-ой гармоники равно [11]

$$r_{0\nu} = r_0\left(k_{П\nu} + k_{б\nu}\right), \qquad \textbf{(3)}$$

где r_0 — удельное сопротивление проводника постоянному току (с учетом температуры);
$k_{П\nu}$ — коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта для ν-ой гармоники, и равный $k_{П\nu} = 0{,}021\sqrt{f}$ — для меди и $k_{П\nu} = 0{,}01635\sqrt{f}$ — для алюминия [12].

Коэффициент $k_{б\nu}$ учитывает эффект близости для ν-ой гармоники и определяется [11]

$$k_{б\nu} = \frac{1{,}18 + k_{П\nu}}{k_{П\nu} + 0{,}27}\left(\frac{d}{a}\right)^2, \qquad \textbf{(4)}$$

где d — диаметр жилы проводника, мм;
a — расстояние между центрами жил, мм.

Что касается эффекта близости, то его обязательно нужно учитывать для кабельных линий. Для воздушных линий, если a>50 мм, эффект близости пред-

лагается не учитывать [12] и выражение для расчета потерь от высших гармоник в ЛЭП примет вид

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = 3r_0 l \sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 \left(k_{\Pi\nu} + k_{б\nu}\right). \qquad (5)$$

Дополнительные потери в электрических машинах разделяются на основные и дополнительные [12]. Основные потери обусловлены основными электромагнитными и механическими процессами, происходящими в машине. К этим потерям относятся потери в меди обмоток и в активной стали от основного потока мощности, а также механические потери.

Рассмотрим вначале режим несимметрии питающего напряжения синхронных машин. При этом пренебрегаем потерями в статоре от несимметрии напряжения, так как они незначительны по сравнению с потерями в роторной обмотке. Дополнительные потери активной мощности в роторе синхронной машины, обусловленные протеканием тока обратной последовательности, согласно [11], вычисляются по формуле

$$\Delta P_{несимм} = \frac{2\left(r_2 - r_{ст}\right)}{z_{2см}^2 \cos\varphi} \varepsilon_u^2, \qquad (6)$$

где ε_u^2 — коэффициент несимметрии напряжения, равный отношению напряжения обратной последовательности к номинальному;
r_2 и $r_{ст}$ — соответственно активное сопротивление обратной последовательности и активное сопротивление якоря синхронно машины;
$z_{2см}$ — модуль сопротивления обратной последовательности в относительных единицах.

Метод определения дополнительных потерь от высших гармоник $\Delta P_{\Sigma\nu}$ по кривым, на которых представлены отношения потерь $\Delta P_{\Delta\nu}$ при напряжении, равном 1 % напряжения основной частоты, к суммарным номинальным потерям $\Delta P_{ном}$, достаточно прост в использовании [7]. Потери на частотах гармоник выше 13-й весьма малы, и ими можно пренебречь. Это справедливо для тех систем, в которых амплитуда напряжения высших гармоник уменьшается при увеличении порядка высших гармоник. Однако при наличии в системе мощных источников тока высших гармоник или резонансных условий на гармониках более высокого порядка (вплоть до 40-й) могут наблюдаться очень большие значения гармоник напряжения с порядком выше 13-го [13].

Другой метод, предложенный в [12], позволяет оценить дополнительные потери в синхронных двигателях от высших гармоник $\Delta P_{\Sigma\nu}$

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = \sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{м(\nu)} + \sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{ст(\nu)} + \sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{т(\nu)}, \qquad (7)$$

где $\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{м(\nu)}$ — дополнительные потери в меди;

$\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{ст(\nu)}$ — дополнительные потери в стали;

$\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{т(\nu)}$ — мощность, идущая на преодоление тормозного момента.

Дополнительные потери в меди определяются как [12]

$$\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{м(\nu)} = I_П^2 \Delta P_к \sum \left(\frac{U_\nu}{U_{ном}}\right)^2 \frac{\sqrt{\nu} + k'\sqrt{\nu \pm 1}}{\nu^2}, \qquad (8)$$

где $I_П$ — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты;
$\Delta P_н$ — потери короткого замыкания;
U_ν — действующие значение ν-й гармоники;

$k' = \frac{R'_{2э}}{R_1}$ — отношение эквивалентного сопротивления ротора к сопротивлению статора.

Знак «+» в подкоренном выражении соответствует симметричным составляющим гармоник, вращающимся против вращения поля основной гармоники, знак «−» — симметричным составляющим гармоник, создающих поля, вращение которых совпадает с вращением поля основной гармоники.

Дополнительные потери в стали определяются [12]

$$\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{ст(\nu)} = \Delta P_{ст.ном} \sum \left(\frac{U_\nu}{U_{ном}}\right)^2 \frac{1}{\nu^{0,7}}, \qquad (9)$$

где $\Delta P_{ст.ном}$ — номинальные потери в стали двигателя при номинальном напряжении.

Мощность для преодоления тормозного момента [12]:

$$\sum_{\nu=2}^{n} \Delta P_{т(\nu)} = \Delta P_{ном} \sum \left(\frac{U_\nu}{U_{ном}}\right)^2 \frac{M_П}{M_{ном}} \frac{1}{\nu^2\sqrt{\nu \pm 1}}, \qquad (10)$$

где $M_П$ и $M_{ном}$ — пусковой и номинальный моменты синхронного двигателя.

Дополнительные потери для асинхронных двигателей, обусловленные несинусоидальностью и несимметрией питающего напряжения определяются из выражения [11, 14]:

$$\Delta P = \Delta P_{м1,ном} I_П^2 \left(2{,}41\varepsilon_u^2 + \sum_{\nu=2}^{n} \left(\frac{U_\nu}{U_{ном}}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{\nu} + \sqrt{\nu \pm 1}}{\nu^2}\right)\right), \qquad (11)$$

где $\Delta P_{м1,ном}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; знак «+» под знаком корня соответствует симметричным составляющим гармоник, создающим поля вращения, встречные полю основной гармоники, а знак «−» — попутные.

Применение этой формулы для расчета результирующих дополнительных потерь активной мощности в системах электроснабжения с большим количеством АД затруднено [11]. В связи с этим целесообразно получить более простое выражение для таких расчетов. Коэффициент $k_{АД}$, учитывающий параметры АД определяется по выражению [11]

$$k_{АД} = \frac{\Delta P_{м1,ном} I_П^2}{P_{ном}}, \qquad (12)$$

где $P_{ном}$ — номинальная активная мощность двигателя.

Известно [11], что потери в меди и ток в статоре АД находятся по выражениям

$$\Delta P_{м1,ном} = m_1 I_1^2 R_1, \qquad (13)$$

$$I_1 = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}\eta \cos\varphi U_{ном}}, \qquad (14)$$

где m_1— число фаз; R_1 — активное сопротивление статорной обмотки, на основной частоте Ом; η — КПД двигателя; *cos*φ — номинальный коэффициент мощности.

С учетом (13) и (14) выражение (12) примет вид

$$k_{АД} = \frac{r_1 I_п^2}{\eta \cos\varphi}, \qquad (15)$$

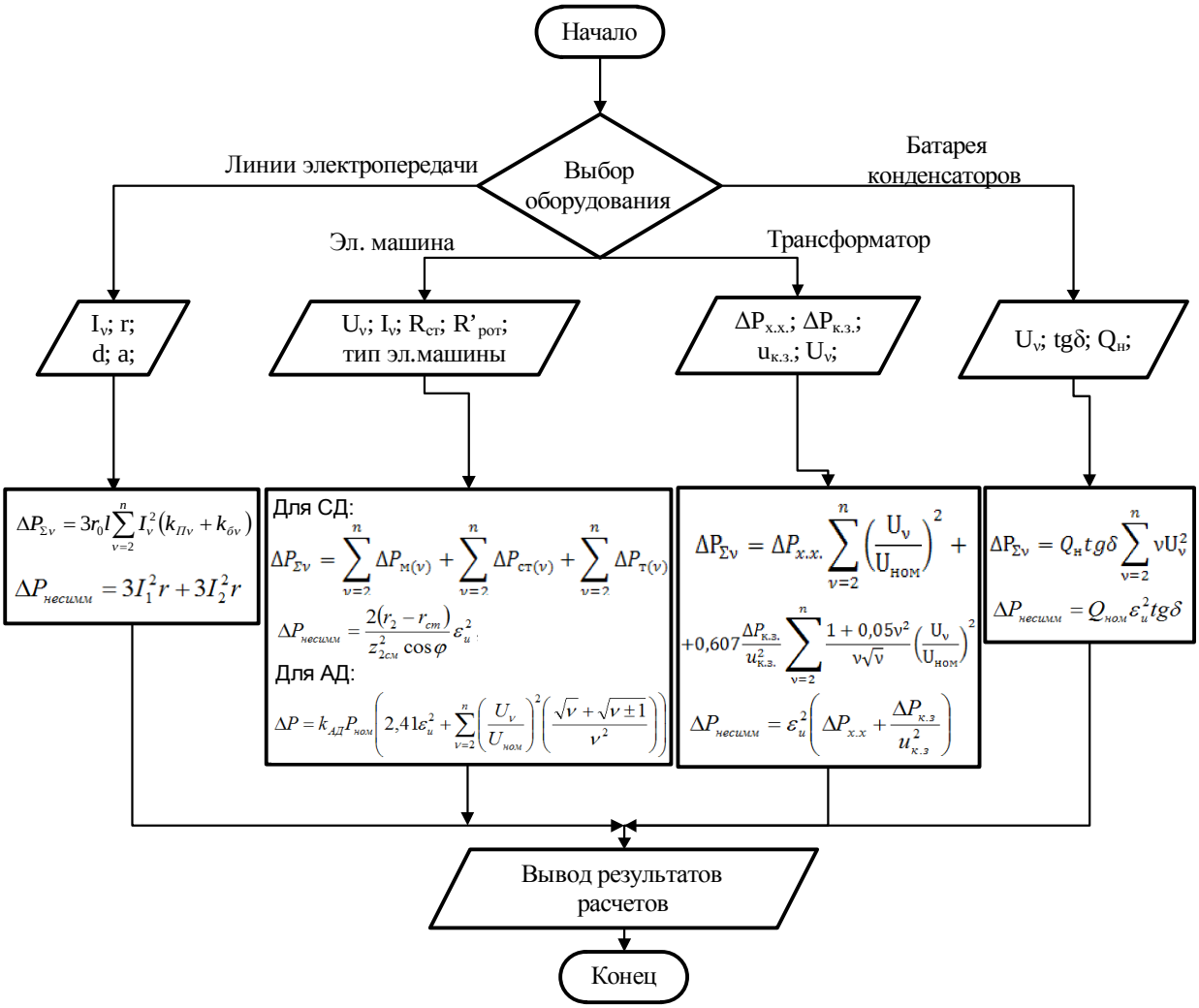


Рис. 1. Алгоритм определения дополнительных потерь мощности в основных элементах системы электроснабжения

где r_1 — активное сопротивление статора, на основной частоте, о.е.

Используя (11) и (15), получаем выражение для расчета дополнительных потерь от несимметрии и несинусоидальности в асинхронных двигателях

$$\Delta P = k_{АД} P_{ном} \left(2{,}41\varepsilon_u^2 + \sum_{\nu=2}^{n} \left(\frac{U_\nu}{U_{ном}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{\nu} + \sqrt{\nu \pm 1}}{\nu^2} \right) \right). \quad \textbf{(16)}$$

Силовые трансформаторы. Дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах в несимметричном режиме можно определить по следующей формуле [11]:

$$\Delta P_{несимм} = \varepsilon_u^2 \left(\Delta P_{х.х} + \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \right). \quad \textbf{(17)}$$

Потери активной мощности от токов высших гармоник в трансформаторах выражаются простейшей формулой [7]

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = 3 \sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 R_{к1} k_{\nu m}, \quad \textbf{(18)}$$

где I_ν — ток ν-й гармоники, гармоники, проходящей через трансформатор;

$R_{к1}$ — сопротивление короткого замыкания трансформатора на основной частоте;

$k_{\nu m}$ — коэффициент учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Для силовых трансформаторов можно принять $k_{5m} = 2{,}1$; $k_{7m} = 2{,}5$; $k_{11m} = 3{,}2$; $k_{13m} = 3{,}7$ [15].

