ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1993 3

·ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ·

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Андерс В. И., Белкин Г. С., Бортник И. М., Борцов Ю. А., Будзко И. А., Бутырин П. А., Гельфанд Я. С., Данилевич Я. Б., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), **Ершевич В. В., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Иоссель Ю. Я., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А.** (главный редактор), **Ларионов В. П., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г., Митюшкин К. Г., Морозкин В. П., Нетушил А. В., Розанов Ю. К., Пищиков В. И., Семенов В. А., Слежановский О. В., Совалов С. А., Строев В. А., Тареев Б. М., Толстов Ю. Г., Чечурин В. Л., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.**

Редакторы по направлениям тематики:

Евсеев Б. Н. (электрические машины, электропривод, электрический транспорт);
Макаршин Б. Д. (ТОЭ, преобразовательная техника, электроматериалы);
Прилуцкий А. Л. (электроэнергетика, ТВН, электрические аппараты)

Адреса редакции: *103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10.* Телефон **924-24-80**
101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648. Адрес для телеграмм: *МОСКВА, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО*

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ИЗДАЕТСЯ С ИЮЛЯ 1880 ГОДА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3
МАРТ
1993

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики), ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Координация и конкуренция в управлении энергообъединениями[1]

РУДЕНКО Ю. Н., СЕМЕНОВ В. А.

Общие сведения. Большое внимание за рубежом уделяется в последние годы экономическим проблемам управления энергосистемами и энергообъединениями. К наиболее значительным событиям в этой области можно отнести: приватизацию энергетической промышленности Великобритании, переход к общему энергетическому рынку в Западной Европе, дискуссию о методах диспетчерского управления энергообъединениями в США и некоторые другие. Значительное внимание этим проблемам было уделено и на сессии СИГРЭ 1992 г., главным образом в дискуссионных группах 37 и 39, обобщению материалов которых посвящен настоящий обзор. Содержащаяся в нем информация может представить интерес для специалистов в современных условиях создания энергетического рынка и акционерных компаний в отечественной энергетике.

В докладах СИГРЭ [1–5] рассмотрен опыт функционирования энергосистем шести стран (Финляндии, Франции, ФРГ, Великобритании, США и Чили). Основные сведения об энергетике этих стран приведены в табл. 1, из которой следует, что рассматриваемые энергосистемы и энергообъединения, как объекты экономического и технологического управления, отличаются большим разнообразием: число энергокомпаний — от одной (Франция) до более 3000 (США); владение электростанциями — преимущественно частное (США, Великобритания, Чили), почти полностью государственное (Франция), смешанное (Финляндия, ФРГ); владение основными (передающими) сетями — в основном частное (Чили, США, Великобритания[2]), преимущественно общественное (Финляндия), полностью государственное (Франция), в ФРГ 90 % основных сетей принадлежат восьми крупнейшим энергообъединениям, каждое из которых несет ответственность за свои сети.

Существенно различен статус общественных энергокомпаний: в Финляндии они не имеют никаких особых прав и привилегий и рассчитывают только на свои средства; в других странах они получают большие дотации, не платят налоги и т. д.

Во всех странах, за исключением Финляндии, энергокомпании несут ответственность за электроснабжение потребителей на соответствующей территории. В Финляндии же эта ответственность распространяется только на энергокомпании, распределяющие электроэнергию; другие же энергокомпании (производящие и передающие электроэнергию) несут ответственность за свою деятельность в соответствии с контрактными обязательствами.

Наблюдается разная степень вертикальной интеграции в экономическом отношении. В боль-

[1] По материалам сессии СИГРЭ 1992 г.

© Энергоатомиздат, "Электричество", 1993.

[2] Основные сети в Англии и Уэльсе принадлежат холдинговой энергокомпании, которой совместно владеют 12 районных компаний.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

шинстве случаев энергокомпании, владеющие электростанциями, одновременно владеют основными и распределительными сетями. Вместе с тем имеются случаи, когда установки по производству и передаче электроэнергии находятся во владении разных энергокомпаний. Яркий пример в этом отношении представляет энергообъединение Англии и Уэльса, в составе которого работают три генерирующих энергокомпании, одна передающая (национальная сетевая компания — НСК) и 12 распределительных энергокомпаний, поставляющих электроэнергию потребителям на напряжении 132 кВ и ниже.

Во всех случаях существует вертикальная интеграция (в процессе управления и планирования режимов) между всеми технологическими уровнями управления (производство, передача, распределение электроэнергии) энергосистемами и энергообъединениями.

Объединение энергетических систем, создание мощных национальных и межнациональных энергообъединений является основным направлением развития современной энергетики. Надежность энергообъединений, обеспечивающих электроснабжение потребителей на огромных территориях, является важнейшей задачей, требующей координации управления энергообъединением как единым технологическим объектом.

Вместе с тем координация работы энергообъединения как единого целого, осуществляемая посредством органов централизованного управления и координации, как правило, обеспечивает существенный экономический эффект. Примером этого может служить централизованно управляемая энергетика Франции, добившаяся в последние годы существенного повышения экономичности и надежности энергосистемы на основе реализации смелого проекта создания атомной энергетики как основы энергетической промышленности, а также постоянного совершенствования на базе современной техники технологического управления. Безусловно, заслуживает внимания и огромный положительный опыт развития в условиях централизованного экономического и технологического управления энергетики нашей страны [6].

Однако и в странах с преимущественно частной энергетикой объединение энергосистем при условии координации технологического и отчасти

Таблица 1

Показатели энергетики	Значения показателей в разных странах					
	Финляндия	Франция	ФРГ (без восточных районов)	Великобритания	США (без Гавайских островов и Аляски)	Чили
Максимум нагрузки (1989), МВт	10700	56000	72000	55000	523000	2750
Потребление электроэнергии (1989), ТВт·ч	60	341	408	270	2849	18
Общее число энергокомпаний[1]	Г–130 П–50 Р–135	1	>1000	21	>3000	Г–14 П–1 Р–37
Общее число районов технологического управления (частотой, напряжением, перетоками мощности)	1	1	8	4	153	1
Распределение электростанций по виду собственности:						
частные[2]	40 %	5 %	21 %[4]	80 %	80 %	86 %
общественные[3]	60 %	95 %	12 %[4]	20 %	20 %	14 %
Распределение электрических сетей по виду собственности:						
частные[2]	26 %	–	см. [5]	100 %	71 %	95 %
общественные[3]	74 %	100 %	—	–	29 %	5 %

Примечания. [1] Г – генерирующие; П – передающие; Р – распределяющие; [2] К частным отнесены энергокомпании с акционерным капиталом, сюда же отнесены промышленные электростанции (блок-станции); [3] К общественным отнесены энергокомпании, принадлежащие государству, общенациональным, местным и другим общественным организациям; [4] Остальные 67 % представляют энергокомпании со смешанным акционерным капиталом (частично общественные, частично частные); [5] 90 % основных электрических сетей сверхвысокого напряжения принадлежат восьми объединенным энергокомпаниям.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

экономического управления может обеспечить значительный экономический эффект. Так, например, в США годовой экономический эффект от объединения энергосистем превысил 20 млрд долл. [1].

Вместе с тем наличие большого числа независимых энергокомпаний создает возможность конкуренции, особенно в сфере производства электроэнергии, что в конечном итоге способствует повышению экономичности энергетики.

Координация. Основная задача каждого энергообъединения — обеспечение надежного электроснабжения потребителей при минимальных затратах. Для решения этой задачи необходима координация деятельности параллельно работающих энергокомпаний, включая: согласование общих принципов функционирования и развития энергообъединения (минимизация затрат на производство и передачу электроэнергии, а также затрат на сооружение новых электростанций и электрических сетей); обеспечение необходимой информацией; согласование общих критериев надежности; справедливое распределение доходов.

Координация необходима на всех уровнях временной иерархии планирования режимов и управления энергообъединением: оптимизация инвестиций (период — 10 лет), управление ремонтами (один год), выбор состава работающего оборудования (один день), управление режимом по частоте и активной мощности (менее 10 мин).

Координация планирования развития генерирующих мощностей в разных странах и энергообъединениях имеет разные формы: централизованное планирование создания всех генерирующих мощностей с целью оптимизации структуры генерации для страны в целом и для конкретного энергообъединения; координация планов, разработанных отдельными энергокомпаниями, для обеспечения надежности энергообъединения и по возможности оптимизации структуры генерирующих мощностей; сооружение совместных электростанций (энергоблоков), что позволяет нескольким энергокомпаниям разделять эффект от сооружения крупных, экономичных агрегатов. Эта форма сотрудничества широко распространена в странах с преимущественно частной энергетикой (ФРГ, США, Финляндия), где она используется как небольшими, так и крупными энергокомпаниями.

Координация планирования развития генерирующих мощностей обеспечивает значительное уменьшение суммарной мощности электростанций и большую экономию капиталовложений. Так, например, в США ежегодная экономия капиталовложений, получаемая за счет оптимизации их структуры, превышает 12 млрд долл. По расчетам французских специалистов в случае разделения единой французской энергосистемы на четыре изолированных энергообъединения потребовалось бы дополнительно 15 % генерирующей мощности [1].

Значительное повышение эффективности энергообъединения может быть достигнуто благодаря оптимизации развития основной электрической сети и его внешних связей с другими энергообъединениями и энергосистемами. Для обсуждения планов развития основных электрических сетей заинтересованные энергокомпании обычно создают двух- или многосторонние комитеты, изучающие:

перспективы развития внутренних ЛЭП с обменом информацией о текущих и будущих схемах магистральных сетей;

надежность объединенной электрической сети с учетом как внутренних схем, так и межсистемных связей.

Максимальная экономия от функционирования энергообъединения может быть обеспечена при оптимизации режима всех параллельно работающих агрегатов на основании их характеристик относительных приростов производственных затрат. Оперативная оптимизация режимов включает: выбор состава работающего оборудования, оптимальное распределение нагрузки между работающими агрегатами, планирование графиков ремонтов. Эти методы оптимизации используются как в США, так и в Западной Европе. Дополнительная прибыль, полученная в результате оптимизации режима энергообъединения в целом, распределяется между энергокомпаниями, входящими в энергообъединение.

Общая основная электрическая сеть энергообъединения, обеспечивающая взаимопомощь энергосистем в аварийных ситуациях, вместе с тем может привести к каскадному развитию аварийных нарушений, распространение их на огромную территорию. Это определяет необходимость сотрудничества параллельно работающих энергосистем в обеспечении надежности энергообъединения. Такое сотрудничество осуществляется в следующих формах: формирование общих критериев надежности; автоматическое регулирование частоты и активной мощности; согласование резервов активной мощности (вращающихся и холодных); формирование системы противоаварийного управления; обмен информацией для анализа надежности в реальном времени и для согласованного планирования ремонтов агрегатов электростанций и элементов основной электрической сети.

Сотрудничество для обеспечения надежности и экономичности необходимо также между параллельно работающими энергосистемами и энергообъединениями разных стран. Опыт подобного сотрудничества накоплен в США и Канаде (NERC, имеющий девять региональных комитетов) и в Европе (UCPTE — Совет по координации

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

производства и передачи электроэнергии, NORDEL — Объединение Северных стран).

Способы координации параллельной работы энергосистем различны в разных странах. В ряде стран (Финляндия, ФРГ, США, Чили) осуществляется обмен большими объемами информации и проводится широкий круг мероприятий по координации эксплуатации и развития систем генерации и передачи электроэнергии. С другой стороны, в приватизированной энергетике Великобритании не предусматривается особых мер по координации. Это, возможно, определяется наличием традиционных связей в ранее полностью централизованной энергетике Англии и Уэльса, в соответствии с чем сохраняется тесная связь энергокомпаний в эксплуатации.

Конкуренция. Конкуренция в энергетике существует много лет, главным образом, в топливоснабжении. Энергокомпания, сопоставляя на рынке топлива предложения поставщиков, выбирает наиболее экономичное решение. Поскольку затраты на топливо составляют более половины суммарных затрат на производство электроэнергии в энергокомпаниях, использующих тепловые электростанции, снижение расходов на топливо обеспечивает существенную экономию. Конкуренция существует между энергокомпаниями в торговле электроэнергией и мощностью, в продаже их крупным муниципальным потребителям, а также во взаимоотношениях с блок-станциями промышленных предприятий. Конкуренция проявляется в следующих областях: строительство, владение и эксплуатация электростанций; сооружение, владение и эксплуатация магистральных ЛЭП и распределительных сетей; поставка электроэнергии в пределах и за пределы энергообъединения; торговля мощностью и электроэнергией с другими энергокомпаниями и с независимыми производителями.

Соревнование между странами или районами одной страны в значительной мере зависит от государственной политики, определяющей: допустимые типы электростанций и их экологические характеристики, налоги, импорт и экспорт электроэнергии, законы по защите окружающей среды. На соревнование оказывают также влияние местные и региональные критерии надежности.

Хорошие условия для конкуренции существуют в *Финляндии*, где сочетаются частная и общественная собственность на электростанции и электрические сети и отсутствует привилегия на использование электрических сетей и на продажу больших объемов электроэнергии в пределах некоторой территории.

Во *Франции*, где государственная энергокомпания владеет 95 % электростанций и всеми основными электрическими сетями, конкуренция проявляется в следующих областях: сопоставление альтернативных вариантов по выбору районов и трасс для сооружения новых электростанций и ЛЭП; торговля электроэнергией с энергообъединениями соседних стран, сооружение мощных энергоблоков и т. д.

В *Германии* (без восточных районов) восемь объединенных энергокомпаний доминируют в системах производства и передачи электроэнергии. Более 700 локальных и региональных энергокомпаний обеспечивают распределение электроэнергии на закрепленных территориях. В отдельных случаях энергообъединения также занимаются ее распределением. Деятельность энергокомпаний строго контролируется муниципалитетами. Региональные компании ответственны за передачу и распределение электроэнергии, а в отдельных случаях — за ее производство и поставку конечным потребителям. Местные энергокомпании, главным образом, обеспечивают распределение электроэнергии конечным потребителям на муниципальном и коммунальном уровнях; некоторые из них имеют собственные электростанции. Восемь энергообъединений соревнуются за поставку и продажу электроэнергии на основе двух- и многосторонних соглашений в пределах своего региона, а также в соседние регионы и страны. Соревнование между электроснабжающими компаниями осуществляется по критериям стоимости, условий поставки и качества поставляемой электроэнергии, Каждый крупный потребитель электроэнергии может либо покупать ее, либо производить на собственных электростанциях. Энергокомпании обязаны принимать на определенных условиях излишки электроэнергии, производимой электростанциями потребителей.

Англия и Уэльс полностью изменили формы организации, владения, планирования, эксплуатации и расчетов за электроэнергию, создав новую систему, которая должна обеспечить конкуренцию благодаря возможности выбора для потребителей на основе рыночных отношений. Даже формирование баланса мощности управляется рыночными законами. Наряду с конкуренцией предусмотрено жесткое регулирование со стороны государства. Преобразования в энергетике *Великобритании* проходят нелегко, и об их эффективности говорить рано. В Великобритании практически нет ограничений для предпринимателей, намеренных построить новую электростанцию и снабжать электроэнергией крупных промышленных потребителей мощностью свыше 1 МВт. К 1998 г. будут сняты все ограничения потребителям получать электроэнергию от разных источников. Специальные контракты защищают обе стороны (продавцов и покупателей электроэнергии) от суточных и ежечасных колебаний цены в энергообъединении

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

на электроэнергию. Эти контракты являются двусторонними, а их наличие и содержание носят конфиденциальный характер. Система цен на передачу электроэнергии общеизвестна. Цены, например, зависят от места подключения к основной электрической сети нового источника мощности.

В *США* акционерные энергокомпании владеют большей частью электростанций и магистральных сетей. Роль независимых производителей электроэнергии медленно нарастает. В некоторых районах соответствующие энергокомпании несут полную ответственность за энергоснабжение потребителей. В энергетике США имеется большое число разнообразных форм конкуренции, а с другой стороны, существует жесткое регулирование со стороны государства. Государственные и регулирующие органы видят в усилении конкуренции на энергетическом рынке путь решения таких проблем, как высокая стоимость сооружения новых электростанций, в частности атомных, и чрезмерно высокий уровень резерва мощности, образовавшийся в результате недостаточной координации развития энергетики отдельными энергокомпаниями и существенного замедления роста нагрузки. Можно отметить три основных тенденции, усиливающие конкуренцию в энергетике: давление государственных регулирующих органов на энергокомпании с целью заставить их покупать электроэнергию у независимых электростанций и блок-станций; увеличивающиеся попытки крупных потребителей и региональных поставщиков электроэнергии находить других поставщиков электроэнергии в противовес энергокомпаниям, увеличивающийся спрос на доступ к электрическим сетям с целью продажи или покупки электроэнергии.

В *Чили* существует конкуренция между поставщиками электроэнергии, в то время как основная сеть принадлежит одной энергокомпании — по сути дела так же, как в Великобритании.

Во всех странах крупные потребители могут сооружать собственные электростанции для того, чтобы полностью исключить или уменьшить использование покупной электроэнергии. Наиболее эффективно в этом случае использование промышленных тепловых электростанций (ТЭЦ), работающих параллельно с энергосистемой.

Национальная энергетическая политика обычно поддерживает промышленные ТЭЦ, ветровые, солнечные и другие энергоустановки, использующие возобновляемые энергоресурсы. Так, например, в *Финляндии* на промышленных агрегатах с противодавлением производится почти треть всей электроэнергии [4]. Законодательство *США*, стимулируя создание промышленных ТЭЦ и небольших энергоустановок на возобновляемых энергоресурсах, обязывает энергокомпании покупать производимую ТЭЦ и энергоустановками электроэнергию.

Режимы работы нескольких блок-станций, принадлежащих одной компании, могут оптимизироваться совместно. Для этого, однако, они должны иметь право на использование основных сетей. Такие права предусмотрены в Великобритании, Финляндии и Чили. Подобная практика не разрешена в США, Франции и ФРГ, где избытки энергии каждой блок-станции должны продаваться энергокомпании, владеющей сетью, к которой она подключена.

Для продажи — покупки мощности характерны двусторонние соглашения. В *США* иногда используются открытые торги для получения дополнительных ресурсов мощности. При этом энергокомпания распространяет информацию о своих нуждах и просит представить предложения возможных подрядчиков. Подобные процедуры весьма разнообразны и продолжают совершенствоваться [1, 3, 5]. Опыт показывает эффективность подобных торгов. Сочетая их с собственными планами энергетического строительства, энергокомпания может сформировать оптимальную программу развития генерирующих мощностей.

В *Великобритании* имеется общий тариф на услуги по передаче электроэнергии. Этот тариф применяется ко всем поставщикам и потребителям электроэнергии. Тариф учитывает место в национальной сети, в котором электроэнергия поступает в сеть и уходит из нее. От случая к случаю в тариф включаются затраты на покрытие инвестиций для сооружения дополнительных сетевых элементов [2]. Аналогичный тариф существует в *Чили*, при этом любой предприниматель имеет право построить новую ЛЭП [1].

В США, Финляндии и ФРГ имеется много собственников основной электрической сети, которым принадлежат конкретные ЛЭП и подстанции. В *Финляндии* и *США* имеются, кроме того, ЛЭП, принадлежащие нескольким собственникам. В обеих странах многие владельцы электрических сетей имеют контрактные соглашения, по которым каждый имеет определенные права по использованию всей сети. В Финляндии и США существует конкуренция в использовании основной электрической сети. В Финляндии отсутствует общий тариф на использование электрической сети, однако существуют рекомендации по формированию цен. Контракты являются двусторонними, и потребители обслуживаются по принципу "первый пришел, первым обслуживается". В случае недостаточной пропускной способности соответствующих участков основной электрической сети пользователи рассматривают вопрос об ее усилении [4]. В США существуют тарифы на передачу электроэнергии, утвержденные Федеральной энергетической регу-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

лировочной комиссией. Эти тарифы почти всегда основаны на суммарных затратах на основную электрическую сеть.

Большим разнообразием характеризуется конкуренция в эксплуатации энергосистем. Только в Великобритании открытый рыночный процесс охватывает всю страну (см. ниже).

В *США* используются разнообразные методы диспетчерского управления параллельной работой энергокомпаний. Около 40 % всей установленной мощности электростанций США работают при централизованном диспетчерском управлении в составе четырех холдинговых энергокомпаний (American Electric Power, Texas Utility, Entergy, Central and Southwest) и пяти крупных энергообъединений (пулов) (МААС/Пенсильвания – Нью-Джерси – Мериленд, Нью-Йорк, Южный, Новой Англии, Мичиганский). Во всех этих энергообъединениях осуществляется диспетчерское управление всем объединением как единым целым.

Другой метод – последовательное диспетчирование распространен в энергокомпаниях США. При этом способе регулирования межсистемных перетоков мощности каждая энергокомпания корректирует свой график работ с учетом обменов электроэнергией и мощностью с соседними энергокомпаниями. Диспетчерские центры (ДЦ) энергокомпаний ежедневно и ежечасно уточняют взаимные обмены, последовательно приближаются к результатам централизованного диспетчирования.

Один из вариантов последовательного диспетчирования, названный "брокерским диспетчированием", был опробован в Среднеконтинентальной ОЭС и в координационной группе энергокомпаний штата Флорида. При брокерском диспетчировании с помощью межмашинного обмена информацией ДЦ энергокомпаний обмениваются предложениями о продаже и покупке электроэнергии и мощности на каждый следующий час и на следующие сутки. Используя эту информацию, диспетчеры ДЦ энергокомпаний по методу последовательного диспетчирования заключают двух- и многосторонние соглашения на поставку экономичной электроэнергии. Экономичной называется электроэнергия, вырабатываемая на работающих более экономичных агрегатах энергокомпании – продавца и принимаемая энергокомпанией – покупателем за счет разгрузки работающих, менее экономичных агрегатов [3].

Во *Франции* экономическая эффективность обеспечивается иерархической системой диспетчерского управления для всего энергообъединения как единого целого.

В *ФРГ* восемь энергообъединений конкурируют в процессе краткосрочного обмена электроэнергией.

В *Финляндии* и *Чили* осуществляется централизованная оптимизация режимов всех агрегатов по методу относительных приростов.

В *Финляндии*, *ФРГ* и *США* каждая энергокомпания (энергообъединение) несет ответственность за надежность своей энергосистемы (в частности, за баланс мощности). Ни одна из энергокомпаний не несет ответственности за электроснабжение в национальном масштабе. В этих странах разработаны общие критерии надежности, что обеспечивает координацию функционирования параллельно работающих энергосистем. Подобные критерии согласованы девятью региональными Советами надежности в США и энергокомпаниями стран, входящих в UCPTE, в Европе.

В *Великобритании* системы передачи и распределения электроэнергии проектируются, эксплуатируются и функционируют в строгом соответствии со стандартами, утвержденными правительством. Национальная сетевая компания (НСК) ответственна за готовность основной электрической сети.

Программой приватизации предусмотрена поставка электроэнергии потребителям по реальным текущим ценам, складывающимся на энергетическом рынке. Однако опыт эксплуатации показывает, что потребители предпочитают специальные долгосрочные контракты, предусматривающие поставку электроэнергии по постоянным ценам. Около 95 % электроэнергии в 1990–91 гг. поставлено именно по таким контрактам [2].

Поставка и продажа электроэнергии между соседними странами осуществляется на основании двусторонних контрактов. В *США* подобные контракты должны быть одобрены регулировочными комиссиями (Федеральной и соответствующих штатов), а также разрешены президентом. В *Финляндии* необходимо разрешение Государственного Совета на межгосударственные перетоки мощности и электроэнергии. В *Европе* и *США* перетоки через третьи энергосистемы должны оформляться как покупка и перепродажа энергии.

В рамках UCPTE обмен электроэнергией между двумя энергокомпаниями через сети третьей энергокомпании оформляется специальным контрактом, в котором третья энергокомпания выступает как партнер, представляющий транспортные услуги. Европейское Сообщество предлагает новую процедуру взаимоотношений между энергокомпаниями разных стран, облегчающую использование всеми энергокомпаниями основных электрических сетей энергообъединения. В ближайшее время эта новая процедура должна быть проверена на практике.

Существуют опасения как в Европе, так и в США относительно отрицательного влияния конкуренции на надежность всего энергообъединения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для устранения этих опасений необходимы как тщательное соблюдение согласованных правил, обеспечивающих надежность энергообъединения, так и постоянный обмен информацией, позволяющий контролировать этот процесс, а также строгие экономические санкции за нарушение условий надежности.

Механизмы интеграции координации и конкуренции в энергообъединениях. Для того чтобы обеспечить наилучшее сочетание процессов координации и конкуренции, в энергообъединениях создаются специальные структуры.

Так, например, в *Финляндии* в 1975 г. на свободной основе тремя группами собственников электростанций (энергокомпаниями, принадлежащими государству, промышленными компаниями и муниципальными энергокомпаниями) был создан Координационный Совет Производителей электроэнергии (КСПЭ). Этот Совет координирует техническое и экономическое развитие, а также совместную (параллельную) работу энергокомпаний. КСПЭ разрабатывает совместно с представителями трех образовавших его групп собственников проекты руководящих материалов по эксплуатации и развитию энергосистем. Так, например, были созданы документы, определяющие основные принципы параллельной работы электростанций, использования электрических сетей, распределения доходов. В соответствии с руководящими документами энергокомпания, участвующая в параллельной работе энергообъединения, должна вносить определенную плату (за участие в параллельной работе) за обмен мощностью и электроэнергией, регулирование напряжения, использование резервной мощности.

Планирование развития энергообъединения Финляндии осуществляется на основе разработок каждой энергокомпании, стремящейся удовлетворить перспективные потребности своих потребителей. Соответствующие контракты заключаются на 10 лет вперед.

Осуществляется предусмотренное законом лицензирование новых электростанций и сетевых объектов. Контроль за ценами на электроэнергию и объемами ее производства не осуществляется, хотя злоупотребление монопольным положением энергоснабжающих предприятий запрещено законом о конкуренции. На законных основаниях любое юридическое лицо может построить новую электростанцию или ЛЭП, полностью отвечая за свои действия. Не требуется специального разрешения на строительство электростанций мощностью ниже 250 МВт.

Планирование развития энергетики осуществляется под контролем Районных Плановых Комитетов (РПК), в состав которых входят представители энергокомпаний, других производителей электроэнергии, потребителей электроэнергии. Функционируют 20 РПК, созданных по территориальному принципу. РПК не реже одного раза в три года разрабатывают планы сооружения электростанций (мощностью до 250 МВт) и объектов основных электрических сетей. Эти планы утверждаются Министерством торговли и промышленности.

КСПЭ играет также важную роль в координации планирования на добровольной основе развития всего энергообъединения. Это осуществляется в соответствии с принципами, согласованными группами собственников, входящими в состав Комитета.

Все члены КСПЭ представляют свои планы сооружения новых мощностей, основанные на их собственных оценках. Сопоставляя эти материалы, КСПЭ формирует общий план, оценивая балансы мощности, электроэнергии и энергоресурсов в целом по энергообъединению. При этом КСПЭ стремится найти наиболее экономичные решения. В соответствии с этим КСПЭ рекомендует проведение необходимых двусторонних рассмотрений с целью нахождения оптимального решения. Возможны разные формы кооперации, которые рассматриваются при двусторонних переговорах, например:

покупка электроэнергии и задержка в связи с этим на некоторое время сооружения новой электростанции (энергоблока);

сооружение более мощной электростанции с созданием одновременно новой компании или при совместном участии нескольких собственников в сооружении и последующей эксплуатации объектов (в течение определенного срока или постоянно).

Подобная система, сочетающая конкуренцию и координацию, функционирует в Финляндии до настоящего времени. В случае опасности того, что в процессе планирования не будут удовлетворены критерии надежности, необходимые решения обычно определяются на добровольной основе.

Электрисите де Франс (ЭДФ) функционирует как государственная энергокомпания с 1946 г. Проектирование развития, планирование режимов и управление французской энергосистемой осуществляется на общенациональном уровне. При этом обеспечивается высокий уровень стандартизации оборудования, схем и режимов его использования, что дает большой экономический эффект.

Конкуренция проявляется в следующих областях:

электричество заменяет другие виды энергии;

ЭДФ конкурирует с другими энергокомпаниями стран, входящих в состав UCPTE, и в перспективе может конкурировать с другими (самостоятельными) производителями электроэнергии.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В *ФРГ* восемь основных энергообъединений производят около 80 % электроэнергии, потребляемой в Германии. Энергосистемы Восточной части Германии и г. Берлин с суммарным максимумом нагрузки около 16 тыс. МВт пока не подключены на параллельную работу с энергообъединением Западной части Германии. Дальнейшие сведения относятся только к энергообъединению Западной части Германии, в которой восемь объединенных энергокомпаний образовали в 1948 г. Немецкое объединенное общество (НОО) по энергетике. Это общество обеспечивает согласование деятельности партнеров по энергообъединению. Так, например, планы каждого из членов НОО, оказывающие влияние на соседнее объединение, должны быть согласованы в рамках НОО.

Каждая компания отвечает за функционирование принадлежащих ей электростанций и электрических сетей. Соответственно каждая компания имеет свой ДЦ. Центрального ДЦ для ФРГ не существует.

Объединенные энергокомпании с учетом конкуренции и рыночных цен согласовывают краткосрочные обмены мощности и электроэнергии. В процессе рыночных отношений сочетаются принципы сотрудничества и конкуренции. Существует, например, конкуренция между производителями электроэнергии при заключении новых контрактов на электроснабжение больших муниципалитетов. Значительная конкуренция существует также в части использования электрической и других видов энергии.

Объединенные энергокомпании имеют право сооружать новые электростанции вне своих районов (в том числе и за рубежом) и подключать их к своим сетям посредством сооружения своих ЛЭП. Подобные решения позволяют более эффективно использовать энергетические ресурсы.

Потребители электроэнергии имеют право сооружать свои собственные энергоустановки. Энергокомпании на определенных условиях обязаны принимать от таких энергоустановок избытки вырабатываемой ими электроэнергии.

В недавно приватизированной энергетике *Великобритании*, в которой поставлена цель оптимизации функционирования через формируемый энергетический рынок, существуют следующие формы координации и конкуренции [2]. Для стимулирования конкуренции в производстве электроэнергии цены, устанавливаемые производителями, не подлежат регулированию. Все производители электроэнергии мощностью 10 МВт и выше должны продавать мощность и электроэнергию через энергообъединение (пул), которое действует как единый рынок с клиринговыми ценами. Управляет энергообъединением НСК, которая, за исключением входящих в ее состав гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), не является членом энергообъединения и не может ни продавать, ни покупать электроэнергию.

Производители электроэнергии, намеренные продавать свою продукцию, сообщают НСК цену на электроэнергию, которая может генерироваться каждым агрегатом на каждый получасовой отрезок следующих суток. Эти цены могут отражать, а могут и не отражать реальные затраты соответствующей энергокомпании на производство электроэнергии. В НСК формируется на каждый получасовой период следующих суток список предложений на продажу электроэнергии: на первом месте списка указывается агрегат, по которому предлагается самая дешевая электроэнергия, на последнем — самая дорогая. На основании этого списка диспетчер национального диспетчерского центра осуществляет последовательную загрузку агрегатов, начиная с того, который будет поставлять самую дешевую электроэнергию, а разгрузку (при снижении электропотребления) — с агрегата, который поставляет самую дорогую электроэнергию.

Поставка электроэнергии всеми агрегатами оплачивается по одной цене, равной объявленной цене электроэнергии, поставляемой самым неэкономичным агрегатом из числа участвовавших в покрытии нагрузки в течение соответствующего получасового периода.

Поскольку в отдельных случаях загрузке наиболее экономичных агрегатов могут препятствовать сетевые ограничения, диспетчер формирует два списка, определяющих порядок загрузки агрегатов: первый — исходный, содержащий перечень агрегатов без учета сетевых ограничений, и второй — с учетом пропускной способности электрической сети. Последний список используется для формирования графика нагрузки, а поставка электроэнергии каждым из перечисленных в нем агрегатов оплачивается так, как было указано выше. Электроэнергия, не поставленная агрегатами вследствие сетевых ограничений, оплачивается как за потерю прибыли. Таким образом, сетевые ограничения увеличивают стоимость электроэнергии.

Элемент конкуренции за использование пропускной способности основной электрической сети присутствует, когда новые пользователи хотят использовать или расширить использование основной сети. В соответствии с законом об энергетике (1989 г.) НСК, владеющая и управляющая основной электрической сетью 400/274 кВ, имеет право организовывать конкуренцию в производстве и поставке электроэнергии. НСК осуществляет это право без дискриминации отдельных пользователей, получивших разрешение на пользование основной сетью. Право на подключение реализует-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ся по принципу: "первый пришел – первым обслуживается". Пользователям, подавшим соответствующую заявку позже, возможно, придется подождать усиления соответствующего участка сети. Сложности с получением разрешения на сооружение новой воздушной ЛЭП порой ограничивают реализацию мощности уже построенных электростанций.

До приватизации большинство потребителей получали электроснабжение от распределительной энергокомпании (РЭК), обеспечивающей электроснабжение соответствующего района. Теперь же существует открытая конкуренция за подключение к сетям одной из РЭК потребителя мощностью более 1 МВт. Это ограничение будет снижено к 1994 г. до 100 кВт и полностью исключено в 1998 г. В результате любой производитель электроэнергии сможет иметь контракт на снабжение потребителя через основную сеть НСК и распределительную сеть РЭК, к которой он подключен. Аналогично любой РЭК может заключить контракт на снабжение электроэнергией любого потребителя, подключенного к распределительным сетям другого РЭК, через соответствующие распределительные и основную сеть.

В *США* некоторые координационные группы и энергообъединения (пулы) имеют соглашения между энергокомпаниями на работу со свободными перетоками мощности по общей основной сети. Право это распространяется на членов группы (пула), участвовавших в инвестировании средств в создание основной сети.

В Западном энергообъединении (пуле) заключено между энергокомпаниями новое многостороннее соглашение с целью получения дополнительного экономического эффекта. Участниками этого нового Соглашения являются как энергокомпании, владеющие участками основной сети, так и энергокомпании, не владеющие такими участками, но нуждающиеся в использовании этой сети. Целью этого Соглашения является способствование открытой конкуренции среди его участников за расширение участия в использовании сети без нарушения ранее заключенных соглашений.

В соответствии с новым Соглашением пул осуществляет с помощью ЭВМ и средств передачи данных обслуживание участников Соглашения информацией о предлагаемых поставках и заявках на поставку экономичной электроэнергии с указанием ориентировочных цен, о краткосрочных поставках мощности, составе работающих агрегатов и состоянии электрической сети. Все это относится к оборудованию, использование которого не предусмотрено ранее заключенными соглашениями.

Анализ функционирования новой информационной системы в течение двух лет показал, что обмены электроэнергией в энергообъединении увеличились за два года на 9078 ГВт·ч и суммарный чистый доход составил 71 млн долл., что соответствует экономии около 0,2 % от суммарных производственных затрат.

Попытки потребителей получить электроэнергию от других энергокомпаний и попытки поставщиков переманить чужих потребителей обычно наталкиваются на существенные возражения. Когда такими потребителями являются распределительные энергокомпании (такие, например, как муниципальные энергокомпании и кооперативы), передающие энергокомпании оказываются перед необходимостью осуществления "кольцевых" поставок, связанных с перепродажей электроэнергии. При этом обычно высказываются опасения по поводу новых, возможно, недостаточно проработанных режимов с точки зрения надежности других потребителей. В общем случае "кольцевое" обеспечение потребителей не допускается регулирующими и правительственными органами. Представляется также, что подобные мероприятия, хотя и позволяют отдельным участникам получить дополнительную прибыль, в целом неэффективны и отрицательно сказываются на экономике многих потребителей.

Чили. Более 85 % электростанций и основных сетей и почти 100 % распределительных сетей находятся в частном владении. Такое положение явилось результатом десятилетней политики, ориентированной на повышение эффективности всех звеньев энергетического производства. В результате экономическую основу энергетики составляют несколько акционерных энергокомпаний.

Большую роль в формировании частной энергетики сыграла Национальная энергетическая Комиссия (НЭК), образованная в 1978 г. как управление, содействующее правительству в формировании планов и политики развития и функционирования энергетической отрасли. В результате правительство перестало осуществлять регулирование энергетикой и функции собственника по отношению к энергосистеме.

В течение 1978–81 гг. были определены основные принципы планирования развития энергетики и формирования тарифов. В 1982 г. была сформирована юридическая база изменений в энергетике. Затем, в 1985 г., были определены основные принципы оптимизации режимов энергосистемы, а в 1989 г.– общего использования основной сети.