Потери на частотах гармоник выше 13-й весьма малы, и ими можно пренебречь [7]. Но не всегда амплитуда напряжения высших гармоник уменьшается при увеличении порядка высших гармоник, в системах с мощными источниками тока высших гармоник или с резонансными условиями на гармониках более высокого порядка (вплоть до 40-й) могут наблюдаться очень большие значения гармоник напряжения с порядком выше 13-го [13]. Ввиду наличия недостатков методики [7], обусловленных применением коэффициентов $k_{\nu m}$, не позволяющих учесть весь ряд гармоник, для расчета дополнительных потерь от высших гармоник в силовых трансформаторах воспользуемся другой методикой, предложенной в [11].

Дополнительные потери в трансформаторах от протекания токов высших гармоник можно выразить в виде суммы потерь х.х. и к.з. [11]. Принимаем, что сопротивление цепи взаимной индукции схемы замещения трансформатора для токов высших гармоник постоянно, и равно значению на основной гармонике [15]. Тогда дополнительные потери х.х., обусловленные высшими гармониками, можно определить по выражению:

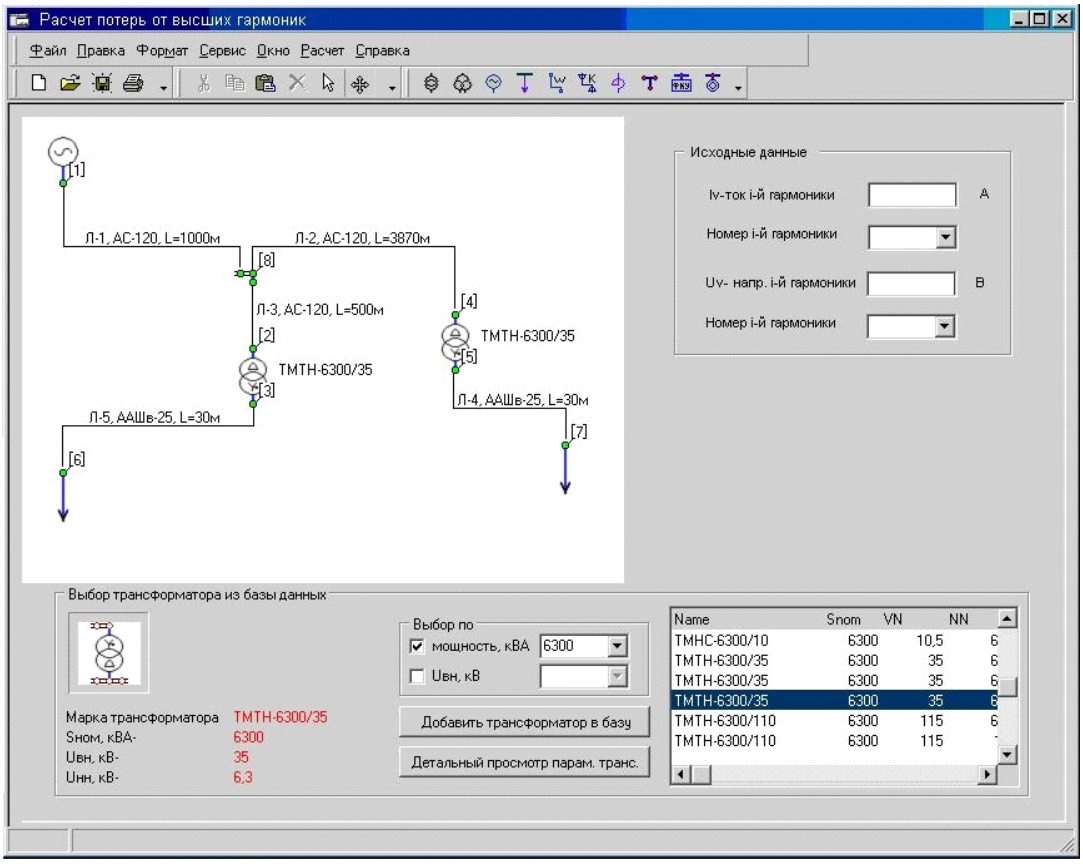


Рис. 2. Интерфейс программы по расчету потерь мощности

$$\Delta P_{x.xv} = \Delta P_{x.x} \sum_{v=2}^{n} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 . \qquad (19)$$

Учитывая, что активное сопротивление к.з. на ν-ой гармонике может быть представлено $r_{к.зv} \approx \approx 0{,}47\sqrt{v} r_{к.з}$, а отношение $z_{к.зv}/z_{к.з} \approx x_{к.зv}/x_{к.з} \approx 0{,}88v$ [14], дополнительные потери к.з., вызванные несинусоидальностью напряжения, представляются в виде [14]

$$\Delta P_{к.зv} = 0{,}607 \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \sum_{v=2}^{n} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{1}{v\sqrt{v}} . \qquad (20)$$

Кроме основных потерь, в трансформаторах имеют место добавочные потери, обусловленные вихревыми токами. Величина этих потерь в обмотках трансформатора возрастают пропорционально квадрату номера гармоники [15]

$$\Delta P_{добv} = v^2 0{,}05 \Delta P_{к.зv} . \qquad (21)$$

Таким образом, суммарные дополнительные потери, обусловленные несинусоидальным режимом работы трансформатора, определяются в виде

$$\Delta P_{\Sigma v} = \Delta P_{x.x} \sum_{v=2}^{n} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 +$$

$$+ 0{,}607 \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \sum_{v=2}^{n} \frac{1 + 0{,}05v^2}{v\sqrt{v}} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 . \qquad (22)$$

Батареи конденсаторов и фильтрокомпенсирующие устройства. Увеличение потерь в конденсаторах, обусловленное искажением питающих напряжений, составляет незначительную долю в суммарных потерях, возникающих в электрических сетях и у потребителей.

Дополнительные потери в конденсаторной установке от несимметрии напряжений в приближенном виде по формуле [16]

$$\Delta P_{несимм} = Q_{ном} \varepsilon_u^2 tg\delta , \qquad (23)$$

где $Q_{ном}$ — мощность конденсаторной установки;
$tg\delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика.

При несинусоидальном напряжении на зажимах батареи конденсаторов в диэлектрике появляются активные потери, обусловленные высшими гармониками, которые находят по формуле [16]

$$\Delta P_{\Sigma диэл} = \omega \sum_{v=2}^{n} U_v^2 v \, tg\delta_v C , \qquad (24)$$

где U_v — напряжение ν-й гармоники;
C — электрическая емкость конденсаторной установки;
ω — угловая частота;
$tg\delta_v$ — тангенс угла потерь диэлектрика на ν-й гармоники.

Значение $tg\delta$ при частоте до 1000 Гц можно принять равным номинальному значению для данного типа диэлектрика [12]. В диапазоне частоты от 1000 до 3000 Гц значение $tg\delta$ возрастает примерно в 1,5 раза. Емкость конденсатора при частоте до 3 кГц можно принять $C_v = C_{ном} = const$. В результате таких допущений формула (24) для определения диэлектрических потерь принимает вид [12]

$$\Delta P_{\Sigma диэл} = \omega C_{ном} tg\delta_{ном} \left(\sum_{v=2}^{20} U_v^2 v + 1{,}5 \sum_{v=21}^{40} U_v^2 v \right) . \qquad (25)$$

Потери в реакторах определяются по формуле [8, 16]

$$\Delta P_{\Sigma_M} = 3\sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 R_1 k_{r\nu}\,, \qquad \textbf{(26)}$$

где I_ν — ток ν-й гармоники в реакторе;
R_1 — активное сопротивление на основной частоте;
$k_{r\nu}$ — коэффициент изменения активного сопротивления на частоте ν-й гармоники.

В соответствии с [7] дополнительные потери в *LC*-фильтре $\Delta P_{\phi\Sigma\nu}$ от высших гармоник слагаются из потерь в реакторе и потерь в батареи конденсаторов на частотах гармоник, на которые настроен фильтр. Потерями от остальных высших гармоник, проникающих в фильтр, можно пренебречь [16] и $\Delta P_{\phi\Sigma\nu}$ принимает вид

$$\Delta P_{\phi\Sigma\nu} = 3I_\nu^2 X_p\left(\nu tg\delta + \sqrt{\nu} ctg\varphi_p\right), \qquad \textbf{(27)}$$

где I_ν — ток ν-й гармоники, проходящий через фильтр; X_p, R_p —реактивное и активное сопротивление реактора; $ctg\varphi_p = R_p \big/ X_p$ — котангенс угла φ реактора.

Проведенный анализ методик расчета дополнительных потерь, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью питающего напряжения и приведенные формулы (13) – (27) легли в основу разработки алгоритма (рис. 1).

Проведенный анализ методик расчета дополнительных потерь от несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения и приведенные формулы (1) – (27) легли в основу разработки алгоритма (рис. 1) и программы [17] для расчета дополнительных потерь в элементах систем электроснабжения от несимметрии и несинусоидальности напряжения и тока, интерфейс которой представлен на рис. 2. При разработке программы была создана база основных элементов системы электроснабжения, в которой учитывались индивидуальные параметры электрооборудования. Программа написана на языке Object Pascal в среде Delphi.

Библиографический список

1. Горюнов, В. Н. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / В. Н. Горюнов [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 168 – 173.

2. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев [и др.] ; под ред. Ю.В. Шарова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

3. Влияние электроприемников, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока, на значение критического напряжения при оценке устойчивости узла с асинхронной нагрузкой / С. Ю. Долингер [и др.] // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 225 – 229.

4. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М. : ФГУП «Стандартинформ» – тип. «Московский печатник», 2013. – 57 с.

5. Схематические решения активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии / В. Н. Горюнов, А. Г. Лютаревич [и др.] // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 214 – 217.

6. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

7. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 186 с.

8. Горюнов, В. Н. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник / В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов, А. Г. Лютаревич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 268 – 273.

9. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер ; пер. с чешск. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

10. Гуртовцев, А. Погрешности электронных счетчиков. Исследование и оценка / А. Гуртовцев // Новости электротехники. – 2007. – № 2. – С. 156 – 160.

11. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев : Наук. думка, 1985. – 268 с.

12. Семичевский, П. И. Методика расчета дополнительных потерь активных мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками : дис. ... канд. тех. наук / П. И. Семичевский. – М., 1978. – 206 с.

13. Проведение исследований распространения высших гармоник тока в энергосистеме и разработка предложений по повышению помехоустойчивости и обеспечению электромагнитной совместимости устройств FACTS и электрической сети: отчет НИР по теме №2127050, гос. рег. № 0120.0511658 / Рук. И. И. Карташаев, 2005. – М., 2005. – 120 с.

14. Церазов, А. Л. Исследование влияний несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей / А. Л. Церазов, Н. И. Якименко. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 120 с.

15. Манькин, Э. А. Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов при несинусоидальном токе / Э. А. Манькин // Электричество. – 1955. – № 12. С. 48 – 52.

16. Гидалевич, Е. Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при несинусоидальном напряжении / Е. Д. Гидалевич // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 24 – 30.