В 1978 г. НЭК провела работу по координации инвестиций. В настоящее время, когда почти вся энергетика приватизирована, НЭК продолжает играть координирующую роль и определяет перспективные задачи и потребности. Возможно, в будущем будет создан специальный Координаци-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

онный Комитет, открытый для всех энергокомпаний.

Оперативную координацию работы электростанций и использования основной сети играет ДЦ по управлению нагрузкой, созданный всеми генерирующими предприятиями. ДЦ по согласованию со всеми учредителями осуществляет среднесрочное, краткосрочное и оперативное планирование режимов. На ДЦ рассчитываются также краткосрочные значения граничных цен для определения стоимости обменов электроэнергией между предприятиями. ДЦ формирует графики капитальных ремонтов основного энергетического оборудования.

Каждый производитель электроэнергии, использующий основную сеть, вносит за это определенную плату с учетом "области основной сети", используемой для передачи выработанной им электроэнергии. Вносимая плата предназначена для компенсации основных инвестиций в магистральную сеть и затрат на эксплуатационное обслуживание сети, не полностью покрываемых платой за электроэнергию.

Соответствующая область основной сети, относящаяся к данной электростанции (агрегату), определяется путем идентификации установок, для которых происходит увеличение потока мощности при удельном увеличении выработки электроэнергии данной электростанцией (агрегатом), сопровождаемое снижением выработки на других электростанциях (агрегатах). Моделирование с целью определения соответствующих областей основной сети производится каждые пять лет с использованием ЭВМ. Очевидно, что подобные исследования необходимо проводить более часто в случае существенных изменений в схеме сети. После определения и внесения соответствующей платы каждый производитель электроэнергии может продавать электроэнергию любому потребителю в "своей" области основной электрической сети. Основу описанного метода расчетов "областей" основной сети представляют расчеты естественного потокораспределения в оптимальном режиме контролируемой энергосистемы. В случае, если производитель электроэнергии намерен продавать ее не в "своей" области, дополнительная плата за использование основной сети определяется специальными расчетами.

Заключение. Рассмотрена структура экономического управления энергетикой в шести странах: от полностью централизованной системы управления во Франции до Великобритании, где энергетика Англии и Уэльса базируется на рыночных отношениях. В остальных четырех странах (Финляндия, ФРГ, США и Чили) функционирует смешанная структура, сочетающая механизмы координации и конкуренции. Имеющаяся информация не позволяет сделать кардинальные выводы о необходимых сочетаниях механизмов координации и конкуренции и оценить конкретные мероприятия как в той, так и в другой области, тем более, что результаты одних и тех мероприятий могут быть существенно различны. Вместе с тем на основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие **выводы**:

1. По мере увеличения числа предприятий, участвующих в производстве и передаче электроэнергии, становится необходимым создание специальных организаций, координирующих развитие и функционирование энергосистем.

2. Сохраняются опасения о снижении уровня надежности при усилении конкуренции между энергокомпаниями. Считается необходимым применять экономические штрафы за нарушение критериев надежности.

3. Ориентацию только на рыночные отношения как движущую силу в развитии энергетики в большинстве стран считают неправильной. Не может быть одобрена ориентация на рыночные отношения при эксплуатации и развитии основной электрической сети. Эта область требует координации.

4. Основными областями конкуренции в энергетике является конкуренция между: видами топлива и его поставщиками; энергокомпаниями в торговле электроэнергией для третьей стороны; энергокомпаниями и независимыми производителями электроэнергии; видами используемой конечными потребителями энергии; между энергокомпаниями за новых потребителей; между строительными компаниями за сооружение новых электростанций, ЛЭП и подстанций; между производителями электроэнергии, работающими в одном энергообъединении; между владельцами электрических сетей.

5. В большинстве стран представители правительства активно участвуют в совершенствовании систем управления энергетикой.

Приложение. Сведения о формах координации и конкуренции, существующих в разных странах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 2

Формы координации среди энергокомпаний	Страны					
	Финляндия	Франция	ФРГ	Великобритания	США	Чили
А. В планировании развития						
1. Обмен информацией						
1.1. Прогноз нагрузки	С	С[2]	С	С[3]	С	С
1.2. План развития генерации	С	С[2], С[4]	С	Н	С	С
1.3. План развития основных сетей	С	С[2], С[4]	С	Н	С	С
1.4. План инвестиций в конкретные объекты	С	Н	Н	Н	О	С
1.5. Капиталовложения, включая норму прибыли	Н	Н	Н	Н	О	Н
1.6. Перспективная стоимость топлива	Н	Н	Н	Н	О	Н
1.7. Необходимые мощности	С	Б	С	Н	О	С
2. Координация перспективных планов						
2.1. Удовлетворение совместных критериев надежности	С	Н	С	С[8]	С	С
2.2. Выбор наиболее эффективных электростанций на региональной основе	С	Б	С	Н	С	С
2.3. Объединенные координационные комитеты:						
для генерации	С[5]	С[4]	С	Н	С	Б
для основной сети	С[5]	С[4]	С	С[9]	С	Б
2.4. Совместное владение						
в генерации	С	С	С	Б	С	В
в основной сети	С	Н	С	Н	С	Б
2.5. Согласованное разделение резервов	С	С[7]	С	С	С	С
2.6. Работа со свободными перетоками	С	Н	Н	С	С[10]	С
2.7. Распределение инвестиций	С[6]	Н	С	Н	С[11]	Н
2.8. Межсистемные обмены и торговля:						
мощностью	С	С	С	С	С	С
электроэнергией	С	С	С	С	С	С
соглашение об использовании основной сети	С	С	С	С	С[11]	С
Б. В эксплуатации						
1. Обмен информацией						
1.1. Текущая нагрузка	Н[12]	Н	С	С	С	С
1.2. Ожидаемая нагрузка в ближайшем будущем	Н[12]	Н	С	С	С	С
1.3. Относительный прирост стоимости электроэнергии	С	Н	Н	Н	С[16]	С
1.4. Относительный прирост производственных затрат	С	Н	Н	Н	О	Н
1.5. Состояние генераторов:						
текущее и в ближайшей перспективе	С	На	С	С	С	С
1.6. Затраты на пуск и останов агрегатов	С	Н	Н	С	О	С
2. Графики ремонтов:						
2.1. Генераторов	С	Н	С	С[15]	С	С
2.2. Элементов основной сети	С	С	С	С[15]	С	С
3. Диспетчирование						
3.1. Координация состава работающих агрегатов	С	Н	Н	Н	О, Б	С
3.2. Распределение вращающегося резерва	С	С[7]	С	С	С	С
3.3. Регулировочная мощность	С	С[14]	С	С	О	С
4. В аварийных условиях						
4.1. Участие в генерации мощности	С	С	С	С	С	С
4.2. Снижение напряжения	Н	Н	Н	С	О	С
4.3. Отключение нагрузки	С	С	С	С	С	С

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Продолжение табл. 2

Формы координации среди энергокомпаний	Страны					
	Финляндия	Франция	ФРГ	Великобритания	США	Чили
5. Права на использование основной сети и "кольцевание"	контракты	переговоры	контракты	С	С[11]	С
В. При разделении доходов						
1. Основанная на долгосрочных оценках планов независимых энергокомпаний	С[18]	Н	Н	Н	С[20]	Н
2. Разделение капитальных затрат						
2.1. Каждая компания имеет собственные установки	С	С	С	С	С[20]	С
2.2. Общая собственность:						
генераторов	С	С	С	Н	С[20,21]	Б
основной сети	С	Н	С	Н	С[20,21]	Б
3. Распределение затрат на электроэнергию						
3.1. Равномерное	С	Н	Н	–	С	Н
3.2. Затраты плюс процент	С	Н	Н	С[19]	С[20]	Н
3.3. Договорное	С	–	С	–	С[20]	Н

Примечания. С – существует; О – используется в ограниченном объеме; На – используется только в части надежности; В – внедряется; Б – в будущем; Н – не применяется; координация осуществляется: 1 – только с энергокомпаниями других стран; 2 – в основном двусторонние; 3 – через НСК; 4 – в пределах Евроэлектрик (европейская энергетическая организация); 5 – осуществляется КСПЭ; 6 – в отдельных случаях; 7 – двусторонние соглашения; 8 – только для основной сети; 9 – только между НСК и Шотландией; 10 – в пределах некоторых объединений; 11 – на переговорах; 12 – только в части максимума нагрузки; 13 – через UCPTE; 14 – в части 2,5 % первичной генерирующей мощности, как член UCPTE; 15 – между НСК и энергокомпаниями-производителями; 16 – координация, вероятно, уменьшится в будущем; 17 – принципы оперативного управления устанавливаются на национальном уровне; 18 – от случая к случаю; 19 – автоматически через цену пула; 20 – общее владение становится более частым; 21 – двусторонние соглашения осуществляются на основе КЭСП.

Таблица 3

Формы конкуренции	Финляндия	Франция	ФРГ	Великобритания	США	Чили
I. Между энергокомпаниями						
А. В планировании развития						
1.1. Разработка альтернативных предложений по дополнительной:						
генерации	С	Б	С	–	С	С
основной сети	С	Б	С	–	С	С
1.2. Для долгосрочных продаж /поставок:						
мощности	С	С	С	С	С	С
электроэнергии	С	С	С	С	О	С
1.3. Для определения прав на использование основной сети	С	С	С	С[3]	С	Б
Б. В эксплуатации						
1.1. Для краткосрочных продаж:						
мощности	Н	С[1]	С[2]	С	С	С
электроэнергии	Н	С[1]	С[2]	С	С	С
II. Между производителями электроэнергии						
А. В планировании развития						
1.1. Используются ли открытые цены	Н	Н, Б	Н	С[4]	С[6]	Н
1.2. Используется ли доступ к сети за плату	Н	Н	Н	Н	Н, Б	Н
Б. В эксплуатации						

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Продолжение табл. 2

Формы конкуренции	Финляндия	Франция	ФРГ	Великобритания	США	Чили
1.1. Для определения приоритета в продаже энергии	Н	Н	Н	С	Б	Н
1.2. Для использования сети	Н	Н	Н	С[5]	Б	Н
1.3. Для сохранения в работе во время минимума нагрузки	–	Н	Н	С[5]	Б	Н
1.4. Графики ремонтов	Н	Н	Н	Н	Б	Н
III. Между передающими компаниями						
А. Контракты	С	Н	Н	Н	С	Н
Б. Способность покупать и продавать услуги по передаче энергии	С	Н	Н	Н	С[7]	Н
В. Права на использование находящихся вне обслуживаемой территории:						
генерации	С	Н	Н	С	С	С[8]
основной сети	С	Н	Н	Н	переговоры	С[9]
IV. Среди потребителей						
А. Право крупных распределительных компаний получать электроэнергию от разных источников	С	Н	Н	С	С	С
Б. Право крупных промышленных потребителей получать электроэнергию от разных источников	С	Н	Н	С	Н	С

Примечания. С, Н, Б, О – то же, что в табл. 2; 1 – в перспективе будет организован обмен возможными ценами; 2 – используется информационная система на базе ЭВМ для информации о ценах на мощность/электроэнергию; 3 – только на первом этапе для существующей пропускной способности. В перспективе необходимы дополнительные инвестиции в основне сети; 4 – на суточной основе; 5 – приоритет определяется предложенными ценами; 6 – расширяется практика использования; 7 – при наличии готовой мощности цена является определяющей; 8 – использование основной сети разрешается после предварительной оплаты; 9 – понятие конкретной территории, принадлежащей генерирующим и передающим энергокомпаниям, не существует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **An international** view on competition and coordination / J. A. Casazza, R. Agurto, E. M. Eunson et al.– CIGRE, Session 1992, Paper 37–101.

2. **Drummond S. M., Lowen J. R., Lumb D.** The use of interconnections to England and Wales.– CIGRE, Session 1992, Paper 39–202.

3. **Palermo P. J., Bulley R. A., Woodward T. R.** The effects of coordinated operation on energy exchanges, system operation and data exchange requirements: a comparison of methods used in the USA.– CIGRE, Session 1992, Paper 39–204.

4. **Viheriavaara H., Kontu A.** Experience of competition and coordination in the Finnish power system.– CIGRE, Session 1992, Paper 37–102.

5. **Maliszewski R. M., Pasternack B. M.** Coordinated electric planning and operation in the context of a competitive environment.– CIGRE, Session 1992, Paper 37–103.

6. **The USSR** United Power Grid: the experience and problems of development / Y. Antimenko, V. Jershevich, Yu.Rudenko et al.– CIGRE, Session 1992, Paper 37–201.

[08.10.92]

Использование методов теории подобия в прогнозировании выработки электроэнергии[1]

АСТАХОВ Ю. Н., ЗУБАНОВ К. К., КАВЧЕНКОВ В. П., ПАШЕНКОВА Т. Е.

Введение. Особое значение оценки характера и перспектив развития энергетики определяется ее исключительной ролью в экономике и социальной сфере, научно-техническом прогрессе и решении экологических проблем [1]. Поэтому для эффективного и планомерного развития народного хозяйства и социальной сферы необходимы поисковый и дальнесрочный прогнозы [2] развития энергетики, в которой все большее место занимает

[1] Статья печатается в порядке дискуссии. Редакция отмечает, что статья была написана в период существования СССР.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

электроэнергетика. Сейчас в мире ее доля составляет около трети всей потребляемой энергии, а к 2000 году достигнет половины [3]. Вместе с тем, оценивая сложное положение электроэнергетической отрасли в СССР, необходимо по-новому подойти к вопросам прогнозирования производства электроэнергии, основываясь в большей степени на объективных характеристиках этих процессов, которые, как показало данное исследование, имеют в ряде стран большую общность, отличаясь только масштабами и временными сдвигами.

В данной статье рассмотрены три тезиса.

1. В первом приближении характеристика производства электроэнергии в некоторой (условно замкнутой) системе (стране) предопределяется решением дифференциального уравнения, отражающего природный и социально-экономический потенциал данной системы при существующей технологии производства электроэнергии. Поскольку действие этих факторов имеет большую инерционность, решение устойчиво на больших временных интервалах.

2. При неизменности отмеченных факторов характеристика производства электроэнергии может стремиться к некоторому условному пределу или области насыщения, отражая известный закон энергоэнтропики [4].

3. Подобие динамических характеристик производства электроэнергии в разных странах позволяет обобщить их в одной критериальной функции, определяя развитие электроэнергетики в разных странах в прошлом, настоящем и будущем.

Для построения методики прогнозирования использована информация о развитии электроэнергетики в СССР. Это в первую очередь связано с существованием значительного объема общедоступных исходных данных, прошедших предварительную обработку с единых позиций в подразделениях Госкомстата [5].

Тенденции развития электроэнергетики в СССР. Для выявления тенденции развития построим в логарифмическом масштабе выработку электроэнергии (ЭЭ) по годам (рис. 1). Качественный анализ приведенного графика позволяет сделать вывод о том, что процесс развивается с уменьшением годовых темпов прироста. Как известно, постоянство темпов прироста характеризует экспоненциально растущие последовательности. В свою очередь, их изображение в логарифмическом масштабе дает прямую. В приведенном на рис. 1 графике $\ln Э(t)$ с ростом t происходит отклонение от прямой к оси абсцисс. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в данном случае отсутствует экспоненциально растущая последовательность. Для проведения количественного анализа процесса, в частности, для выявления темпа годового прироста, используем понятие логарифмической производной α. Ее приближенное выражение через разностное отношение имеет вид:

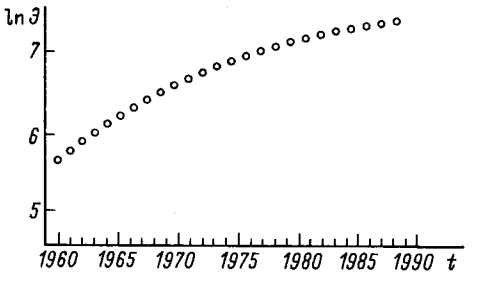


Рис. 1. Выработка по годам электроэнергии в СССР

$$\alpha_{i+1} = \frac{\ln Э_{t_{i+1}} - \ln Э_{t_i}}{\Delta t}, \qquad (1)$$

где $Э_{t_{i+1}}$, $Э_{t_i}$ — величина произведенной ЭЭ соответственно в $(i+1)$-м и i-м году; Δt — интервал времени $t_{i+1} - t_i$.

При непрерывном (функциональном) представлении процесса и $\Delta t \to 0$ логарифмическая производная определяется как $\alpha = \frac{d \ln f(t)}{dt}$.

В табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) значения α на период 1960—1990 гг. для $\Delta t = 1$.

Согласно рекомендациям [6] была проанализирована также информация по периодам продолжительностью 5 лет. Определенные для интервала 1930—1990 гг. значения α даны в табл. 2.

Предварительный анализ изменения α позволяет сделать важные для прогнозирования производства ЭЭ в СССР выводы. Во-первых, темпы прироста ЭЭ падают, что характерно и для общего потребления энергии в мире: если в 60-х годах оно увеличивалось на 5—6 % в год, то в последнее время, и по прогнозам специалистов — вплоть до 2000 г., прирост не превысит 2—3 % в год [3]. Причем прослеживается устойчивая закономерность уменьшения логарифмической производной во времени. Аппроксимация этой закономерности рядом возможных функций показала, что наилучший результат дает экспоненциальная функция вида:

$$\alpha = A \cdot \exp(-\gamma t), \qquad (2)$$

где A и γ — коэффициенты аппроксимации; t — номер года от начала отсчета.

Конкретные значения A и γ определяются на основе обработки исходной информации.

Во-вторых, выявленные тенденции процесса производства ЭЭ с экспоненциально затухающими темпами указывают на наличие определенного

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Выработка электроэнергии в СССР

Год	Выработка электроэнергии, млрд·кВт·ч		Погрешность аппроксимации, %	Логарифмическая производная α
	Статистическое значение	Расчетное значение		
1960	292,30	287,61	−1,61	–
1961	327,60	323,89	−1,13	0,1159
1962	369,30	362,55	−1,83	0,1147
1963	412,40	403,51	−2,16	0,1123
1964	458,90	446,66	−2,67	0,1054
1965	506,70	491,88	−2,92	0,0927
1966	544,70	539,03	−1,04	0,0825
1967	587,70	587,97	0,05	0,0770
1968	638,30	638,52	0,03	0,0788
1969	689,90	690,52	0,09	0,0772
1970	740,90	743,79	0,39	0,0754
1971	800,40	798,15	−0,28	0,0725
1972	857,40	853,42	−0,46	0,0704
1973	915,00	909,42	−0,61	0,0658
1974	975,00	965,97	−0,93	0,0639
1975	1038,60	1022,90	−1,51	0,0650
1976	1112,00	1080,04	−2,87	0,0551
1977	1150,10	1137,23	−1,12	0,0487
1978	1201,90	1194,31	−0,63	0,0358
1979	1238,20	1251,15	1,05	0,0393
1980	1293,90	1307,59	1,06	0,0328
1981	1326,00	1363,53	2,83	0,0325
1982	1365,10	1418,83	3,94	0,0301
1983	1416,00	1473,40	4,05	0,0395
1984	1493,00	1527,14	2,29	0,0410
1985	1544,00	1579,96	2,33	0,0405
1986	1599,00	1631,78	2,05	0,0363
1987	1665,00	1682,55	1,05	0,0331
1988	1705,00	1732,20	1,60	0,0293
1989	1722,00	1777,09	3,19	0,0337
1990	1726,00	1827,95	5,90	0,0023

энергетического предела. Его существование вполне объяснимо, так как энергетические возможности цивилизации, какой бы мощной она ни была, ограничены хотя бы для того, чтобы сохранить среду обитания. Однако конкретная величина предела, естественно, зависит, при прочих равных условиях, от используемой технологии производства энергии, ограничений по экологии и ряда других факторов.

Математическое описание процесса производства ЭЭ в СССР. Изменение логарифмической производной α вырабатываемой в СССР электроэнергии имеет вид:

$$\alpha_{t_i} = 0{,}12 \exp\left[-0{,}0536(t_i - t_{\text{нач}})\right],$$

Таблица 2

Значения логарифмической производной α выработки электроэнергии в СССР по пятилеткам

Пятилетка, года	Значение α
1930–1935	0,2268
1935–1940	0,1128
1945–1950	0,1520
1950–1955	0,1243
1955–1960	0,1109
1960–1965	0,1106
1965–1970	0,0769
1970–1975	0,0670
1975–1980	0,0520
1980–1985	0,0353
1985–1990	0,0229

т. е. $A = 0{,}12$, а $\gamma = 0{,}0536$.

За начальную точку отсчета $t_{\text{нач}}$ может быть принят любой год анализируемого статистического ряда. Однако для некоторых стран авторы располагали данными начиная только с 1960 г. Поэтому для единообразия он и был принят за начальную точку отсчета, т. е. $t_{\text{нач}} = 1960$ г.

С учетом (1) логарифм абсолютного уровня выработки ЭЭ определится следующим образом:

$$\ln Э_t = \ln Э_0 + \sum_{t_i = t_0}^{t} \alpha_{t_i} \Delta t,$$

где $Э_t$ – выработка ЭЭ в момент времени t; $Э_{t_0}$ – выработка ЭЭ в момент t_0, принятый за точку отсчета; α_{t_i} – логарифмическая производная в момент времени t_i; Δt – интервал времени, в течение которого α неизменна, в данном случае $\Delta t = 1$ г.

При изменении α согласно (2) получим:

$$\ln Э_t = \ln Э_{t_0} \sum_{t_i = t_0}^{t} A \cdot \exp\left(-\gamma(t_i - t_{\text{нач}})\right). \quad (3)$$

Для оценки суммы в (3) перейдем к интегралу:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \sum_{t_i = t_0}^{t} A \cdot \exp\left(-\gamma(t - t_{\text{нач}})\right)\Delta t = \int_{t_0}^{t} A \cdot \exp\left(-\gamma(t_i - t_{\text{нач}})\right) dt_i. \quad (4)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Раскрывая (4), найдем выражение для оценки значения логарифма вырабатываемой ЭЭ в любой момент времени t:

$$\ln Э_t = \ln Э_{t_0} - \frac{A}{\gamma} \exp\left(-\gamma(t_i - t_{нач})\right)\Big]_{t_0}^{t}. \quad (5)$$

Абсолютное значение ЭЭ определится из выражения:

$$Э_t = Э_{t_0} \cdot \exp\left[- \frac{A}{\gamma} (\exp(-\gamma(t - t_{нач})) - \right.$$

$$\left. - \exp(-\gamma(t_0 - t_{нач}))) \right]. \quad (6)$$

На рис. 2 представлен график $Э_t = f(t)$ для СССР[2], построенный по модели (6). Из рассмотрения (6) следует, что коэффициенты A и γ играют решающую роль в предопределении конкретных числовых значений α во времени. Этим обстоятельством и вызван столь тщательный подход к выявлению их значений. При прочих равных условиях с учетом возможности распространения созданной методики на другие страны выбрано значение Δt, равное 1 г. В этом случае для СССР $A = 0{,}12$ и $\gamma = 0{,}0536$.

Предлагаемая модель (6) в силу своей специфики позволяет изучить процесс производства электрической энергии на достаточно большом временно́м интервале. Естественно, возникает вопрос о разумном периоде, который может быть использован для дальнесрочного прогнозирования. Согласно рекомендациям [6], как правило, этот период ограничен 25—30 годами. Поэтому все, что находится за пределами 2015—2020 гг., следует отнести к поисковому прогнозированию, или футурологии [6], методы которой при едином подходе к обработке исходной информации ряда стран могут позволить проводить анализ и за указанными пределами. С учетом сделанных оговорок оказывается возможным рассмотрение условных пределов выработки, вытекающих из рассмотрения модели (6) при $t \to \infty$.

При футурологических исследованиях одновременно с выявлением значения условного предела развития процесса во времени целесообразно назначать зону равнозначности. В нашем случае она выбрана равной ±5 %. Отметим, что величина зоны хотя и произвольна, но должна быть единой для всех изучаемых стран.

С изложенных позиций рассмотрим результаты, приведенные на рис. 2.

Реальные значения произведенной ЭЭ практически лежат на полученной зависимости (максимальная погрешность менее 3 %). Сплошной горизонтальной линией обозначено среднее значение условного предела выработки ЭЭ, равного 2800 ТВт·ч в год.

На рис. 2 показана также зона отклонения прогнозируемых уровней выработки ЭЭ в СССР от среднего по модели (6) при случайных вариациях $Э_{t_0}$ (разных точках отсчета). Распределения прогнозируемых показателей имеют нормальный закон, параметры которого в каждом сечении времени различаются только масштабами, так как выполняется условие линейного их подобия:

$$\pi = \frac{m_{Э_{t_i}}}{\sigma_{Э_{t_i}}} = 75 = \text{idem}, \quad (7)$$

где $m_{Э_{t_i}}$, $\sigma_{Э_{t_i}}$ — соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение прогнозируемой величины.

С учетом (7) и того, что при нормальном распределении разброс значений случайной величины составляет $\pm 3\sigma$, получаем одинаковую в относительных единицах зону отклонения, равную ±4 % от среднего значения прогнозируемого уровня.

Дифференциальные модели прогнозирования. В теории прогнозирования известно, что дифференциальные уравнения позволяют глубоко изучить динамический процесс формирования про-

[2] Хотя СССР и разделился на ряд самостоятельных государств, авторы считают, что энергетика этих государств должна быть единой и объединена в Единую энергетическую систему. Поэтому возможно и целесообразно прогнозирование процессов во всей системе в целом, что не исключает рассмотрения развития отдельных ее регионов.

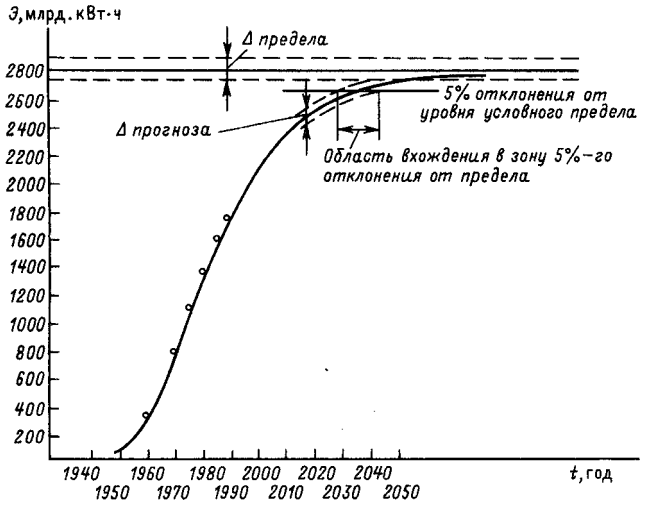


Рис. 2. Характер изменения во времени $Э_t$, выявленный на основе анализа модели (6)

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

гнозируемой величины, рассмотреть влияние известных параметров модели на устойчивость прогнозируемого процесса [7].

В научно-техническом и отраслевом прогнозировании часто используется экспоненциальная модель роста, что означает пропорциональность прироста показателя за единицу времени достигнутому уровню с неизменным коэффициентом пропорциональности:

$$\frac{d\Э_t}{dt} = \alpha \cdot \Э_t, \qquad (8)$$

где $\alpha = \text{const}$.

Реально годовой темп прироста (логарифмическая производная α) имеет тенденцию к снижению как в СССР, так и в других странах. Поэтому при составлении дифференциальной модели развития необходимо ввести корректирующий фактор, который ставит α в зависимость от времени.

В рассматриваемой задаче описания процесса производства ЭЭ найденный корректирующий фактор (2) явно зависит от времени. С его использованием дифференциальное уравнение (8) принимает вид:

$$\frac{d\Э_t}{dt} = A \cdot \Э_t \cdot \exp(-\gamma t). \qquad (9)$$

Решение выглядит следующим образом:

$$\ln \Э_t = \ln \Э_{t_0} + \frac{A}{\gamma} \exp(\gamma t_0) - \frac{A}{\gamma} \exp(-\gamma t). \qquad (10)$$

Сумма двух первых членов в правой части выражения (10) определяет предельное значение $\ln \Э_t$ при $t \to \infty$. Сопоставляя полученное решение (10) с зависимостью (6), нетрудно заметить, что они совпадают с точностью до формы записи. Отсюда следует, что дифференциальное уравнение (9) может служить основой для создания методики изучения процесса производства ЭЭ не только в нашей стране, но и, при аналогичных допущениях, в других странах мира. Естественно, после того, как будут найдены соответствующие значения A и γ.

Проведенные авторами исследования показали, что после обработки статистических рядов возможно провести футурологический анализ процессов производства электроэнергии в таких странах, как США, Англия, ФРГ, Япония, Болгария, Чехословакия, КНР. Параметры моделей, описывающих эти процессы, приведены в табл. 3.

В приложении 1 приведены реальные и средние расчетные значения вырабатываемой электроэнергии.

Кроме отмеченного, достоинствами математической модели (6) являются следующие ее возможности:

1) прямого и обратного счета при перспективном и ретроспективном анализе процессов;

2) оценки вероятностных характеристик прогнозируемых показателей при случайных вариациях параметров;

3) непосредственной оценки предельных уровней;

4) физической интерпретации ее параметров;

5) рассмотрения (6) как решения дифференциального уравнения, что имеет наиболее важное значение из перечисленного.

Существующая в некоторых странах неоднородность исходной информации не позволяет однозначно относиться к полученным количественным результатам. Данное обстоятельство побудило авторов статьи привлечь обобщающие методы теории подобия [8] и на ее основе вычленить из разнородной исходной информации то общее, что

Таблица 3

Параметры дифференциальных моделей, описывающих процессы выработки электроэнергии в различных странах

Страна	$t_{нач}$, год	Параметры дифференциальной модели		Точка перегиба характеристики, год	Оценка условного предела выработки, ЭЭ, млрд·кВт·ч	Средняя погрешность модели, %
		A	γ			
СССР	1960	0,120	0,0536	1975	2800	2
США	1960	0,093	0,0655	1965	3600	3
Англия	1960	0,082	0,1140	1957	310	3
ФРГ	1960	0,133	0,0945	1964	460	4
Япония	1960	0,196	0,0890	1969	850	4
КНР	1960	0,152	0,0353	1991	2500	10
Болгария	1960	0,282	0,1040	1970	50	5
Чехословакия	1960	0,088	0,0504	1971	132	2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

наиболее присуще развитию энергетики различных стран.

Рассмотрим полученные результаты.

Критериальные (интегральные) модели прогнозирования. Как показали проведенные авторами исследования, характеристики производства ЭЭ в различных странах могут быть описаны одной обобщенной критериальной зависимостью, т. е. показатели произведенной ЭЭ и соответствующие им моменты времени отличаются только масштабами. Вместе с тем процессы производства электрической энергии в разных странах происходят с разной степенью интенсивности и с большими временными сдвигами, поэтому показатели их развития сегодня не одинаковы. Это позволяет для отстающих увидеть свои перспективы и на основе подобия количественно определить прогнозируемые показатели в определенные моменты времени в будущем.

Представим уравнение (6) в критериальной форме с использованием метода относительных единиц [8], выполнив замену переменной $\tau = t - t_{\text{нач}}$ и приняв $t_0 = t_{\text{нач}}$. Тогда это уравнение в логарифмической форме записи будет иметь вид:

$$\ln Э_t = \ln Э_{t_0} + \frac{A}{\gamma}(1 - \exp(-\gamma t)).$$

Приняв за базисные значения переменных τ и Э их значения в точке перегиба характеристики (6), т. е. $\tau_{\text{п}} = -\frac{1}{\gamma}\ln\frac{\gamma}{A}$; $Э_{\text{п}} = Э_0 \cdot \exp\left[\frac{A-\gamma}{\gamma}\right]$, после преобразований получим:

$$Э_* = \frac{Э}{Э_{\text{б}}} = \exp\left[1 - \left[\frac{\gamma}{A}\right]^{\tau_*^{-1}}\right], \qquad (11)$$

где $Э_*$, τ_* и $\frac{\gamma}{A} = \pi_1 = \text{idem}$ – критерии подобия исследуемых процессов.

Чтобы критерий подобия π_1 был одинаков для рассматриваемых процессов, при определении A необходимо за начало отсчета принимать сходственные точки характеристик. Так, например, если для процесса производства ЭЭ в США взять за начало отсчета $t_{\text{нач}} = 1960$ г. ($\gamma_1/A_1 = 0{,}0655/0{,}0933 = 0{,}702 = \pi_1$), то для СССР значение $A2 = \gamma_2/\pi_1 = 0{,}0536/0{,}702 = 0{,}0764$ соответствует началу отсчета, находящемуся на расстоянии от точки перегиба (1975 г.) на 6,6 года, т. е. примерно 1968 году, для КНР сходственная точка характеристики соответствует примерно 1981 году.

Проанализируем значения относительной величины $Э_*$ в характерные моменты времени. В начальной точке критериальной характеристики выработка ЭЭ равна $Э_{*(\tau=0)} = \exp(1 - A/\gamma)$ после ее умножения на базисное значение Э получим $Э_0$. В точке перегиба характеристики имеем: $Э_{*(\tau=1)} = 1$. При $\tau_* \to \infty$ $Э_{*\infty} = e^1$, т. е. предельное значение прогнозируемого показателя в e раз больше его значения в точке перегиба. Этот результат имеет большое значение для поискового прогнозирования выработки ЭЭ, так как, например, по прогнозу ООН [9] предельная численность населения Земли (10 млрд. чел) от ее значения в точке перегиба прогнозной характеристики (1965 г.– 3,68 млрд. чел.) отличается ровно в e раз. Кроме того, и точка перегиба и период "насыщения" (середина XXI века) совпадают с найденными прогнозными характеристиками производства ЭЭ в разных странах.

Рассмотрим критериальную модель процесса производства ЭЭ, в которой за начало отсчета принимается точка перегиба характеристики, что дает определенные удобства анализа и оценки исследуемых явлений. С использованием метода анализа размерностей [8] можно получить следующие критерии подобия исследуемых процессов: $\pi_1 = \frac{\gamma}{A} = \text{idem}$; $\pi_2 = \tau\gamma = \tau_* = \text{idem}$; $\pi_3 = Э_* = \frac{Э}{Э_\infty} = \text{idem}$.

Тогда критериальные уравнения можно записать следующим образом:

$$\pi_1 = \exp(\pi_2);$$
$$\pi_3 = \exp(-\pi_1^{-1}) = \exp(-\exp(-\pi_2)) \qquad (12)$$

или $Э_* = \exp(-\exp(-\tau_*))$.

На рис. 3 представлен график полученного критериального уравнения (12), который является своеобразной обобщенной характеристикой развития СССР, США, Англии, ФРГ, Японии, КНР, Болгарии, ЧСФР. Эта зависимость имеет два

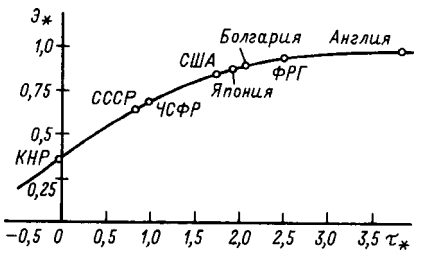


Рис. 3. Обобщенная характеристика научно-технического прогресса в производстве электроэнергии

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

характерных участка: до точки перегиба ($\tau < 0$) — период интенсивного роста выработки ЭЭ, и после точки перегиба ($\tau > 0$) — период затухания темпа роста выработки ЭЭ, на который, тем не менее, приходятся наибольшие ее объемы. В пределе ($\tau \to \infty$) значение $Э_{*\infty} \to 1$ и отличается от значения в точке перегиба в e^1 раз.

На обобщенной характеристике (рис. 3) показано положение различных стран в относительном производстве ЭЭ для 1990 г. Из рассмотренных стран наилучшие показатели имеет Англия, замыкает эту группу КНР.

Если считать, что полученная энергетикой СССР скорость развития сохранится (хотя бы в среднем), то легко посчитать, когда производство ЭЭ в СССР достигнет тех или иных уровней. Так, например, для достижения относительного уровня Англии 1990 г. ЭЭ СССР должна пройти путь в $\Delta\tau$ относительных единиц: $\Delta\tau = \tau_{*\text{Англ 1990}} - \tau_{*\text{СССР 1990}} = (1990-1957)\cdot 0{,}114 - (1990-1975)\cdot 0{,}0536 = 2{,}96$ о. е.