17. Лютаревич, А. Г. Расчет потерь мощности от снижения качества электроэнергии / А. Г. Лютаревич, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов. – М. : ОФЭРНиО ФГНУ ИНИПИ РАО, 2012. – Св-во № 18490.

ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ЛЮТАРЕВИЧ Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», декан энергетического института ОмГТУ.

САФОНОВ Дмитрий Геннадьевич, старший преподаватель, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

ЧЕРЕМИСИН Василий Титович, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», проректор по научной работе и инновациям Омского государственного университета путей сообщения.

Адрес для переписки: stas_chicago@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2013 г.

© С. Ю. Долингер, А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов, Д. Г. Сафонов, В. Т. Черемисин

УДК 621.18

Е. П. ЖИЛЕНКО
С. Ю. ПРУСС
Н. Ю. ФОМЕНКО
Д. Е. ХРИСТИЧ

Омский государственный технический университет

УПРАВЛЯЕМЫЙ ХАОС В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Нелинейная динамика была успешна в объяснении очевидного предельного поведения электроэнергетических систем (ЭЭС). Компоненты ЭЭС нелинейные и линейные методы их анализа иногда приводят к качественно неправильному предсказанию поведения ЭЭС. В реальных ЭЭС происходят процессы, которые вписываются в общие рамки хаотической динамики.

Ключевые слова: энергетические системы, нелинейная динамика, стабильность, раздвоение, хаос.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения 14.B37.21.0332 от 27 июля 2012 г.

1. Введение. Многие исследования показали существование хаотического поведения в нелинейных электрических схемах и системах, например [1]. В частности, они часто раскрывали ранее неподозреваемую *бифуркацию* установившегося режима работы ЭЭС.

Исследованы нелинейные эффекты, такие как *хаос* в преобразователях питания [2]. Тем не менее инженеры продолжают использовать линеаризацию на основе методов моделирования слабого сигнала при исследовании переходных и установившихся процессов.

Рассматриваемая нами ЭЭС состоит из нескольких взаимосвязанных подсистем постоянного тока: солнечные батареи, аккумуляторы, ПТ – ПТ (постоянный ток в постоянный ток) преобразователи, регуляторы, сети распределения питания и полезной нагрузки. Более того, последующие поколения энергетических систем становятся более крупными и сложными, включая цифровые контроллеры и частые изменения конфигурации системы. Это всё создается для удовлетворения требований к источнику питания. Следствиями нежелательной хаотической бифуркации режимов ЭЭС могут быть снижение качества и динамики или непредсказуемые сбои ЭЭС в целом.

2. Нелинейная динамика и хаос. Цель нелинейной динамики: понять сложное поведение нелинейных систем. Ниже приведены очень кратко некоторые основные идеи.

А. Пространство состояний и показателей качества регулирования ЭЭС. Пространство состояний автономной динамической системы определяется дифференциальным уравнением.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x), f : R^n \to R^n, x(t_0) = x_0, \qquad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ является n-мерным вектором состояния в момент времени t.

В электрических системах вектор состояния обычно включает токи индуктивностей и напряжения конденсаторов. Производная $\dot{x}$ представляет собой векторное поле. Множество всех траекторий $x(t)$, которые удовлетворяют (1), называется *потоком* системы. Выбирая конкретные начальные условия $x_0 = x(0)$, выберем одну единственную траекторию. С ростом t от нуля вектор состояния следует этой траектории и происходит динамическое развитие системы.

Б. Предельные множества. Далее описаны четыре различных типа стационарного поведения системы. Они называются предельными множествами, потому что они содержат множество точек, принадлежащих $x(t)$ в пределе при $t \to \infty$.

Точка равновесия. Специальные точки в пространстве состояний (обозначаются x^*), где вектор поля равен нулю, т. е. вектор состояния остается неподвижным. Следовательно, $x(t)=x^*$ для всех t. Устойчивость точки равновесия определяется из собственных матриц Якоби F от x^* (матрица Якоби содержит частные производные от F по x). Собственные значения с отрицательной действительной частью указывают на сокращение, а с положительной действительной частью — на расширение. Они показывают, что малые возмущения от равновесной точки могут привести к росту или распаду неустойчивости. Если все n собственных значений лежат в левой половине комплексной плоскости, то система асимптотически устойчива. (Это похоже на условие устойчивости линейных непрерывных систем, по сути, мы линеаризуем системы x^*.)

Периодические решения. Это такие решения, которые удовлетворяют условиям $x(t)=x(t+T)$, где T — некоторый минимальный период больше нуля. Их устойчивость может быть определена из их *характерных множителей* (мультипликаторов Флоке) — обобщение собственных значений в точке равновесия [3]. Если характеристика мультипликато-

ров лежит внутри единичного круга, периодическое решение асимптотически устойчиво — предельный цикл. (Это условие должно быть известно из дискретной линейной теории систем.)

Квазипериодическое решение. Квазипериодичность возникает, если спектр траекторий состоит из двух или более компонентов, частоты которых несоизмеримы, то есть связаны иррациональным числом.

Хаотические решения. Хаос по-прежнему бросает вызов общепринятым определениям, но, грубо говоря, это шумоподобные колебания, которые происходят в детерминированных системах и имеют широкополосный спектр. Траектория очень чувствительна к возмущениям, и остается в пределах ограниченной области пространства состояния. Лучшим показателем хаоса является положительный показатель Ляпунова [4, с. 185 – 187].

Стабильные предельные множества известны как аттракторы. Областью притяжения является область пространства состояний, в которую вектор состояния, в конце концов, притянул область при $t \to \infty$. Хаос, связанный с фрактальной устойчивостью предела, с бесконечно сложным фазовым портретом, известен как странный аттрактор.

В. Повторное отображение (изображение на фрактальной плоскости). Система также может быть описана с помощью карты, или отображения. Это алгебраическая функция, касающаяся вектора состояния x_m на одной выборке от x_{m+1}, образцы могут быть приняты в ряде способов: через регулярные промежутки времени (стробоскопическая карта); на определенные события, например, максимумов или минимумов (карта Лоренца), или как $x(t)$ проходит через поперечную поверхность в пространстве состояний (карта Пуанкаре). Полученные из дифференциальных уравнений, отображения можно легко повторить и выявить динамику системы [5].

n-мерное отображение $F{:}R'' \to R''$, $x \to F(x)$ является функцией, которая действует на вектор состояния x_m, чтобы произвести свое следующее значение x_{m+1},

$$x_{m+1} = F(x_m), \quad \text{где} \quad m = 0, 1, 2, 3... \qquad \textbf{(2)}$$

Учитывая начальное состояние x_0, отображение может повторяться, чтобы получилась последовательность $\{x_m\} = \{x_0, x_1, x_2, ...\}$. Это называется орбита системы.

Г. Неподвижные и периодические точки отображения. Если есть $x_m = x^*$ такое, что $F(x^*) = x^*$ (т.е. вектор состояния инвариантен при отображении), тогда x^* известен как неподвижная точка отображения. Для одномерной системы неподвижные точки можно получить графически от пересечения линии $x_{m+1} = x_m$ с функцией $x_{m+1} = F(x_m)$.

Устойчивость неподвижной точки может быть определена из собственной матрицы Якоби F от x^*. Неподвижная точка устойчива, если спектральный радиус Якоби меньше единицы (ее собственные значения лежат внутри единичного круга), т.е.

$$\left\| \left(\frac{dF}{dx} \right)_{x=x^*} \right\| < 1. \qquad \textbf{(3)}$$

Для одномерной системы это условие упрощается $|F'(x^*)| < 1$.

Если вектор состояния возвращается в ту же точку, но только после двух итераций отображения, т.е. $F(x^*) \neq x^*$, а $F(F(x^*)) = x^*$, то x^* называется двухпериодной точкой. Она может быть обобщена в период k, для которого $F^k(x^*) = x^*$ для некоторых $k = 2, 3, 4, ...$

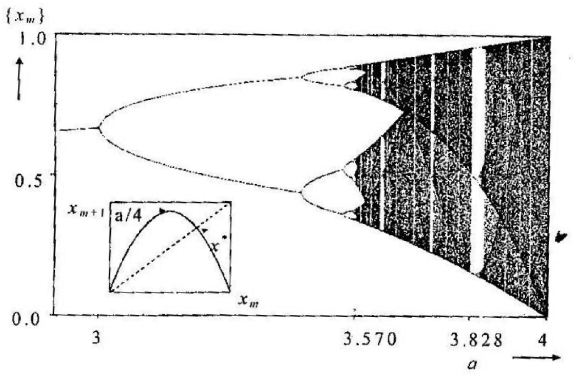


Рис. 1. Одномерное квадратичное отображение (вставка) и бифуркационная диаграмма при α от 2,9 до 4

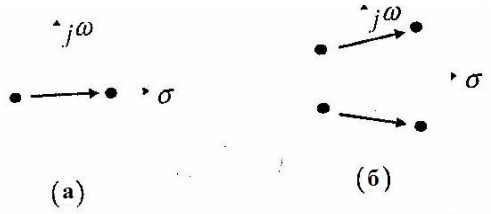


Рис. 2. а — каскад бифуркаций; б — бифуркация Хопфа

Связанная последовательность $\{x^*\} = \{x_0, x_1, .., x_{k-1}\}$ известна как k-периодная орбита. Периодические орбиты могут быть стабильными, либо неустойчивыми, как это определено в собственных матрицах Якоби $F\{x^*\}$.

Д. Хаос повторного отображения. Хаос повторного отображения характеризуется последовательностью $\{x_m\}$, которая никогда не повторяется, но остается ограниченной в пространстве состояния. Таким образом, привлекающая хаотическая орбита заполняет конечную область, не сходясь и не повторяя себя. Классическое одномерное отображение является квадратичным отображением

$$X_{m+1} = \alpha x_m (1 - x_m), \quad \alpha \in [0, 4]. \qquad \textbf{(4)}$$

Бифуркационная диаграмма (рис. 1) свидетельствует о качественном изменении поведения электроэнергетической системы при изменении бифуркационого параметра a (в нашем случае коэффициент a обозначает относительное солнечное освещение).

При $\alpha \leq 3$, $\{x_m\}$ сходится к неподвижной точке, при $\alpha = 3$, $\{x_m\}$ предполагает двухпериодную траекторию. При дальнейшем увеличении периода 4, 8, 16, ... последовательно период возобновляется. При $\alpha \approx 3{,}570$ период становится бесконечным и возникает хаос. (Это явление известно как период удвоения бифуркации.) При определенных значениях параметров, вновь появляются стабильные периодические орбиты, например, при $\alpha = 3{,}828$ возникает трёхпериодная траектория.

Е. Бифуркации. Каскад бифуркаций происходит тогда, когда действительное собственное значение изменяется между отрицательным и положительным значениями (рис. 2а), изменяя местоположение стационарной точки равновесия на фазовой плоскости.

Бифуркация Хопфа происходит тогда, когда действительная часть комплексно-сопряженной пары собственных значений изменяется между отрицательным и положительным значениями. Возникает

периодическое решение, и если оно устойчиво, то имеют место автоколебания (рис. 2б).

Кроме того, бифуркации могут также быть охарактеризованы по способу установления предельного цикла.

3. Нелинейность в энергетической системе. Далее мы опишем нелинейные элементы энергетической системы.

А. Солнечные батареи. Особенность постоянного тока солнечной батареи может быть смоделирована математически простыми отношениями, полученными из физики полупроводника:

$$j=j_{кз}-j_0(expU/U_T-1), \qquad (5)$$

где j — плотность тока, $j_{кз}$ — плотность тока короткого замыкания (на данном уровне освещения), j_0 — плотность тока при отсутствии освещения, U — напряжение через ячейку, и U_T — тепловое напряжение, вычисленное по формуле kT/q, где k — постоянная Больцмана, q — заряд на электроне и T — абсолютная температура. Мы видим, что отношение нелинейное.

Б. Батареи. Напряжение на клеммах аккумулятора нелинейно изменяется с зарядом. Таким образом, простейшая модель будет состоять из нелинейного конденсатора [6]. На практике математическое моделирование включает в себя множество дополнительных параметров, в том числе внутреннее сопротивление и емкость, заряд и разряд, саморазряд и температуру.

В. Электрические компоненты. Многие силовые электрические компоненты являются нелинейными. Транзисторы, биполярные транзисторы и диоды имеют нелинейные характеристики постоянного тока, а также нелинейную емкость. Трансформаторы, дроссели и магнитные усилители имеют нелинейную индуктивность. Элементы управления, такие как широтно-импульсный модулятор, текущий режим контроллера и фазовой автоподстройки петли также существенно нелинейный.

Г. ПТ–ПТ преобразователи. Уже более десяти лет существует литература, которая описывает бифуркацию и хаос в ПТ–ПТ (постоянный ток – постоянный ток) преобразователях с различными схемами управления. Вполне вероятно, что все типы способны создать хаос, при любых условиях.

Например, простой управляемый напряжением понижающий преобразователь был изучен усреднением пространства состояния и оказался стабильным в широком входном диапазоне. Когда к нему были применены основы нелинейной динамики, то был получен удивительный диапазон поведения: высшие гармоники, перебои, хаос, сосуществующие аттракторы и даже узкие группы хаотического поведения включены в устойчивую область. Диаграмма раздвоения представлена на рис. 3.

4. Потеря (просадка) напряжения на шине. Чтобы продемонстрировать значение нелинейной динамики, мы опишем некоторые знакомые нам эффекты в энергетической системе, исследуя упрощенную, но соответствующую модель.

Давайте сначала рассмотрим простую систему первого порядка, содержащую солнечные батареи, конденсатор и понижающий ПТ–ПТ преобразователь, как показано на рис. 4. Для иллюстрации предположим, что нет аккумулятора, поэтому питание происходит от солнечной энергии.

Вместо того чтобы использовать обобщенную формулу для солнечной батареи (5), мы упрощаем

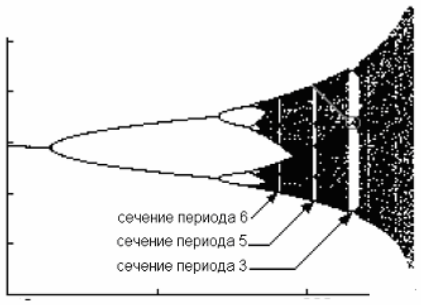


Рис. 3. Моделирование диаграммы бифуркации для понижающего преобразователя. U_1=[15, ..., 40 В]

вычисления, моделируя солнечную батарею полиномом

$$i_I=a\ I_{кз}(1-(U_1/U_{рц})^p),\ 0\le U_1\le U_{рц},\ 0\le i\le I_{кз}, \qquad (6)$$

где i_1 и U_1 — предельный ток множества и напряжение, $I_{кз}$ — ток короткого замыкания, $U_{рц}$ — напряжение разомкнутой цепи, значение степени принимаем $p=33$, чтобы приблизить близко ПТ к реальной солнечной батарее. Коэффициент обозначает относительное солнечное освещение.

Получим четыре значения тока в солнечной батарее для различных значений освещенности: $i_1(\alpha=0{,}25)=1$ А, $i_1(\alpha=0{,}5)=1{,}99$ А, $i_1(\alpha=0{,}75)=1{,}66$ А, $i_1(\alpha=1{,}00)=1{,}093$ А.

В следующем анализе мы используем α в качестве параметра раздвоения. Солнечная батарея питает конденсатор и регулируемый понижающий преобразователь. Преобразователь имеет два режима работы, в зависимости от входного напряжения. В предпочтительном режиме входного напряжения достаточно для получения регулируемого выходного напряжения. Однако, когда входное напряжение слишком низкое, переключатель понижающего преобразователя закрывается постоянно, и его входное значение становится пропорционально значению R_L. Этот режим является нежелательным, поскольку выходное напряжение не регулируется.

Входная характеристика понижающего преобразователя:

$$\begin{cases} i_2=\dfrac{U_{выход}}{R_1U_1}, если, u_2\ge U_{выход} \\ \qquad\qquad (предпочтительный\ способ) \\ i_2=\dfrac{u_2}{R_1}, если, u_2\le U_{выход} \\ \qquad\qquad (нежелательный\ способ) \end{cases}, \qquad (7)$$

где i_2 и u_2 — значения входного тока и напряжения; $U_{выход}$ – искомое значение выходного напряжения.

Получим значения тока для различной освещенности: $i_2(\alpha=0{,}25)=0{,}456$ А, $i_2(\alpha=0{,}5)=6{,}37$ А, $i_2(\alpha=0{,}75)=11{,}5$ А, $i_2(\alpha=1{,}0)=11{,}672$ А.

Как только $u_2=u_1$, то система примет вид:

$$\frac{du_1}{dt}=\frac{i_1(u_1)-i_2(u_2)}{C}=f(u_1), \qquad (8)$$

где $i_1(u_1)$ — задается формулой (6), $i_2(u_1)$ — системой (7). Мы получим равновесную точку $\{u_1^*\}$, полагая $f(u_1)=0$ и решая уравнение относительно u_1. Мы используем следующие параметры: $I_{кз}=4$ А; $U_{рц}=46{,}2$ V; $U_{выход}=14$ В; $R_L=3{,}92$ Ом; $C=250$ мФ. Рассматриваются два случая: $\alpha=1$, $\alpha=0{,}5$ (полное и неполное освеще-

Таблица 1

Полученные значения равновесия ЭЭС

α	Нежелательный		Предпочтительный	
	u_1^*	$i_1^*=i_2^*$	u_1^*	$i_1^*=i_2^*$
0,50	7,840	2,000	25,000 45,082	2,000 1,109
1,00	–	–	45,755	1,092

Таблица 2

Стабильность и режим равновесия ЭЭС

α	Точки равновесия	u_1	du_1/dt	Состояние	Режим
0,50	А	7,840	−1020,41	Стабильный	Нежелательный
	Б	25,00	+319,99	Нестабильный	Предпочтительный
	В	45,08	−2510,87	Стабильный	Предпочтительный
1,00	Г	45,75	−8289,07	Стабильный	Предпочтительный

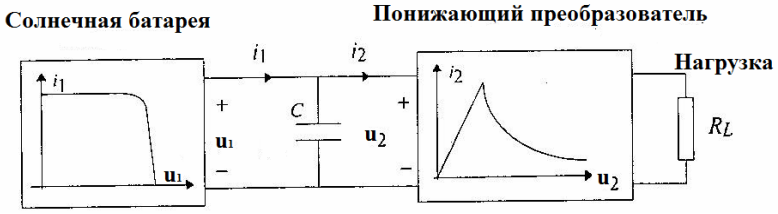


Рис. 4. Схема энергетической системы первого порядка

ние). Мы можем получить одну, две или три точки равновесия, в зависимости от значений параметров (рис. 5).

В табл. 1 приведены численные результаты.

Устойчивость равновесия определяется путем оценки du_1/dt при $\{u_1^*\}$.

В табл. 2 обобщаются результаты. Отрицательные значения указывают на стабильность, положительные на нестабильность. При α=1 (полное освещение), есть одна устойчивая точка равновесия Г (рис. 5), где понижающий преобразователь работает в своем предпочтительном режиме. Когда снижается напряжение, эта точка перемещается в точку В, но появляются два дополнительных равновесия А и Б. Точка Б неустойчива, но точка А является стабильной и происходит в нежелательном режиме работы. Бифуркационная диаграмма представлена на рис 6.

Два интересных уровня освещенности: α=0,3102 и α=0,8929. В поворотной точке происходит бифуркация в момент, когда встречаются две ветви — ветвь стабильного равновесия и ветвь нестабильного равновесия. В пределах диапазона в зависимости от начальных условий можно выбрать одно из двух устойчивых равновесий. Это явление хорошо известно как гистерезис (запаздывание). Большое возмущение может перевернуть систему в другое устойчивое равновесие, где она и будет оставаться. Это простой пример сосуществующих аттракторов. Нестабильные ветви отделяют бассейны притяжения от каждой стабильной ветви. Если R_L принимается в качестве параметра бифуркации, то в диапазоне 1,215 Ом< $<R_L<$3,5 Ом будет снова наблюдаться гистерезис. Если мощность входного сигнала недостаточна для обеспечения мощности, которая нужна нагрузке, система переходит на нестабильную ветку, что может привести к «лавине напряжения». Этот эффект является хорошо известной опасностью энергетической системы. Чтобы избежать этого, R_L должно быть увеличено (более чем 3,5 Ом при полном освещении), выключив полезную функцию: сброс нагрузки.

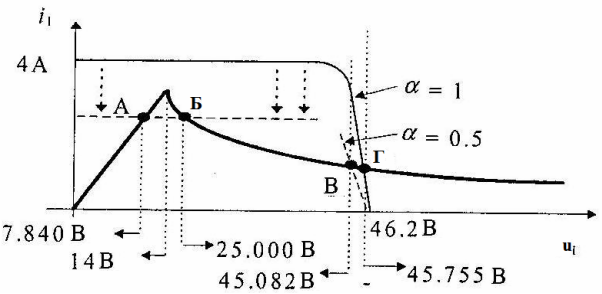


Рис. 5. ВАХ, точки равновесия А, Б, В и Г

5. Псевдоколебания. Мы расширяем модель на более высокие измерения, включением двух дальнейших компонентов фильтра (рис. 7). Системные уравнения теперь выглядят следующим образом:

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{i_1(u_1) - i_1}{C_1} = f_1(u_1, i_L, u_2), \quad \textbf{(9)}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_1 - i_L R_s - u_2(i_2)}{L} = f_2(u_1, i_L, u_2), \quad \textbf{(10)}$$

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{i_L - i_2}{C_2} = f_3(u_1, i_L, u_2). \quad \textbf{(11)}$$

Полученные значения при различных уровнях освещенности сведены в табл. 3.