Двигаясь с рассчитанной внешней скоростью $\gamma = 0{,}0536$ 1/год, этот путь можно будет пройти за 55 лет. В частности отметим, что сегодняшнего относительного уровня производства ЭЭ в США СССР достигнет через 15 лет (в Японии — через 20 лет, ФРГ — через 30), оставаясь, однако, второй страной в мире по абсолютным показателям производимой электроэнергии.

Таким образом, полученная критериальная модель (12) обобщает (интегрирует) информацию о процессах производства ЭЭ в разных странах, позволяет с большей уверенностью оценивать перспективы в плане следования отмеченным тенденциям развития электроэнергетики.

Полученные в этом разделе результаты позволяют сделать еще ряд выводов.

Несмотря на разнородную базу исходной информации по исследованным авторами странам, процессы выработки ЭЭ, предствленные в критериальной форме записи, обладают значительной общностью, что нашло свое отражение в единой для всех стран зависимости, приведенной на рис. 3.

Данное обстоятельство позволяет использовать информацию одной страны для прогнозирования выработки ЭЭ в другой. Подобный подход на примере СССР и США нашел отражение в следующем разделе.

Стохастическое моделирование производства ЭЭ в СССР (или в любой другой стране) может быть осуществлено с использованием полученной критериальной модели (12). Поскольку производство ЭЭ в разных странах происходит с разной степенью интенсивности и большими временными сдвигами (см. табл. 3), страны, достигшие значительных относительных уровней развития энергетики, могут служить моделями развития для отстающих. При этом необходимо учитывать, что рассматриваемым процессам свойственны случайные отклонения, связанные с влиянием природных, социальных и экономических факторов, вследствие чего результаты стохастического моделирования обладают некоторой неопределенностью и между сходственными параметрами модели и оригинала нарушается взаимно однозначное соответствие, свойственное классической теории подобия и моделирования. Это требует введения количественных оценок качества моделирования: корреляционных или информационных. На рис. 4 построена линейная стохастическая модель прогнозирования производства ЭЭ в СССР по характеристике произведенной ЭЭ в США. В приложении 2 приведены статистические данные произведенной в СССР и США электроэнергии в сходственные моменты и прогнозные оценки. На графике обозначены соответствующие значения ЭЭ для СССР и США в сходственные моменты времени, которые в начале равны соответственно (1968—1960 гг), в конце (1989—1977 гг). То есть, если вначале разница во времени между СССР и США при одинаковом относительном уровне производимой ЭЭ была 8 лет, то в конце она составила 12 лет. В 1985 г. США имели относительный уровень производимой ЭЭ, который в СССР будет достигнут только к 2000 г. Уравнение линейной регрессии описываемых процессов имеет вид: $Э_2 = 79{,}9 + 0{,}765Э_1$ при коэффициенте корреляции $R = 0{,}992$, т. е. при степени связи, близкой к функциональной. Таким образом, на основе анализа статистической информации получен результат, подтверждающий подобие исследуемых процессов (в частности, в СССР и США) и иллюстрирующий

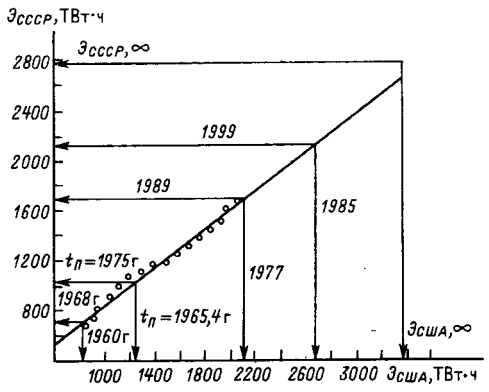


Рис. 4. Линейная стохастическая модель производства ЭЭ в СССР по характеристике произведенной ЭЭ в США

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

широкие возможности теории подобия при построении дальнесрочных прогнозов и футурологическом анализе.

• **Выводы.** 1. Создана методика дифференциального и интегрального дальнесрочного и поискового прогнозирования, позволяющая выявлять характер протекания процесса во времени.

2. На основе теории подобия получена для ряда стран обобщающая зависимость изменения выработки ЭЭ во времени.

3. Полученная единая для всех стран обобщенная зависимость доказывает возможность использования информации различных стран для коррекции прогнозирования выработки ЭЭ в данной стране.

4. Для принятия решения о количественных значениях выработки ЭЭ в той или иной стране целесообразно сопоставление с результатами, базирующимися на иных подходах к построению дальнесрочного и поискового прогнозов.

Приложение 1. Аппроксимация процесса выработки электроэнергии в ряде стран моделью (6).

Таблица 4

Выработка электроэнергии в США

Год	Выработка электроэнергии, млрд·кВт·ч		Погрешность аппроксимации, %
	Статистическое значение	Расчетное значение	
1960	844,00	781,57	−7,40
1961	—	858,86	—
1962	—	938,36	—
1963	—	1019,68	—
1964	–	1102,41	–
1965	1158,00	1186,16	2,43
1966	1249,00	1270,57	1,73
1967	1317,00	1355,26	2,91
1968	1436,00	1439,89	0,27
1969	1533,00	1524,13	−0,58
1970	1640,00	1607,70	−1,97
1971	1718,00	1690,30	−1,61
1972	1853,00	1771,70	−4,39
1973	1965,00	1851,68	−5,77
1974	1967,00	1930,03	−1,88
1975	2003,00	2006,60	0,18
1976	2123,00	2081,24	−1,97
1977	2211,00	2153,83	−2,59
1978	2289,00	2224,27	−2,83
1979	2319,00	2292,49	−1,14
1980	–	2358,43	–
1981	–	2422,05	–
1982	–	2483,34	–
1983	2368,00	2542,28	7,36
1984	2460,00	2598,88	5,65
1985	2536,00	2653,15	4,62
1986	2554,00	2705,14	5,92
1987	2644,00	2754,86	4,19

Примечание. Дальнесрочный прогноз: 2000 г.— 3221,16 млрд·кВт·ч. Поисковый прогноз: 2050 г.— 3622,45 млрд·кВт·ч; на бесконечность — 3641,30 млрд·кВт·ч.

Таблица 5

Выработка электроэнергии в Англии

Год	Выработка электроэнергии, млрд·кВт·ч		Погрешность аппроксимации, %
	Статистическое значение	Расчетное значение	
1960	137,00	149,80	9,35
1961	–	161,82	–
1962	–	173,35	–
1963	–	184,33	–
1964	–	194,71	–
1965	197,00	204,45	3,78
1966	203,00	213,55	5,20
1967	210,00	222,01	5,72
1968	224,00	229,84	2,61
1969	239,00	237,05	−0,82
1970	249,00	243,67	−2,14
1971	257,00	249,74	−2,83
1972	264,00	255,27	−3,31
1973	282,00	260,31	−7,69
1974	273,00	264,89	−2,97
1975	272,00	269,04	−1,09
1976	277,00	272,80	−1,52
1977	283,00	276,19	−2,40
1978	288,00	279,26	−3,04
1979	300,00	282,02	−5,99
1980	285,00	284,51	−0,17
1981	278,00	286,74	3,14
1982	272,00	288,75	6,16
1983	276,00	290,55	5,27
1984	283,00	292,17	3,24
1985	297,00	293,62	−1,14
1986	303,00	294,92	−2,67
1987	304,00	296,08	−2,60

Примечание. Дальнесрочный прогноз: 2000 г.— 303,62 млрд·кВт·ч. Поисковый прогноз: 2050 г.— 305,85 млрд·кВт·ч; на бесконечность — 305,86 млрд·кВт·ч.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Приложение 2. Статистические данные произведенной в СССР и США ЭЭ в сходственные моменты времени

Таблица 6

США		СССР	
Год	$Э_2$, ТВт·ч	Год	$Э_1$, ТВт·ч
1960	841	1968	659
1961	875	1970	720
1962	943	1971	790
1963	1010	1972	863
1964	1082	1973	933
1965	1157	1975	1005
1966	1248	1976	1073
1967	1314	1977	1150
1968	1436	1978	1209
1969	1552	1979	1260
1970	1640	1981	1312
1971	1718	1982	1358
1972	1853	1983	1423

Продолжение табл. 6

США		СССР	
Год	$Э_2$, ТВт·ч	Год	$Э_1$, ТВт·ч
1973	1960	1984	1507
1974	1967	1986	1571
1975	2001	1987	1642
1976	2036	1988	1701
1977	2124	1989	1726
1978	2204	1990	1766
1979	2247	1992	1799
1980	2300	1993	1840
1981	2368	1994	1892
1982	2296	1995	1836
1983	2480	1997	1977
1984	2600	1998	2069
1985	2650	1999	2107

Примечание. В столбце "год" для СССР приведены округленные данные. Для 1990—1999 гг. приведены данные дальнесрочного прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тенденции** развития и методы прогнозирования энергетики стран-членов СЭВ / Под ред. А. А. Макарова и Д. Б. Вольфберга.— М.: Энергоатомиздат, 1987.

2. **Прогностика.** Терминология.— М.: Наука, 1990, вып. 109.

3. **Алексеев Б. А.** Энергетика мира.— Энергохозяйство за рубежом, 1989, № 1.

4. **Гиббонс Джон Х., Блейр Питер Д., Гуин Холли Л.** Стратегия использования энергии.— В мире науки, 1989, № 11.

5. **СССР** в цифрах ... Крат. стат. сб. / Гос. ком. СССР по статистике, Информ.-изд.— М.: Финансы и статистика, 1960.

6. **Мелентьев Л. А.** Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития.— М.: Наука, 1979.

7. **Вольтерра В.** Математическая теория борьбы за существование: Пер. с фр. / Под ред. Ю. М. Свирежева.— М.: Наука, 1976.

8. **Веников В. А.** Теория подобия и моделирования. (Применительно к задачам электроэнергетики).— М.: Высшая школа, 1976.

9. **"Что** после пятого миллиарда".— За рубежом, 1990, № 13.

[20.04.92]

Проблемы устойчивости многоагрегатной гидроэлектростанции "Джердап 2"

ДЖЮРИЧ М. Б., ШКОКЛЕВ И. А., ТЕРЗИЯ В. В., РИСТИЧ М.

Постановка задачи. При проведении анализа электромеханических переходных процессов, связанного с определением устойчивости, одним из наиболее важных вопросов является правильное эквивалентирование исходной системы. При этом требуется определить, к какому наиболее простому виду можно привести схему, чтобы при исследовании были учтены все существенные явления.

Устойчивость сложных электроэнергетических систем анализируется путем моделирования элект-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ростанции с несколькими синхронными генераторами с последующей заменой ее одной эквивалентной синхронной машиной. Поскольку взаимная устойчивость синхронных генераторов в электростанции сохраняется при возмущении в энергосистеме, устойчивость энергосистемы можно анализировать эквивалентированием нескольких синхронных генераторов одним синхронным генератором, так как оно дает более простую математическую модель системы в целом. В данной статье приведен анализ замены идентичных, одинаково нагруженных синхронных машин, присоединенных к шинам высшего напряжения электростанции [1–3]. Необходимость такого анализа вызвана случаями неустойчивости параллельной работы однотипных генераторов гидроэлектростанции "Джердап 2" (Югославия). При значительных нарушениях в сети 110 кВ, которая связывает "Джердап 2" с энергосистемой Югославии, происходило нарушение устойчивости генераторов станции. В течение 1985–1987 гг. (зимой) возникали нарушения устойчивости. До этого происходили обрывы линии электропередачи, которая соединяла гидроэлектростанцию с системой. При обрыве линии 110 кВ станция "Джердап 2" вместе со своей местной нагрузкой представляла собой отдельную энергосистему. В этих случаях отдельная энергосистема продолжала работать, однако в ней чаще возникали режимы неустойчивости работы генераторов станции, причины которых персоналу гидроэлектростанции не удавалось обнаружить.

ГЭС "Джердап 2" состоит из четырех групп генераторов мощностью 2×30 МВ·А с блок-трансформаторами мощностью 60 МВ·А (рис. 1). В случаях потери устойчивости работали две группы с двумя генераторами.

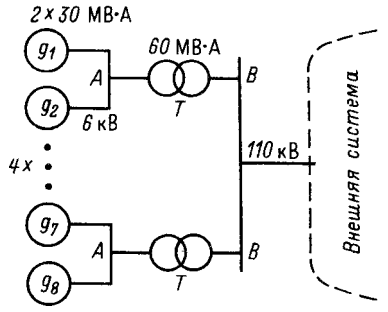


Рис. 1. Схема гидроэлектростанции "Джердап 2"

Упрощенный анализ колебаний двух близких генераторов. На рис. 2 показаны два близких генератора, которые через блок-трансформатор присоединяются к внешней сети. В этом анализе внешняя система заменяется нагрузкой P_N, линией с реактивным сопротивлением X_{LS} и шинами C неизменного напряжения ($U_C = \text{const}$).

Колебание каждого генератора с постоянным напряжением возбуждения и моментом турбины в симметричном режиме описано системой нелинейных дифференциальных уравнений Парка седьмого порядка [4, 5].

При возмущениях генераторы g_1 и g_2 могут испытывать синфазные или противофазные колебания. При синфазных колебаниях относительное положение генераторов не изменяется. Оба генератора движутся по отношению к внешней сети одинаково и ведут себя как один эквивалентный генератор.

Двухмашинную систему (рис. 2) тогда можно заменить одномашинной системой (рис. 3), для которой анализ устойчивости проводится относительно легко. Этот анализ хорошо описан в литературе [4–6].

Когда колебания генераторов электростанции синфазны, возникает только проблема внешней устойчивости электростанции по отношению к внешней системе.

При противофазных колебаниях (push – pull) генераторов g_1 и g_2 (т. е. относительно друг друга) частота напряжения U_A является постоянной, а амплитуда меняется следующим образом:

$$U_A = U_{As} \cos(\delta/2), \qquad (1)$$

где U_{As} – напряжение узла A в стационарном режиме; δ – угол между одноименными осями роторов генераторов g_1 и g_2, который появляется при возмущении ($\delta_s = 0$).

Анализ противофазного колебания генераторов электростанции можно проводить на упрощенной

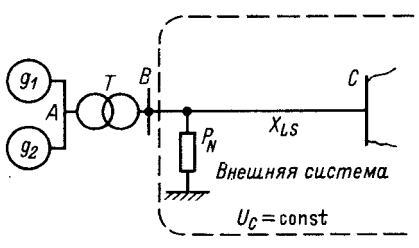


Рис. 2. Система для анализа колебаний двух близких генераторов

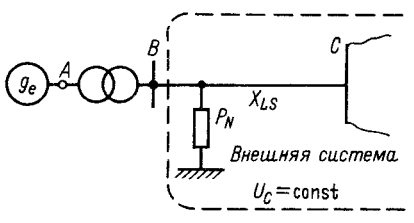


Рис. 3. Одномашинная система для анализа синфазного колебания синхронных генераторов электростанции

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

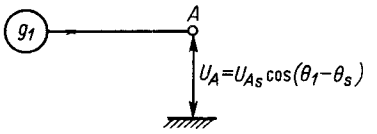


Рис. 4. Одномашинная система для анализа противофазного колебания синхронных генераторов

одномашинной модели (рис. 4). Достаточно анализировать только один генератор.

Анализ устойчивости при синфазном колебании двух или четного числа одинаково нагруженных синхронных генераторов можно проводить на простых математических моделях, сводящихся к одномашинной системе.

Практическое применение упрощенного анализа устойчивости при синфазном и противофазном колебании синхронных генераторов. Упрощенный анализ устойчивости при синфазном и противофазном колебании близких генераторов проводился при решении проблемы устойчивости в работе станции "Джердап 2". Система возбуждения и АРВ агрегатов ГЭС "Джердап 2" представлена на рис. 5, где обозначено: tt — трансформатор тока; tn — трансформатор напряжения.

Регулирование напряжения возбуждения выполняется на основе:

общего напряжения с отрицательной обратной связью через регулятор напряжения с коэффициентом усиления K и постоянной времени T;

среднего значения скоростей роторов $(\omega_1 + \omega_2)/2$, фильтрующегося через напряжение U_A (коэффициент усиления этого стабилизирующего канала — K_3);

суммарного реактивного тока обоих генераторов $(I_1 + I_2)$ с положительной обратной связью и коэффициентом усиления K_2;

реактивного тока генератора (I_1 или I_2) с отрицательной обратной связью и коэффициентом усиления K_1.

Системы возбуждения генераторов g_1 и g_2 связаны между собой общими обратными связями (коэффициенты усиления K_2 и K_3), которые будут относительно сложными. Между тем, если рассматривать устойчивость генераторов при синфазном и противофазном колебании, то их систему возбуждения можно упростить. При противофазном колебании генераторов сумма их реактивных токов является постоянной, т. е. $I_1 + I_2 = \text{const} = 2I_{\text{ref}}$, а среднее значение скорости роторов будет $(\omega_1 + \omega_2)/2 = \text{const} = \omega_{\text{ref}}$, где I_{ref} и ω_{ref} — опорные значения реактивного тока и скорости. В этом случае обратные связи по сумме реактивных токов и по среднему значению скорости являются разомкнутыми, так как в этих каналах не возникают сигналы ошибки. Это дает возможность анализировать внешнюю устойчивость генераторов с помощью одномашинной модели (рис. 6).

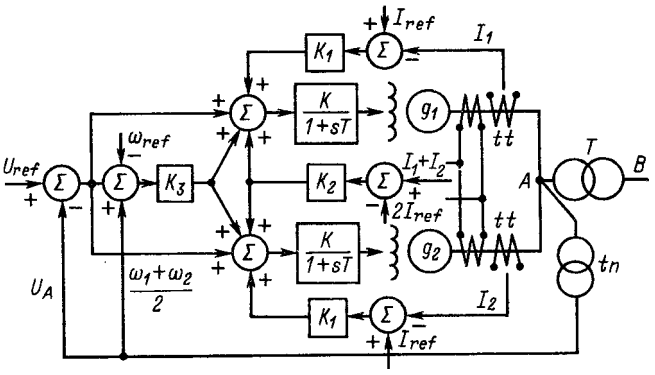


Рис. 5. Система возбуждения и АРВ агрегатов ГЭС "Джердап 2"

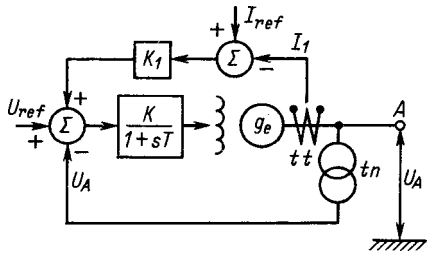


Рис. 6. Одномашинная модель системы для анализа устойчивости при противофазном колебании синхронных генераторов

Обратная связь по реактивному току (K_1) является отрицательной и обеспечивает равномерное распределение реактивной мощности в генераторах. Она порождает положительный демпфирующий момент и стабилизирует взаимные колебания генераторов. Коэффициент усиления K_1 выбирается так, чтобы при выбранном коэффициенте усиления регулятора напряжения K обеспечивалось хорошее демпфирование взаимных колебаний генераторов, что и было реализовано на ГЭС "Джердап 2".

При синфазных колебаниях генераторов соблюдаются соотношения $I_1 = I_2$ и $\omega_1 = \omega_2$. Входной сигнал регулятора напряжения, обусловленный реактивными токами по обоим каналам (K_1 и K_2), представляет собой

$$\Delta U_{I_{12}} = -(2K_2 - K_1)(I_{\text{ref}} - I_1). \qquad (2)$$

Если генераторы колеблются синфазно, то при $2K_2 > K_1$ обратная связь по реактивному току является положительной, т. е. противоположной по отношению к случаю противофазного колебания генераторов. Если системы колеблются синфазно, то систему, представленную на рис. 5, можно упростить и представить как одномашинную систему (рис. 7). При заранее выбранных коэффициентах усиления K и K_1 коэффициент

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

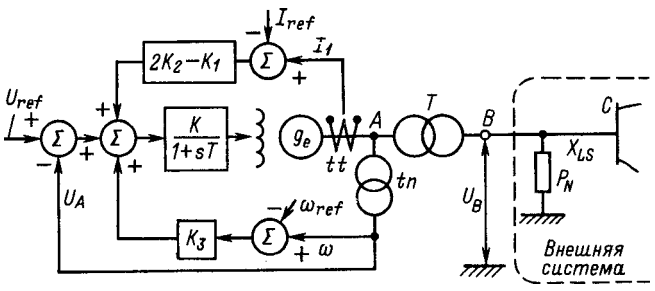


Рис. 7. Одномашинная модель для анализа устойчивости синфазных колебаний синхронных генераторов станции

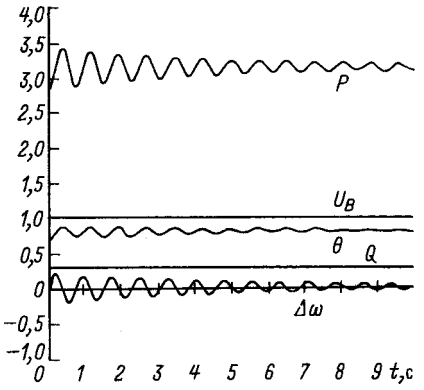


Рис. 8. Численный пример расчета переходного процесса при синфазных колебаниях генераторов ГЭС

усиления K_2 выбирается так, чтобы при изменении реактивной нагрузки электростанции получить требуемый статизм напряжения в узле B, т. е. чтобы частично компенсировать понижение напряжения на блок-трансформаторе T. В рассматриваемой электростанции K_2 был выбран именно таким способом. Генераторы и регуляторы "Джердап 2" были советского производства. Между тем, возможно, при выборе коэффициента K_2 не учитывалось то, что на электростанции применяются еще три идентичные группы синхронных машин, присоединенных к шинам высшего напряжения 110 кВ (рис. 1).

Неустойчивость генераторов на ГЭС "Джердап 2" возникала в режимах, когда работали две группы генераторов. Анализ устойчивости с четырьмя генераторами при их синфазном колебании можно провести при помощи одномашинной модели (рис. 7).

На рис. 8 приведены результаты численного расчета переходного процесса при синфазных колебаниях генераторов электростанции. Здесь P и Q — активная и реактивная мощности; U_B — напряжение узла B; θ — угол ротора эквивалентного генератора; $\Delta\omega$ — приращение частоты вращения генератора.

Напряжение шин C внешней сети надо считать постоянным (внешняя сеть может быть и пассивной, т. е. без генераторов). В этом случае все четыре генератора заменяются одним эквивалентным генератором мощностью в два раза больше.

Переходные электромеханические процессы (рис. 8) возбуждались увеличением активной мощности эквивалентного генератора на 1,1 установившегося значения. Установившийся режим, предшествующий росту активной мощности генератора, определялся следующим способом: $P_e = 0{,}95$ о. е.; $Q_e = 0{,}1$ о. е.; $P_L = 0{,}8$ о. е.; $U_B = 1$ о. е.; $X_{CB} = 0{,}4$ о. е.; $K = 25$ о. е.; $2K_2 - K_1 = 0{,}1$ о. е. и $K_3 = 0{,}5$ о. е.

Базисная мощность равнялась 1/3 номинальной мощности, а базисное напряжение — номинальному напряжению генератора.

Из рис. 8 видно, что синхронные машины ГЭС в данном установившемся режиме и для определенного нарушения являются устойчивыми при синфазных колебаниях генераторов.

Устойчивость генераторов ГЭС с четырьмя однотипными генераторами можно также анализировать с помощью одномашинной модели (рис. 7). Взаимная устойчивость генераторов в группе, присоединяемой к блок-трансформатору, некритична к величине отрицательной обратной связи по реактивному току. Между тем, взаимная устойчивость двух групп генераторов является критичной, так как когда две группы генераторов совершают взаимное противофазное колебание, обратная связь по реактивному току в каждой группе является положительной. Для анализа взаимной устойчивости двух групп генераторов генераторы в группе заменяют одним эквивалентным генератором, а напряжение узла B меняется по соотношению $U_B = U_{Bs} \cos(\theta_1 - \theta_s)$.

Результаты численного расчета переходного процесса при взаимном противофазном колебании двух групп генераторов показан на рис. 9. Нару-

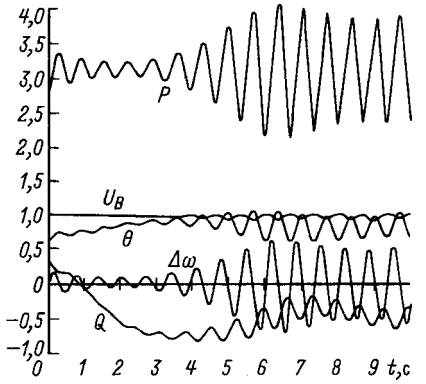


Рис. 9. Численный пример расчета переходного процесса при взаимном противофазном колебании двух групп генераторов ГЭС

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

шение, рабочий режим до нарушения и все остальные параметры системы возбуждения остались одинаковыми при расчетах синфазных колебаний генераторов. Из рис. 9 видно, что внутренние колебания двух групп генераторов являются неустойчивыми. Переходный процесс в начале как будто демпфирован, но через несколько секунд появляются расходящиеся колебания с отрицательным демпфированием.

Результаты расчета, приведенные на рис. 8 и 9, были получены с помощью одномашинных моделей электростанции с четырьмя одинаковыми генераторами. Эти расчеты показали неустойчивость ГЭС "Джердап 2" при противофазных колебаниях двух групп генераторов.

После этого расчета был выбран другой, несколько меньший, коэффициент усиления $K_2(2K_2 - K_1 = 0{,}09$ о. е.), обеспечивающий устойчивость ГЭС при противофазном колебании групп генераторов. Расчеты показали, что устойчивость при синфазном колебании мало зависит от коэффициента K_2, а при противофазных колебаниях очень чувствительна к нему.

Переходные электромеханические процессы (рис. 9) возбуждались путем увеличения активной мощности эквивалентного генератора на 1,1 установившегося значения. Надо подчеркнуть, что электромеханический переходный процесс (рис. 9) в течение первых нескольких секунд демпфирован. Затем появляется неустойчивость в виде автоколебаний.

• **Выводы.** На примере ГЭС "Джердап 2" показано, что устойчивость при синфазных и противофазных колебаниях одинаковых и одинаково нагруженных генераторов одной электростанции можно анализировать с помощью простых одномашинных моделей. Это существенно повышает эффективность исследований устойчивости многоагрегатной электростанции в энергосистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Duric M., Muzdeka G.** The Analysis of the occurence conditions and the possibility of elimination of negative dampings in the power systems.– CIGRE 1984, Paris, No. 38–06.

2. **Duric M., Muzdeka G., Skokljev I.** Internal and external stability of synchronous machines in a power plant with two equal units.– Proc. Int. AMSE Conf. on Modelling and Simulation, Monastir, Tuisia, Nov. 25–28, 1985, vol. 2C, pp. 154–165.

3. **Михневич Г. В.** Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин.— М.: Наука, 1964.

4. **Anderson P. M., Fouad A. A.** Power system control and stability.– The Iowa State University Press, 1977.

5. **Страхов С. В.** Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока.— М.—Л.: ГЭИ, 1960.

6. **Методика** расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем / Под ред. В. А. Веникова.— М.: Высшая школа, 1966.

7. **Тимченко В. Ф.** Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем.— М.: Энергия, 1975.

8. **Портной М. Г., Рабинович Р. С.** Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости.— М.: Энергия, 1978.

9. **Экспериментальные** исследования режимов энергосистем / Под ред. С. А. Совалова.— М.: Энергоатомиздат, 1985.

[16.01.92]

Обобщенная модель вентильных преобразователей

БУЛГАКОВ А. А., доктор техн. наук

Москва

Каждая точная наука на высшем этапе своего развития после накопления и систематизации эмпирических и аналитических конкретных зависимостей для частных видов объектов переходит к их обобщению на более абстрактном уровне. В электротехнике таким этапом было создание в 30-х годах общей теории электрических машин на основе идей Г. Крона [1–3], показавшего, что адекватным аппаратом общей теории машин является тензорное исчисление.

Потребности автоматизации технологических процессов привели к тому, что в настоящее время почти половина всех электроприводов реализуется на базе двигателей переменного тока, оснащенных в целях управления вентильными полупроводниковыми преобразователями и образующих достаточно сложные многодвигательные динамические системы.

Отсюда ясно практическое и теоретическое значение создания общей теории вентильных

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

преобразователей и объединения ее с общей теорией электрических машин вентильных двигателей, т. е. электродвигателей, снабженных вентильными преобразователями.

В настоящей статье автором предлагаются принципы построения математической модели, общей для всех основных видов вентильных преобразователей: выпрямителей, обратимых преобразователей, инверторов и преобразователей частоты; начало разработке модели положено в [4].

Элементарная алгебраическая операция соединения модели преобразователя с обобщенной электрической машиной Г. Крона в неподвижной, квазиголономной системе координат позволяет получить единую модель для вентильных двигателей и систем из них и положить ее в основу общей теории электромеханических вентильных систем, излагаемой в монографии автора [14].

В основу предлагаемой общей теории вентильных преобразователей положены следующие принципиальные соображения.

Каждый управляемый вентильный преобразователь выполняет две функции принципиально различной природы — энергетической и информационной:

1. Качественное преобразование параметров электроэнергии (постоянный и переменный ток) с требованием минимальных потерь.

2. Управление количеством — значением параметра энергии (напряжения, частоты) с требованием обеспечения необходимой точности воспроизведения этим энергетическим параметром сигнала управления.

Энергетические параметры в принципе описываются непрерывными функциями времени, но управление ими осуществляется путем модуляции параметров импульсов, получаемых квантованием по времени (дискретизацией) входных функций и сложением модулированных импульсов в непрерывные (в принципе) выходные функции.

Таким образом, теория вентильных преобразователей объединяет два класса различных систем — импульсных [5] и непрерывных, занимая промежуточное место между ними, и выделяет самостоятельный класс квазинепрерывных систем [6].

В энергетическом аспекте понятие полезной составляющей имеет смысл только в стационарных по управлению режимах, т. е. при постоянном значении сигнала управления ($x = \text{const}$), и выражается средними значениями напряжения и тока.

В информационном же аспекте полезной составляющей является функция, точно воспроизводящая сигнал управления, т. е. в рабочей области ему пропорциональная

$$e^0 = K_{\text{у}} x, \qquad (1)$$

где $K_{\text{у}}$ — коэффициент усиления напряжения постоянного тока или амплитуды переменного.

В обоих случаях квантование искажает полезную составляющую и истинное значение выходной функции равно сумме:

$$e(t) = K_{\text{у}} x(t) + \Delta(t), \qquad (2)$$

где $\Delta(t)$ — функция искажений квантования.

Разделение истинной преобразованной ЭДС на полезную составляющую и искажения квантования имеет следующее научное и практическое значение:

1. Исследование микропроцессов квантования необходимо при проектировании преобразователей для оптимального выбора схем и расчета их параметров, что является предметом прикладной теории "основ преобразовательной техники".

2. Исследования и расчет переходных макропроцессов вентильных систем могут производиться с точностью до искажения квантования по простым полезным (гладким) функциям.

В стационарном по управлению режиме выходное напряжение (ток) преобразователя аналитически может быть представлено в виде:

1) суммы финитных импульсов, обозначим их значком "крыша" сверху

$$e(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{e}_n [x(t)], \qquad (3)$$

где x — сигнал управления, и

2) суммы волн ряда Фурье [7, 8]

$$e(t) = \sum_{k=0}^{\infty} E_{mk} [x(t)] \cos [\omega_k(t) t]. \qquad (4)$$

Оба вида разложения используются в теории стационарных режимов $x(t) = \text{const}$, и оба обладают тем недостатком, что при управлении становятся нелинейными функциями относительно переменного сигнала управления.

Для построения общей теории вентильных преобразователей, а за ней и единой теории вентильных машин предпочтительнее второй вид — ряды Фурье. Этот выбор обусловлен прежде всего тем, что общая теория электрических машин основана на непрерывном аппарате [16]. Кроме того ряды Фурье позволяют естественно выделить непрерывные полезные функции, линейные относительно сигнала управления, отделив нелинейные дискретные функции микропроцессов — "искажений квантования".

В стационарных режимах [$x(t) = \text{const}$] полезной составляющей является среднее значение, т. е.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нулевая составляющая ряда Фурье для постоянного тока и первой гармоники — для переменного $e^0(t)$. Остающиеся гармоники (включая постоянную составляющую) в случае переменного тока образуют в сумме искажения квантования $\Delta(t)$.

При управлении искажения квантования получают дополнительную деформацию, зависящую от скорости изменения сигнала управления $x(t)$. Эту деформацию в первом приближении можно рассматривать как аддитивную динамическую ошибку.

В действительности входное напряжение источника энергии, питающего преобразователь, подвержено достаточно ощутимым случайным колебаниям. Поэтому истинные искажения квантования являются случайной функцией, сильно коррелированной с сигналом управления [9]. Этот вопрос нуждается в специальных исследованиях.

В основу общей теории вентильных преобразователей положена одна математическая модель. Погрешности, допускаемые идеализацией, в моделях реальных устройств не превышают общепринятых в теории электрических машин. Приняты следующие ограничения и приближения.

1. Исключаются преобразователи, работающие в режиме прерывистых токов.

2. Рассматриваются преобразователи с магнитоуравновешенными трансформаторами и симметричными схемами вентильных цепей (схема и параметры одинаковы во всех периодах повторения).

3. Вентили рассматриваются как идеальные ключи без потерь.

4. Реверсивные двухкомплектные выпрямители работают без уравнительных токов и без паузы при реверсе тока (схемы с переключателями не рассматриваются).

5. Первичное активное сопротивление трансформатора мало и не учитывается.

6. Нагрузка описывается эквивалентной цепью из последовательно соединенных активного сопротивления R, индуктивности L и ЭДС, заданной как непрерывная функция времени. Фильтр включается в эту цепь.

В пределах перечисленных условий модель может рассматриваться как некий эквивалентный генератор. Прообраз модели был впервые предложен автором на основании экспериментальных данных еще в 1941 г. [4].

Модель (рис. 1) состоит из одного контура, в котором протекает ток нагрузки $i_н$; в этот контур входит источник энергии, внутренняя ЭДС которого пропорциональна входному сигналу управления

$$e^0 = K_у x,$$

где $K_у$ — коэффициент усиления — основной параметр модели, определенный как номинальный параметр преобразователя.

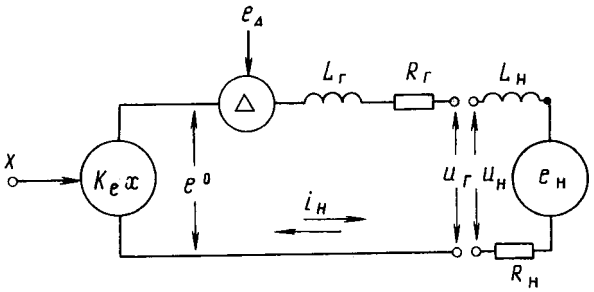


Рис. 1

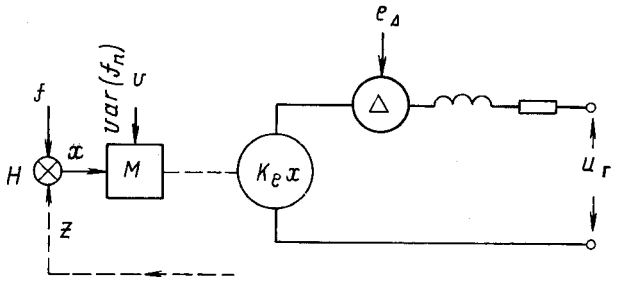


Рис. 2

Внутреннее полное сопротивление генератора состоит из активного сопротивления $R_г$ и индуктивности $L_г$.

В контур модели включен также и второй источник ЭДС $e_Δ(t)$, учитывающий искажения квантования и случайные колебания напряжения действительного источника энергии (сети).

Для пояснения и обоснования модели ее удобно разделить на две части (рис. 2): силовую или энергетическую и сигнальную или информационную. В реальных преобразователях они физически связаны вентилями. К силовой части относятся трансформатор (если он имеется) и электроды вентилей, проводящие ток нагрузки. Сигнальная часть содержит модулятор M, выдающий управляющие импульсы, и управляющие электроды вентилей, а также другие элементы управления, в частности генератор опорных (тактовых)сигналов v.

Математически обе части связаны общей функцией — в а р и а н т о й у п р а в л е н и я.