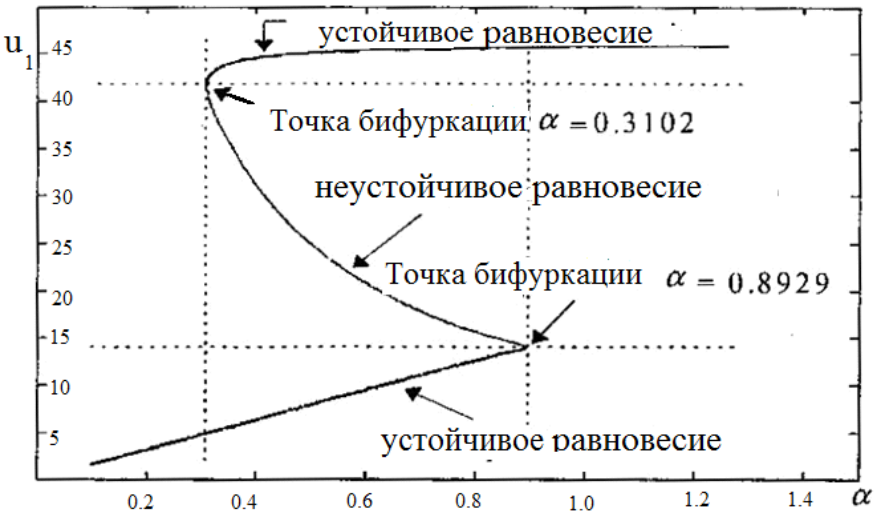


Рис. 6. Бифуркационная диаграмма $u_1(\alpha)$ (гистерезис при 0,3102<α<0,8929)

Рис. 7. Схема энергетической системы третьего порядка

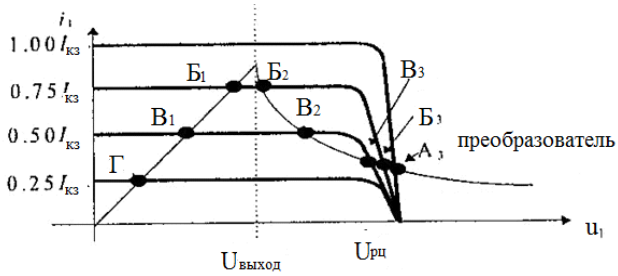


Рис. 8. Параметры режима и точки равновесия при различной освещённости

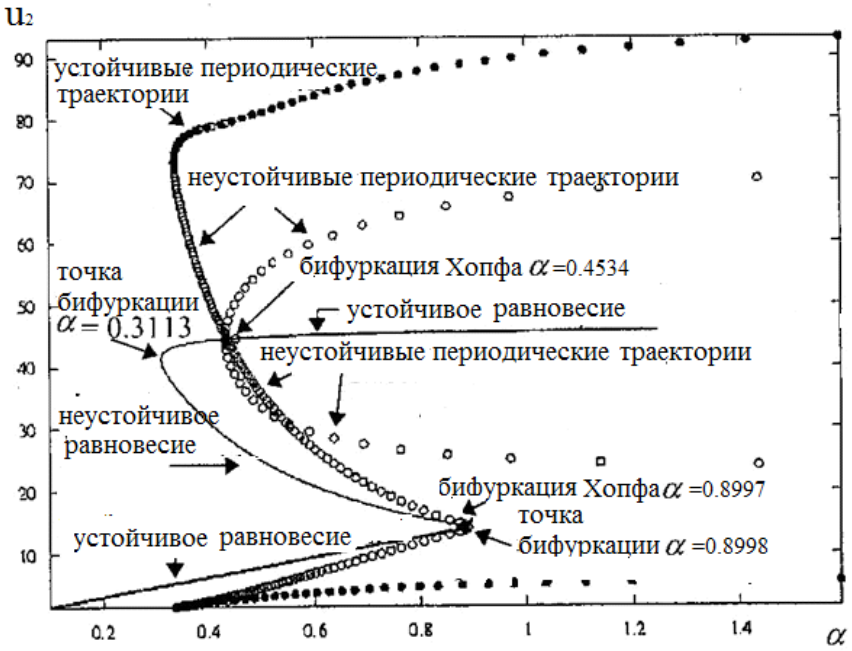


Рис. 9. Бифуркационная диаграмма $u_2(\alpha)$

Таблица 3

Значения, получившиеся в результате решения системных уравнений ЭЭС

α	i_1	u_2	u_1	i_2
0,25	1,255	1,788	5,802	0,799
0,5	1,91	24,97	−0,352	−4,46
0,75	2,287	45,08	−0,246	−9,21
1,0	3,165	45,754	−0,31	−8,507

Таблица 4

Нежелательный режим						
α	Точки равновесия	i_1	u_1	i_L	u_2	i_2
0,25	Г	1,00	4,12	1,00	3,92	1,00
0,50	$В_1$	2,00	8,24	2,00	7,84	2,00
0,75	$Б_3$	3,00	12,36	3,00	11,76	3,00
1,00	–	–	–	–	–	–
Предпочтительный режим						
α	Точки равновесия	i_1	u_1	i_L	u_2	i_2
0,25	–	–	–	–	–	–
0,50	$В_2$ $В_3$	2,00 1,114	25,40 45,10	2,00 1,114	25,00 44,88	2,00 1,114
0,75	$Б_2$ $Б_3$	3,00 1,102	17,72 45,67	3,00 1,102	16,67 45,45	3,00 1,102
1,00	$А_3$	1,098	45,75	1,098	45,53	1,098

Таблица 5

Сведения о бифуркации Хопфа

a	Точки равновесия	Собственные значения якобиана			Состояние
		λ_1	λ_2	λ_3	
0,25	Г1	−2345,2 −j4812,0	−2345,0 +j4812,0	−678,2	Устойчивое
0,50	$В_1$	+2345,2 −j4812,0	−2345,2 +j4812,0	−678,3	Устойчивое
	$В_2$	+564,5 −j5431,4	+564,5 + j5431,4	+204,4	Неустойчивое
	$В_3$	−21,4 −j5462,6	−21,4 +j5462,6	−161,2	Устойчивое
0,75	$Б_1$	−2345,1 − j4812,0	−2345,1 + j4812,0	−678,3	Устойчивое
	$Б_2$	+1422,3 − j5109,5	+1422,3 + j5109,5	+487,3	Неустойчивое
	$Б_3$	−86,84 − j5362,1	−86,84 + j5362,1	−3841,2	Устойчивое
1,00	$А_3$	−88,28 − j5297,9	−88,28 + j5297,9	−5575,8	Устойчивое

При значениях параметров системы $C_1=50$ мФ, $C_2=350$ мФ, $L=700$ мГн и $R_s=0,2$ Ом, находим переменные состояния (параметры режимов) f_1, f_2, f_3 в равновесных точках $\{x^*\}$ (рис. 8, табл. 4).

Для исследования устойчивости, рассмотрим собственные значения $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ якобиана в каждой точке равновесия (табл. 5). Помимо стационарных бифуркаций в системе второго порядка мы существование бифуркации Хопфа.

Как и прежде, мы создаем бифуркационную диаграмму, α параметр бифуркации (рис. 9). Опять наблюдается гистерезис, теперь при значениях $0,3113<\alpha<0,8998$. Значения несколько выше, так как $R_s>0$.

Есть еще два интересных значения освещенности: $\alpha=0,4534$ и $\alpha=0,8997$ — начальные точки бифуркации Хопфа. Проследим теперь траектории периодических решений, которые снова могут стать либо стабильными, либо нестабильными.

В области сосуществования трех аттракторов в диапазоне $0,4534<\alpha<0,8997$ можем наблюдать: два устойчивых равновесия, также есть две неустойчивые периодические траектории и неустойчивое равновесие, что говорит нам о наличии сложного переходного процесса.

Сосуществование аттракторов этого типа представляет собой серьезную угрозу для надежной

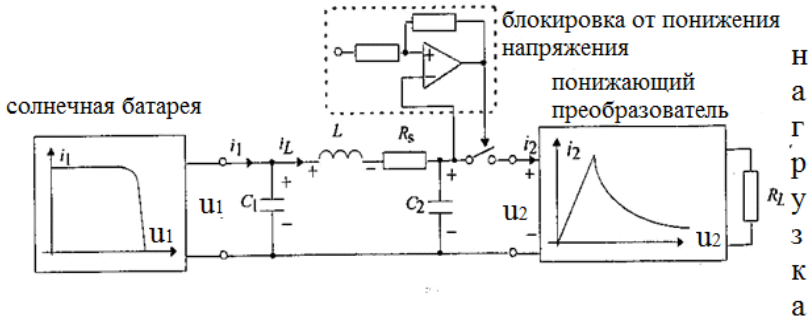


Рис. 10. Схема энергетической системы третьего порядка с блокировкой от понижения напряжения

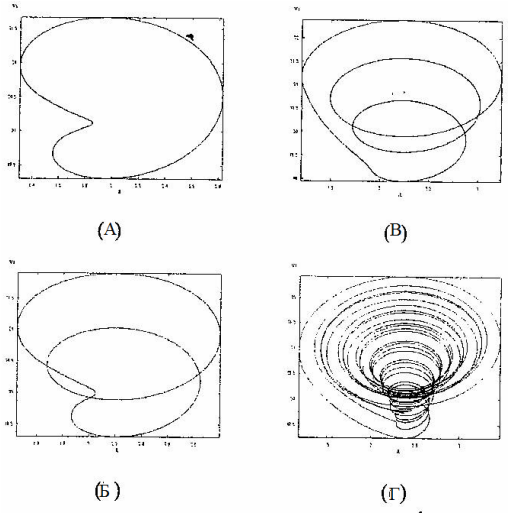


Рис. 11. Фазовые портреты хаотического процесса колебаний напряжения u_1 при α=0,49 (А); α=0,55 (Б); α=0,558 (В); α=0,597 (Г)

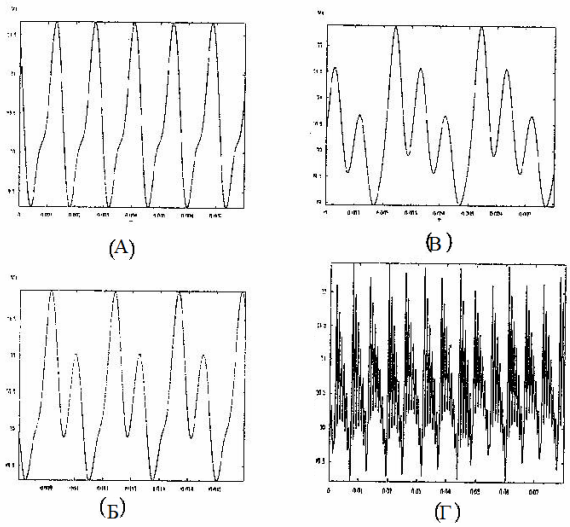


Рис. 12. Сигнал $u_1(t)$ при α=0,49 (А); α=0,55 (Б); α=0,558 (В); α=0,597 (Г)

работы и может привести к неисправности или отказу.

6. Хаос. В нашей третьей модели (рис. 10) установлена блокировка от понижения напряжения в конверторе. Такие схемы обычно используются для предотвращения критической разрядки батарей во время затмения, для обеспечения правильной работы преобразователя. Когда его входное напряжение слишком низкое, преобразователь отключается, когда напряжение восстанавливается, он автоматически подключается.

В этой модели L=250 мГн; C_1=120 мФ; C_2=250 мФ, и гистерезис пороговых значений при u_2=19 В (отключение) и u_2=21 В (подключение). Были получены результаты моделирования (зависимость u_1 от i_L) при повышении уровня освещенности (рис. 11), соответствующие им сигналы $u_1(t)$ (рис. 12).

На рис. 11А существует предельный цикл при α=0,490. На рис. 11Б при α=0,550 период удвоился и на рис. 11В при α=0,558 период утроился. Далее период увеличивается и на рис. 11Г при α=0,597 поведение становится хаотичным. Таким образом, система хаотичная.

Хаотические операции могут быть качественно описаны следующим образом. Вольт-амперная характеристика преобразователя представляет собой отрицательное сопротивление, которое возбуждает резонансный режим между индуктивностью и емкостью, вызывая автоколебания вблизи резонансной частоты, при этом необходимо временно проигнорировать понижения напряжения. Если в данный момент не учитывать L, то из-за гистерезиса появятся затухающие колебания напряжения, так как конденсатор разрядится, и при его зарядке от солнечных батарей преобразователь не будет работать. Эти колебания напряжения имеют свою собственную частоту, определяемую емкостью и частотой смены режимов заряда и разряда конденсатора. В общем, эти два типа колебаний происходят с несоизмеримыми частотами, следовательно, могут появиться квазипериодические колебания. Но нелинейное взаимодействие между двумя типами колебаний приведет к тому, что они могут заблокировать друг друга, в результате чего время отключения преобразователя увеличится, или они могут синхронизироваться с определенными интервалами, при этом вызывая хаос [7].

Система обладает чувствительной зависимостью от начальных условий, это фундаментальное свойство хаотического поведения. При повторении моделирования с начальными условиями, отличающимися только на 0,01, траектории быстро расходятся друг от друга. Фрактальная природа аттрактора является еще одним свидетельством хаоса.