Варианта управления — это последовательность моментов времени t_n фактического замыкания и размыкания вентилей: $\mathrm{var}(t_n)$ и $\mathrm{var}(\theta_n)$. Здесь θ (а также α) — фаза, имеющая смысл относительного времени, так как

$$\theta = \omega t = 2\pi t/T. \qquad (5)$$

Точки варианты на выходе модулятора получаются в результате преобразования двух непрерыв-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

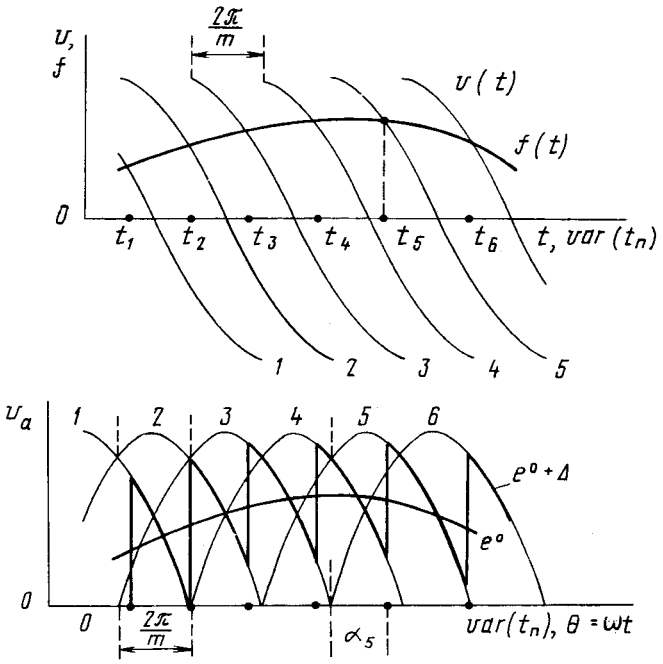


Рис. 3

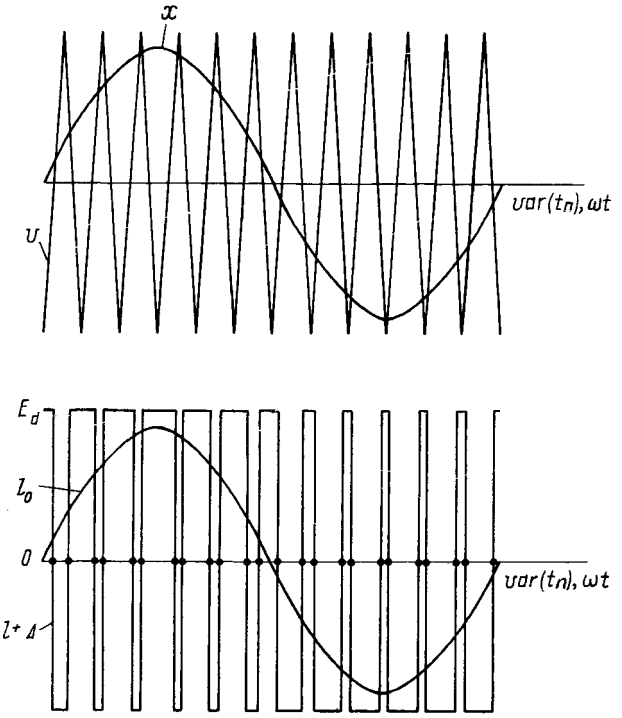


Рис. 4

ных функций — опорного сигнала $v(t)$ и сигнала управления $x(t)$, в простейшем случае — путем аналогового решения уравнения

$$x - v = 0, \tag{6}$$

осуществляемого в компараторе (нуль-органе) H.

Опорный сигнал подается от специального генератора фиксированной или управляемой частоты, задающего частоту преобразованного напряжения, или непосредственно от питающего напряжения сети.

Кроме того, в компаратор, как правило, вводятся сигналы обратной связи $z(t)$ от выходного напряжения преобразователя или других переменных, доставляемых информационно-измерительной и управляющей подсистемами.

На рис. 3 и 4 показаны два основных и типичных случая преобразования сигнала управления в полную ЭДС преобразователя, соответствующих выпрямителю с фазоширотной модуляцией (ФШМ) (рис. 3) и автономному инвертору с широтно-импульсной модуляцией (рис. 4).

В обоих случаях верхний график показывает преобразование сигнала управления в варианту, а нижний — преобразование варианты в ЭДС, путем вырезания импульсов из входной синусоидальной ЭДС в первом случае и из постоянной ЭДС — во втором.

Варианта управления может определяться и более сложными способами, включая цифровые, и задавать более сложные законы управления, например с исключением желаемого числа высших гармоник в автономных инверторах [12]. Важно, что точки варианты не могут передавать в силовую цепь ничего, кроме информации, и эта передача направлена в одну сторону.

Математическим, расчетным параметром модели, предлагаемым в качестве номинала промышленных преобразователей, является коэффициент усиления, т. е. передачи. В общем случае коэффициент усиления модели состоит из двух компонентов — усиления ЭДС и усиления частоты. Последний является просто размерной постоянной величиной и не требует пояснения. Коэффициент усиления по ЭДС в преобразователях с ФШМ (выпрямителях и непосредственных преобразователях частоты) выражает отношение среднего значения выпрямленного напряжения при номинальном значении входного напряжения к сигналу управления.

Среднее значение выпрямленной ЭДС в стационарном режиме [10, 11]

$$e^0_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_0^t E^0_m \cos\left(\omega t^* - \frac{\pi}{m} + \alpha\right) dt = E^0_m K_m \cos\alpha. \tag{7}$$

Здесь: E^0_m — номинальное значение амплитуды входного напряжения; t^* — "местное" время, отсчитываемое от очередного момента открытия; m — пульс (периодичность) преобразователя; α — фаза открытия вентиля, отсчитываемая от точки $\omega t^* = -\pi/m$ при $\alpha = 0$; k_m — коэффициент пульса;

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$k_m = \frac{\sin \pi/m}{\pi/m}. \quad (8)$$

Для получения линейной характеристики модели (в пределах "насыщения") $e^0(x)$ модулятор изготовляют с арккосинусной характеристикой

$$\alpha = \arccos \chi, \quad (9)$$

где относительное значение сигнала управления

$$\chi = x/V_m, \quad (10)$$

а V_m — значение сигнала управления в граничной точке, где $x = x_m = V_m$.

Из (7) и (9) следует

$$e^0 = E_m^0 k_m \chi = K_e x, \quad (11)$$

где коэффициент усиления по ЭДС

$$K_e = k_m \frac{E_m^0}{V_m}. \quad (12)$$

В преобразователях с ШИМ (автономные инверторы), управляемых путем сдвига фаз открытия вентилей двух групп, полезной составляющей является первая гармоника [12, 14]

$$e^0 = \frac{4}{\pi} E_d^0 \sin \frac{\gamma}{2} \cos \nu t, \quad (13)$$

где γ — ширина импульса прямоугольного синуса преобразованной ЭДС, $\gamma = \pi$, а E_d^0 — номинальное значение входного напряжения.

При арксинусной характеристике модулятора

$$\gamma = 2 \arcsin \chi, \quad (14)$$

где χ — определяется той же формулой (10), амплитуда

$$E_m^0 = \frac{4}{\pi} E_d^0 \chi \quad (15)$$

и коэффициент усиления

$$K_e = \frac{4}{\pi} \frac{E_d^0}{V_m}. \quad (16)$$

В общей модели сигнал управления выражается матрицей

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_e & 0 \\ 0 & K_\nu \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где K_ν — коэффициент усиления по частоте.

Выходное напряжение может быть записано комплексом (вектором-фазором)

$$\dot{U} = K_e x_e \exp(K_\nu x_\nu t). \quad (18)$$

Вторым параметром обобщенной модели является его внутреннее сопротивление в контуре силовой части.

Конструктивно силовая часть преобразователя содержит вентильный коммутатор и трансформатор, первым назначением последнего является увеличение числа фаз выпрямляемого напряжения для уменьшения пульсаций, а вторым — электрическое разделение цепей первичного и вторичного напряжения.

Рассмотрим схему с трехфазным трансформатором. Трехфазный трансформатор с одним сердечником и уравновешенной магнитной системой можно заменить эквивалентной группой из трех однофазных трансформаторов [11]. Но в любом межкоммутационном интервале преобразователя нагружены только два трансформатора с общей цепью нагрузки, а уравнение третьей фазы может не рассматриваться как независимое. При соединении вторичных обмоток по схеме простая звезда ток проводит вся вторичная обмотка. При схемах двойная звезда и зигзаг ток проводит одна секция половинного числа витков.

В сложных схемах две одновременно проводящие обмотки соединены через уравнительный реактор (схема Кюблера и другие). В дальнейшем имеется в виду одна проводящая обмотка или одна секция на каждом трансформаторе.

Некоторые авторы [2, 15] вводят в описание полные схемы преобразователя со всеми обмотками и вентилями. Анализ существенно упрощается, если в рассмотрение ввести только те элементы, которые в данный межкоммутационный интервал проводят ток. Для такой сокращенной цепи в силу симметрии справедливы одно дифференциальное уравнение второго порядка и двухконтурная схема замещения для всех периодов повторения (рис. 5, *а*). Если же, кроме того, пренебречь первичным активным сопротивлением трансформатора, то уравнение второго порядка вырождается в уравнение первого порядка, соответствующее одному контуру математической модели (рис. 5, *б*).

В коммутационном интервале проводят ток три контура, но сначала считаем коммутацию идеальной, а потом учитываем вызываемое ею снижение напряжения приближенно, как эффект обратной связи от выпрямленного тока [11, 13].

Итак для двух одинаковых нагруженных фаз справедлива система из трех уравнений (рис. 5, *а*):

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

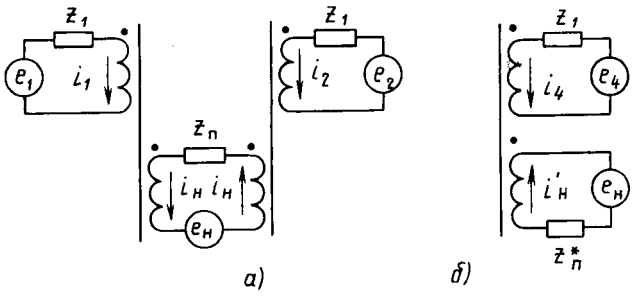


Рис. 5

$$\left.\begin{aligned} z_1 i_1 + x i_н &= e_1; \\ z_2 i_2 - x i_н &= e_2; \\ x i_1 - x i_2 + z_п i_н &= e_н. \end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

Здесь z_1 и z_2 — первичное и вторичное сопротивления трансформатора; $x = Mp$ — его взаимное сопротивление; $z_п$ — полное сопротивление цепи выпрямленного тока, включая нагрузку $z_н$

$$z_п = 2z_2 + z_н, \qquad (20)$$

($z_н$ — эквивалентное сопротивление цепи нагрузки).

Эту систему можно заменить системой из двух уравнений, заменив переменные на первичной стороне:

$$e_4 = e_1 + e_2 \text{ и } i_4 = i_1 - i_2 \qquad (21)$$

и вычтя второе уравнение из первого, тогда

$$\left.\begin{aligned} z_1 i_4 + x(2i_н) &= e_4; \\ x i_4 + \frac{1}{2} z_г (2i_н) &= e_н. \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

Этому уравнению точно соответствует однофазная двухконтурная схема замещения трансформатора (рис. 5, *б*), с удвоенным током и половиной полного сопротивления в контуре выпрямленного тока нагрузки, который включен на напряжение:

$$e_4 = \sqrt{3}\, E_m \cos(\omega t + \pi/6), \qquad (23)$$

если за напряжение e_1 принять

$$e_1 = E_m \cos \omega t. \qquad (24)$$

Двухконтурная схема заменяется с большой степенью точности одноконтурной, если пренебречь первичным активным сопротивлением трансформатора, роль которого ощутима только у преобразователей очень малой мощности.

Действительно, допуская $z_1 \simeq x_1$ и учитывая, что

$$x_1 = \frac{x}{k_т}(1 + \tau_1), \qquad (25)$$

где $k_т$ — коэффициент трансформации,

$$k_т = w_2/w_1; \qquad (26)$$

τ_1 — коэффициент рассеяния,

$$\tau_1 = \frac{k_т x_1 - x}{x}, \qquad (27)$$

получаем выражение для вторичного тока нагрузки:

$$i_н = \frac{e_н - e_5}{z_н + 2x \dfrac{k_т}{1 + \tau_1}}, \qquad (28)$$

где e_5 — первичное напряжение, приведенное к вторичному контуру,

$$e_5 = e_4 \frac{k_т}{1 + \tau_1}. \qquad (29)$$

Знаменатель, очевидно, представляет полное сопротивление схемы замещения. Учитывая, что

$$z_4 = z_н + 2z_2, \qquad (30)$$

где $z_н$ — сопротивление нагрузки; $z_2 = R_2 + x_2$ — сопротивление вторичной обмотки трансформатора или ее секции, обтекаемой током, получаем

$$z_4 - 2x \frac{k_т}{1 + \tau_1} = z_н + 2\left[R_2 + x_2 \frac{\tau}{1 + \tau}\right], \qquad (31)$$

где τ — общий коэффициент рассеяния трансформатора;

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2. \qquad (32)$$

Следовательно, внутреннее сопротивление выпрямителя

$$z_2 = 2\left[R_2 + x_2 \frac{\tau}{1 + \tau}\right]. \qquad (33)$$

В однофазном двухтактном выпрямителе z_2 вдвое меньше:

$$z_2 = R_2 + x_2 \frac{\tau}{1 + \tau}. \qquad (34)$$

В сложных схемах, состоящих из параллельного соединения прямой и обратной звезд через урав-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нительный реактор (схема Кюблера),

$$z_2 = \frac{1}{2}\left[R_2 + x_2\frac{\tau}{1+\tau} + R_д + x_{дs}\right], \qquad (35)$$

где $R_д$ — активное сопротивление; $x_{дs}$ — индуктивное сопротивление рассеяния уравнительного реактора.

В случае автономного инвертора внутренее сопротивление модели определяется сопротивлением последовательного дросселя (реактор фильтра). Определение внутреннего сопротивления модели завершается учетом уменьшения напряжения из-за коммутации. Как известно, среднее значение уменьшения напряжения в первом приближении пропорционально коммутируемому току [4, 13] с коэффициентом пропорциональности

$$R_ф = \frac{m}{2\pi}x_к, \qquad (36)$$

где $x_к$ — индуктивное сопротивление коммутируемого контура, равное удвоенному сопротивлению рассеяния вторичной обмотки трансформатора.

Это величина, имея размерность сопротивления, может рассматриваться формально как активное сопротивление, но физически таковым не является так как не рассеивает энергии. По существу это коэффициент характеризующий отрицательную обратную связь от тока нагрузки.

Таким образом, за внутреннее сопротивление модели выпрямителей следует принимать величину

$$z_м = z_2 + R_ф. \qquad (37)$$

В применении к отдельным видам преобразователей обобщенная универсальная модель упрощается в результате подстановки частных значений параметров данного вида. Так, для непосредственного преобразователя частоты значение внутреннего сопротивления сохраняется, но модель дополняется внешним задатчиком управляющего сигнала переменной частоты и внешней обратной связью по напряжению (для уменьшения искажений). У автономных инверторов, питаемых от выпрямителей, входное напряжение определяется полезным напряжением выпрямителя $E_d = K_e x$, а искажения выпрямителя дополняют искажения инвертора и т. п.

Более полное изложение материала настоящего исследования опубликовано в монографии автора [14].

В заключение автор отмечает всестороннюю помощь А. О. Булгаковой в работе над статьей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kron G.** Non-Rieman Dynamics of Rotating Electrical Machinery. — Journal of Mathematics and Physics, 1934, vol. XIII, № 2.

2. **Крон Г.** Применение тензорного анализа в электротехнике. — М.: Энергоиздат, 1955.

3. **Lynn J. W.** Tensors in Electrical Engineers. London: Chapman and Hall Ltd. 1963.

4. **Булгаков А. А.** Переходные режимы электроприводов с управляемыми выпрямителями. — Бюллетень ВЭИ, 1941, № 1.

5. **Цыпкин Я. З.** Теория линейных импульсных систем. — М.: ГИФМЛ, 1963.

6. **Булгаков А. А.** Исследование квазинепрерывных функций. — М.: Наука, 1973.

7. **Булгаков А. А.** К теории импульсных систем. — Автоматика и телемеханика, 1967, № 12.

8. **Булгаков А. А.** Определение непрерывной полезной составляющей в квазинепрерывных импульсных системах. — Доклады АН СССР, 1967, т. 174, № 1.

9. **Булгаков А. А.** "Полезное напряжение" и шумы квантования управляемых выпрямителей. — Электричество, 1977, № 3.

10. **Булгаков А. А.** Основы динамики управляемых вентильных систем. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.

11. **Булгаков А. А.** Новая теория управляемых выпрямителей. — М.: Наука, 1970.

12. **Бедфорд Б., Хофт Р.** Теория автономных инверторов. — М.: Энергия, 1969.

13. **Методы** расчета и анализа электромагнитных процессов в мощных тиристорных преобразователях / А. А. Янко-Триницкий, И. М. Серый, А. М. Вейнигер и др. Свердловск: Изд. УПИ. 1978, т. 174, № 1.

14. **Булгаков А. А.** Вентильная электромеханика. — М.: Наука, 1993.

15. **Костенко М. П., Нейман Л. Р., Блавдзевич Г. Н.** Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. — М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1946.

16. **Базилевич В. П.** К вопросу общей теории электрических машин. — Электричество, 1930, № 2.

[12.03.92]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Определение объемной плотности электромагнитых сил в нелинейной системе энергетическим методом

АБРАМКИН Ю. В., канд. техн. наук

Московский энергетический институт

Своеобразие электромагнитного и, в частности, магнитного поля любого электромеханического устройства или произвольной электромеханической системы проявляется в силовом взаимодействии этого поля с его источниками. Возникающее при этом поле электромагнитных сил (ЭМС) распределяется в рассматриваемый момент времени в пространстве с некоторой объемной $\overline{f}$ или поверхностной $\overline{f}_s$ плотностью.

Как показывает приводимый далее анализ в настоящее время можно применить различные по своему физическому содержанию способы обоснования расчетного выражения для объемной плотности (ОП) ЭМС $\overline{f}$ в магнитном поле некоторой нелинейной магнитной системы (НМС), устанавливающего однозначную зависимость ОП ЭМС $\overline{f}$ от физических величин $\overline{B}$, $\overline{H}$, характеризующих само магнитное поле. Вместе с тем эти способы в конечном итоге оказываются равноценными в том смысле, что все они приводят к одному и тому же конечному выражению для искомой зависимости[1] ОП ЭМС:

$$\overline{f} = [\overline{J} \times \overline{B}] - (1/2)H^2 \operatorname{grad} \mu. \qquad (1)$$

Постановка задачи. Допущения. Определяется пространственное распределение ОП ЭМС в магнитной, нелинейной, изотропной, безгистерезисной среде с непрерывно изменяющимися магнитными свойствами. Магнитное поле в среде возбуждается заданной системой контуров с токами. Токи в контурах включая и вихревые токи, считаются по условию заданными в ограниченной подобласти безграничного трехмерного пространства, которое является исследуемой областью магнитных полей с индукцией $\overline{B}$ и напряженностью $\overline{H}$ и искомого поля ОП ЭМС $\overline{f}$. Распределение в данный момент времени в пространстве векторных полей с индукцией $\overline{B}(x, y, z)$, напряженностью $\overline{H}(x, y, z)$ и, следовательно, магнитной проницаемости $\mu(x, y, z)$ предполагается заданным (рассчитано тем или иным численным способом).

1. *Краткая предыстория проблемы.* Основополагающей работой в решении проблемы ОП ЭМС в магнитном поле общепризнано считать одну из ранних работ Дж. К. Максвелла "О физических силовых линиях" [1, с. 124 ф. (12)]. В современных обозначениях и в системе СИ формула Максвелла для ОП ЭМС в магнитном поле в векторной форме записывается следующим образом:

$$\overline{f} = \overline{H} \operatorname{div} \overline{B} + [\overline{J} \times \overline{B}] + \\ + \operatorname{grad} \left[\frac{\mu H^2}{2} \right] \Big|_{\mu = \text{invar}} - \operatorname{grad} p_1, \qquad (2)$$

где физическая величина p_1, названная Максвеллом "гидростатическим давлением", действующим равномерно в любом направлении, не получила полной расшифровки со стороны автора (2). Установить связь "гидростатического давления" p_1 с физическими величинами, характеризующими магнитное поле,—

$$p_1 = (1/2)\mu H^2, \qquad (3)$$

удалось позднее Л. Больцману [3] уже после опубликования основного труда Максвелла "Трактата об электричестве и магнетизме" [2].

После подстановки в (2) p_1 из (3) и последующих несложных преобразований уравнение (2) с учетом очевидного соотношения $\operatorname{div} \overline{B} = 0$ легко приводится к уравнению (1).

2. *Энергетические и неэнергетические методы обоснования расчетного выражения (1) для ОП ЭМС в магнитном поле.* Далее кратко рассматриваются известные к настоящему времени различные способы вывода уравнения (1). Более подробному анализу подвергаются предлагаемые здесь нетрадиционные способы реализации энергетического и неэнергетического методов для решения поставленной выше проблемы ОП ЭМС в магнитном поле.

Излагаемый далее в этом пункте материал имеет общее значение при последующем отдельном рассмотрении каждого из способов обоснования уравнения (1). Так, общей иллюстрацией к ним является рис. 1, на котором радиусом-вектором $\overline{r}_P$ фиксируется произвольно выбираемая точка наблюдения $P(x, y, z)$. Последняя является одной из точек малого объема $V = dV \to 0$ рассматриваемой НМС, подвергающегося в магнитном поле воздей-

[1] Впоследствии она обобщается на нестационарное электромагнитное поле в присутствии среды с анизотропными магнитными и диэлектрическими свойствами.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ствию ЭМС $\overline{F}$. Из физических соображений очевидно, что предельное значение отношения

$$\lim_{V \to 0} \overline{F}/V = \overline{f}, \qquad (4)$$

совпадающего с искомой ОП ЭМС $\overline{f}$, никак не зависит ни от конфигурации (формы) объема dV, ни от его пространственного положения относительно некоторой его точки P, к которой этот объем стремится при бесконечно малом его уменьшении. Воспользуемся этим обстоятельством и выберем в качестве малого объема dV НМС такой, который пространственно совпадает с некоторым элементом трубки поля, проходящей через точку P.

При этом трубка поля через эту точку проводится таким образом, чтобы ее сечение, ортогональное вектору $\overline{H}(\overline{r}_P)$, имело форму квадрата, а магнитные поверхности, имеющие общую точку P, в окрестности этой точки совпадали с участками плоскостей $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$. Путем подбора достаточно малой величины Δl элементу трубки поля при точке P всегда можно придать форму куба. Отметим, что на рис. 1 с целью упрощения ось координат $0z$ выбрана на некоторой линии, параллельной вектору напряженности $\overline{H}(\overline{r}_P)$. Указанное ограничение никак не сказывается на общности последующих выводов.

В пределах выбранного указанным образом малого объема dV НМС векторные поля с магнитными индукцией $\overline{B}(x, y, z)$, напряженностью $\overline{H}(x, y, z)$ имеют только один из слагающих их в принятой системе координат (рис. 1) векторов по оси z:

$$\overline{B}(x, y, z) = \overline{q}_z B_z = \overline{q}_z B,\ B_x = B_y = 0; \qquad (5)$$

$$\overline{H}(x, y, z) = \overline{q}_z H_z = \overline{q}_z H,\ H_x = H_y = 0. \qquad (6)$$

Приводимые ниже соотношения

$$J_x = \operatorname{rot}_x \overline{H} = \frac{\partial H_z}{\partial y};\quad J_y = \operatorname{rot}_y \overline{H} = -\frac{\partial H_z}{\partial x};$$

$$\operatorname{rot}_z \overline{H} = J_z = 0; \qquad (7)$$

$$\operatorname{div} \overline{B} = \operatorname{div}(\mu \overline{H}) = \mu \operatorname{div} \overline{H} + (\overline{H} \operatorname{grad} \mu) =$$

$$= \mu \frac{\partial H_z}{\partial z} + H_z \frac{\partial \mu}{\partial z} = 0; \qquad (8)$$

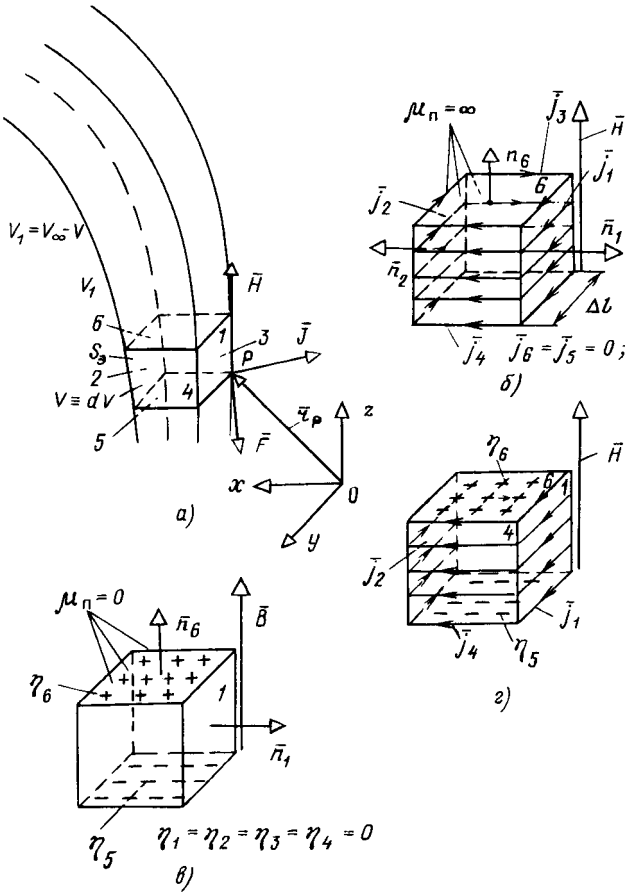


Рис. 1

$$[\overline{J} \times \overline{B}] = \begin{vmatrix} \overline{q}_x & \overline{q}_y & \overline{q}_z \\ J_x & J_y & 0 \\ 0 & 0 & B_z \end{vmatrix} =$$

$$= \overline{q}_x B_z J_y - \overline{q}_y B_z J_x = \overline{q}_x B J_y - \overline{q}_y B J_x \qquad (9)$$

будут справедливы для любой точки, принадлежащей малому объему dV или его граничной поверхности $S_э$, и являются следствием уравнений (5) и (6). Координаты переменной точки наблюдения, принадлежащей поверхности $S_э$ объема dV, в дальнейшем обозначаются через x_0, y_0, z_0.

Кроме того, ввиду малой величины длины Δl ($\Delta l \to 0$) стороны куба (объема dV), значения векторных функций $\overline{H}_j$ и скалярных функций μ_j, $j \in [1, 6]$ на отдельных участках (гранях с номером j) поверхности $S_э$ могут быть с большой точностью найдены в соответствии со следующими уравнениями:

$$\overline{H}_1 = \overline{H}_3 = \overline{H}_5(x_0, y_0, z_0) = \overline{H}(x, y, z) = \overline{H}(\overline{r}_P) =$$

$$= \text{invar}; \qquad (10)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\mu_1 = \mu_3 = \mu_5(x_0, y_0, z_0) = \mu(x, y, z) = \mu(\bar{r}_P) = \text{invar}; \quad (11)$$

$$\bar{H}_2 = \bar{H}_1 + (d\bar{H})_1 = \bar{H}_1 + \Delta l(\bar{q}_x \nabla)\bar{H} = \bar{H}(\bar{r}_P) + \bar{q}_z \frac{\partial H_z}{\partial x} \Delta l = \bar{q}_z(H_z - J_y \Delta l); \quad (12)$$

$$\mu_2 = \mu_1 + (d\mu)_1 = \mu + d\mu_x = \mu + \frac{\partial \mu}{\partial x} \Delta l; \quad (13)$$

$$\bar{H}_4 = \bar{H}_3 + (d\bar{H})_3 = \bar{H} + \Delta l(\bar{q}_y \nabla)\bar{H} = \bar{H} + \bar{q}_z \frac{\partial H_z}{\partial y} \Delta l = \bar{q}_z(H_z + J_x \Delta l); \quad (14)$$

$$\mu_4 = \mu_3 + (d\mu)_3 = \mu + d\mu_y = \mu + \frac{\partial \mu}{\partial y} \Delta l; \quad (15)$$

$$\bar{H}_6 = \bar{H}_5 + (d\bar{H})_5 = \bar{H} + \Delta l(\bar{q}_z \nabla)\bar{H} = H_z \bar{q}_z + \bar{q}_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \Delta l = \bar{q}_z \left[H_z - (1/\mu) H_z \frac{\partial \mu}{\partial z} \Delta l \right]; \quad (16)$$

$$\mu_6 = \mu_5 + (d\mu)_5 = \mu + d\mu_z = \mu + \frac{\partial \mu}{\partial z} \Delta l. \quad (17)$$

В последующих выводах всюду, если не делается специальных оговорок, направление вектора элемента площади $\bar{dS}$ поверхности $S_э$ совпадает с направлением из малого объема dV во вне его. Принимая во внимание сказанное и обозначения рис. 1, получаем очевидные соотношения, связывающие орт $\bar{n}_j$ на j-й грани с одним из трех ортов декартовой системы координат на рис. 1: $\bar{n}_2 = -\bar{n}_1 = \bar{q}_x$; $\bar{n}_4 = -\bar{n}_3 = \bar{q}_y$; $\bar{n}_6 = -\bar{n}_5 = \bar{q}_z$.

2.1. Обоснование расчетного выражения объемной плотности электромагнитных сил в магнитном поле по изменению магнитной энергии системы при малом перемещении ее элементарного объема. Общепризнано считать наиболее общим и универсальным методом исследования проблемы ЭМС в НМС энергетический, в основу которого положен закон сохранения энергии при ее преобразовании в процессе малого перемещения выделенной части НМС относительно остальной неподвижной V_1 части НМС.

При этом определяется не полная ЭМС $\bar{F}$, действующая на перемещаемую часть (объем) V НМС, а только одна слагающая вдоль линии перемещения

$$\bar{F}_\xi = \bar{n}_\xi F_\xi; \quad \bar{n}_\xi = \bar{\delta\xi}/\delta\xi,$$

где $\bar{\delta\xi}$ — вектор малого ($\bar{\delta\xi} \to 0$) перемещения выделенной части V НМС относительно остальной (V_1) части линеаризованной модели НМС.

Алгоритм практической реализации энергетического метода по определению ЭМС $\bar{F}_\xi$, действующей на выделенный объем V (в направлении вектора перемещения $\bar{\delta\xi}$), имеющий конечные размеры, наиболее обстоятельно разработан в последнее время в работах А. В. Иванова-Смоленского [4, 5].

Как показывает анализ, такая же методика эффективно может быть применена и при решении более общей проблемы определения ОП распределения ЭМС в НМС. С этой целью определяется (полная) ЭМС $\bar{F} = \bar{q}_x F_x + \bar{q}_y F_y + \bar{q}_z F_z$, действующая на произвольно выбранный малый объем $V \equiv dV$ ($dV \to 0$) рассматриваемой НМС. При этом ЭМС $\bar{F}_x = \bar{q}_x F_x = \bar{q}_x f_x dV$; $\bar{F}_y = \bar{q}_y F_y$; $\bar{F}_z = \bar{q}_z F_z$, действующие на выделенную часть НМС dV в направлении соответствующей оси декартовой системы координат (рис. 1), определяются в соответствии с методикой [4, 5] для трех значений вектора перемещения $\bar{\delta\xi}$: 1) $\bar{\delta\xi} = \bar{\delta x} = \bar{q}_x \delta x$ при определении ЭМС $\bar{F}_x$; 2) $\bar{\delta\xi} = \bar{\delta y} = \bar{q}_y \delta y$ при определении ЭМС $\bar{F}_y = \bar{q}_y F_y$; 3) $\bar{\delta\xi} = \bar{\delta z} = \bar{q}_z \delta z$ при определении ЭМС $\bar{F}_z = \bar{q}_z F_z$. Искомое расчетное выражение для ОП ЭМС в НМС находится затем путем решения уравнения (4).

Существенно [4, 5], что перед перемещением выделенной части dV исходная НМС заменяется линеаризованной моделью, в которой воспроизводятся такие же, как и в самой НМС, магнитные поля с индукцией и напряженностью[2]

$$\bar{B}_M(x, y, z) = \bar{B}(x, y, z); \quad \bar{H}_M(x, y, z) = \bar{H}(x, y, z),$$

[2] Воспроизводятся и их производные любого типа, например, $\nabla \times \bar{H}_м = \nabla \times \bar{H}$; $(\nabla \bar{H}_м) = (\nabla \bar{H})$; $(\bar{B}_м \nabla)\bar{H}_м = (\bar{B}\nabla)\bar{H}$ и т. д.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и по этой причине такое же, как в исходной НМС, искомое поле ОП ЭМС: $\overline{f}_M(x, y, z) = \overline{f}(x, y, z)$. Кроме того, действие реальных токов контуров i_k, $k \in [1, N]$ (N — число контуров с токами в рассматриваемой системе) заменяется эквивалентным действием (в отношении магнитного поля системы) поверхностных токов элементарных ветвей. Под последними понимаются [4, 5] элементы трубок поля с достаточно малыми высотой и поперечным сечением. При этом энергетические преобразования в системе, обусловленные перемещением ее части dV, удовлетворяют уравнению баланса энергии $\delta W_э = \delta W + A$, $A = (\overline{F}_\xi \overline{\delta\xi})$, которое следует рассматривать при условии поддержания неизменными либо токов контуров $i_k = \text{const}$ (или токов элементарных ветвей $i_{BS} = \text{const}$) либо магнитных потоков контуров $\Phi_k = \text{const}$ (или магнитных потоков ветвей $\Phi_{BS} = \text{const}$), $k \in [1, N]$; $S \in [1, \infty]$.

Важно ответить, что конфигурация элементарных ветвей, образующих в своей совокупности выделенный объем V конечных размеров, а также конфигурации ветвей, входящих в состав внешнего к объему V магнитного поля и не примыкающих к этому объему, не изменяются в процессе перемещения объема V на малый вектор $\overline{\delta\xi}$ и магнитное поле в них сохраняется таким же, каким оно было в начальный момент перемещения.

В тех же ветвях, которые извне примыкают к перемещаемому объему V и изменяют свою конфигурацию (размеры) в процессе перемещения объема V, за счет сторонних управляемых источников поддерживаются неизменными либо токи этих ветвей, либо магнитные потоки.

В данном случае выделенная часть $V \equiv dV \to 0$ НМС бесконечно мала и пространственно совпадает с единственным элементом трубки поля (рис. 1), а граничная поверхность $S_э$ этого объема кубической формы состоит из двух участков потенциальных (грани *5* и *6*) и четырех участков магнитных поверхностей. Приращение магнитной энергии произойдет лишь в тех (шести) элементарных ветвях неперемещаемой части V_1 системы, которые непосредственно примыкают к граничной поверхности $S_э$ малого объема dV и изменяют свои размеры вследствие перемещения выделенного объема.

Определим вначале ЭМС $\overline{F}_z = \overline{q}_z F_z$ и соответствующую этой ЭМС слагающую $\overline{f}_z = \overline{q}_z f_z$ искомой векторной функции ОП ЭМС $\overline{f}$. При этом выделенная часть dV линеаризованной модели НМС перемещается на $\overline{\delta\xi} = \overline{\delta z} = \overline{q}_z \delta_z$. Полное приращение магнитной энергии системы при перемещении объема dV в условиях поддержания неизменными магнитных потоков $\Phi_{BS} = \text{const}$ в элементарных ветвях (элементах трубок поля), примыкающих извне к граням *5* и *6*,

$$\delta W_z = \delta W_{zj} + \delta W_{z\mu},$$

где

$$\delta W_{zj} = \delta W_z \Big|_{\substack{J \neq 0 \\ \mu = \text{invar}}} = \delta W'_{zj} + \delta W''_{zj};$$

$$\delta W_{z\mu} = \delta W_z \Big|_{\substack{J = 0 \\ \mu = \text{var}}} = \delta W'_{z\mu} + \delta W''_{z\mu}. \qquad (18)$$

Нетрудно убедиться в том, что $\delta W_{zj} = 0$. Действительно, в данном случае [4]

$$\delta W'_{zj} = -(1/2)(B^2/\mu)\delta z \cos\widehat{(\bar{n}_5 \overline{\delta z})}\Delta l^2 = $$

$$= (1/2)(B^2/\mu)\delta z \Delta l^2; \qquad (19)$$

$$\delta W''_{zj} = -(1/2)(|\overline{B} + d\overline{B}|^2/\mu)\delta z \cos\widehat{(\bar{n}_6 \overline{\delta z})}\Delta l^2 =$$

$$= -(1/2)(B^2/\mu)\delta z \Delta l^2, \qquad (20)$$

поскольку

$$d\overline{B} = \Delta l(\overline{q}_z \nabla)\overline{B} = \overline{q}_z \Delta l \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0, \qquad (21)$$

так как в пределах малого объема dV при $B_x(x, y, z) = B_y = 0$ имеем

$$\operatorname{div} \overline{B} = \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0.$$

Совместное рассмотрение уравнений (18)–(21) подтверждает ранее сделанный вывод о равенстве нулю приращения δW_{zj}.

Определим теперь другую составляющую приращения магнитной энергии системы $\delta W_{z\mu}$, обусловленную изменением магнитной проницаемости в направлении оси $0z$. Учтем при этом [см. (21)], что значение индукции $\overline{B}_6$ на грани *6* совпадает со значением индукций $\overline{B}_5 = \overline{B}$ на грани *5*. Получим в итоге

$$\delta W'_{z\mu} = -(1/2)(B^2/\mu)\delta z \cos\widehat{(\bar{n}_5 \overline{\delta z})}\Delta l^2 =$$

$$= (1/2)(B^2/\mu)\delta z \Delta l^2;$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\delta W''_{z\mu} = -(1/2)(B^2/(\mu + d\mu_z))\delta z\,\Delta l^2 \cos(\widehat{\bar{n}_6 \delta z}) =$$

$$= -(1/2)\frac{B^2}{\mu}\left[1 - \frac{d\mu_z}{\mu}\right]\delta z \Delta l^2 =$$

$$= -(1/2)\frac{B^2}{\mu}\delta z \Delta l^2 + (1/2)H^2\frac{\partial \mu}{\partial z}\delta z \Delta l^3,$$

откуда, принимая во внимание [4, 5],

$$\delta W_{z\mu}\Big|_{i_{BS} = \text{const}} = -\delta W_{z\mu}\Big|_{\Phi_{BS} = \text{const}} =$$

$$= -(\delta W'_{z\mu} + \delta W''_{z\mu}) = -(1/2)H^2\frac{\partial \mu}{\partial z}\delta z \Delta l^3,$$

определяем

$$\bar{f}_z = \bar{q}_z f_z = \lim_{V \to 0}\frac{\bar{F}_z}{V} =$$

$$= \bar{q}_z \lim_{V \to 0}\left\{\frac{1}{V}\frac{\delta W_z}{\delta z}\Big|_{i_{BS} = \text{const}}\right\} =$$

$$= -(1/2)H^2\frac{\partial \mu}{\partial z}\bar{q}_z. \qquad (22)$$

Механизм решения задачи определения искомых слагающих $\bar{f}_x$ и $\bar{f}_y$ векторной функции ОП ЭМС $\bar{f}$ вполне аналогичен. По этой причине ограничимся подробным обоснованием расчетного выражения, например, для слагающей векторной функции $\bar{f}_x = \bar{q}_x f_x$. Поскольку грани *1* и *2* выделенного объема (куба) системы совпадают с участками магнитных поверхностей, то сохранение неизменным магнитного поля в двух элементарных трубках (ветвях), примыкающих извне к граням *1* и *2* и изменяющих свои размеры при перемещении объема $V \equiv d\,V \to 0$, удается обеспечить путем поддержания неизменными токов упомянутых выше двух элементарных ветвей. Искомое приращение магнитной коэнергии системы (коэнергия обозначается таким же символом как и магнитная энергия, но имеющим сверху знак "~"), обусловленное перемещением малого объема $V \equiv dV \to 0$ на $\overline{\delta\xi} = \bar{\delta}\,\bar{x} = \bar{q}_x \delta x$ в условиях $i_{BS} = \text{const}$, $S \in [1, \infty[$, определится [4, 5] из уравнения $\delta W_x = \delta \tilde{W}_x = \delta \tilde{W}'_x + \delta \tilde{W}''_x$, где расчетным выражениям для приращений $\delta W'_x$ и $\delta W''_x$ можно, принимая во внимание рис. 1, а также (8), (10)–(13), придать следующий вид:

$$\delta W'_x = \delta \tilde{W}'_x = -(1/2)H^2\mu\delta x \cos(\widehat{\bar{n}_1 \delta x})\Delta l^2 =$$

$$= (1/2)H^2\mu\delta x \Delta l^2;$$

$$\delta W''_x = \delta \tilde{W}''_x =$$

$$= -(1/2)|\bar{H} + d\bar{H}_x|^2(\mu + d\mu_x)\delta x \cos(\widehat{\bar{n}_2 \delta x})\Delta l^2 =$$

$$= (-1/2)|\bar{H} + \Delta l(\bar{q}_x \nabla)\bar{H}|^2(\mu + d\mu_x)\delta x \Delta l^2 =$$

$$= \left\{-\frac{H^2}{2}\left[\mu + \frac{\partial \mu}{\partial x}\Delta l\right] - H_z\mu(-J_y)\Delta l\right\}\delta x \Delta l^2.$$

Суммируя левые и правые части последних двух уравнений, найдем искомое выражение для приращения магнитной энергии системы:

$$(\delta W_x = \delta \tilde{W}_x)\Big|_{\substack{i_{BS} = \text{const},\\ S \in [1, \infty[}} =$$

$$= \left\{-(1/2)H^2\frac{\partial \mu}{\partial x} + B_z J_y\right\}\Delta l^3 \delta x,$$

откуда

$$\bar{f}_x = \bar{q}_x f_x = \lim_{V \to 0}\frac{\bar{F}_x}{V} =$$

$$= \bar{q}_x \lim_{V \to 0}\left\{\frac{1}{V}\frac{\delta W_x}{\delta x}\Big|_{\substack{i_{BS} = \text{const},\\ S \in [1, \infty[}}\right\} =$$

$$= \bar{q}_x\left\{-\frac{H^2}{2}\frac{\partial \mu}{\partial x} + B_z J_y\right\}. \qquad (23)$$

Аналогично выводится расчетная формула для слагающей $\bar{f}_y$:

$$\bar{f}_y = \bar{q}_y f_y = \bar{q}_y\left\{-(1/2)H^2\frac{\partial \mu}{\partial y} - B_z J_x\right\}. \qquad (24)$$

Из совместного рассмотрения уравнений (22)–(24) с учетом уравнения (9) следует искомое соотношение (1) для ОП ЭМС:

$$\bar{f} = \bar{f}_x + \bar{f}_y + \bar{f}_z = [\bar{J} \times \bar{B}] - (1/2)H^2 \operatorname{grad} \mu. \qquad)J5P$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

2.2. Обоснование расчетного выражения для объемной плотности электромагнитных сил в магнитном поле по натяжениям. Как показывает анализ, поиск искомого выражения для ОП ЭМС в магнитном поле может быть реализован двумя способами, отличающимися степенью сложности промежуточных математических преобразований и по своей физической наглядности.

2.2.1. Способ определения ОП ЭМС в магнитном поле, основанный на дифференцировании компонентов тензора натяжений в магнитном поле. Этот способ вывода формулы Максвелла (1) для ОП ЭМС в магнитном поле следует называть классическим. В послемаксвелловский период этот способ использовался в [3, 6] при выводе формулы (1). Наиболее обстоятельно особенности применения этого способа при доказательстве формулы (1) проанализированы в [7]. Существо классического способа вывода формулы Максвелла (1) сводится к дифференцированию известных по условию компонентов тензора натяжений в магнитном поле $T_{pq} = (B_p B_q - (1/2)B^2\delta_{pq})/\mu$; $p, q \in [z, y, z]$; $\delta_{pq} = 1$, если $p = q$; $\delta_{pq} = 0$, если $p \neq q$, в соответствии с уравнениями

$$f_\lambda = \frac{\partial T_{\lambda x}}{\partial x} + \frac{\partial T_{\lambda y}}{\partial y} + \frac{\partial T_{\lambda z}}{\partial z}; \ \lambda \in [x, y, z],$$

что приводит в конечном итоге после достаточно сложных математических преобразований к искомой формуле (1) для ОП ЭМС в магнитном поле $\overline{f}$.

2.2.2. Способ определения ОП ЭМС в магнитном поле, основанный на объемном дифференцировании тензора натяжений. При применении этого способа подлежит определению предельное значение правой части уравнения

$$\overline{f} = \operatorname{div} \overline{T} = \lim_{V \to 0} \frac{1}{V} \oint_{S_э} (\overline{T} d\overline{S}) =$$

$$= \lim_{V \to 0} \frac{1}{V} \oint_{S_э} (\overline{T}_n dS) = \lim_{V \to 0} \frac{\overline{F}}{V},$$

где электромагнитное натяжение на элементе $\overline{dS}$ поверхности $S_э$, ограничивающей объем $V \to 0$,

$$\overline{T}_n = (\overline{T}\overline{n}) = \mu(\overline{H}H_n - \overline{n}(1/2)H^2) \qquad (25)$$

предполагается известным, определенным предварительно энергетическим методом так, как это сделано, например, в [8].

Основная идея объемного дифференцирования тензора натяжений заключается в определении ЭМС $\overline{F}$, действующей на выделенный объем системы $V \to 0$ (рис. 1) ($\overline{F} = \overline{f}V$), путем суммирования элементарных сил на граничной поверхности

$$\overline{F} = \oint_{S_э} \overline{T}_n dS \approx \sum_{j=1}^{6} \overline{T}_{n_j} S_j = \Delta l^2 \sum_{j=1}^{6} \overline{T}_{n_j}.$$

Суммирование натяжений на отдельных гранях малого объема (куба) при $V \to 0$

$$\overline{T}_{n_j} = \mu_j(\overline{H}_j H_{n_j} - \overline{n}_j (1/2)H_j^2), \ j \in [1, 6]$$

целесообразно осуществить в следующей последовательности: вначале сложить натяжения на каждой из трех пар параллельных граней, а затем сложить три результирующих вектора натяжений.

Принимая во внимание сказанное выше, а также соотношения (10)—(17), получаем после несложных преобразований искомое соотношение для ОП ЭМС в магнитном поле (1):

$$\overline{f} = \lim_{V \to 0} (\overline{F}/V) = \lim_{V \to 0} \frac{1}{V} \oint_S \overline{T}_n dS = \operatorname{div} \overline{T} =$$

$$= \lim_{\Delta l \to 0} \frac{1}{\Delta l^3} \sum_{j=1}^{6} \overline{F}_j =$$

$$= \lim_{\Delta l \to 0} \frac{1}{\Delta l^3} \sum_{j=1}^{6} (\overline{T}_{n_j} \Delta l^2) =$$

$$= \lim_{\Delta l \to 0} \left[\frac{1}{\Delta l} \sum_{j=1}^{6} \overline{T}_{n_j} \right] =$$

$$= [\overline{J} \times \overline{B}] - (1/2)H^2 \operatorname{grad} \mu.$$

2.3. Обоснование расчетного выражения для объемной плотности электромагнитных сил на основе применения специальных силовых оболочек: магнитных с фиктивными токами проводимости или магнитно непроницаемых, заряженных фиктивными магнитными зарядами. Упомянутые выше оба типа силовых оболочек являются не чем иным как физическими идентификаторами натяжений в магнитном поле. Особые свойства магнитной токовой оболочки и механизм практического ее применения при определении ЭМС $\overline{F}$, действующей на выделенный объем V системы, имеющий конечные размеры, установлены в [10]. Основ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ное назначение магнитной токовой оболочки, а также предлагаемого здесь ее альтернативного варианта — магнитно непроницаемого, заряженного фиктивными магнитными зарядами силового магнитного листка, заключается в том, что с их помощью (без прямого обращения к энергетическому методу) удается обосновать как формулу для натяжений в магнитном поле (25), так и формулу для ОП ЭМС. При этом само обоснование оказывается достаточно простым в математическом отношении и отличается физической наглядностью.

2.3.1. Расчет натяжений и ОП ЭМС в магнитном поле на основе применения магнитных токовых оболочек. Обратим внимание на то, что некоторая замкнутая без самопересечений поверхность S разделяет систему на два объема (V и V_1) условно; физического разделения системы на две автономные части не происходит. Будем теперь считать, что на месте граничной поверхности S размещена некоторая ферромагнитная поверхность с бесконечно большой магнитной проницаемостью $\mu = \infty$, с каждой стороной которой совмещены поверхностные токовые слои, плотности тока в которых удовлетворяют следующим соотношениям (рис. 2): $\overline{j} = \overline{n} \times \overline{H}$; $\overline{j}_1 = \overline{n}_1 \times \overline{H}$.

Образованная указанным выше образом магнитная токовая оболочка и созданное ею магнитное поле обладают специфическими свойствами. Одно из них сводится к тому, что возбуждаемые фиктивными токами проводимости магнитные поля ($\overline{H}$ и $\overline{B}$) имеют только тангенциальные слагающие, сосредоточиваются в пределах поверхностных токовых слоев оболочки и совпадают на наружной поверхности оболочки с аналогичными слагающими напряженности и индукции действительного магнитного поля. Особое свойство этих оболочек можно усмотреть в том, что с их помощью осуществляется физическое подразделение исходной замкнутой системы на две независимые (автономные) замкнутые подсистемы, магнитные поля индукции и напряженности в которых сохраняются такими же какие имели место в исходной НМС до проведения магнитной токовой оболочки.

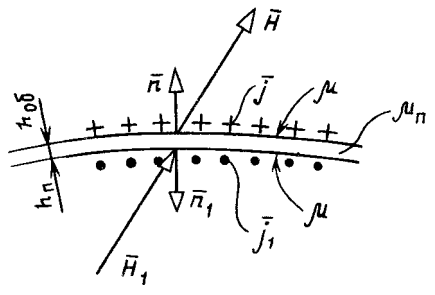


Рис. 2

По этой причине сохраняются неизменными и пространственные распределения силовых полей ОП ЭМС в обеих автономных частях рассматриваемой НМС. Основное достоинство магнитных токовых оболочек заключается в том, что два ее активных слоя (граничные поверхности объемов с магнитной проницаемостью μ, примыкающие к магнитной подложке с магнитной проницаемостью $\mu_п = \infty$, на которых располагаются поверхностные токовые слои) являются не чем иным, как физическими носителями тех ЭМС, которые обусловливают натяжение $\overline{T}_n$ на элементе $\overline{dS} = \overline{n}\,dS$ активного слоя токовой оболочки. При этом ограничивающая объем V_1 ферромагнитная поверхность с магнитной проницаемостью среды μ, испытывает силу тяжения, направленную в сторону среды с меньшей магнитной проницаемостью и распределенную с плотностью $\overline{T}_{nn\mu} = \overline{n}(1/2)B_n H_n$, являющейся не чем иным, как нормальной слагающей вектора натяжения магнитного происхождения.

Силовое взаимодействие поверхностного токового слоя (с плотностью тока в слое $\overline{j} = \overline{n} \times \overline{H}$) с магнитными полями $\overline{B}_\tau = \overline{\tau} B_\tau$ и $\overline{B}_n = \overline{n} B_n$ обусловливает нормальную и тангенциальную слагающие вектора натяжения амперовского происхождения

$$\overline{T}_{nnj} = [\overline{j} \times (1/2)\overline{B}_\tau] = [[\overline{n} \times \overline{H}] \times (1/2)\overline{\tau} B_\tau] =$$

$$= -\overline{n}(1/2)B_\tau H_\tau,$$

$$\overline{T}_{n\tau j} = [\overline{j} \times \overline{B}_n] = [[\overline{n} \times \overline{H}] \times \overline{n} B_n] = \overline{\tau} B_n H_\tau,$$

где множитель 1/2 учитывает то, что при переходе через токовый слой магнитная индукция $\overline{B}_{\tau\sim}$ в слое изменяется от 0 до B_τ.

Результирующее натяжение, испытываемое элементом $\overline{dS} = \overline{n}\,dS$ активного слоя магнитной токовой оболочки, определится как результат суммирования левых и правых частей трех последних уравнений [10]:

$$\overline{T}_n = \overline{T}_{nn\mu} + \overline{T}_{nnj} + \overline{T}_{n\tau j} =$$

$$= \overline{n}(1/2)B_n H_n - \overline{n}(1/2)B_\tau H_\tau + \overline{\tau} B_n H_\tau =$$

$$= \mu(\overline{H} H_n - (1/2)\overline{n} H^2).$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Весьма простым оказывается и обоснование на основе применения магнитной токовой оболочки расчетного выражения для ОП ЭМС в магнитном поле, если выделенный объем $V \to 0$ системы пространственно совпадает с элементом трубки поля (рис. 1,*б*). В этом случае натяжение $\overline{T}_n$ в пределах участка магнитной токовой оболочки, пространственно совпадающей с λ-й гранью элементарного куба (объема $V \to 0$), упрощается:

$$\overline{T}_n = \overline{T}_{nnj} = \overline{j} \times (1/2)\overline{B}_\tau =$$

$$= -\overline{n}(1/2)B_\tau H_\tau, \ \overline{n} \equiv \overline{n}_\lambda, \ \lambda \in [1, 4];$$

$$\overline{T}_n = \overline{T}_{nn\mu} = \overline{n}(1/2)B_n H_n, \ \overline{n} = \overline{n}_\lambda, \ \lambda \in [5, 6].$$

Последующий вывод расчетного выражения для ОП ЭМС в математическом отношении полностью совпадает с приведенным в п. 2.2.

2.3.2. Расчет электромагнитных сил в магнитном поле на основе применения магнитно непроницаемых, заряженными фиктивными магнитными зарядами оболочек. Такого рода оболочки для краткости в дальнейшем называются силовыми магнитными листками (рис. 3,*а*). В отличие от магнитной токовой оболочки несущая на себе поверхностные слои фиктивных магнитных зарядов поверхность S магнитно непроницаема: ее магнитная проницаемость условно принимается равной нулю: $\mu_п = 0$. К магнитно непроницаемому слою листка с обеих его сторон примыкают два бесконечно тонких слоя, заряженных фиктивными магнитными зарядами с плотностью их распределения $\eta = (\overline{B}\overline{n}) = -\eta_1 = -(\overline{B}\overline{n}_1)$.

Нетрудно убедиться в том, что внесение силового магнитного листка никак не повлияет на магнитные поля с индукцией $\overline{B}$ и напряженностью $\overline{H}$ вне самого листка. Действительно, применив теорему Гаусса к некоторому бесконечно малому цилиндрическому объему V_c, охватывающему активную часть на одной из сторон силового магнитного листка (рис. 3,*б*), получим, имея в виду, $\Delta \to 0$, $d \to 0$, $d \gg \Delta$ и отсутствие поля индукции в магнитно непроницаемом слое листка с $\mu_п = 0$, $(\operatorname{div} \overline{B})V_c = \int_s (\overline{B}\,\overline{dS}) = B_n S_c = \eta S_c$, откуда следует вывод о неизменности нормальной составляющей магнитной индукции на наружной поверхности силового магнитного листка.

Применив закон полного тока к контуру, образующему от пересечения плоскости рис. 3,*б* с

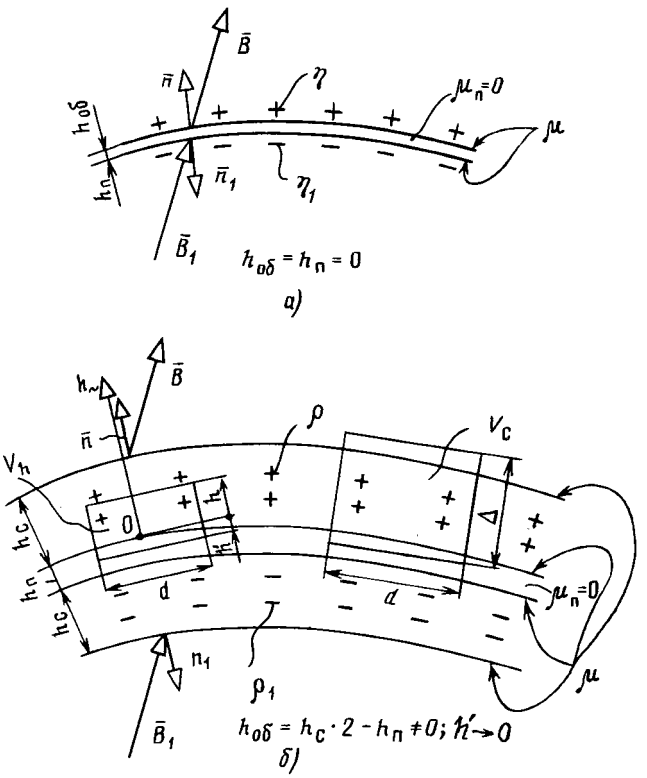


Рис. 3

цилиндрическим объемом V_h, убедимся в неизменности (из-за отсутствия в пределах листка вихрей напряженности магнитного поля: $\operatorname{rot} \overline{H} = 0$) внутри листка тангенциальной слагающей напряженности, определяемой тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на наружной поверхности листка H_τ: $H_{\tau h} = H_\tau = \text{const} \neq f_1(h)$, $h \in [-h', h_c]$.

Так как магнитная проницаемость в двух бесконечно близких точках, разделенных магнитным листком совпадает с действительной магнитной проницаемостью μ, то оказываются неизменными нормальная составляющая напряженности $H_{nh}(h_c) = H_n = \dfrac{B_n}{\mu}$ и тангенциальная составляющая индукции $B_{\tau h}(h_c) = B_\tau = \mu H_\tau$ на наружной поверхности силового магнитного листка. Таким образом, значения векторных функций индукции $\overline{B}(h_c) = \overline{n}B_n + \overline{\tau}B_\tau$ и напряженности $\overline{H}(h_c) = \overline{n}H_n + \overline{\tau}H_\tau$ на каждой из сторон магнитного листка сохранятся такими же, какими они были в соответствующих точках пространства до внесения силового магнитного листка.

На значениях векторных функций $\overline{B}$ и $\overline{H}$ в данной точке наблюдения никак не скажется и

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

изменение ориентации элемента $\overline{dS} = \overline{n}\,dS$ силового магнитного листка, проходящего через эту точку. Последнее возможно только в том случае, если магнитные поля индукции и напряженности, обусловленные самим магнитным листком, сосредоточены в пределах самого листка. Как показывает анализ, собственные магнитные поля индукции и напряженности, обусловленные фиктивными магнитными зарядами, имеют только одну нормальную к поверхности листка слагающую.

При определении векторной функции натяжения на любой из двух сторон силового магнитного листка удобно предварительно рассчитать ЭМС, воздействующие на единичный элемент $\overline{dS}$ магнитного листка в предположении малой и вместе с тем конечной величины толщины h_c активного слоя магнитного листка. Аппроксимирующие зависимости магнитной проницаемости и ОП фиктивных магнитных зарядов внутри такого слоя в функции удаления h от поверхности магнитной непроницаемой "подложки" листка могут быть выбраны в виде некоторых непрерывно изменяющихся функций, обеспечивающих при этом: а) скачок магнитной проницаемости при переходе через активный слой от 0 при $h = 0$ до μ при $h = h_c$; б) сохранение неизменным магнитного заряда $dQ = \eta dS$, приходящегося на элемент dS поверхности листка. Этим условиям удовлетворяют, например, следующие зависимости для функций $\mu_h(h)$ и $\rho_h(h)$:

$$\mu_h(h) = \mu = \text{const} \neq f_1(h);$$

$$\rho_h(h) = \eta/h_c = \text{const} \neq f_2(h),\ h \in [0,\ h_c].$$

При этом фиктивные магнитные заряды генерируют сосредоточенные в слое собственные магнитные поля $\overline{B}_h$ и $\overline{H}_h$, имеющие только нормальные (к поверхности листка) слагающие, изменяющиеся в зависимости от h по линейному закону. Действительно, применяя теорему Гаусса к объему V_h получаем (рис. 3,*б*):

$$\int_{V_h} \operatorname{div} \overline{B}_h\, dV = \int_S (\overline{B}_h\, \overline{dS}) = B_{nh}\, dS = \rho\, dS h,$$

откуда $B_{nh} = \mu H_{nh} = \rho h = (\eta/h_c)h$; $H_{nh} = (\eta/(\mu h_c))h$, $h \in [0,\ h_c]$.

Тангенциальные слагающие напряженности $\overline{H}_{\tau h}$ и индукции $\overline{B}_{\tau h}$ внутри переходного слоя очевидны:

$$\overline{H}_{\tau h} = \overline{\tau} H_{\tau h} = \overline{\tau} H_\tau = \text{const};$$

$$\overline{B}_{\tau h} = \overline{\tau} B_{\tau h} = \overline{\tau}\mu H_\tau = \text{const},\ h \in [0,\ h_c]$$

и обусловливаются внешними источниками и принятой зависимостью для магнитной проницаемости в слое: $\mu_h(h) = \mu_h(h = h_c) = \mu = \text{const} \neq f_1(h)$, $h \in [0,\ h_c]$.

Физическим носителем ЭМС, обусловливающим искомое натяжение $\overline{T}_n$ на рассматриваемом элементе $\overline{dS} = \overline{n}\,dS$ поверхности S, ограничивающей выделенный объем V рассматриваемой системы, является заряженный фиктивными магнитными зарядами магнитный (с $\mu_h = \mu = \text{const}$) активный слой силового магнитного листка.

Магнитный слой (с $\mu_h = \mu = \text{const}$) этого листка граничит с магнитно непроницаемой "подложкой" (с $\mu_п = 0$) листка. При этом магнитные поля индукции и напряженности на стороне магнитного слоя, обращенной к "подложке", определяются только тангенциальными слагающими $\overline{B}_\tau = \overline{\tau} B_\tau$ и $\overline{H}_\tau = \overline{\tau} H_\tau$, а единичный элемент $\overline{dS}$ магнитного слоя испытывает направленное в сторону "подложки" натяжение, определяемое в соответствии с уравнением [13]

$$\overline{T}_{n\mu} = \overline{T}_{nn\,\mu} = -\,\overline{n}(1/2) B_\tau H_\tau.$$

Магнитостатическое поле внутри активного слоя магнитного листка, удовлетворяющее системе дифференциальных уравнений Максвелла $\operatorname{rot} \overline{H}_h = 0$; $\operatorname{div} \overline{B}_h = \rho_h$, обусловливает возникновение внутри переходного слоя распределенного с ОП $\overline{f}_\rho = \rho_h \overline{H}$ поля пондеромоторных сил, которым подвергаются фиктивные магнитные заряды. Определяемый последними вектор натяжений $\overline{T}_{n\rho}$ находится из очевидного уравнения, вытекающего из закона Кулона:

$$\overline{T}_{n\rho} = \lim_{\substack{dS \to 0 \\ h_c \to 0}} (\overline{F}/dS) = \lim \left\{ \frac{1}{dS} \int_V \overline{f}_\rho\, dV \right\} =$$

$$= \lim \left[\int_0^{h_c} \rho_h \overline{H} dh \right] =$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$= \lim_{h_c \to 0} \int_0^{h_c} (\eta/h_c) \left[\overline{n} H_n \frac{h}{h_c} + \overline{\tau} H_\tau \right] dh =$$

$$= \overline{T}_{nn\rho} + \overline{T}_{n\tau\rho} = \overline{n}(1/2) B_n H_n + \overline{\tau} B_n H_\tau.$$

Суммируя левые и правые части двух последних уравнений вновь приходим к искомому выражению для натяжений в магнитном поле (25), полученному ранее иным путем на основе применения для этой цели магнитной токовой оболочки.

Достаточно простым и физически наглядным оказывается обоснование формулы для натяжений в магнитном поле (25) на основе применения для этой цели магнитного силового листка в том случае, когда выделенный малый объем ($V \to 0$) системы пространственно совпадает с элементом трубки поля. В этом случае (рис. 1,*в*) выражение для натяжения $\overline{T}_{n\lambda}$ участка силового магнитного листка, пространственно совпадающего с λ-й гранью элементарного малого объема (куба) упрощается:

$$\overline{T}_n = \overline{T}_{nn\mu} = -\overline{n}(1/2) B_\tau H_\tau, \quad \overline{n} \equiv \overline{n}_\lambda, \ \lambda \in [1, 4];$$

$$\overline{T}_n = \overline{T}_{nn\rho} = \overline{n}(1/2) B_n H_n, \quad \overline{n} \equiv \overline{n}_\lambda, \ \lambda \in [5, 6].$$

Последующий вывод расчетного выражения для ОП ЭМС полностью повторяет приведенный в п. 2.2.2 с тем же итоговым результатом.

2.3.3. Применение комбинированной зарядотоковой оболочки для определения плотности распределения электромагнитных сил в магнитном поле. В этом случае (рис. 1,*і*) грани элементарного объема (куба) dV с номерами 1÷4, $\lambda \in [1, 4]$ совмещаются с магнитно-токовым поясом, а грани *5* и *6* с магнитно непроницаемыми заряженными фиктивными магнитными зарядами листками. При применении такой комбинированной зарядо-токовой оболочки максимально упрощается поиск натяжений на отдельных гранях куба малого объема dV. Воспользовавшись при этом законами Ампера (при определении натяжений на гранях *1–4*) и Кулона (при определении натяжений на гранях *5*, 6), получим

$$\overline{T}_{nnj} = \overline{j} \times (1/2)\overline{B} = \overline{j} \times (1/2)\overline{B}_\tau =$$

$$= -\overline{n}(1/2) B_\tau H_\tau;$$

$$\overline{T}_{nn\mu} = \eta \overline{H}(1/2) = \eta(1/2)\overline{H}_n = \overline{n}(1/2) B_n H_n.$$

Последующий вывод расчетного выражения для ОП ЭМС в магнитном поле полностью идентичен приведенному в п. 2.2.2. Появление множителя 1/2 объясняется тем, что при прохождении токового (или заряженного фиктивными магнитными зарядами) слоя вектор магнитной индукции, определяемой одной тангенциальной слагающей (или вектор напряженности поля, определяемый одной нормальной слагающей), изменяется от нуля на поверхности подложки до $\overline{B} = \overline{\tau} B_\tau$ (или до $\overline{H} = \overline{n} H_n$) на поверхности слоя, обращенной к среде.

2.4. Вторичные источники магнитного поля, силовая и потенциальная функции и их применение для обоснования пространственного распределения ОП ЭМС в поляризованном магнетике.

Рассматриваемые далее еще три способа обоснования формулы Максвелла (1) для ОП ЭМС в магнитном поле поляризованного магнетика непосредственно вытекают из анализа уравнений Максвелла для этого поля:

$$\operatorname{rot} \overline{H} = 0; \tag{26}$$

$$\operatorname{div} \overline{B} = 0; \tag{27}$$

$$\overline{B} = \mu \overline{H}, \tag{28}$$

из которых следует, что магнитные поля напряженности и индукции поляризованного магнетика обладают, соответственно, истоками и вихрями

$$\operatorname{div} \overline{H} = -(\overline{H} \operatorname{grad} \mu)/\mu; \tag{29}$$

$$\operatorname{rot} \overline{B} = [\operatorname{grad} \mu \times \overline{H}]. \tag{30}$$

Переход от исходной математической модели Максвелла поляризованного магнетика (26)–(30) к любой физически обоснованной иной модели поляризованного магнетика должен, очевидно, сопровождаться сохранением в окрестности рассматриваемой точки наблюдения предлагаемой модели следующих условий:

$$\overline{H}_м = \overline{H}; \ \overline{B}_м = \overline{B}; \ \operatorname{div} \overline{H}_м = \operatorname{div} \overline{H};$$

$$\operatorname{rot} \overline{B}_м = \operatorname{rot} \overline{B}.$$

Этим требованиям в полной мере отвечает так называемая линеаризованная модель поляризованного магнетика, в которой в отличие от исходной модели Максвелла (26)–(28) магнитная проницаемость представляется фиксированной пространственной зависимостью

$$\mu_м(x, y, z) = B_м(x, y, z)/H_м(x, y, z) = B/H = \text{invar}$$

соответствующей пространственным распределе-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ниям магнитных индукций и напряженности в рассматриваемый момент времени.

Из сказанного выше следует, что модель Максвелла и линеаризованная модель поляризованного магнетика адекватны в рассматриваемый момент времени:

$$\overline{B}_{м}(x, y, z) = \overline{B}(x, y, z); \ \overline{H}_{м}(x, y, z) =$$

$$= \overline{H}(x, y, z); \ \operatorname{rot} \overline{H}_{м} = \operatorname{rot} \overline{H}; \ \operatorname{rot} \overline{B}_{м} = \operatorname{rot} \overline{B};$$

$$\operatorname{div} \overline{H}_{м} = \operatorname{div} \overline{H}; \ \operatorname{div} \overline{B}_{м} = \operatorname{div} \overline{B} = 0;$$

$$\overline{f}_{м}(x, y, z) = \overline{f}(x, y, z).$$

Искомая ОП ЭМС в точке наблюдения $P(x, y, z)$ рис. 4 поляризованного магнетика (ПМ) никак не зависит ни от формы малого объема dV, ни от его пространственной ориентации относительно точки P. Рассмотрим в рамках линеаризованной модели (ЛМ) ПМ некоторую окрестность (малый объем dV) точки P, например, сферу малого радиуса ($R_0 \to 0$) с центром на линии, проходящей через точку P в направлении градиента магнитной проницаемости в той же точке: $\operatorname{grad} \mu(P)$. Из сказанного выше следует, что круги, образующиеся от пересечения со сферой плоскостей, перпендикулярных диаметру сферы $PP_{г}$, являются поверхностями уровня для магнитной проницаемости $\mu_{\sim}(x_0)$, где переменная x_0 изменяется от 0 в точке P до $x_{г} = 2R_0$ в точке $P_{г}$. По этой причине вполне достаточно ограничиться заданием аппроксимирующих зависимостей для магнитной проницаемости и ее градиента для переменной точки

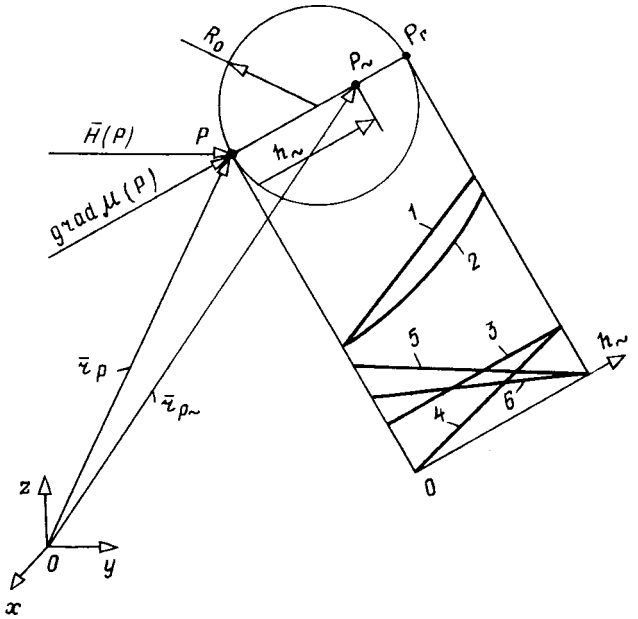


Рис. 4

наблюдения внутри сферы, изменяющей свое положение вдоль диаметра сферы $PP_{г}$ в зависимости от значения удаления x_0 от фиксированной точки наблюдения P.

Графики *1* и *3* (рис. 4) изображают зависимости магнитной проницаемости $\mu_{\sim}(x_0)$ и модуля ее градиента в ЛМ малого объема dV ПМ, которые могут быть представлены также и в аналитическом виде:

$$\left|\operatorname{grad} \mu_{\sim}(P_{\sim})\right| = \left|\operatorname{grad} \mu(P)\right| = \text{const};$$

$$\mu_{\sim}(P_{\sim}) = \mu_{\sim}(x_0, y_0, z_0) = \mu(P) + \left|\operatorname{grad} \mu(P)\right| x_0;$$

$$x_0 \in [0, 2R_0],$$

причем для удобства переменная точка внутри сферы условно обозначена символом $P_{\sim}$, а ее координаты x_0, y_0, z_0; переменная точка, принадлежащая граничной поверхности сферы, обозначена символом $P_{г}$; а ее координаты — $x_{г}$, $y_{г}$, $z_{г}$. При этом символы x, y, z сохранены для обозначения координат точки наблюдения P, в которую вырождается сфера при $R_0 \to 0$.