7. Заключение. Различные аспекты, относящиеся к энергетической системе, были изучены при помощи упрощенных моделей. Результаты моделирования показали гистерезис и бифуркацию Хопфа, ведущую к предельным циклам, каскад бифуркаций и хаотическое поведение. Этот подход к электроэнергетической системе может потенциально пролить новый

свет на некоторые знакомые, но мало понятные эффекты, включая лавину напряжения, псевдоколебания и хаотический «шум». Эти явления могут привести к сбою системы. Но наша задача полностью понять и предотвратить эти эффекты.

Библиографический список

1. T. Matsumoto, «Chaos in electronic circuits», *Proc. IEEE,* vol. 75, no. 8, pp. 1033–1056, Aug. 1987.

2. D. C. Hamill, «Power electronics : a field rich in nonlinear dynamics». *Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems,* Dublin, pp. 164–179, July 1995.

3. T. S. Parker and L. O. Chua, «Chaos: a tutorial for engineers», *Proc. IEEE,* vol 75, no. 8, pp. 982–1008, Aug. 1987.

4. Современные проблемы нелинейной динамики энергосистем: электромеханический резонанс, энтропия, детерминированный хаос. Научное издание / Фёдоров В. К. [и др.]. – Омск : Полиграфический центр Кан, 2012. – 327 с.

5. D. C. Hamill, J. H. B. Deane and D. J. Jefferies, «Modeling of chaotic dc-dc converters by iterated nonlinear mappings», *IEEE Trans, on Power Electronics,* vol. 7, no. I, pp. 25–36, Jan. 1992.

6. H. J. N. Spruijt, «Possible battery cell model topologies», *Euro. Space Power Conf.,* Graz, pp. 671–676, Aug. 1993.

7. Y. S. Tang, A. I. Mees and L. O. Chua, «Synchronization and chaos», *IEEE Trans, on Circuits andSystems,* vol. 30, no. 9, pp. 620–626, Sep. 1983.

ЖИЛЕНКО Елена Петровна, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».
ПРУСС Светлана Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».
ФОМЕНКО Николай Юрьевич, магистрант группы ЭС-512.
ХРИСТИЧ Дмитрий Евгеньевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», инженер.
Адрес для переписки: espp@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 14.03.2013 г.

© Е. П. Жиленко, С. Ю. Прусс, Н. Ю. Фоменко, Д. Е. Христич

УДК 621.316.4

Е. В. ПЕТРОВА
А. Я. БИГУН
В. Н. ГОРЮНОВ
С. С. ГИРШИН
А. А. БУБЕНЧИКОВ

Омский государственный технический университет

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОВОДАХ ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ИЗ-ЗА НЕУЧЕТА АТМОСФЕРНЫХ И РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ

В статье рассмотрены высокотемпературные провода повышенной пропускной способности. Произведен расчет температуры провода и потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности с учетом атмосферных факторов и вариации нагрузки.

Ключевые слова: нагрузка, провод повышенной пропускной способности, потери энергии, температура, ветер.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения 14.B37.21.0332 от 27 июля 2012 г.

Современное состояние отечественной электроэнергетики характеризуется устойчивыми темпами увеличения электропотребления. В этих условиях актуально иметь возможность достоверно определять допустимую токовую нагрузку, уровень технологических потерь электрической энергии, а также оптимизировать технические решения повышения пропускной способности линий электропередач [1–4].

До недавнего времени для удовлетворения постоянно растущего спроса на электрическую энергию использовались традиционные подходы [1, 5]: повышение напряжения, расщепление фазы, увеличение сечения проводов, строительства дополнительных

Таблица 1

Характеристика	Материал токопроводящего слоя		
	AI	TAL	ZTAL
Рабочая температура, °С	80	150	210
Краткосрочный (до 30 мин) нагрев, °С	110	180	240
Температура при КЗ, °С	120	220	280
Удельное разрывное усилие, Н/мм^2	160 – 180	160 – 180	160 – 180
Модуль упругости, Н/мм^2	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$

линий электропередач. Указанные подходы, имеют известные недостатки, ограничивающие их применение. Повышение напряжения, расщепление фазы, замена старого провода на новый большего сечения не всегда возможны. Уже имеющиеся эксплуатируемые опоры и элементы этих опор, как правило, не удовлетворяют повышенной нагрузке, обусловленной, например, увеличением массы проводов большего сечения. Установка новых опор или строительство новых линий, удовлетворяющих новым изменениям, также не всегда возможны из-за необходимости получения различных разрешений, значительных финансовых и временных затрат. Особенно это проблематично в зонах, имеющих ограничения на строительство в заповедниках, национальных парках, густонаселенных районах и т.д.

Повышение энергоэффективности в этих условиях может быть достигнуто за счет применения современных проводов с высокой рабочей температурой эксплуатации.

В практике строительства современных воздушных линий (ВЛ) все более широкое применение находят высокотемпературные провода специального типа [1] ACCP (США) [6], TACSR/ACS, TACSR/HACIN (Австрия) [7], GTACSR (Япония) [8].

При значительном увеличении пропускной способности указные марки проводов удовлетворяют высокой электропроводности и механической прочности, малому температурному удлинению, высокой устойчивости к ветровому воздействию и старению, отличаются небольшой погонной массой. Опыт применения в Европе, Японии, Америке проводов с повышенной пропускной способностью насчитывает около двух десятков лет. Датой выхода на российский рынок таких проводов можно считать 2008 год.

Одним из наиболее успешных решений задачи повышения пропускной способности воздушных линий является применение проводов марок TACSR/ACS, ZTACSR/ACS, TACSR/HACIN, ZTACSR/HACIN, производящихся компанией Lumpi – Berndorf (Австрия).

Устойчивость к высокой температуре и повышенной токовой нагрузке обеспечивается выполнением токопроводящих повивов из специальных термостойких сплавов TAL или ZTAL. Термостойкий сплав TAL состоит из алюминия и циркония. Добавка циркония повышает температуру кристаллизации алюминия и позволяет при высоких нагревах провода токопроводящим проволокам сохранять практически без изменения электрические и механические характеристики (табл. 1) [1, 5].

Конструктивное исполнение проводов TACSR/ACS аналогично исполнению классического провода марки АС. Структуру провода TACSR/ACS образуют внешние токопроводящие повивы и внутренний стальной сердечник (рис. 1) [1, 5].

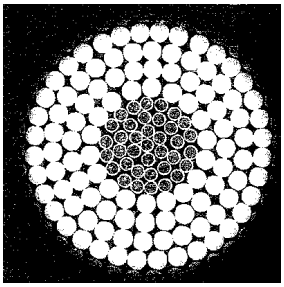


Рис. 1. Конструктивное исполнение проводов TACSR/ACS

Сверхтермостойкий сплав ZTAL, который используется в проводах ZTACSR/ACS и ZTACSR/HACIN, отличается от сплава TAL (провода TACSR/ACS и TACSR/HACIN) еще большим содержанием циркония.

Сердечник проводов марки TACSR/ACS и ZTACSR/ACS сделан из стальной проволоки, которая плакирована алюминием. С целью уменьшения стрелы провеса и повышения прочности в проводах марки TACSR/HACIN и ZTACSR/HACIN вместо простой стальной проволоки (провода TACSR/ACS и ZTACSR/ACS) используется проволока из специального сплава «Инвар» (табл. 2) [1, 5].

Похожесть конструкций проводов TACSR/ACS, ZTACSR/ACS, TACSR/HACIN, ZTACSR/HACIN с классическими проводами АС, позволяет использовать отработанные с традиционными проводами методики работы и монтажа, а также применять известные виды арматуры. Необходимым условием применения последних с высокотемпературными проводами является удовлетворение более высоким температурам эксплуатации.

Указанная особенность не единственное преимущество рассматриваемых проводов фирмы Lumpi – Berndorf.

К достоинствам проводов компании Lumpi – Berndorf следует отнести также и то, что они аттестованы межведомственной комиссией ОАО ФСК ЕЭС.

Аналогом проводов марок TACSR/ACS, ZTACSR/ACS, TACSR/HACIN, ZTACSR/HACIN в России являются отечественные провода АСПТ AT1/20AS [9]. По сравнению с проводом марки АС провод АСПТ AT1/20AS (рис. 2) может эксплуатироваться при температуре 150 °С. Отдельные характеристики некоторых проводов АСПТ AT1/20AS.

Обладая целым рядом достоинств высокотемпературные провода имеют особенности, которые можно

Таблица 2

Характеристика	Материал сердечника		
	Оцинкованная сталь	Сталь, плакированная алюминием	«Инвар»
Модуль упругости, Н/мм^2	207 000	162 000	155 000
Коэффициент линейного расширения, 1 /°С	$11 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$3{,}7 \cdot 10^{-6}$ (менее 230 °С) $10{,}8 \cdot 10^{-6}$ (более 230 °С)
Напряжение при 1 %-ной деформации, Н/мм^2	1100 – 1170	1100 – 1200	990 – 1070
Удельное разрывное усилие, Н/мм^2	1300 – 1400	1070 – 1340	1125 – 1225
Удлинение, %	3 – 4	—	1,5
Плотность, г/см^3	7,78	6,59	7,1

отнести к недостаткам этих типов проводов. Одной из негативных особенностей является увеличение потерь электрической энергии, которые растут пропорционально квадрату тока. Увеличение рабочей температуры эксплуатации высокотемпературных проводов требует более детально относится к расчету потерь электрической энергии в данном случае [3, 10, 11]. Приведенная ниже существующая практика расчета потерь электрической энергии этому не способствует [10].

В целях организации работы по расчету и обследованию нормативов технологических потерь электроэнергии в электроэнергетических сетях организаций, осуществляющих услуги по передаче электроэнергии, в Минэнерго России разработана инструкция [4], утвержденная приказом № 326 от 30.12.2008 г. и заменившая Порядок расчета и обоснования нормативов потерь [12], по которому нормировались технологические потери электроэнергии для сетевых организаций до 2009 г. В соответствии с [12] температура, окружающего провод воздуха, не учитывалась, потери электрической энергии определялись через сопротивление провода для температуры 20 °С.

Инструкция [4] определяет Методику расчета технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде. В методике наряду с прочими изменениями добавлен раздел для расчета активных сопротивлений элементов электрической сети. При расчете активного сопротивления воздушной линии электропередач (ВЛЭП) необходимо учитывать температуру провода, которая при средней загрузке линий ниже экономической плотности тока принимается приблизительно равной температуре воздуха [4].

Зависимости активного сопротивления провода R_t и активных потерь мощности ΔP_t от температуры $t_{пр}$ определяются выражениями:

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha(t_{пр} - 20)),$$

$$\Delta P_t = I^2 R_t = I^2 R_{20}(1 + \alpha(t_{пр} - 20)), \qquad \textbf{(1)}$$

где R_t и R_{20} — активные сопротивления соответственно при температурах t и 20 °С; $\alpha = 0{,}004\ °C^{-1}$ — температурный коэффициент активного сопротивления алюминиевых проводов; $t_{пр}$ — температура провода.

Погрешности определения R_t, а также потерь активной мощности ΔP_t и потерь электрической энергии ΔW в зависимости от $t_{пр}$ по отношению к справочным данным определяются уравнение (табл. 3):

а

б

Рис. 2. Провод марки АСПТ АТ1/20AS
а — общий вид; б — поперечное сечение провода

$$\delta = \frac{R_{20} - R_{20}(1 + \alpha(t_{пр} - 20))}{R_{20}} \cdot 100\ \% =$$

$$= \alpha(t_{пр} - 20) \cdot 100\ \%. \qquad \textbf{(2)}$$

Значительные величины погрешностей указывают на целесообразность учета реальной $t_{пр}$ для совершенствования существующих методов расчета ΔW в ВЛЭП.