Модифицированная линеаризованная модель (МЛМ) малого объема dV ПМ вытекает из ЛМ того же малого объема dV ПМ путем искусственного изменения магнитных свойств ЛМ и одновременного размещения внутри сферы (малого объема) МЛМ так называемых вторичных источников магнитного поля: фиктивных магнитных зарядов и фиктивных токов проводимости. Графики *2* и *4* (рис. 4) изображают зависимости магнитной проницаемости $\mu_{м\sim}(x_0)$ и модуля ее градиента в МЛМ малого объема dV ПМ:

$$\left|\operatorname{grad} \mu_{м\sim}(P_{\sim})\right| = \frac{x_0}{2R_0} \left|\operatorname{grad} \mu(P)\right|;$$

$$\mu_{м\sim}(P_{\sim}) = \mu(P) + \frac{x_0^2}{2R_0} \left|\operatorname{grad} \mu(P)\right|.$$

Эквивалентность МЛМ ПМ в окрестности точки P ЛМ ПМ той же окрестности достигается размещения внутри сферы МЛМ ПМ фиктивных магнитных зарядов и фиктивных токов проводимости с переменной ОП их распределения в соответствии с приведенными ниже уравнениями (см. зависимости *5* и *6* на рис. 4):

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\overline{J}_{м\sim} = \overline{J}_{м\,m}\left(1 - \frac{x_0}{2R_0}\right);$$

$$\rho_{м\sim} = \rho_{м\,m}\left(1 - \frac{x_0}{2R_0}\right),$$

где $\rho_{м\,m} = \rho_{м\sim}(P) = -(H \cdot \text{grad}\ \mu)$; $\overline{J}_{м\,m} = \overline{J}_{м\sim}(P) = [\text{grad}\ \mu \times \overline{H}]/\mu$ – максимальные значения ОП распределения вторичных источников магнитного поля, наблюдаемые в точке P, в которую вырождается сфера (малый объем dV) при бесконечно малом уменьшении ее радиуса R_0. Они определяются из условия обеспечения в рассматриваемой точке наблюдения P в МЛМ малого объема ПМ таких же истоков магнитной напряженности и вихрей магнитной индукции, как и в ЛМ малого объема dV ПМ:

$$\text{div}\ \overline{H}_{м\sim}(P) = \text{div}\ \overline{H}(P) = -(\overline{H}\ \text{grad}\ \mu)/\mu;$$

$$\text{rot}\ \overline{B}_{м\sim}(P) = \text{rot}\ \overline{B}(P) = [\text{grad}\ \mu \times \overline{H}].$$

Модифицированная линеаризованная модель малого объема ПМ обладает по сравнению с ЛМ малого объема dV ПМ несомненным преимуществом, поскольку в ней физические носители ЭМС представлены в явной форме. При этом ЭМС, действующие на фиктивные токи проводимости и фиктивные магнитные заряды в объеме dV, определяются на основании, соответственно, закона Ампера и закона Кулона, в соответствии с уравнениями

$$d\overline{F}_{\mu j} = dV[\overline{J}_м \times \overline{B}] = dV(1/2)\overline{J}_{м\,m} \times \overline{B} =$$

$$= (1/2)[[\text{grad}\ \mu \times \overline{H}] \times \overline{H}]dV;$$

$$d\overline{F}_{\mu\rho} = dV\rho_м \overline{H} = dV(1/2)\rho_{м\,m}\overline{H} =$$

$$= -(1/2)(\overline{H}\ \text{grad}\ \mu)\overline{H}dV,$$

где эффективные значения ОП распределения фиктивных токов проводимости ($\overline{J}_м$) и фиктивных магнитных зарядов ($\rho_м$) совпадают со средними значениями распределения тех же физических величин в пределах малого объема dV, равными половине максимальных значений ОП этих величин $\overline{J}_м = (1/2)\overline{J}_{м\,m}$; $\rho_м = (1/2)\rho_{м\,m}$.

Из-за переменной намагниченности (см. график *4* на рис. 5 для $|\text{grad}\ \mu_{м\sim}(h_\sim)|$) малый объем dV в рамках его МЛМ подвержен воздействию еще одной слагающей ЭМС $d\overline{F}_{\mu\mu}$ в соответствии с уравнением

$$d\overline{F}_{\mu\mu} = -(1/4)H^2 \text{grad}\ \mu_м(P_г)dV.$$

Однако эта ЭМС стремится (при $dV \to 0$) к нулю как величина второго порядка малости в сравнении с ЭМС $d\overline{F}_{\mu j}$ и $d\overline{F}_{\mu\rho}$, поскольку в последнем уравнении к нулю стремятся как dV, так и $\text{grad}\ \mu_м(P_г) \to \text{grad}\ \mu_м(P) = 0$.

2.4.1. Вторичные источники магнитного поля и их применение для обоснования пространственного распределения ОП ЭМС в поляризованном магнетике. Искомое расчетное выражение для ОП ЭМС, действующих на поляризованный магнетик получается на основании обоснованной в п. 2.4 МЛМ ПМ и применения законов Ампера и Кулона и принципа суперпозиции:

$$\overline{f}_{\mu\rho} = \overline{H}_м\ \text{div}\ \overline{B}_м = \overline{H}\rho_м = -\overline{H}(1/2)(\overline{H}\ \text{grad}\ \mu);$$

$$\overline{f}_{\mu j} = [\overline{J}_м \times \overline{B}_м] = (1/2)\frac{[\text{grad}\ \mu \times \overline{H}]}{\mu} \times \overline{B};$$

$$\overline{f}_\mu = \overline{f}_{\mu\rho} + \overline{f}_{\mu j} = -(1/2)H^2\ \text{grad}\ \mu.$$

2.4.2. Потенциальная функция вторичных источников магнитного поля и ее применение для обоснования пространственного распределения ОП ЭМС в поляризованном магнетике. Если символами $\overline{A}$ и φ обозначить соответственно, векторный и скалярный магнитные потенциалы, то, как показывает анализ [17], зависимость потенциальной функции для ПМ приобретает следующий вид:

$$u_\mu = (\overline{J}_м \overline{A}) + \rho_м\varphi = u_{\mu j} + u_{\mu\rho}.$$

Применив принцип суперпозиции, найдем вначале ОП ЭМС $\overline{f}_{\mu j} = \overline{f}_\mu\Big|_{\rho_м = 0}$. Воспользуемся энергетическим соотношением [17] $\delta U_{\mu j} = A_{мех\,j}$, соответствующим условию $J_м = \text{invar}$, и учтем равенства

$$\delta U_{\mu j} = dV\delta(u_{\mu j}) = dV(\overline{J}_м \delta\overline{A}) =$$

$$= -dV(\overline{J}[\delta\xi \times \text{rot}\ \overline{A}]);\ A_{мех\,j} = (\overline{f}_{\mu j}\overline{\delta\xi}\,dV).$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Получим в итоге

$$\overline{f}_{\mu j} = \overline{J}_{\text{м}} \times \text{rot}\ \overline{A} = [(1/2)\left[\frac{[\text{grad}\ \mu \times \overline{H}]}{\mu} \times \overline{B}\right] =$$

$$= (1/2)[[\nabla\mu \times \overline{H}] \times \overline{H}].$$

Предполагаем теперь, что в пределах малого объема МЛМ ПМ выполняется условие $\overline{J}_{\text{м}} = 0$. Решая уравнение баланса энергии $\delta U_{\mu\rho} + A_{\text{мех}\,\rho} = 0$, соответствующее условию $\rho_{\text{м}} = \text{invar}$, найдем искомое выражение для ОП ЭМС

$$\overline{f}_{\mu\rho} = \rho_{\text{м}}\overline{H} = \overline{H}\ \text{div}\ \overline{B}_{\text{м}} = -(1/2)\overline{H}(\overline{H}\ \text{grad}\ \mu),$$

если учесть очевидные ниже приведенные соотношения

$$\delta U_{\mu\rho} = dV\delta u_{\mu\rho} = dV\delta(\rho_{\text{м}}\varphi) = \rho_{\text{м}}\delta\varphi dV =$$

$$= \rho_{\text{м}}\ \text{grad}\ \varphi\overline{\delta\xi}dV = -\rho_{\text{м}}\overline{H}\overline{\delta\xi}dV;$$

$$A_{\text{мех}\,\rho} = (\overline{f}_{\mu\rho}\overline{\delta\xi}dV).$$

Искомое выражение для ОП ЭМС в ПМ определится на основании сказанного выше из уравнения

$$\overline{f}_{\mu} = \overline{f}_{\mu j} + \overline{f}_{\mu\rho} = (1/2)[[\nabla\mu \times \overline{H}] \times \overline{H}] -$$

$$-(1/2)\overline{H}(\overline{H}\nabla\mu) = -(1/2)(\overline{H}\overline{H})\ \text{grad}\ \mu.$$

2.4.3. Силовая функция и ее применение для обоснования пространственного распределения ОП ЭМС в поляризованном магнетике. Как показывает анализ, решение проблемы ЭМС в ПМ можно осуществить, введя в рассмотрение понятие так называемой силовой функции, определив ее следующим соотношением (при $\text{rot}\ \overline{H} = 0$):

$$F_{\mu} = (\rho_{\text{м}}\varphi - \overline{J}_{\text{м}}\overline{A})\Big|_{\substack{\rho_{\text{м}} = \text{invar} \\ \overline{J}_{\text{м}} = \text{invar}}}$$

Непосредственным вычислением можно убедиться в справедливости уравнения

$$\overline{f}_{\mu} = -\ \text{grad}\ F_{\mu} - (\overline{J}_{\text{м}}\nabla)\overline{A} =$$

$$= \{\rho_{\text{м}}(-\ \text{grad}\ \varphi) + \overline{J}_{\text{м}} \times \text{rot}\ \overline{A}\} =$$

$$= -(1/2)H^2\ \text{grad}\ \mu.$$

Нетрудно обобщить указанное выше выражение для силовой функции и на тот случай, когда в пределах рассматриваемого малого объема ПМ имеется еще и свободный ток проводимости, распределенный с ОП $\overline{J}$:

$$F = \{\rho_{\text{м}}\varphi - (\overline{J}_{\text{м}} + \overline{J})\overline{A}\}\Big|_{\substack{\rho_{\text{м}} = \text{invar} \\ \overline{J}_{\text{м}} = \text{invar} \\ \overline{J} = \text{invar}}}$$

Искомая функция ОП ЭМС определится теперь из уравнения

$$\overline{f} = -\ \text{grad}\ F - ((\overline{J}_{\text{м}} + \overline{J})\nabla)\overline{A} =$$

$$= [\overline{J} \times \overline{B}] - (1/2)H^2\ \text{grad}\ \mu.$$

2.5.1 Определение поля объемной плотности электромагнитных сил в магнитном поле по изменению магнитной энергии взаимодействия в условиях перемещения всей рассматриваемой системы относительно неподвижного пространства. Рассмотрим еще один особый подход к практической реализации энергетического метода по определению поля ОП ЭМС НМС. Впервые он был предложен автором в ходе недавно закончившейся дискуссии по ЭМС в магнитном поле, организованной редакцией журнала "Электричество" [12]. Следует отметить, что обоснованная там формула для ОП ЭМС распространяется на нелинейные анизотропные магнитные среды; другими словами, система допущений, приведенная в "Постановке задачи" [12], может быть соответствующим образом ослаблена.

За истекший период времени этот подход удалось несколько усовершенствовать. В основу предлагаемой концепции решения проблемы ЭМС в СМП энергетическим методом положены:

1) принцип линеаризации исходной НМС с анизотропными магнитными свойствами [4, 5];

2) принцип малого перемещения на $\overline{\delta\xi} = \text{const}$ (направление вектора малого перемещения $\delta\overline{\xi}$ произвольно) относительно неподвижного пространства всей рассматриваемой анизотропной линеаризованной модели НМС;

3) уравнение энергетического баланса, связывающее работу искомой ЭМС $d\overline{F}$, действующей на малый объем системы dV, с вариацией (приращением) магнитной энергии взаимодействия (МЭВ) в соответствующем неподвижном малом пространственном объеме

$$\delta A = \delta W_f, \qquad (31)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где δA — работа, совершенная ПС $d\bar{F} = \bar{f}dV$, действующей на один из элементарных объемов рассматриваемой НМС, в процессе перемещения последней на $\bar{\delta\xi}$;

$$\delta A = (d\bar{F}\delta\bar{\xi}) = (\bar{f}dV\delta\bar{\xi});$$

δW_f — приращение (вариация) так называемой [12] магнитной энергии взаимодействия (МЭВ) в элементарном объеме неподвижного пространства, где к моменту начала перемещения линеаризованной модели НМС на $\bar{\delta\xi} = \text{const}$ размещался рассматриваемый элементарный объем системы и куда после перемещения всей системы переходит элементарный объем системы одинаковый по конфигурации с упомянутым выше и смещенный относительно него (на момент начала перемещения) на $-\bar{\delta\xi}$;

$$\delta W_f = W_f(\bar{r}_P - \bar{\delta\xi}) - W_f(\bar{r}_P) =$$

$$= (w_f(\bar{r}_P - \bar{\delta\xi}) - w_f(\bar{r}_P))dV =$$

$$= ((w_f(\bar{r}_P) - \bar{\delta\xi}\ \text{grad}\ w_f(\bar{r}_P)) -$$

$$- w_f(\bar{r}_P))dV = -\bar{\delta\xi}\ \text{grad}\ w_f(\bar{r}_P)dV; \quad (32)$$

$w_f(\bar{r}_P)$ — объемная плотность МЭВ;

$$w_f(\bar{r}_P) = w(\bar{r}_P) - w(\bar{r}_P)\ \Big|_{\substack{\mu(\bar{r}_P) = \mu(x,\ y,\ z) = \text{inv} \\ \bar{J}(\bar{r}_P) = 0}} =$$

$$= \left[\frac{\bar{B}\bar{H}}{2}\right] - \left[\frac{\bar{B}\bar{H}}{2}\right]\ \Big|_{\substack{\mu = \text{inv} \\ \bar{J} = 0}} \quad (33)$$

В последнем уравнении нуждается в дополнительном комментарии второй член в правой части уравнения. Он представляет собой не что иное как ОП магнитной энергии в данной точке наблюдения, которая имела бы место при условии инвариантности (неизменности) магнитной проницаемости в окрестности данной точки, равной $\mu(x, y, z)$ (приводящему как следствие к уравнению $\text{grad}\ \mu = 0$) и равенства нулю ОП тока проводимости. Скалярная функция ОП МЭВ w_f обладает весьма своеобразными свойствами: она либо тождественно равна нулю там, где одновременно выполняются два условия: $\mu(x, y, z) = \text{invar}$; $\bar{J}(x, y, z) = 0$, либо бесконечно мало отличается от нуля, если $\mu(x, y, z) = \text{var}$; $\bar{J}(x, y, z) \neq 0$.

В последнем случае наибольшая скорость (с обратным знаком), с которой функция ОП МЭВ стремится к нулю в данной точке, оказывается отличной от нуля и представляет собой не что иное, как искомую ОП ЭМС в магнитном поле

$$\bar{f} = -\ \text{grad}\ w_f = -\ \text{grad}\ (w - w\ \Big|_{\substack{\mu = \text{inv} \\ \bar{J} = 0}}) =$$

$$= -\ (\text{grad}\ \left[\frac{\bar{B}\bar{H}}{2}\right] - \text{grad}\ \left[\frac{\bar{B}\bar{H}}{2}\right]\ \Big|_{\substack{\mu = \text{inv} \\ \bar{J} = 0}}) =$$

$$= -\ \text{grad}\ \left[\frac{\bar{B}\bar{H}}{2}\right] + (\bar{B}\nabla)\bar{H}. \quad (34)$$

Обратим внимание на очевидный и вместе с тем важный вывод, вытекающий из уравнения (32). Вариация МЭВ в рассматриваемом малом неподвижном пространственном объеме, обусловленная малым перемещением линеаризованной модели НМС на $\bar{\delta\xi} = \text{const}$, тождественно совпадает с взятым с обратным знаком пространственным приращением (дифференциалом) МЭВ, равным разности МЭВ $W_f(\bar{r}_P) - W_f(\bar{r}_P - \bar{\delta\xi})$ в двух одинаковых по конфигурации малых объемах системы, положение которых в начальный момент перемещения системы определяется радиусами-векторами соответственно, $\bar{r}_P$ и $\bar{r}_P - \bar{\delta\xi}$.

2.5.2. Фундаментальное свойство электромагнитного поля и обоснование на его основе эффективной теории электромагнитных сил. Условимся далее запасенную в пределах рассматриваемого малого объема $V \equiv dV$ системы МЭВ обозначать символом L и называть лагранжианом магнитного поля системы: $W_f = w_f dV = L$.

Тогда ОП МЭВ w_f (см. п. 2.5.1) есть не что иное, как плотность лагранжиана в той же точке наблюдения, задаваемой радиусом-вектором $\bar{r}_P$.

Отдавая должное великому английскому физику — создателю теории электромагнитного поля, будем далее плотность лагранжиана, тождественно совпадающую с ОП МЭВ, обозначать символом M_c и называть кратко максвеллианом стационарного

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

магнитного поля в данной точке наблюдения:

$$M_c \equiv w_f = w - w \Big|_{\substack{\mu(x,\,y,\,z)\,=\,\mathrm{inv} \\ \bar{J}\,=\,0}} = \lim_{V \to 0} \frac{L}{V}. \qquad (35)$$

Принимая во внимание сказанное выше, уравнению баланса МЭВ (31) можно придать следующий вид:

$$\delta A / dV = \delta M_c = - dM_c. \qquad (36)$$

Это соотношение имеет глубокий физический смысл и отражает фундаментальное свойство стационарного магнитного поля.

Вариация максвеллиана магнитного поля в данной точке наблюдения, равная взятому с обратным знаком пространственному приращению максвеллиана в той же точке с обратным знаком, тождественно совпадает с плотностью работы, которую совершила бы электромагнитная сила, действующая на элементарный объем системы при его перемещении на $\bar{\delta}\xi = \mathrm{const}$ вместе со всей остальной системой.

Из совместного рассмотрения уравнений (31), (33), (35), (36) следует искомое выражение для ОП ЭМС в стационарном магнитном поле:

$$\bar{f} = - \operatorname{grad} w_f = - \operatorname{grad} M_c = - (1/2) \operatorname{grad} (\bar{B}\bar{H}) + (\bar{B}\nabla)\bar{H},$$

которое в случае изотропной нелинейной магнитной среды приводится к виду

$$\bar{f} = \bar{J} \times \bar{B} - (1/2) H^2 \operatorname{grad} \mu.$$

Отмеченное свойство присуще в равной мере также и электростатическому полю, и, в общем случае,— нестационарному электромагнитному полю. В первом случае, как показал анализ [15], максвеллиан электростатического поля, тождественно совпадающий с ОП электрической энергии взаимодействия (ЭЭВ), определяется из уравнения

$$M_э = w_{fэ} = w_э - w_э \Big|_{\varepsilon(x,\,y,\,z)\,=\,\mathrm{inv}} + \varphi\rho - (\varphi\rho) \Big|_{\varphi(x,\,y,\,z)\,=\,\mathrm{inv}} = \left[\frac{\bar{D}\bar{E}}{2}\right] - \frac{(\bar{D}\bar{E})}{2} \Big|_{\varepsilon\,=\,\mathrm{inv}} + \varphi\rho - (\varphi\rho) \Big|_{\varphi\,=\,\mathrm{inv}}, \qquad (37)$$

где $\rho(x, y, z)$ — ОП свободных электрических зарядов, возбуждающих электростатическое поле в присутствии диэлектрических тел, выполненных в общем случае из материала с нелинейной кривой поляризации; $\varphi(x, y, z)$ — пространственное распределение электростатического потенциала, обусловливающее векторные поля индукции $\bar{D}(x, y, z)$ и напряженности $\bar{E}(x, y, z)$.

Искомое поле ОП пондеромоторных сил (ПС) в электростатическом поле (ЭСП) определится из уравнения

$$\bar{f}_э = - \operatorname{grad} M_э = - \operatorname{grad} \left[\frac{\bar{D}\bar{E}}{2}\right] + (\bar{D}\nabla)\bar{E} + \bar{E} \operatorname{div} \bar{D},$$

которое при изотропной диэлектрической нелинейной среде преобразуется к известному со времен Максвелла виду [15]

$$\bar{f}_э = \rho\bar{E} - (1/2) E^2 \operatorname{grad} \varepsilon.$$

В общем случае исследуемое электромагнитное поле нестационарно и возбуждается источниками в присутствии магнитных и диэлектрических тел, изготовленных из анизотропного материала с нелинейной кривой поляризации. При определении пространственного распределения в рассматриваемый момент времени ОП ЭМС предварительно заменяем исходную нелинейную систему линеаризованной моделью, а затем определяем искомое расчетное выражение для максвеллиана электромагнитного поля, исходя из известных выражений для максвеллиана стационарного (35) и электростатического (37) полей и принципа суперпозиции:

$$M = M_c + M_э = (1/2)(\bar{B}\bar{H}) - (1/2)(\bar{B}\bar{H}) \Big|_{\substack{\mu\,=\,\mathrm{inv} \\ \bar{J}\,=\,0 \\ \bar{B},\bar{H}\,\neq\,f_1(t)}} + (1/2)(\bar{D}\bar{E}) - (1/2)(\bar{D}\bar{E}) \Big|_{\substack{\bar{D},\bar{E}\,\neq\,f_2(t) \\ \varepsilon\,=\,\mathrm{inv}}} + (\varphi\rho) - (\varphi\rho) \Big|_{\varphi\,=\,\mathrm{inv}},$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где физические величины $\overline{B}$, $\overline{H}$, $\overline{D}$, $\overline{E}$, ρ, φ зависят не только от пространственных координат, но и от времени и удовлетворяют известным уравнениям Максвелла для нестационарного электромагнитного поля

$$\operatorname{rot} \overline{H} = \overline{J} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \overline{E} = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t};$$

$$\overline{B} = \hat{\mu}\overline{H}; \ \overline{D} = \hat{\varepsilon}\overline{E}; \ \operatorname{div} \overline{D} = \rho; \ \operatorname{div} \overline{B} = 0,$$

в которых символами $\hat{\mu}$, $\hat{\varepsilon}$ обозначены тензоры, соответственно, магнитной и диэлектрической проницаемостей среды.

Искомое поле ОП ЭМС в нестационарном электромагнитном поле в присутствии среды с нелинейными, анизотропными магнитными и диэлектрическими свойствами определится из уравнения [18]

$$\overline{f}_{\sim} = -\nabla(\overline{B}\overline{H})/2 + (\overline{B}\nabla)\overline{H} + \overline{H} \operatorname{div} \overline{B} - \nabla(\overline{D}\overline{E})/2 +$$

$$+ (\overline{D}\nabla)\overline{E} + \overline{E} \operatorname{div} \overline{D} = (1/2)\{\operatorname{rot} \overline{H} \times \overline{B} +$$

$$+ \operatorname{rot} \overline{B} \times \overline{H} + \overline{H} \operatorname{div} \overline{B} + \overline{B} \operatorname{div} \overline{H} + \operatorname{rot} \overline{E} \times \overline{D} +$$

$$+ \operatorname{rot} \overline{D} \times \overline{E} + \overline{E} \operatorname{div} \overline{D} + \overline{D} \operatorname{div} \overline{E} +$$

$$+ \operatorname{rot} [\overline{H} \times \overline{B}] + \operatorname{rot} [\overline{E} \times \overline{D}]\},$$

преобразуемого в случае изотропности магнитных и диэлектрических свойств среды к следующему виду:

$$\overline{f}_{\sim} = -\operatorname{grad} M = \overline{J} \times \overline{B} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t} \times \overline{B} + \overline{D} \times \frac{\partial \overline{B}}{\partial t} -$$

$$- (1/2)H^2 \operatorname{grad} \mu - (1/2)E^2 \operatorname{grad} \varepsilon + \rho\overline{E}.$$

Нетрудно видеть, что рассмотренные выше формулы для поля ОП ЭМС в стационарном магнитном поле и в ЭСП являются частными случаями полученного выше расчетного выражения для ОП ЭМС в нестационарном электромагнитном поле.

2.6. Формулы Тамма — Абрагама для объемной плотности электромагнитных сил в стационарном магнитном и электростатическом полях. Уточненный подход Тамма - Абрагама, приводящий к известным формулам Максвелла для объемной плотности электромагнитных сил в стационарном магнитном и электростатическом полях. Первоначально М. Абрагам (при решении проблемы распределения ОП ПС в электростатическом поле), а позднее и И. Е. Тамм (при решении проблемы распределения ОП ПС в электростатическом и стационарном магнитном полях) применили одинаковый по существу способ реализации энергетического метода, который привел в конечном итоге к известным формулам для ОП ЭМС с так называемыми стрикционными членами [6, 11]:

$$\overline{f}_{\text{э}}^{\,A-T} = \rho\overline{E} - (1/2)E^2 \operatorname{grad} \varepsilon +$$

$$+ (1/2) \operatorname{grad} \left[E^2 \tau \frac{d\varepsilon}{d\tau} \right];$$

$$\overline{f}^{\,T} = [\overline{J} \times \overline{B}] - (1/2)H^2 \operatorname{grad} \mu +$$

$$+ (1/2) \operatorname{grad} \left[H^2 \tau \frac{\partial \mu}{\partial \tau} \right].$$

Особенность методики Абрагама—Тамма анализа упомянутой выше проблемы заключается в том, что оба автора предлагают использовать известные классические уравнения баланса энергии

для ЭСП

$$\delta W_{\text{э}} + A = 0, \quad Q_k = \text{invar}, \quad k \in [1, N_Q]; \quad (38)$$

для СМП

$$\delta W = A, \quad i_k = \text{invar}, \quad k \in [1, N_i] \quad (39)$$

в условиях малого перемещения всей рассматриваемой системы: заряженных тел и диэлектрической среды в первом случае и контуров с токами и магнитных тел во втором случае (в то время как классический способ реализации энергетического метода предполагает малое перемещение на $\overline{\delta}\xi = \text{const} \neq f(x, y, z)$ некоторого выделенного объема системы относительно остальной неподвижной части рассматриваемой системы).

Вторая не менее существенная особенность той же методики сводится к тому, что векторная функция малого перемещения системы $\overline{\delta\xi}(x, y, z)$ должна удовлетворять требованиям непрерывности и дифференцируемости в любом направлении, будучи во всем остальном совершенно произвольной, назначаемой самим исследователем.

Нетрудно объяснить необходимость выбора функциональной зависимости от пространственных координат перемещаемого малого объема системы $\overline{\delta\xi}(x, y, z) = \text{var}$. Действительно, в случае $\overline{\delta\xi}(x, y, z) = \text{const} \neq f_1(x, y, z)$ уравнения баланса энергии вырождаются в тождества типа $0 + 0 = 0$ (для ЭСП), или $0 = 0$ (для СМП) и их последующее применение (решение относительно искомых функций ОП ЭМС $\overline{f}_{\text{э}}$ в ЭСП и $\overline{f}$ в СМП) теряет

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

физический смысл. Только в общем случае малого перемещения всей системы на $\overline{\delta\xi}(x, y, z) = \mathrm{var}$ имеем

$$A_э = \int (\overline{f}_э dV\overline{\delta\xi}) \neq 0;$$

$$A = \int (\overline{f} dV\overline{\delta\xi}) \neq 0; \qquad (40)$$

$$\delta W_э = \int \delta w_э dV =$$

$$= \int ((\overline{E}\delta\overline{D}) - (1/2)E^2\delta\varepsilon)dV \neq 0; \qquad (41)$$

$$\delta W = \int \delta w dV =$$

$$= \int ((\overline{H}\delta\overline{B}) - (1/2)H^2\delta\mu)dV \neq 0 \qquad (42)$$

и решение уравнений (38) и (39) относительно искомых функций ОП ЭМС $\overline{f}_э$ (для ЭСП) и $\overline{f}$ (для СМП) сводится к поиску преобразованного выражения для вариации либо электрической энергии системы $\delta W_э$, либо магнитной энергии системы δW:

$$\delta W_э = \int ((\overline{E}\delta\overline{D}) - (1/2)E^2\delta\varepsilon)dV =$$

$$= \int (\overline{\delta\xi}\overline{G}_э(\overline{D}, \overline{E}, \rho, \varepsilon, \overline{\delta\xi}))dV;$$

$$\delta W = \int ((\overline{H}\delta\overline{B}) - (1/2)H^2\delta\mu)dV =$$

$$= \int (\overline{\delta\xi}\overline{G}(\overline{B}, \overline{H}, \overline{J}, \mu, \overline{\delta\xi}))dV,$$

откуда, учитывая (38)–(40),

$$\overline{f}_э = \lim_{\overline{\delta\xi}(x, y, z) \to \overline{\delta\xi}_0 = \mathrm{const}} \overline{G}_э(\overline{D}, \overline{E}, \rho, \varepsilon, \overline{\delta\xi}) =$$

$$= \overline{G}_{э.пр}(\overline{D}, \overline{E});$$

$$\overline{f} = \lim_{\overline{\delta\xi}(x, y, z) \to \overline{\delta\xi}_0 = \mathrm{const}} \overline{G}(\overline{B}, \overline{H}, \overline{J}, \mu, \overline{\delta\xi}) =$$

$$= \overline{G}_{пр}(\overline{B}, \overline{H}),$$

где $\overline{\delta\xi}_0$ — некоторая не зависящая от пространственных координат x, y, z бесконечно малая величина высшего порядка малости по сравнению с максимальным значением наблюдаемой в зависимости $\overline{\delta\xi}(x, y, z) \to 0$.

Как показал анализ [15, 16], преобразования исходных выражений для вариаций $\delta W_э$ и δW осуществлены авторами [6, 11] в целом некорректно. Вместо действительных преобразованных выражений для вариаций $\delta W_э$ и δW

$$\delta W_э = \int ((\overline{E}\delta\overline{D}) - (1/2)E^2\delta\varepsilon)dV =$$

$$= \int \left[\overline{\delta\xi}\left(\frac{E^2}{2}\nabla\varepsilon - \rho\overline{E} - (\overline{n}_\xi/\delta\xi)\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times(\nabla(\varphi\delta\overline{D} + \varphi\rho\overline{\delta\xi}) - \frac{E^2}{2}\tau\frac{d\varepsilon}{d\tau}\nabla\overline{\delta\xi})\right)\right]dV;$$

$$\delta W = \int ((\overline{H}\delta\overline{B}) - (1/2)H^2\delta\mu)dV =$$

$$= \int (\overline{\delta\xi}([\overline{J}\times\overline{B}] - \frac{H^2}{2}\nabla\mu -$$

$$- (\overline{n}_\xi/\delta\xi)(\nabla([[\overline{J}\times\overline{\delta\xi}]\times\overline{A}] + [\delta\overline{H}\times\overline{A}]) +$$

$$+ \frac{H^2}{2}\tau\frac{d\mu}{d\tau}\nabla\overline{\delta\xi}))\Big)dV, \quad \overline{n}_\xi = \overline{\delta\xi}/\delta\xi,$$

тождественных с исходными расчетными формулами для этих вариаций (41) и (42), авторы [6, 11] подставляют в уравнение (38) ошибочно преобразованное выражение $\delta W_э^*$

$$\delta W_э^* = \int \left[\overline{\delta\xi}\left[\frac{E^2}{2}\nabla\varepsilon - \rho\overline{E} - (1/2)\nabla\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\left[E^2\tau\frac{d\varepsilon}{d\tau}\right]\right]\right]dV \neq \delta W_э =$$

$$= \int ((\overline{E}\delta\overline{D}) - (1/2)E^2\delta\varepsilon)dV,$$

а при решении уравнения (39) И. Е. Тамм применяет ошибочно преобразованное выражение δW^*

$$\delta W^* = \int \left[\overline{\delta\xi}\left[[\overline{J}\times\overline{B}] - \frac{H^2}{2}\nabla\mu +\right.\right.$$

$$\left.\left.+ (1/2)\nabla\left[H^2\tau\frac{d\mu}{d\tau}\right]\right]\right]dV \neq \delta W =$$

$$= \int ((\overline{H}\delta\overline{B}) - (1/2)H^2\delta\mu)dV.$$

Как нетрудно видеть, в расчетном выражении для ОП ЭМС $\overline{f}_э$ в ЭСП и $\overline{f}$ в СМП при малом, но конечном значении перемещения системы $\overline{\delta\xi}(x, y, z)$, кроме двух максвелловских членов,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

появляются еще так называемые виртуальные силовые члены:

$$\overline{f}_{\xi э} = \frac{\overline{n}_\xi}{\delta\xi}\left\{ \operatorname{div}(\varphi\delta\overline{D} + \varphi\rho\overline{\delta\xi}) - (1/2)E^2\tau\frac{d\varepsilon}{d\tau}\times \right.$$

$$\left. \times \operatorname{div}\overline{\delta\xi} \right\};$$

$$\overline{f}_\xi = -\frac{\overline{n}_\xi}{\delta\xi}\left\{ \operatorname{div}([[\overline{J}\times\overline{\delta\xi}]\times\overline{A}] + [\delta\overline{H}\times\overline{A}]) - \right.$$

$$\left. - (1/2)H^2\tau\frac{d\mu}{d\tau}\operatorname{div}\overline{\delta\xi} \right\},$$

обусловливаемые принятой зависимостью малого перемещения $\overline{\delta\xi}(x, y, z)$ и обращающиеся в пределе (при $\overline{\delta\xi}(x, y, z) \to \overline{\delta\xi}_0 = 0$) в нуль [15, 16].

Таким образом методика Абрагама–Тамма после внесения в нее необходимой коррекции [15, 16] приводит в конечном итоге к общеизвестным формулам Максвелла для ОП ЭМС в ЭСП и СМП без стрикционных членов.

Анализ уравнения для ОП ЭМС (34) свидетельствует об однозначной органической связи поля ОП ЭМС с обусловившими его полями индукции $\overline{B}$ и напряженности $\overline{H}$. Дополнительная ценность представления формулы (1) для ОП ЭМС в форме правой части уравнения (34) обнаруживается при выводе формулы для натяжений $\overline{T}_n$ в магнитном поле. Действительно, ЭМС $\overline{F}$, действующая на некоторый объем V рассматриваемой системы, определится, учитывая (34) и известные [14, с. 16, ф-лы (16), (16с)] теоремы векторного анализа, из следующего уравнения:

$$\overline{F} = \int_V \overline{f}\,dV = \int \{-(1/2)\operatorname{grad}(\overline{B}\overline{H}) + (\overline{B}\nabla)\overline{H}\}dV =$$

$$= \int_V (-\operatorname{grad} w + (\overline{B}\nabla)\overline{H} + \overline{H}\operatorname{div}\overline{B})dV =$$

$$= \int_V \operatorname{div}\overline{T}\,dV = \int_S \overline{T}\,\overline{dS} = \int_S \overline{T}_n\,dS =$$

$$= \int_S (-\overline{n}w + (\overline{B}\overline{n})\overline{H})dS,$$

откуда вытекает искомое выражение для векторной функции натяжения (25).

Возвращаясь вновь к формуле Максвелла для ОП ЭМС в магнитном поле (1), обратим внимание на то, что она, с учетом рекомендованного Л. Больцманом соотношения (2), связывающего "гидростатическое давление" p_1 с физическими величинами магнитного поля, легко приводится к уравнению (34), если в правую часть последнего добавить равное тождественно нулю выражение $\overline{H}\operatorname{div}\overline{B}$. Для этого необходимо подставить в уравнение (1) вместо p_1 рекомендованное Л. Больцманом выражение в векторной форме:

$$p_1 = \frac{\mu H^2}{2} = \left[\frac{\overline{B}\overline{H}}{2}\right]$$

и учесть проверяемое непосредственным вычислением следующее соотношение:

$$[\overline{J}\times\overline{B}] + \operatorname{grad}\left[\frac{\mu H^2}{2}\right]\Bigg|_{\mu = \text{invar}} = (\overline{B}\nabla)\overline{H}.$$

С учетом двух последних уравнений предложенная Дж. К. Максвеллом формула для ОП ЭМС преобразуется к следующему выражению для ОП ЭМС в СМП:

$$\overline{f} = \overline{H}\operatorname{div}\overline{B} + [\overline{J}\times\overline{B}] +$$

$$+ \operatorname{grad}\left[\frac{\mu H^2}{2}\right]\Bigg|_{\mu = \text{invar}} -$$

$$- \operatorname{grad} p_1 = \overline{H}\operatorname{div}\overline{B} + (\overline{B}\nabla)\overline{H} - \operatorname{grad}((1/2)\overline{B}\overline{H}),$$

прямое доказательство которого энергетическим методом на основе введения понятия магнитной энергии взаимодействия приведено в п. 2.5.1.

Приведенный здесь анализ проблемы ЭМС в стационарном магнитном поле с распространением его результатов и на электростатическое поле и нестационарное электромагнитное поле, удовлетворяющее известной системе уравнений Максвелла, свидетельствует об однозначной обусловленности поля объемной плотности электромагнитных сил имеющимися в рассматриваемый момент времени пространственными распределениями физических величин самого электромагнитного поля: $\overline{B}$, $\overline{H}$, $\overline{D}$, $\overline{E}$ и об отсутствии какой-либо зависимости "силового поля" от предшествующего процесса (предыстории), который привел в конечном итоге к упомянутым выше пространственным распределениям $\overline{B}$, $\overline{H}$, $\overline{D}$, $\overline{E}$.

Это означает, в частности, что любой физически обоснованный метод решения проблемы электромагнитных сил в магнитном поле в присутствии изотропной среды должен привести к единственно

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

правильному решению (не входящему в противоречие с уравнениями Максвелла для этого магнитного поля) для объемной плотности электромагнитных сил, предложенному впервые Максвеллом (1).

Такой вывод подтверждается полученным таким же решением (1) упомянутой выше проблемы известными и предложенными здесь энергетическими и неэнергетическими методами. При этом к неэнергетическим методам условно отнесены те, которые исходят из анализа уравнений Максвелла для стационарного магнитного поля и не требуют в процессе их реализации прямого обращения к закону сохранения энергии и, в частности, обоснования уравнения баланса энергии, а также условного перемещения части или всей системы на бесконечно малое расстояние в произвольном направлении.

Как известно, уравнения Максвелла для магнитного поля не противоречат закону сохранения энергии; более того, эти уравнения вытекают из этого закона. Поэтому становится понятным условность подразделения методов решения проблемы объемной плотности электромагнитных сил в магнитном поле на энергетические и неэнергетические. Любой физически обоснованный метод решения этой проблемы по существу является энергетическим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Максвелл Дж. К.** Избранные сочинения по теории электромагнитного поля.— М.: Гостехиздат, 1954.

2. **Maxwell J. C.** A treatise on electricity and magnetism.– Oxford Clarendon Press, 1873, vol. 1,2.

3. **Boltzman L.** Vorlesungen uber Maxwelles Theorie der Eletrizitat and des Lichtes.– Leipzig, 1891 (Teile I), 1893 (Teile 2).

4. **Иванов-Смоленский А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах.— М.: Высшая школа, 1989.

5. **Иванов-Смоленский А. В.** Определение электромагнитных сил в нелинейных магнитных системах по изменению энергии при малом перемещении.— Электричество, 1985, № 5.

6. **Абрагам М.** Теория электричества. Т. 1. Введение в теорию электричества Максвелла.— Л.—М.: ГОНТИ, 1939.

7. **Иванов-Смоленский А. В.** Определение электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе по их объемной плотности.— Электричество, 1985, № 9.

8. **Иванов-Смоленский А. В.** Определение электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе по натяжениям.— Электричество, 1985, № 7.

9. **Иванов-Смоленский А. В.** Сопоставление формул Максвелла с другими формулами для расчета электромагнитных сил в магнитном поле.— Электричество, 1990, № 11.

10. **Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В., Аванесов М. А.** Об определении электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе по натяжениям.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1990, № 5.

11. **Тамм И. Е.** Основы теории электричества.— 8-е изд.— М.: ГИТТЛ, 1966.

12. **Абрамкин Ю. В.** Об определении электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе по их объемной плотности.— Электричество, 1988, № 10.

13. **Зильберман Г. Е.** Электричество и магнетизм.— М.: Наука, 1970.

14. **Френкель Я. И.** Электродинамика. Т. 1.— Л.—М.: ОНТИ ГТТИ, 1934.

15. **Абрамкин Ю. В.** Критический анализ формулы для объемной плотности пондеромоторных сил в электростатическом поле, содержащей стрикционный член.— Электромеханика, 1992, № 1.

16. **Абрамкин Ю. В.** Об определении объемной плотности электромагнитных сил энергетическим методом.— Электромеханика, 1992, № 2.

17. **Абрамкин Ю. В.** Потенциальная функция источников поля и ее применение для определения объемной плотности распределения электромагнитных сил в магнитном поле.— Электромеханика, 1993, № 1.

18. **Абрамкин Ю. В., Иванов-Смоленский А. В.** Определение электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе энергетическим методом.— Электричество, 1992, № 9.

[17.04.91]

Определение электрических и магнитных мультипольных моментов по результатам измерений на замкнутых поверхностях

ВИШНЕВСКИЙ А. М., доктор техн. наук

Санкт-Петербург

В ряде важных приложений, связанных с исследованием, изготовлением и эксплуатацией электротехнических устройств и систем различного назначения [1], а также в разведочной геофизике [2], геомагнитной навигации [3] и во многих других случаях возникает задача определения

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

интегральных характеристик источников стационарного электрического, электростатического и магнитного полей — мультипольных моментов [4] по результатам измерений характеристик поля на произвольной замкнутой поверхности S вокруг его источников.

Решение указанной задачи обычно строится для однородной среды [5], а полученные расчетные формулы относятся, в большинстве случаев, к определению составляющих дипольных моментов [6].

Настоящая статья посвящена решению более общей задачи: определению моментов произвольного порядка n в условиях, имеющих место на практике, когда на поверхности S выполняются измерения потенциала электрического поля u или напряженности магнитного поля $\vec{H}$, а распределение электрической проводимости γ или диэлектрической проницаемости ε внешней магнитооднородной среды является кусочно-непрерывным.

Решение задачи основывается на применении интегральных формул, устанавливающих связь поля в произвольной точке t вне поверхности S со значениями характеристик поля на S, причем эти характеристики интерпретируются как поверхностные распределения зарядов, диполей или токов.

Для определения потенциалов стационарного электрического поля запишем формулу Грина—Стокса [7] в виде

$$u(t)=\int_S \gamma[u(q)-u(t_0)][\mathrm{grad}_q \Phi(t,q)\cdot\vec{n}_q]dS_q - \int_S \gamma[\mathrm{grad}_q u(q)\,\vec{n}_q]\Phi(t,q)dS_q\,, \qquad (1)$$

где $\vec{n}_q$ — внешняя нормаль к S в точке q; t_0 — фиксированная точка вне поверхности S, относительно которой производится измерение потенциала; $\Phi(t, q)$ — главная часть функции Леви [7].

Функция $\Phi(t, q)$ является регулярным на бесконечности решением уравнения

$$\mathrm{div}_q\,\gamma\,\mathrm{grad}_q\,\Phi(t,q) = -\delta[r(t,q)], \qquad (2)$$

где δ — дельта-функция; $r(t, q)$ — расстояние между точками t и q.

При этом $\Phi(t, q)$ удовлетворяет на поверхности S_{12}, где значения γ меняются скачком от γ_1 до γ_2, условиям вида

$$\left.\begin{aligned}\Phi_1(t,q)&=\Phi_2(t,q);\\ \gamma_1\frac{\partial\Phi_1(t,q)}{\partial n_q}&=\gamma_2\frac{\partial\Phi_2(t,q)}{\partial n_q},\ q\in S_{12}.\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Для решения задачи (2)—(3) в ряде случаев эффективно применение метода отражений [8].

Для однородной среды

$$\Phi(t,q)=\frac{1}{4\pi\gamma}\frac{1}{r(t,q)},$$

где $r(t,q)=\sqrt{(X_q-X_t)^2+(Y_q-Y_t)^2+(Z_q-Z_t)^2}$,)2

причем вектор $\vec{r}(t, q)$ направлен из t в q.

С помощью выражений для компонент электрического мультипольного момента порядка n (составляющих тензора n-го ранга) $P^{(n)}_{ijk}(i+j+k=n,\ n=0,\ 1,\ 2,\ \ldots)$ распределений на S простого или двойного слоя с плотностью

$$\sigma(q) = -\gamma[\mathrm{grad}_q\,u(q)\cdot\vec{n}_q]$$

и

$$\tau(q)=\gamma[u(q)-u(t_0)]$$

соответственно получаем, что при измерении на S потенциала и его нормальной производной

$$P^{(n)}_{ijk}=\int_S\gamma[u(q)-u(t_0)](\mathrm{grad}_q\,\varphi X_q^i Y_q^j Z_q^k\cdot\vec{n}_q)dS_q - \int_S\gamma[\mathrm{grad}_q u(q)\cdot\vec{n}_q]\varphi X_q^i Y_q^j Z_q^k dS_q\,, \qquad (4)$$

где символом φ обозначена операция образования тензора должной симметрии [4].

Переход к электростатическому полю осуществляется путем замены γ на ε.

Использование интегральной формулы Стрэттона—Чу [9, 10] для напряженности магнитного поля

$$\vec{H}(t)=-\frac{1}{4\pi}\mathrm{grad}_t\int_S[\vec{H}(q)\cdot\vec{n}_q]\frac{1}{r(t,q)}dS_q - \frac{1}{4\pi}\mathrm{rot}_t\int_S[\vec{H}(q)\cdot\vec{n}_q]\frac{1}{r(t,q)}dS_q+\vec{H}(\infty) \qquad (5)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и выражений для составляющих магнитных моментов $M_{ijk}^{(n)}$ (относительно точки 0, расположенной внутри S), создаваемых поверхностными распределениями магнитных зарядов и токов с плотностями

$$\nu(q) = \vec{H}(q) \cdot \vec{n}_q$$

и

$$\vec{\lambda}(q) = -[\vec{H}(q) \cdot \vec{n}_q]$$

соответственно, дает

$$M_{ijk}^{(n)} = \int_S [\vec{H}(q) \cdot \vec{n}_q]\varphi X_q^i Y_q^j Z_q^k dS_q +$$

$$+ \frac{1}{n+1} \int_S \left\{ \left\{ [\vec{H}(q) \cdot \vec{n}_q] \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \vec{r}(0, q) \right\} \operatorname{grad}_q \varphi X_q^i Y_q^j Z_q^k \right\} dS_q . \qquad (6)$$

При практическом применении формулы (6) для уменьшения объема измерений оказываются полезными соотношения

$$\int_S \left\{ [\vec{H}(q) \cdot \vec{n}_q] \operatorname{grad}_q \varphi X_q^i Y_q^j Z_q^k \right\} dS_q = 0.$$

Приведенные интегральные формулы обладают фильтрующими свойствами и позволяют исключить влияние источников поля, расположенных вне поверхности измерений S. Все полученные соотношения очевидным образом упрощаются в случае плоскопараллельных и осесимметричных полей. Аналогичный подход с использованием трехмерных аналогов интеграла типа Коши (формул типа Стрэттона — Чу) [10] может быть использован для определения мультипольных моментов источников переменного электромагнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чалисов Ю. И., Додзина Т. Я.** Экспериментальный анализ внешнего магнитного поля электротехнических устройств. — Электричество, 1983, № 6.

2. **Полонский А. М.** К вопросу о вычислении магнитных моментов. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз, 1962, № 6.

3. **Михлин Б. З., Селезнев А. В.** Геомагнитная навигация. — М.: Машиностроение, 1976.

4. **Медведев Б. В.** Начала теоретической физики. — М.: Наука, 1977.

5. **Шленов А. Г.** О решении линейных обратных задач геофизики. — ДАН СССР, 1988, вып. 302, № 3.

6. **Краснов И. П.** Об определении магнитных моментов по результатам измерений на замкнутых поверхностях. — Геомагнетизм и аэрономия, 1981, вып. XXI, № 1.

7. **Кошляков Н. С., Глинер Н. Б., Смирнов М. М.** Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высшая школа, 1970.

8. **Иоссель Ю. Я.** Расчет потенциальных полей в энергетике. — Л.: Энергия, 1978.

9. **Стрэттон Дж. А.** Теория электромагнетизма. — М., Л.: ГИТТЛ, 1948.

10. **Жданов М. С.** Аналогия интеграла типа Коши в теории геофизических полей. — М.: Наука, 1984.

[30.01.92]

Энергетические процессы в цепях с электрической дугой

ЕРМУРАТСКИЙ П. В., НЕТУШИЛ А. В.

Москва

1. Исследование процессов в цепях с электрической дугой около двух столетий является одной из наиболее сложных задач теории нелинейных электрических цепей. Сложность связана с неоднозначностью и нелинейностью характеристики электрической дуги, ее зависимостью от скорости изменения тока и напряжения, с условиями применения дуги и ее технологическим назначением. Весьма существенно различаются характеристики дуги в коммутационных аппаратах высокого напряжения, электросталеплавильных печах и агрегатах электрической сварки. Во всех случаях

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

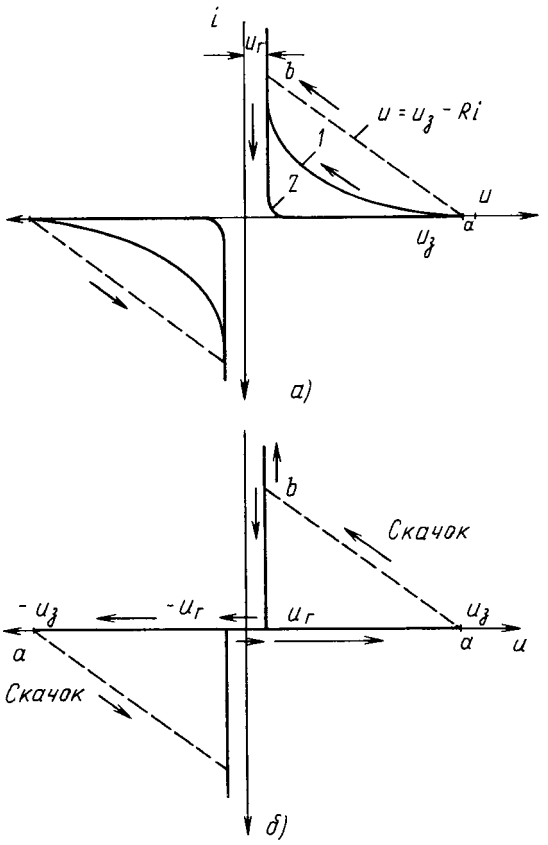


Рис. 1

необходимо рассматривать две ветви характеристики: восходящую *1* — при увеличении тока и нисходящую *2* — при его снижении (см. рис. 1, *а*).

Настоящая статья обусловлена появлением в средствах массовой информации [1—2] сенсационных сообщений о возможности с помощью электрической дуги и конденсатора получить энергию из физического вакуума. Интерес к этой проблеме заставил авторов произвести расчеты и эксперименты, рассмотренные ниже. Проблема анализируется для дуги малой мощности в цепи переменного тока синусоидального напряжения источника. На примере этой задачи можно установить некоторые особенности нелинейных электрических цепей при несинусоидальных токах, существенно отличающихся от линейных цепей. При этом для приближенной оценки процессов могут быть применены методы, хорошо разработанные для линейных электрических цепей.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника синусоидального напряжения, электрической дуги, резистивного потребителя энергии и некоторого линейного четырехполюсника, в котором могут содержаться накапливающие энергию емкостные и индуктивные элементы. Источник напряжения подключен ко входу четырехполюсника, цепь из последовательно соединенных дуги и потребителя электрической энергии — к его выходу.

Будем рассматривать различные схемы четырехполюсников, от самого простого, не содержащего накопителей энергии, до более сложных, содержащих емкостные и индуктивные накопители. При этом основной интерес представляют мощность источника на входе и мощность, выделяемая в потребителе электрической энергии. Для характеристики дуги принимаем кусочно-постоянную аппроксимацию в виде ломаной линии, изображенной на рис. 1, *б*. Ее математическое описание выражается следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l} \text{если } \dfrac{du}{dt} > 0 \text{ и } -U_г < u < U_з \\ \text{или } \dfrac{du}{dt} < 0 \text{ и } -U_з < u < U_г, \\ \text{то } i = 0; \\ \text{если } i > 0, \text{ то } u = +U_г; \\ \text{если } i < 0, \text{ то } u = -U_г; \end{array}\right\} \quad (1)$$

где $U_з$ и $U_г$ — напряжение зажигания и напряжение горения дуги; u — напряжение на дуге; i — ток дуги.

2. Первоначально рассмотрим цепь нулевого порядка, в которой вход и выход четырехполюсника соединены непосредственно друг с другом (рис. 2, *а*).

Если напряжение источника $u_и$ на входе четырехполюсника $u_и = U_m \sin \omega t$, то при $u_и < U_з$ ток равен нулю в течение всего периода и дуга не горит. При достижении напряжения источника $U_з$ в момент t_1 при $\alpha = \omega t_1 = \arcsin U_з / U_m$ происходит зажигание дуги, после чего ток $i = (U_m \sin \omega t - U_г) / R$, а напряжение на дуге u станет равным напряжению ее горения $U_г$.

На характеристике дуги ее зажигание выразится мгновенным скачком из точки *a* в точку *b*, для которой ток $i_b = (U_з - U_г) / R$. Далее до снижения напряжения источника до $U_г$ напряжение на дуге остается равным $U_г$. В момент времени t_2 при $\beta = \omega t_2 = \arcsin U_г / U_m$ дуга гаснет и ток становится равен нулю. При отрицательной ~~полуволне~~ напряжения происходит аналогичный процесс.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

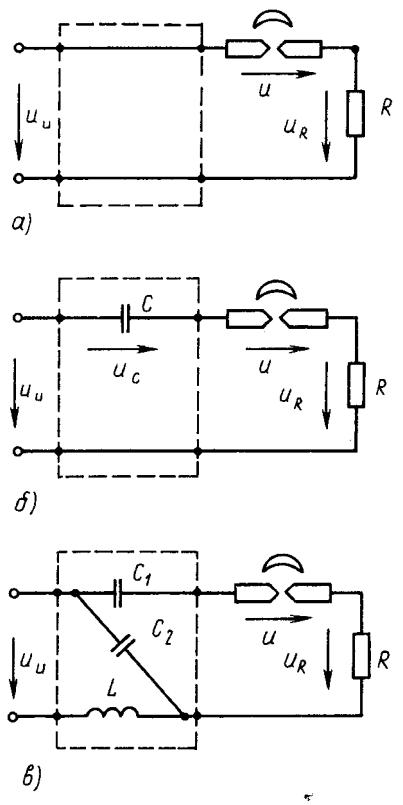


Рис. 2

Графики изменения во времени напряжения источника $u_и$, тока и напряжения дуги u построены на рис. 3. При этом принято $U_m = 800$ В, $U_з = 600$ В, $U_г = 20$ В, $R = 50$ Ом. Разложение тока и напряжения в гармонический ряд иллюстрируется частотными спектрами амплитуды A_{ki}, A_{ku}, показанными на рис. 4. Выражая разложение в виде

$$f(\omega t) = \sum_{k=1}^{\infty} (B_{ku} \sin k\omega t + C_{ku} \cos k\omega t),$$

можно определить мощности источника —

$$P_и = \frac{1}{T}\int_0^T u_и i dt = \frac{U_m B_{1i}}{2}, \qquad (2)$$

потребителя —

$$P_R = R\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt = \frac{R}{2}\sum_{k=1}^{\infty}(B_{ki}^2 + C_{ki}^2) \qquad (3)$$

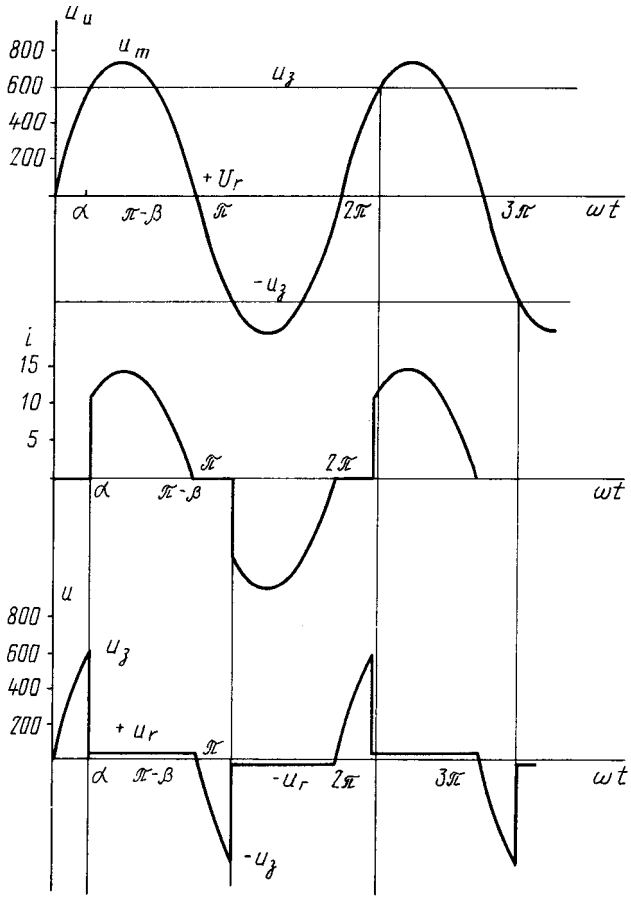


Рис. 3

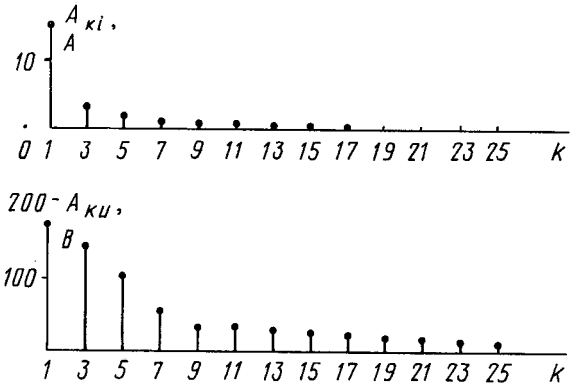


Рис. 4

и в дуге —

$$P_д = P_и - P_R = \frac{1}{T}\int_0^T u\, i dt =$$

$$= \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}(B_{ku} B_{ki} + C_{ku} C_{ki}) =$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$= (U_г / \pi R)\,[U_m\,(\cos\beta + \cos\alpha) -$$

$$- U_г\,(\pi - \alpha - \beta)]. \qquad (4)$$

Вычисляя мощность дуги как сумму мощностей отдельных гармоник, можно убедиться, что для всех гармоник при $k > 1$ составляющие мощности имеют отрицательный знак и, следовательно, для них дуга является не приемником, а источником электрической энергии. Таким образом, дугу можно рассматривать как преобразователь мощности основной гармоники, поступающей из сети, в мощность высших гармоник, передаваемую из дуги в резистивный элемент:

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_k u_k dt > 0 \text{ при } k = 1;$$

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_k u_k dt < 0 \text{ при } k > 1.$$

Для рассматриваемого примера из расчета следует $P_и = 5565$ Вт, $P_R = 5376$ Вт, $P_д = 189$ Вт. Реактивная мощность, потребляемая из сети за счет отставания во времени тока от напряжения дуги, составляет величину $Q = \dfrac{U_m C_{1i}}{2} = 1029$ ВАр. При этом никаких реактивных элементов в цепи не содержится и эта величина выражает мощность искажения.

Следует заметить, что измерение мощности рассматриваемой цепи с помощью ваттметров можно производить только на стороне источника, где напряжение, подключаемое к обмотке ваттметра, принимается чисто синусоидальным. Что касается мощностей резистора и дуги, то измерение их с помощью ваттметра не может дать требуемых результатов. Если ток ваттметра без искажений содержит все высшие гармоники, то ток в обмотке напряжения сильно фильтруется за счет большой величины индуктивности обмотки, и в ней высшие гармоники напряжения сильно уменьшаются или даже могут вообще отсутствовать.

Ваттметр обладает свойством синхронного детектора и измеряет мощность первой гармоники. Можно рассчитать показания ваттметра для случая, если бы его включили для измерения мощности дуги и резистора. Для дуги эта величина составляет $P_{д1} = 5658$ Вт, а для резистора $P_{R1} \approx 5000$ Вт. Очевидна недопустимость измерения мощности ваттметром в нелинейных цепях при несинусоидальности формы кривой напряжения.

3. Теперь перейдем к рассмотрению цепи, содержащей емкостный накопитель электроэнергии и представляющей собой простейший вариант преобразователя Чернетского (см. рис. 2, *б*), описанного в [4, 5]. Эта цепь описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка и хорошо может быть исследована методом припасовывания решений для линейных участков характеристики, и в ней так же, как и в системе нулевого порядка, наблюдаются скачки тока. Он прерывается в интервалах, когда напряжение на конденсаторе остается неизменным, а напряжение на дуге изменяется от $\pm U_г$ до $\mp U_з$ по уравнению $u = u_и - u_C$. Во время горения дуги $u = \pm U_г$, а сумма свободной и принужденной составляющих тока имеет вид:

$$i(t) = A_k\, e^{-\frac{t - t_k}{RC}} + I_m \sin(\omega t - \varphi), \qquad (5)$$

где $\varphi = -\operatorname{arctg}\dfrac{X_C}{R}$; $t_k = \dfrac{1}{\omega} \times$

$$\times \left[\arcsin\left|\frac{(-1)^k U_з + U_{C(k-1)}}{U_m}\right| + \pi(k-1)\right].$$

Для интервала $k + 1$ постоянная интегрирования A_{k+1} определяется из условия

$$A_{k+1} = \Delta i_{k+1} - I_m \sin(\omega t_k - \varphi),$$

где $\Delta i_k = (\pm U_з - U_г) / R$, а момент погасания дуги t_β определяется из условия $i(t_\beta) = 0$.

Последовательно переходя от одного интервала к следующему, произвольно задаваясь начальным значением напряжения на конденсаторе, получаем решения для установившегося режима, при котором решение через каждый период повторяется. Сходимость решения получается очень хорошая и практически через три — четыре интервала достигается установившийся режим. На рис. 5 построены графики тока i и напряжений на конденсаторе u_C и дуге u для установившегося процесса. Расчет был выполнен для конкретных параметров цепи при $U_m = 590$ В, $U_з = 730$ В, $U_г = 30$ В, $R = 390$ Ом, $X_C = 820$ Ом. При этом для устано-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

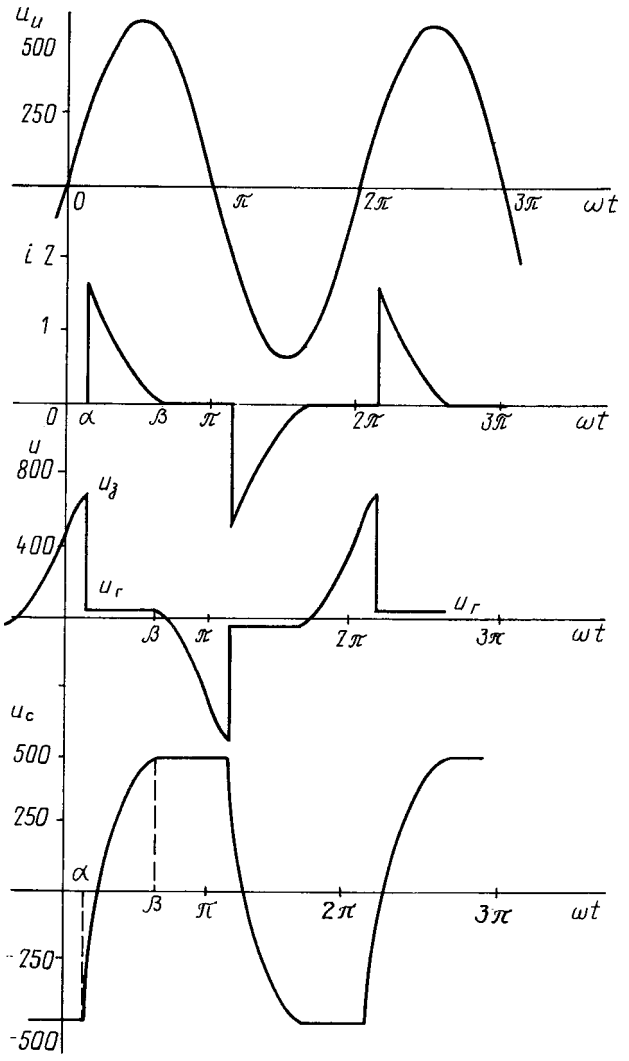


Рис. 5

вившегося режима получено: $\alpha = 0{,}453$, $\beta = 2{,}12$, $U_C = \pm 472$ В. Расчет мощностей дал следующий результат: $P_и = 165$ Вт, $Q_и = 720$ ВАр, $P_R = 148$ Вт, $P_д = 15{,}8$ Вт.

Разложение тока и напряжений в гармонический ряд иллюстрируется частотными спектрами амплитуд A_{ki} и A_{ku}, изображенными на рис. 6.

Из расчета мощностей по первой гармонике следует: $P_{д1} = 69{,}7$ Вт, $P_{R1} = 92{,}5$ Вт. При этом мощность, выделяемая в резисторе для этих параметров цепи при замыкании дуги накоротко

$$P_и = P_R = \frac{RU_m^2}{2(R^2 + X_C^2)} \qquad (6)$$

составляет 82,3 Вт, что примерно в 2 раза меньше, чем при горении дуги.

Эксперимент со схемой с параметрами, близкими к рассчитанным, дал следующие результаты:

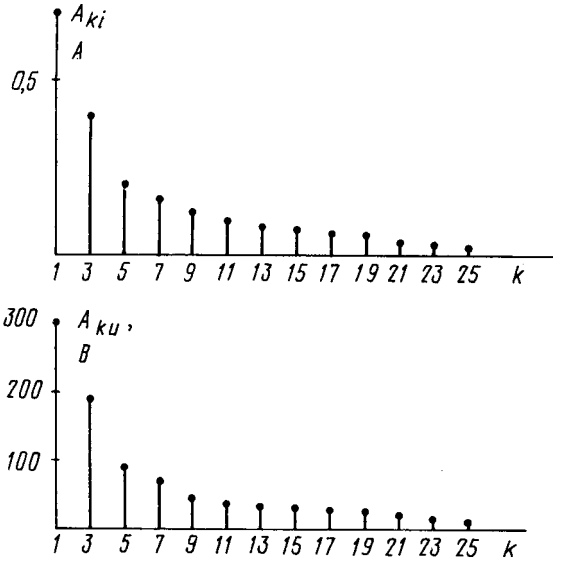


Рис. 6

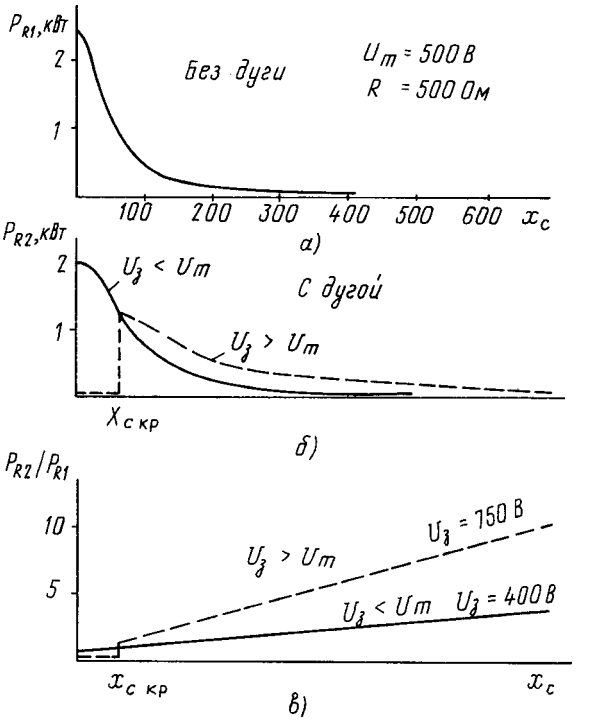


Рис. 7

$P_и = 150$ Вт при наличии дуги, а при ее замыкании накоротко $P_и = 75$ Вт. Таким образом, эксперимент подтвердил результаты расчета. С зажиганием дуги мощность, потребляемая из сети, возросла в 2 раза. Дополнительная энергия, связанная с несинусоидальностью тока в цепи и накоплением ее в конденсаторе, поступает полностью от источника синусоидального напряжения.

На рис. 7 представлены результаты анализа зависимости мощности, выделяемой в потребителе, от емкостного сопротивления конденсатора. Кри-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вая на рис. 7, *а* соответствует выражению (6). Мощность потребителя P_{R1} монотонно убывает из-за уменьшения тока в цепи. На рис. 7, *б* для нагрузки P_{R2} представлены два случая:

$U_з < U_m$, тогда дуга загорается при любом как угодно малом X_C;

$U_з > U_m$ — при этом существует некоторое критическое X_C, ниже которого ток в цепи не возникает из-за малости U_C. Очевидно, из $U_з = U_m + U_{Cкр}$ следует, что

$$X_{Cкр} = R\left[\left[\frac{U_m}{U_з - U_m}\right]^2 - 1\right]^{-1/2}$$

Рис. 7, *в* показывает, что в общем случае при малых X_C отношение P_{R1} / P_{R2} может быть меньше единицы, как и следует ожидать для случая дополнительного включенного последовательно элемента (дуги). Но далее это отношение обязательно становится больше единицы из-за существенной несинусоидальности тока.

4. Значительно сложнее обстоит дело при наличии индуктивности цепи (рис. 2, *в*). В этом случае повышается порядок дифференциального уравнения и усложняется математическое описание характеристики дуги. При этом может не происходить скачка тока в цепи дуги, так как при включении индуктивности последовательно с дугой, она исключает возможность скачков тока в цепи и от момента зажигания до горения проходит какое-то время, в течение которого характеристика дуги представляет собой нелинейную кривую *1*, показанную на рис. 1, *а*. Для сохранения скачка тока в момент зажигания дуги, кроме конденсатора C_1, может быть включен второй конденсатор C_2, обеспечивающий остроконечный импульс тока и соответственно возрастание тока в цепи резистора. Эта схема описывается дифференциальным уравнением третьего порядка, и ее рассмотрение выходит за пределы данной статьи. Приближенно такая схема рассмотрена в книге Е. М. Цейрова [5] в связи с процессами возникновения дуги при отключении кабельной линии от воздушной в сети высокого напряжения. В этой книге приведен очень интересный расчет колебаний для идеального случая при $R = 0$ и показана возможность возникновения больших перенапряжений на контактах выключателя. Изучение режимов в такой цепи представляет особый интерес. Однако разработанная методика использования ЭВМ для решения подобного рода нелинейных задач может быть применена и в более сложных случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Украинцев Б.** Энергия пустоты.— Природа и человек, 1988, № 2.

2. **Чернетский А. В.** Неизведанный океан энергии.— Энергия, 1990, № 6.

3. **Нетушил А. В., Ермуратский П. В.** Энергетический курьез.— Энергия, 1990, № 6.

4. **Нетушил А. В.** Цепь переменного тока с электрической дугой, сопротивлением и емкостью.— Сборник научно-методических статей. Электротехника.— М.: Изд-во Московского полиграфич. ин-та, 1991, № 14.

5. **Цейров Е. М.** Воздушные выключатели высокого напряжения.— М.: Госэнергоиздат, 1957.

[27.02.92]

Синтез программ определения места пониженного сопротивления изоляции в автономной системе электроснабжения транспортного средства

КАПАЕВ В. И., канд. техн. наук, МАРЯШЕВ В. И., инж.

Казань

В настоящее время в нашей стране и за рубежом интенсивно ведутся разработки структур высокоэффективных автономных систем электроснабжения (АСЭС) постоянного тока повышенного напряжения с системой контроля и диагностики на базе микропроцессорного комплекта для пол-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ностью электрифицированных транспортных средств (ПЭТС) [1]. Однако серьезным недостатком, сдерживающим распространение АСЭС постоянного тока повышенного напряжения, является высокая вероятность возникновения и трудность локализации места пониженного сопротивления изоляции между линией и корпусом транспортного средства.

Если место отказа типа "обрыв" или "замыкание" может быть сравнительно легко локализовано по их проявлениям (например, непрохождение тока, срабатывания средств защиты), то этого невозможно сделать при локализации места пониженного сопротивления изоляции, поскольку пониженное сопротивление изоляции в одном элементе АСЭС как бы распространяется по всем ее элементам, электрически связанным с данным элементом.

В большинстве случаев задача локализации места пониженного сопротивления изоляции решается путем последовательного электрического разобщения элементов АСЭС с последующим контролем значения сопротивления изоляции. Эта задача решается с помощью микропроцессорной системы контроля и диагностики, содержащей централизованное устройство для регистрации факта пониженного сопротивления изоляции (появление тока утечки через поврежденную изоляцию) и управляющей блоками коммутации, которые могут электрически разобщать тот или иной элемент от всей АСЭС [2].