Естественным следствием [4] является то, что для регионов с отрицательной среднегодовой температурой потери электроэнергии в линии одной марки провода одного и того же сечения при одинаковой нагрузке и прочих равных условиях будут меньше, чем в регионах с более теплым климатом.

Приходящиеся на год и находимые на основе [4] с учетом tв потери электрической энергии для сетевых организаций, работающих в северных регионах России со среднегодовой температурой воздуха меньше 20 °С, будут меньше потерь, определяемых для температур 20 °С. Обоснование этого утверждения может быть обеспеченна исходя из уравнения (1) и анализа графиков на рис. 3 и 4 для различных температур воздуха.

Таблица 3

Диапазон неопределенности ΔP_t, найденный без учета изменения $t_{пр}$

Марка провода	Температура эксплуатации, °С	Диапазон неопределенности потерь, %
АС	от −50 до +70	48
Высокотемпературные провода повышенной пропускной способности		
ZTACSR/HACIN	от −50 до +210	104
TACSR/ACS	от −50 до +150	80
GTACSR	от −50 до +150	80
ACCR	от −50 до +210	104
АСПТ AT1/20AS	от −50 до +150	80

В соответствии с [12] температура окружающей среды $t_в$ и реальная нагрузка в расчете активного сопротивления ВЛЭП не учитывалась. Предполагая, что при малых нагрузках в среднем $t_{пр}<20$ °С, расчетные потери с учетом фактической температуры проводов для сетевых организаций, имеющих большую общую протяженность ВЛЭП на своем балансе в северных регионах России, согласно [4], будут меньше потерь, определенных для температуры 20 °С. Таким образом, в результате применения [4] и предположения $t_{пр}=t_в$ или нахождение реальной $t_{пр}$ норматив технологических потерь электроэнергии по абсолютной и в относительной величине (% от отпуска электроэнергии в сеть) по сравнению с расчетами по [12] уменьшается при неизменной нагрузке. Следовательно, это приведет к снижению величины тарифа на электроэнергию при передаче сторонним потребителям.

Для сетевых организаций, в которых в большинстве случаев фактические потери электроэнергии существенно больше нормативных, расчетное уменьшение последних приводит к прямым финансовым потерям. С этой точки зрения, сетевые организации в регионах со среднегодовой температурой меньше 20 °С и при малых нагрузках линий не заинтересованы повышать точность расчета потерь и, как правило, расчеты ведутся через сопротивления провода при температуре 20 °С. Заинтересованной стороной является государство, так как повышение точности расчета и снижение нормативов заставит сетевые организации более тщательно заниматься поиском, уменьшением или устранением источников потерь. Однако при увеличении нагрузки линии электропередачи температуры проводов этих линий растут и даже для «холодных» регионов могут превышать потери, находимые через сопротивления при 20 °С.

Такие случаи особенно характерны для линий с высокотемпературными проводами, температура эксплуатации, которых, как правило, превышает 20 °С и температуру воздуха. Представляется, что потери электрической энергии в высокотемпературных проводах в целом ряде случаев будут превышать потери при температуре 20 °С и при температуре воздуха. В этой ситуации сетевые организации заинтересованы в повышении точности расчета потерь.

Необходимость уменьшения возможных финансовых потерь из-за неточного определения нормативов потерь электрической энергии при возрастании нагрузок в традиционных и, особенно, в высокотемпературных проводах требует повышение точности расчета потерь путем учета реальной температуры провода $t_{пр}$. Эта же задача ставится при решении проблем энергосбережения за счет поиска и уменьшения источников потерь.

В данной статье при различных значениях температуры воздуха, скорости ветра и нагрузок, проводится анализ температуры, потерь электрической энергии и возможных погрешностей расчета потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности. Условия расчета:

1. Температура солнечной радиации $t_{рад}=0$ °С, скорость ветра $v=0{,}6$; 5 м/с; температура воздуха варьируется от минус 40 °С до плюс 40 °С, коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси воздушной линии $k_v=0{,}75$, степень черноты поверхности провода $\varepsilon=0{,}6$.

2. Среднегодовые температуры:

— 9,2 °С характерны для Московской области;

— 1,6 °С характерны для Омской области.

3. Провода:

АС 120/27 диаметр провода $d=15{,}4$ мм, сопротивление при 20 °С $R_{20}=0{,}2531$ Ом/км, допустимый ток $I_A=375$А.

АСПТ AT1/20AS диаметр провода $d=15{,}4$ мм, сопротивление при 20 °С $R_{20}=0{,}2381$, Ом/км, допустимый ток $I_A=665{,}8$А.

4. Для расчета используется метод №1 (У) [13−15].

Погрешности расчета потерь электрической энергии определяются по формулам:

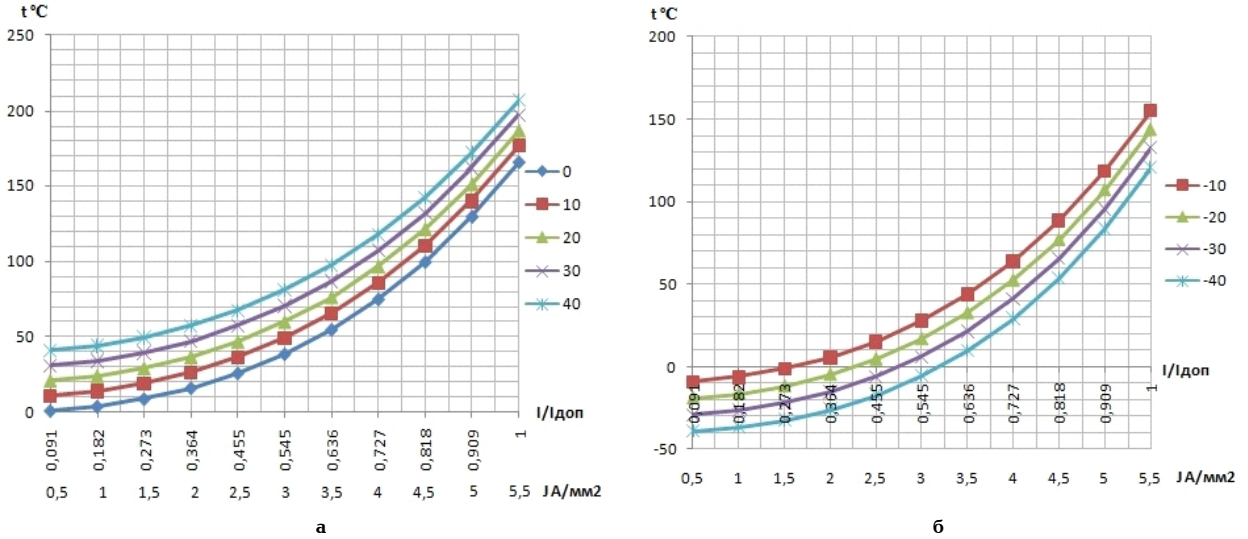
$$\delta_1 = \frac{\Delta W_{20} - \Delta W_{t_в}}{\Delta W_{20}} \cdot 100\ \%\ , \qquad \textbf{(3)}$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta W_{20} - \Delta W_{I,v,t}}{\Delta W_{20}} \cdot 100\ \%\ , \qquad \textbf{(4)}$$

ΔW_{20}, $\Delta W_{tв}$, $\Delta W_{tв,I,v}$ — соответственно потери электрической энергии при разных значениях активного сопротивления R: ΔW_{20} — R при $t_в=20$ °С; $\Delta W_{tв}$ — R определяется в зависимости от значения температуры воздуха $t_в$; $\Delta W_{tв,I,v}$ — R определяется в зависимости от значений температуры воздуха $t_в$, тока в проводнике I и скорости ветра v.

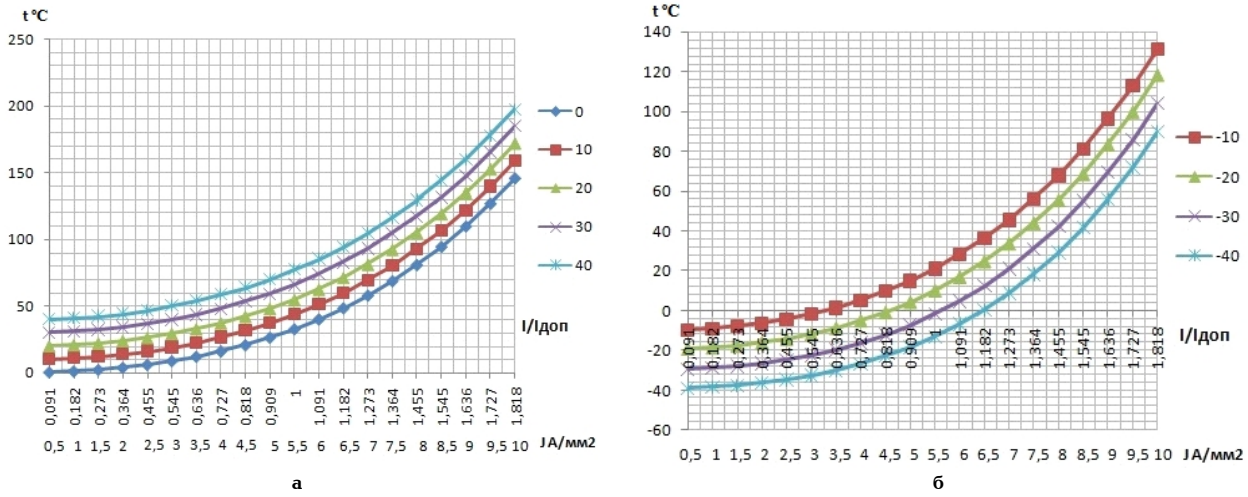
В практике эксплуатации ВЛ значительный интерес представляет возможный уровень загрузки линии по условиям нагрева при различных климатических условиях, к которым в первую очередь относятся $t_в$ и скорость ветра.

Диапазон температур определим от минус 40 °С до плюс 40 °С, так как температура ниже и выше на территории России встречается достаточно редко. В работе [5] отмечается, что в большинстве регионов России характерным является то, что время в течение



а б

Рис. 3. Зависимости температуры провода АСПТ АТ1/20AS 120/27 при v=0,6 м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха: а) положительной б) отрицательной



а б

Рис. 4. Зависимости температуры провода АСПТ АТ1/20AS 120/27 при v=5 м/с от коэффициента загрузки и температуры воздуха: а) положительной б) отрицательной

года, когда скорость ветра более 6 м/с, достаточно мало, кроме того, минимальное расчетное значение скорости ветра составляет 0,6 м/с [5] и соответствует перемещению воздуха за счет нагрева при полном безветрии. При проведении численного эксперимента скорость ветра выбрана равной 0,6 м/с и 5 м/с. На рис. 3 и 4 представлены построенные методом № 1 (У) графики изменения температуры проводов высокой пропускной способности в зависимости от режимных и климатических условий. Интерес представляет длительно допустимая токовая нагрузка $I_{доп}$. В справочниках для каждого проводника приводится значение $I_{доп}$, под которым понимают ток, повышающий температуру провода до 70 °С (для высокотемпературных до 150 – 200 °С) при температуре окружающего воздуха +25 °С, при полном безветрии (v = 0,6 м/с).

Как следует из представленных на рис. 3 и 4 зависимостей, при лучших условиях охлаждения за счет обдувания проводов ветром v = 5 м/с и меньших чем +25 °С температурах воздуха, в проводниках могут быть допущены более высокие нагрузки, если исходить из указанной предельной температуры в +150 °С.

Достаточно хорошо, качественно подтверждая физическую сторону рассматриваемых процессов, представленные на рис. 3 и 4 графики дают при заданных токах и температурах воздуха завышенную по сравнению с ПУЭ [16] температуру провода. Расчет провода АСПТ АТ1/20AS методом №1 (У) ($t_в$ = = 25 °С, $t_{пр}$ = 150 °С, v = 0,6 м/с, ε = 0,6, k_v = 0,75) дает значение допустимого тока 594 А, что на 11% отличается от величины $I_{доп}$ = 665,8 А приводимой в [9] согласно ТУ 3511-005-63976268-2010.

С целью повышения достоверности моделирования необходимо определить причину указанного несоответствия, что потребует проведения дополнительных исследований, направленных, в первую очередь, на уточнение значений постоянной лучеиспускания, мощности теплового потока, обусловленного теплоотдачей конвекцией, а также условий определения $I_{доп}$, приводимого в справочных материалах для провода АСПТ АТ1/20AS. Особого интереса заслуживает анализ влияния на конвективный теплообмен не только величины ветра, но и его направления.

Из рис. 3 видно, что, при $t_в$ = –10 °С и загрузки линий 0,455 $I_{доп}$, температура провода принимает

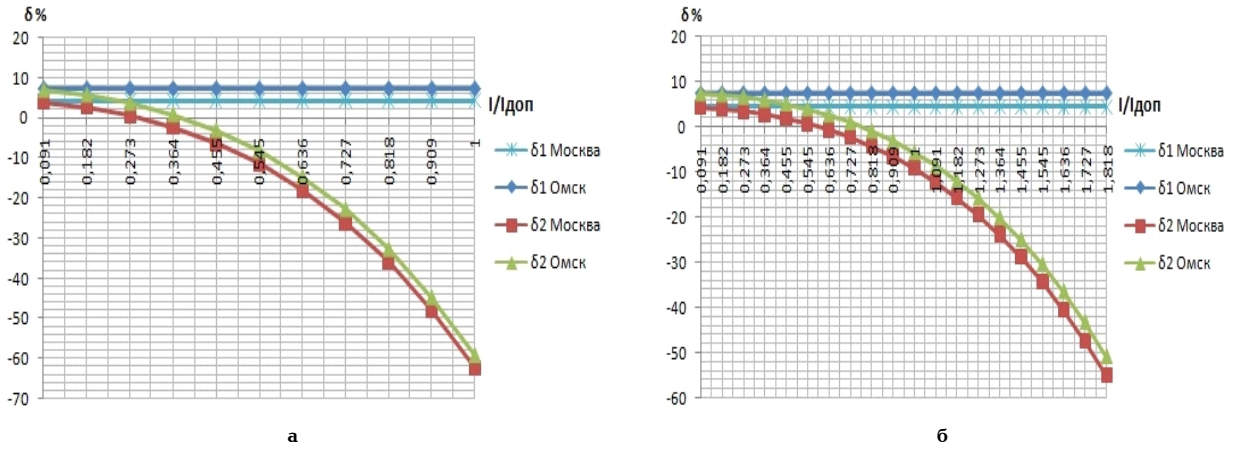


Рис. 5. Зависимости погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии от коэффициента загрузки в проводе АСПТ АТ1/20AS 120/27 для среднемесячных температур г. Омска и Московской обл. при скорости ветра: а — v=0,6 м/с и б — v=5 м/с

значение (порядка) 15 °С. Для той же нагрузки и $t_в = 10$ °С температуру провода можно оценить величиной около 48 °С. Величина сопротивления для $t_{пр} = 48$ °С, а соответственно, и потери мощности будут больше чем при $t_{пр} = 15$ °С. Данный факт свидетельствует, что в южных регионах при одинаковой нагрузке линий и прочих равных условиях потери электрической энергии будут больше, чем в северных регионах.

Как уже говорилось, утвержденная 30 декабря 2008 года «Инструкция по организации в Минэнерго РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электрической энергии при её передаче по электрическим сетям» [4] рекомендует при расчетах учитывать реальную температуру провода. В ней также указывается, что в случае, когда средняя нагрузка меньше экономической плотности тока, температуру провода можно принять равной температуре окружающего воздуха. Действующий с 2006 по 2009 гг. порядок расчета и обоснования нормативов потерь предусматривал нахождение нормативов потерь электрической энергии через активное сопротивление, соответствующее + 20 °С. Учитывая то, что температура воздуха $t_в$ является одним из основных параметров определяющих $t_{пр}$, представляет интерес расчет погрешностей по формулам (3) и (4) для регионов с различной среднегодовой температурой. На рис. 5 представлены погрешности расчета потерь электрической энергии для провода АСПТ АТ1/20AS 120/27 применительно к среднегодовым температурам города Омска (1,6 °С) и города Москвы (9,2 °С). Сравнение потерь электрической энергии ΔW_{20} и $\Delta W_{тв}$ показывает, что ΔW_{20} для обоих регионов превышает $\Delta W_{тв}$. Погрешность δ_1 составляет 4,3 % для Московского региона и 7,4 % для Омского региона. Потери электрической энергии $\Delta W_{тв,I,v}$ при увеличении $t_в$ и тока растут. С увеличением скорости ветра естественно улучшаются условия охлаждения провода. Поэтому нагрев проводов и, следовательно, $\Delta W_{тв,I,v}$ при больших скоростях ветра будут иметь менее зависимый от тока характер. Представленные на рис. 5 зависимости показывают, что при малых плотностях тока определяющее влияние на потери электрической энергии оказывает $t_в$, с увеличением загрузки линии ведущее влияние на потери энергии оказывает величина тока нагрузки. При увеличении загрузки линии, как следует из значений δ_2 (рис. 5), фактические потери $\Delta W_{тв,I,v}$ преобладают над ΔW_{20} за счет интенсивного тепловыделения. Значения δ_2 составляют 20 % для $t_{пр} = 70$ °С и 52 % для $t_{пр} = 150$ °С независимо от скорости ветра и среднегодовой температуры. Это свидетельствует, с одной стороны, о том, что реальные потери значительно превышают расчетные, найденные по сопротивлениям провода для $t_в$ или t_{20}, а с другой — информирует о том, что необходимо при определении потерь в проводах высокой пропускной способности учитывать реальную температуру провода.

Из анализа графиков на рис. 5 и расчета провода АС следует отметить еще одну особенность. Максимальная передаваемая мощность для случая провода АСПТ АТ1/20AS ($t_{пр} = 150$°С) превышает мощность при использовании провода АС ($t_{пр} = 70$°С) в среднем в 1,4 раза независимо от ветра и среднегодовой температуры. При передаче максимальной мощности по проводу АСПТ потери в нем превышают потери мощности в проводе АС в среднем в 2,4 раза. Таким образом, при замене провода АС на АСПТ АТ1/20AS максимальная передаваемая мощность в среднем возрастает на 40 %, а величина потерь при этом увеличивается на 125 %. Кроме того, стоимость провода АСПТ АТ1/20AS 120/27 (89976 руб./км) практически в два раза выше чем стоимость провода АС 120/27 (48600 руб./км). Приведенные обстоятельства указывают на целесообразность строгого технико-экономического обоснования замены проводов АС на АСПТ АТ1/20AS в сетях электроэнергетических систем.

Библиографический список

1. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник. — 2009. — № 3(83). — С. 171—175.

2. Горюнов, В. Н. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах / В. Н. Горюнов, А. А. Бубенчиков // Омский научный вестник. — 2009. — № 1 (77). — С. 106—108.

3. Дед, А. В. Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов / А. В. Дед, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. — 2010. — № 1 (87). — С. 114—119.

4. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электричес-

ким сетям. Утв. приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008, № 326. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kuzenergo.com/normativy_poter_elektroenergii (дата обращения: 04.03.2013).

5. Колосов, С. В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С. В. Колосов // Энергетик. – 2011. – № 1. – С. 18–22.

6. 3М Электротехническое оборудование Алюминиевый композитный усиленный провод 3М™ ACCR для ЛЭП свыше 1000 В [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://solutions.3mrussia.ru/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1351576894000&locale=ru_RU&assetType=MMM_Image&assetId=1319240836570&blobAttribute=ImageFile (дата обращения: 04.03.2013).

7. Высокотемпературные провода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.essp.ru/production/catalog/partners/CROSSY/provoda%20lumpi.php/ (дата обращения: 04.03.2013).

8. Mazon A. J., Zamora I., Criado R., Alonso C., Medina R., Albizu I. Pilot installation of GTACSR conductors in the Spanish power system / A. J. Mazon, I. Zamora, Criado, C. Alonso, R. Medina, I. Albizu // 18th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2005. – Turin, 6–9 June.

9. Провод неизолированный из термостойкого алюминиевого сплава с сердечником из стальной проволоки, плакированной алюминием (Провод АСПТ). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http: / /n–er.ru/shop/provod/provod–aspt/ (дата обращения: 04.03.2013).

10. Бурчевский, В. А. Коррекция технологических потерь электрической энергии ВЛ 35кВ электрических сетей ООО «Роснефть – Юганскнефтегаз» на основе учета климатических и режимных условий / В. А. Бурчевский, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2010. – № 1(87). – С. 127–132.

11. Гиршин, С. С. Упрощение уравнений теплового баланса воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь энергии / С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, Е. А. Кузнецов // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 148–151.

12. Порядок расчета и обоснования нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. приказом Минпромэнерго России от 4 октября 2005 г, № 267. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zakonprost.ru/content/base/part/530146 (дата обращения: 04.03.2013).

13. Петрова, Е. В. Исследование преимуществ усовершенствованного метода расчета потерь в воздушных линиях электропередачи при вариации токов нагрузки и погодных условий / Е. В. Петрова, Н. В. Кириченко, Е. В. Птицына // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (110). – С. 223–228.

14. Вырва, А. А. Уточнение формул для анализа температуры проводов ВЛ в задачах расчета потерь электрической энергии / А. А. Вырва, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 120–126.

15. Петрова, Е. В. Исследование преимуществ усовершенствованного метода расчета потерь в воздушных линиях электропередачи при вариации токов нагрузки и погодных условий / Е. В. Петрова, Н. В. Кириченко, Е. В. Птицына // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (110). – С. 223–228.

16. Правила устройства электроустановок. – 7–й вып. – Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2007. – 854 с.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

БИГУН Александр Ярославович, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», декан энергетического института.

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: barsbigun@list.ru

Статья поступила в редакцию 14.03.2013 г.

© Е. В. Петрова, А. Я. Бигун, В. Н. Горюнов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков

Книжная полка

Андреева, Е. Г. Информационные системы и технологии в электрохозяйстве предприятий : конспект лекций / Е. Г. Андреева, А. Ю. Ковалёв ; ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 59 с.

Рассматриваются основные понятия, принципы и подходы к вопросам определения информационных систем и информационных технологий в электрохозяйствах предприятий и организаций.

Быстрицкий, Г. Ф. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии) : учеб. для вузов по направлениям 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Г. Ф. Быстрицкий, Г. Г. Гасангаджиев, В. С. Кожиченков. – М. : КНОРУС, 2013. – 407 с. – ISBN 978-5-406-02742-4.

Содержит сведения о невозобновляемых и возобновляемых энергетических ресурсах, их характеристики; основы теплотехники, положения технической термодинамики и основы теплообмена. Приведены схемы и технологические процессы тепловых электрических станций, газотурбинных установок, АЭС, гидравлических и ветровых электрических станций. Представлены принципы работы основного теплового оборудования ТЭС: паровые и водогрейные котлы, паровые турбины, оборудование систем теплоснабжения; нагнетательные машины. Рассмотрено основное электрооборудование энергосистемы: электрические генераторы — турбо- и гидрогенераторы, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии электропередачи, их конструктивные элементы.