При бессистемном разобщении элементов АСЭС затраты времени, характеризующие быстродействие программы микропроцессорной системы контроля и диагностики в режиме локализации места пониженного сопротивления изоляции, не будут минимальными. Очевидно, что при осуществлении поиска места пониженного сопротивления изоляции система контроля и диагностики АСЭС на базе микропроцессорного комплекта должна управляться по определенной программе. Применение оптимальных программ позволит вести поиск не бессистемно, а на основе конкретных расчетов, минимизирующих затраты времени, а следовательно, повысить быстродействие программы микропроцессорной системы контроля и диагностики в режиме локализации места пониженного сопротивления изоляции.

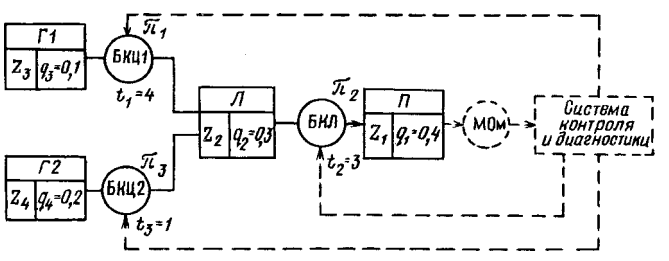


Рис. 1

В статье излагается методика построения оптимальных программ локализации пониженного сопротивления изоляции в АСЭС с микропроцессорной системой контроля и диагностики, обеспечивающих гарантированную минимальную продолжительность их реализации в любом случае отказа типа "пониженное сопротивление изоляции" при следующих предположениях.

1. Схема АСЭС (рис. 1) состоит из множества функциональных элементов $Z = \{z_i\}$, $i = \overline{1, 4}$, где, например, z_1 — потребитель электроэнергии (*П*); z_2 — линия распределительной сети (*Л*); z_3 — генератор *1* (*Г1*); z_4 — генератор *2* (*Г2*). Степень детализации функциональных элементов определяется требуемой глубиной локализации места пониженного сопротивления изоляции (до блока, до узла, до фидера).

2. Среди множества элементов системы $Z = \{z_i\}$ возможно множество разобщений электрических функциональных связей $\Pi = \{\pi_r\}$, $r = \overline{1, 3}$, где, например, π_1 — разобщение блоком коммутации центральным первым (*БКЦ1*); π_2 — разобщение блоком коммутации в линии (*БКЛ*); π_3 — разобщение блоком коммутации центральным вторым (*БКЦ2*).

Число мест выполнения этих разобщений необходимо и достаточно для того, чтобы электрически разобщить тот или иной элемент от общей системы электроснабжения. Блоки коммутации срабатывают по командам, поступающим от микропроцессора, входящего в состав системы контроля и диагностики АСЭС. Затраты времени на выполнение разобщения π_r известны и равны t_r.

3. В АСЭС предусмотрено централизованное устройство для контроля сопротивления изоляции (на рис. 1 это — прибор МОм), устанавливающее факт нормального или пониженного сопротивления изоляции всей системы, а при разобщении элементов — ее части, электрически связанной с устройством контроля сопротивления изоляции. Информация с центрального устройства контроля сопротивления изоляции поступает в микропроцессорную систему контроля и диагностики.

4. Понижение сопротивления изоляции возможно в любом, но только одном элементе. Известно, что с вероятностью $q_i (\Sigma q_i = 1)$ сопротивление изоляции может быть понижено в элементе z_i.

Данным условиям удовлетворяет обширный класс АСЭС ПЭТС, имеющих разветвленную блочную структуру и содержащих в своем составе

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

встроенную микропроцессорную систему контроля и диагностики.

О состоянии сопротивления изоляции элемента или подмножества соединенных электрически между собой элементов можно судить по результатам разобщений, каждое из которых предусматривает разрыв электрической связи между элементами с помощью блоков коммутации с последующим контролем сопротивления изоляции и имеет два исхода: отрицательный и положительный. Будем считать исход разобщения отрицательным, если информация, поступающая с центрального устройства контроля сопротивления изоляции в результате этого разобщения свидетельствует о пониженном сопротивлении изоляции хотя бы одного из совокупности неразобщенных элементов. В противном случае исход разобщения будем называть положительным.

Из рис. 1 следует, что в первом случае элемент с пониженным сопротивлением изоляции находится среди подмножества элементов неразобщенных от общей системы электроснабжения, а во втором случае — среди подмножества элементов, разобщенных от общей системы электроснабжения. Например, допустим, что при выполнении разобщения в точке π_2 показания устройства для контроля сопротивления изоляции не в норме (т. е. исход разобщения π_2 отрицательный). Очевидно, что в этом случае элемент с пониженным сопротивлением изоляции находится в одноэлементном подмножестве $\{z_1\}$. Если при выполнении разобщения в точке π_2 показания устройства для контроля сопротивления изоляции в норме (т. е. исход разобщения π_2 положительный), то элемент с пониженным сопротивлением изоляции находится в подмножестве элементов $\{z_2, z_3, z_4\}$.

Поиск элемента с пониженным сопротивлением изоляции состоит в выполнении некоторой последовательности разобщений, которую будем называть программой локализации места пониженного сопротивления изоляции. Программа локализации места пониженного сопротивления изоляции, в которой каждое последующее разобщение назначается в зависимости от исхода предыдущего, называется условной [3]. Построение условной программы локализации места пониженного сопротивления изоляции начинается с выбора первого разобщения. В зависимости от исхода разобщения, выполненного в качестве первого, множество элементов z будет разделено на два подмножества. В одно из этих подмножеств войдут элементы множества z, для которых данное разобщение имеет отрицательный исход. Второе подмножество будет содержать элементы множества z, для которых исход данного разобщения является положительным. Затем выбираются разобщения, разделяющие эти подмножества и т. д.

Допустим, что на каком-то шаге этой процедуры разобщение $\pi_r (\pi_r \in \Pi)$ разделяет подмножество элементов Z_k на два подмножества $Z^0_{k,r}$ и $Z^1_{k,r}$ (здесь $Z_k \subseteq Z$ — все возможные подмножества элементов, образующиеся в процессе выполнения разобщений, а $\Pi_k \subseteq \Pi$ — подмножество разобщений, возможных в подмножестве элементов Z_k). В подмножество $Z^0_{k,r}$ входят те элементы из Z_k, для которых разобщение Π_r имеет отрицательный исход, тогда как в подмножество $Z^1_{k,r}$ — элементы, для которых это разобщение имеет положительный исход. Цепочку подобных рассуждений можно продолжить до получения одноэлементных подмножеств, установление факта пониженного сопротивления изоляции которых является целью программ локализации места пониженного сопротивления изоляции.

В соответствии с изложенной процедурой процесс построения всех возможных условных программ локализации места пониженного сопротивления изоляции в системе электроснабжения с множеством элементов Z можно представить в виде сетевой модели (рис. 2), являющейся по сути ориентированным ациклическим графом. Вершинами графа является множество всевозможных пар подмножеств (Z_k, Π_k). Дуги графа указывают на положительные (индекс 1) и отрицательные (индекс 0) исходы этих разобщений. Граф ориентирован от вершины аналога пары исходных множеств (Z, Π), где $Z = (z_i)$, $i = \overline{1, 4}$ — исходное множество элементов, а $\Pi = \{\pi_r\}$, $r = \overline{1, 3}$ — множество возможных в нем разобщений, в направлении вершин — аналогов одноэлементных подмножеств $\{z_1\}$, $\{z_2\}$, $\{z_3\}$, $\{z_4\}$.

Для определения содержательного смысла понятия "длина дуги" допустим, что в результате выполнения некоторой последовательности разобщений установлено: элемент с пониженным сопротивлением изоляции находится в подмножестве элементов Z_k и для его дальнейшей локализации выполняется одно из возможных в данном подмножестве элементов разобщений $\pi_r (\pi_r \in \Pi_k)$, которое разделяет подмножество элементов Z_k на два подмножества: $Z^0_{k,r}$ и $Z^1_{k,r}$. В этих условиях средние затраты времени на локализацию элемента с пониженным сопротивлением изоляции в подмножестве Z_k будут определяться выражением

$$\overline{T}(Z_{k,r}) = t_r \sum_{Z_k} q_i + \overline{T}(Z^0_{k,r}) + \overline{T}(Z^1_{k,r}), \qquad (1)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где t_r — время выполнения разобщения π_r; $\sum_{Z_k} q_i$ — вероятность нахождения элемента с пониженным сопротивлением изоляции в подмножестве элементов Z_k; $\overline{T}(Z^0_{k,r})$ — среднее время локализации элемента с пониженным сопротивлением изоляции в подмножестве элементов $Z^0_{k,r}$; $\overline{T}(Z^1_{k,r})$ — среднее время локализации элемента с пониженным сопротивлением изоляции в подмножестве элементов $Z^1_{k,r}$.

В выражении (1) произведение $t_r \sum_{Z_k} q_i$ характеризует средние затраты времени на выполнение разобщения π_r в подмножестве элементов Z_k при многократном применении програмы и отражает тот факт, что выполнение разобщения π_r в подмножестве элементов Z_k — событие случайное, вероятность которого равна $\sum_{Z_k} q_i$. Кроме того, подмножество Z_k может представлять собой различные комбинации по k элементов из исходного множества элементов Z, в которых возможно выполнение разобщений π_r. Например, в условиях рис. 2 разобщение π_2 на этапе трехэлементных подмножеств $Z_k(k = 3)$ может выполняться в двух трехэлементных подмножествах $\{z_1, z_2, z_4\}$ и $\{z_1, z_2, z_3\}$. Эти обстоятельства определяют структуру первого слагаемого в выражении (1).

Второе и третье слагаемые в выражении (1) отражают тот факт, что после выполнения разобщения π_r в подмножестве элементов Z_k возможны два направления процесса поиска элемента с пониженным сопротивлением изоляции. Первое направление поиск в подмножестве $Z^0_{k,r}$, а второе — в подмножестве $Z^1_{k,r}$.

Вероятность каждого из этих направлений поиска определяется суммой вероятностей пониженного сопротивления изоляции элементов, входящих в соответствующие подмножества. Следует помнить, что индексы "0" и "1" в обозначениях подмножеств $Z^0_{k,r}$ и $Z^1_{k,r}$ указывают лишь на направление процесса поиска в зависимости от исхода разобщения π_r. Как отмечалось, "0" — исход разобщения отрицательный, т. е. показания устройства контроля сопротивления изоляции не в норме, а "1" — исход разобщения положительный, т. е. показания устройства для контроля сопротивления изоляции в норме.

В процессе построения программы локализации места пониженного сопротивления изоляции мы допускаем возможность понижения сопротивления изоляции у каждого из элементов исходного множества Z, а следовательно, и различные исходы разобщений. Поэтому выражение для подсчета средних затрат времени на локализацию элемента с пониженным сопротивлением изоляции в подмножестве элементов Z_k должно охватывать оба возможных исхода разобщений, т. е. оба возможных направления процесса поиска элемента с пониженным сопротивлением изоляции.

Каждой вершине графа и паре дуг, выходящих из нее, можно сопоставить выражение типа (1). Тогда с длиной каждой дуги графа можно связать соответствующие величины $\overline{T}(Z^0_{k,r})$ и $\overline{T}(Z^1_{k,r})$. Если подмножества $Z^0_{k,r}$ и $Z^1_{k,r}$ одноэлементные, то $\overline{T}(Z^0_{k,r} = 0$ и $\overline{T}(Z^1_{k,r}) = 0$, так как при выполнении условной программы элемент с пониженным сопротивлением изоляции выделяется в виде одноэлементного подмножества, которое не нуждается в разобщении.

Таким образом, предложенная сетевая модель наглядно и однозначно определяет все возможные подмножества элементов системы электроснабжения, а также все возможные в этих подмножествах разобщения, их исходы и средние затраты времени на их выполнение. Из сетевой модели следует, что программа локализации места пониженного сопротивления изоляции является в сущности упорядоченной определенным образом последовательностью разобщений элементов (в дальнейшем будем называть ее программой разобщений).

Из анализа сетевой модели следует, что для системы электроснабжения, представленной на рис. 1, может быть построено шесть различных программ разобщений, две из которых представлены на рис. 3. Данные программы отличаются друг от друга только последовательностью выполнения разобщений.

Средняя продолжительность выполнения условной программы разобщений определяется выражением

$$\overline{T}(Z) = \sum_{Z} q_i t(z_i), \qquad (2)$$

где $t(Z_i)$ — суммарное время всех разобщений, выполнение которых необходимо для локализации

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

элемента с пониженным сопротивлением изоляции z_i в соответствии с данной программой в множестве элементов Z.

Например средняя продолжительность выполнения условных программ разобщений, представленных на рис. 3, *а* и 3, *б*, соответственно будет

$$\overline{T}(Z) = q_4(t_3 + t_2 + t_1) + q_2(t_3 + t_2 + t_1) + \\ + q_1(t_2 + t_1) + q_3 t_1 = 7{,}2;$$

$$\overline{T}(Z) = q_3(t_1 + t_2 + t_3) + q_2((t_1 + t_2 + t_3) + \\ + q_1(t_2 + t_3) + q_4 t_3 = 5.$$

Таким образом, для одного и того же множества элементов Z средняя продолжительность выполнения условной программы разобщений $\overline{T}(Z)$ является случайной величиной, возможные значения которой зависят от порядка следования разобщений в программе. Очевидно, что среди всех возможных для данной системы электроснабжения условных программ разобщений можно выбрать программу с такой последовательностью выполнения разобщений, которая соответствует заданным критериям. Именно это обстоятельство обуславливает правомерность постановки задачи оптимизации условных программ разобщений путем определения рациональной последовательности их выполнения.

Для нахождения оптимальной программы разобщений должен быть задан критерий оптимальности. В том случае, когда для системы электроснабжения первостепенное значение имеет поддержание ее в исправном состоянии, основным критерием оптимизации является продолжительность процесса локализации места пониженного сопротивления изоляции. Как правило, при вероятностном характере отказов основным критерием оптимальности программ диагностирования служит минимум средней продолжительности их реализации [4].

В соответствии с изложенной основной процедурой построения условных последовательных программ разобщений среднее время локализации элемента с пониженным сопротивлением в любом подмножестве элементов Z_k (см. рис. 2) определяется выражением (1). Оптимальная программа разобщений обладает тем свойством, что в любом подмножестве элементов Z_k из подмножества возможных в нем разобщений Π_k перспективным разобщением является то, для которого выражение (1) принимает минимальное значение. Следовательно, для любой вершины графа — аналога пар подмножеств (Z_k, Π_k) — критерием включения в состав перспективных того или иного разобщения из подмножества разобщений Π_k, возможных в

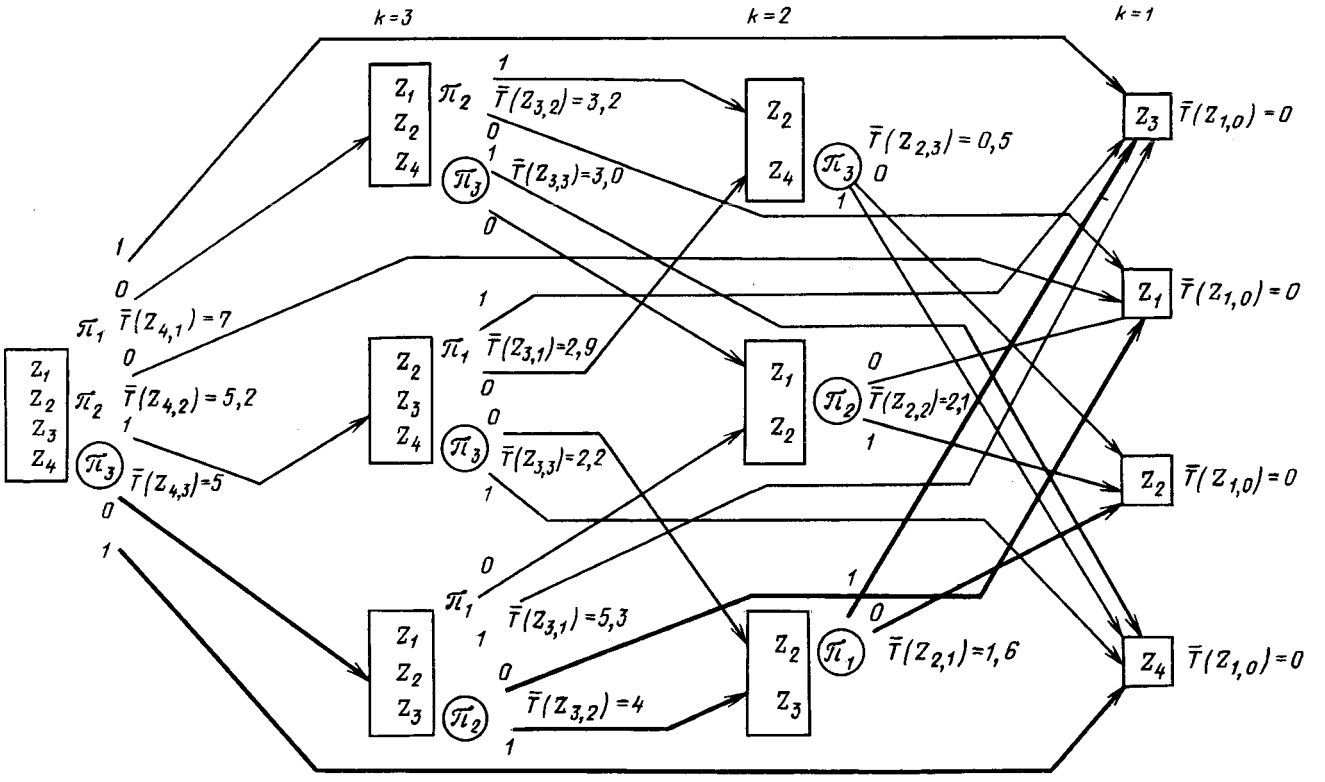


Рис. 2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

подмножестве элементов Z_k, будет являться реализация данным разобщением следующего условия:

$$\overline{T}(Z_{k,r}) = \min_{\substack{Z_k \in Z \\ \pi_r \in \Pi}} [t_r \sum_{Z_k} q_i + \overline{T}(Z^0_{k,r}) + \overline{T}(Z^1_{k,r})]. \quad (3)$$

Здесь минимизация осуществляется по переменной r, соответствующей номеру разобщения π_r, выбираемого путем перебора из подмножества всех возможных разобщений в рассматриваемой на данном этапе вершине графа — аналога пар подмножеств (Z_k, Π_k). Минимизация по переменной r обусловлена тем, что оптимизация условных программ разобщений производится в направлении определения рациональной последовательности их выполнения.

Соотношение (3) представляет собой функциональное уравнение динамического программирования, которое используется для построения оптимальной программы разобщений. Его рекуррентность заключается в том, что для вычисления $\overline{T}(Z_{k,r})$ используются величины $\overline{T}(Z^0_{k,r})$ и $\overline{T}(Z^1_{k,r})$, рассчитанные на предыдущих этапах вычислительной процедуры с помощью выражения, аналогичного выражению (3).

Процедура решения уравнения (3) становится более обозримой при использовании сетевой модели (рис. 2), характеризующей все возможные варианты условных программ разобщений в исходном множестве элементов Z. В этом случае решение уравнения (3) заключается в определении кратчайшего пути в сетевой модели из начальной вершины — аналога пары множеств (Z, Π) в конечные вершины — аналоги одноэлементных подмножеств. Так как этот путь складывается из отдельных дуг графа, с длиной которых связаны средние затраты времени, то следовательно, он однозначно определяет оптимальную программу разобщений, обеспечивающую минимум средних затрат времени на ее реализацию и величину этих затрат.

Построение оптимальной условной программы разобщений выполняется в два этапа.

На первом этапе для всех подмножеств элементов $Z_k (Z_k \neq Z)$, начиная с подмножеств, включающих два элемента, рекурсивно по формуле (1) рассчитывается среднее время реализации каждой из возможных в данных подмножествах элементов программ разобщений. При этом разобщения, для которых реализуется условие (3), заносятся в разряд перспективных, запоминаются и используются в расчетах согласно выражению (1) для последующих подмножеств элементов. Перспективные разобщения на сетевой модели выделены кружками. Разобщения, для которых не выполняется условие (3), из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Применительно к рассматриваемой системе электроснабжения данная процедура выглядит следующим образом (см. рис. 2).

В одноэлементных подмножествах $Z_k (k = 1)$: $\{z_3\}$, $\{z_1\}$, $\{z_2\}$, $\{z_4\}$ разобщения фиктивные $(r = 0)$ с нулевыми затратами времени $\overline{T}(Z_{1,0}) = 0$. Условие $\overline{T}(Z_{1,0}) = 0$ говорит о том, что "система" из одного элемента не нуждается в разобщении, так как априори известно, что элемент отказал.

В двухэлементных подмножествах $Z_k (k = 2)$: $\{z_2, z_4\}$, $\{z_1, z_2\}$, $\{z_2, z_3\}$ возможно только по одному разобщению, в частности:

в подмножестве $\{z_2, z_4\}$ — разобщение π_3, а средние затраты времени в соответствии с (1) равны

$$\overline{T}(Z_{2,3}) = t_3(q_2 + q_4) + \overline{T}(Z_{1,0}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 0{,}5;$$

в подмножестве $\{z_1, z_2\}$ — разобщение π_2, средние затраты времени $\overline{T}(Z_{2,2}) = t_2(q_1 + q_2) + \overline{T}(Z_{1,0}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 2{,}1$;

в подмножестве $\{z_2, z_3\}$ — разобщение π_1, средние затраты времени

$$\overline{T}(Z_{2,1}) = t_1(q_2 + q_3) + \overline{T}(Z_{1,0}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 1{,}6.$$

Так как в каждом двухэлементном подмножестве возможно только одно разобщение, то это разобщение для данного подмножества заносим в разряд перспективных, выделив его на сетевой модели кружком.

В трехэлементных подмножествах

$$Z_k (k = 3) : \{z_1, z_2, z_4\}, \{z_2, z_3, z_4\}, \{z_1, z_2, z_3\}$$

возможны по два разобщения, в частности:

1. В подмножестве $\{z_1, z_2, z_4\}$ — разобщения π_2 и π_3, средние затраты времени, соответствующие каждому из этих разобщений, равны

$$\overline{T}(Z_{3,2}) = t_2(q_1 + q_2 + q_4) + \overline{T}(Z_{1,0}) + \overline{T}(Z_{2,3}) = 3{,}2;$$

$$\overline{T}(Z_{3,3}) = t_3(q_1 + q_2 + q_4) + \overline{T}(Z_{2,2}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 3{,}0.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Так как для разобщения π_3 реализуется условие (3), т. е. $\overline{T}(Z_{3,3}) < \overline{T}(Z_{3,2})$, то данное разобщение подмножества элементов $\{z_1, z_2, z_4\}$ заносится в разряд перспективных и выделяется на сетевой модели кружком.

2. В подмножестве $\{z_2, z_3, z_4\}$ — разобщения π_1 и π_3, средние затраты времени соответственно равны

$$\overline{T}(Z_{3,1}) = t_1(q_2 + q_3 + q_4) + \overline{T}(Z_{2,3}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 2{,}9;$$

$$\overline{T}(Z_{3,3}) = t_3(q_2 + q_3 + q_4) + \overline{T}(Z_{2,1}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 2{,}2.$$

Так как для разобщения π_3 реализуется условие (3), т. е. $\overline{T}(Z_{3,3}) < \overline{T}(Z_{3,1})$, то данное разобщение для подмножества элементов $\{z_2, z_3, z_4\}$ заносится в разряд перспективных и выделяется на сетевой модели кружком.

3. В подмножестве $\{z_1, z_2, z_3\}$ — разобщения π_1 и π_2, средние затраты времени, соответственно, будут

$$\overline{T}(Z_{3,1}) = t_1(q_1 + q_2 + q_3) + \overline{T}(Z_{2,2}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 5{,}3;$$

$$\overline{T}(Z_{3,2}) = t_2(q_1 + q_2 + q_3) + \overline{T}(Z_{1,0}) + \overline{T}(Z_{2,1}) = 4.$$

Так как для разобщения π_2 реализуется условие (3), т. е. $\overline{T}(Z_{3,2}) < \overline{T}(Z_{3,1})$, то данное разобщение для подмножества элементов $\{z_1, z_2, z_3\}$ будет перспективным, что отмечается на сетевой модели кружком.

В исходном множестве $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ $(k = 4)$ возможны три разобщения π_1, π_2, π_3, а средние затраты времени, соответствующие каждому из этих разобщений, равны:

$$\overline{T}(Z_{4,1}) = t_1(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + \overline{T}(Z_{3,3}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 7{,}0;$$

$$\overline{T}(Z_{4,2}) = t_2(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + \overline{T}(Z_{3,3}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 5{,}2;$$

$$\overline{T}(Z_{4,3}) = t_3(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + \overline{T}(Z_{3,2}) + \overline{T}(Z_{1,0}) = 5.$$

Так как для разобщения π_3 реализуется условие (3), т. е. $\overline{T}(Z_{4,3}) < \overline{T}(Z_{4,2})$ и $\overline{T}(Z_{4,3}) < \overline{T}(Z_{4,1})$, то данное разобщение для исходного множества элементов $\{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ заносится в разряд перспективных и выделяется на сетевой модели кружком.

На втором этапе производится построение самой оптимальной программы разобщений. Для этого в качестве первого разобщения в состав оптимальной программы включается то разобщение из множества возможных Π в исходном множестве элементов Z, для которого выполняется условие (3). Далее двигаясь по дугам-исходам этого разобщения в направлении одноэлементных подмножеств, в программу включают только перспективные разобщения из числа возможных Π_k в подмножествах элементов Z_k, на которые выводят дуги-исходы разобщения, включенного в состав программы на предыдущих шагах. Подобным образом процесс включения разобщений в состав оптимальной программы продолжается до получения одноэлементных подмножеств $Z_k(k = 1)$.

Применительно к рассматриваемой системе электроснабжения дуги-исходы разобщений, вошедшие в оптимальную программу, указаны на сетевой модели (см. рис. 2) утолщенными линиями.

Построенную таким образом оптимальную программу разобщений удобно представить в виде графа-дерева разобщений и их исходов (см. рис. 3, *б*). В сущности данная программа является алгоритмом работы микропроцессорной системы контроля и диагностики в режиме локализации места пониженного сопротивления изоляции. Порядок пользования этой программой следующий.

После установления устройством для контроля сопротивления изоляции факта пониженного сопротивления изоляции в АСЭС, представленной на рис. 1, микропроцессорная система контроля и диагностики переходит в режим локализации места пониженного сопротивления изоляции. При этом первым в соответствии с программой

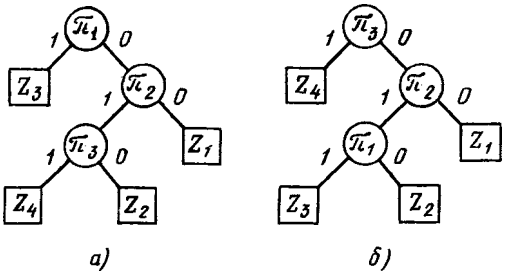


Рис. 3

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

(рис. 3, *б*) по командам системы контроля и диагностики АСЭС с помощью блока коммутации БКЦ2 выполняется разобщение π_3. Если исход этого разобщения положительный (с устройства для контроля сопротивления изоляции в микропроцессорную систему контроля диагностики поступает информация о состоянии изоляции в норме), то в соответствии с программой сопротивление изоляции понижено в элементе z_4 — генераторе *2* (*Г2*). Если исход разобщения π_3 отрицательный (с устройства для контроля сопротивления изоляции в микропроцессорную систему контроля и диагностики поступает информация о состоянии изоляции не в норме), то в соответствии с программой вторым выполняется разобщение π_2 с помощью блока коммутации БКЛ. Если исход этого разобщения отрицательный, то сопротивление изоляции понижено в элементе z_1 — потребителе электроэнергии (*П*). Если исход разобщения π_2 положительный, то в соответствии с программой третьим выполняется разобщение π_1 с помощью блока коммутации БКЦ1. Если исход разобщения π_1 положительный, то сопротивление изоляции понижено в элементе z_3 — генераторе *1* (*Г1*), а если — отрицательный, то — в элементе z_2 — линии распределительной сети (*Л*).

Описанная процедура построения оптимальных программ локализации места пониженного сопротивления изоляции сравнительно просто поддается алгоритмизации и может решаться на ЭЦВМ, а полученные таким способом программы могут составить алгоритм работы системы контроля и диагностики АСЭС на базе микропроцессорного комплекта, что позволит увеличить ее быстродействие в режиме локализации места пониженного сопротивления изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комбинированная** автономная система электроснабжения полностью электрифицированного транспортного средства / С. Р. Мизюрин, С. Б. Резников, В. В. Бочаров и др. — Электричество, 1984, № 11.

2. **Диагностика** неисправностей в автономной системе электроснабжения квазипостоянного тока / Г. А. Дубенский, Е. Л. Белова, С. Б. Резников и др. — Электричество, 1989, № 2.

3. **Мозгалевский А. В., Калевич В. П., Костанди Г. Г.** Диагностирование электронных систем. — Л.: Судостроение, 1984.

4. **Пашковский Г. С.** Задачи оптимизации обнаружения и поиска отказов в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Радио и связь, 1981.

[01.04.92]

Об обозначениях элементов схем замещения[1]

ТЕР-АКОПОВ А. К.

В настоящее время в нашей стране отсутствует стандарт на элементы схем земещения; судя по имеющейся доступной литературе, нет его и за рубежом. И это является одним из доказательств того, что в теории электрических цепей обращается недостаточное внимание этому важному вопросу. Между тем, правильно составленная схема замещения электрической цепи предопределяет успех любого расчета. Если иметь готовую схему замещения электрической цепи, то, составив систему интегро-дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа, можно в принципе рассчитать любую электрическую цепь и в любом режиме (постоянный ток, синусоидальный и несинусоидальный режимы, переходные процессы, цепи с распределенными параметрами и т. д.).

В [1, с. 19, п. 183] приводится определение схемы замещения электрической цепи, но в этом же стандарте не нашлось места, чтобы привести в качестве примера хотя бы один из элементов схемы замещения. Более того, приводятся определения активного сопротивления [1, с. 15, п. 137], индуктивности [1, с. 12, п. 105], емкости [1, с. 6, п. 39]. Но ведь эти параметры одновременно являются элементами схем замещения; однако об этом не сказано ни слова.

В [2] приводятся сотни условных графических обозначений элементов цепей (только одних разделов более 30), и в этой довольно объемистой книге (496 страниц!) не нашлось места для двух десятков (см. ниже) условных обозначений элементов схем замещения. Кстати, ни в одной монографии, ни в одном учебнике или учебном пособии нет ответа на вопрос, сколько же всего элементов схем замещения.

Часто путаются понятия элементов цепей и элементов схем замещения. Если сравнить между собой современные учебники по теории электриче-

[1] В порядке обсуждения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ских цепей, то без преувеличения можно сказать: что ни автор, то своя терминология. Как только не называют элементы схем замещения: "идеальные элементы цепи", "идеализированные элементы цепи", "идеальный резистор", "идеальная индуктивная катушка", "идеальный конденсатор" и т. д. При этом забывают, что у той же катушки при высоких частотах результирующий эффект емкостной. Приходится напоминать о возможности при этом таких несуразных выражений, как в "схеме замещения индуктивной катушки фигурирует идеальный конденсатор".

В [3] обоснована необходимость введения стандарта на элементы схем замещения, сформулированы требования к условным графическим обозначениям их. Эти же вопросы рассмотрены и в [4], но с позиций терминологии и определений.

В настоящей статье впервые представляется полный проект стандарта на элементы схем замещения. Изучение и анализ отечественной и зарубежной литературы показали, что в настоящее время в мировой практике используются всего 20 элементов схем замещения, и все они представлены в предлагаемом стандарте в виде таблицы.

В ней приведены названия элементов, связь между током и напряжением в каждом элементе, условные графические обозначения и, конечно, положительные направления напряжений и токов. Конечно, со временем появятся и новые элементы, поэтому в дальнейшем, возможно, придется расширить предлагаемую таблицу.

Следует подчеркнуть, что существование условных обозначений элементов схем замещения — объективная реальность; они давно используются в литературе. Однако отсутствие стандарта привело к тому, что один и тот же элемент обозначается у разных авторов самым различным образом в официально утвержденных учебниках по теории электрических цепей. Поэтому необходимость создания нового стандарта, думается, не может вызвать возражений. Дискуссии могут (и должны) вызвать только вопросы выбора того или иного обозначения каждого конкретного элемента. Основным достоинством предлагаемых здесь условных обозначений является то, что можно сначала изобразить прямыми линиями "скелет" схемы, не оставляя зазоров для тех или иных элементов, а затем уже наносить на схему любые элементы.

Теперь остается только прокомментировать и обосновать выбор условного обозначения каждого элемента схем замещения. На рис. 1 показаны условные обозначения источника напряжения, которые используются в настоящее время в учебной и научной литературе, например в [5—7]. Наиболее распространено первое обозначение (рис. 1, *а*), оно наиболее удобно и не совпадает ни с одним из условных обозначений источников

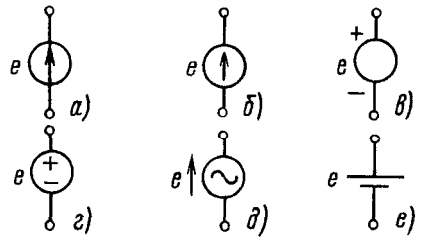


Рис. 1. Условные обозначения источника напряжения, используемые в учебной и научной литературе

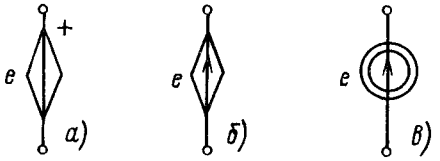


Рис. 2. Условные обозначения зависимого источника напряжения, используемые в учебной и научной литературе

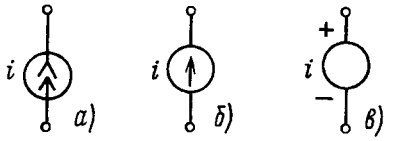


Рис. 3. Условные обозначения источника тока, используемые в учебной и научной литературе

энергии, как элементов цепи. Остальные условные обозначения либо неудобны, либо совпадают с условными обозначениями соответствующих элементов цепи. Поэтому в таблице (первая строка) рекомендовано именно первое условное обозначение.

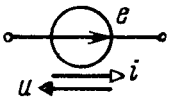
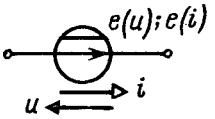
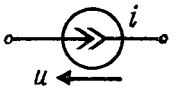
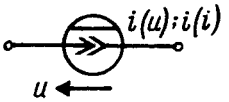
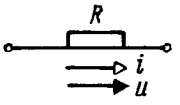
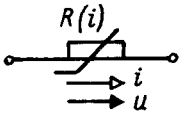
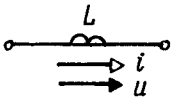
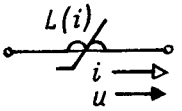
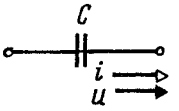
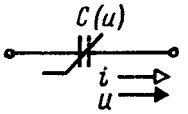
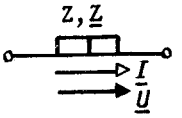
Зависимые источники напряжения изображаются или в виде ромбиков (рис. 2, *а*, *б*), либо в виде двух концентрических окружностей (рис. 2, *в*); такие условные обозначения используются, например, в [5—7]. Они менее удобны, чем рекомендуемое обозначение зависимого источника напряжения (см. вторую строку таблицы): оно отличается от обозначения независимого источника только добавлением хорды, параллельной стрелке.

В третьей строке таблицы показано условное обозначение источника тока; оно отличается от широко используемого (рис. 3, *а*) только тем, что соединительная линия не прерывается. Конечно, здесь лишаемся наглядности в том, что сопротивление источника тока бесконечно большое (разрыв), но зато приобретаем удобство в непрерывности соединительных линий. Аналогичные замечания можно сделать и относительно условного обозначения зависимого источника тока (см. четвертую строку таблицы).

Наиболее трудно было выбрать условные обозначения сопротивления, индуктивности и емкости

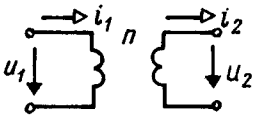
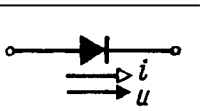
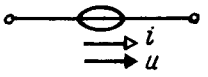
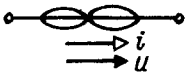
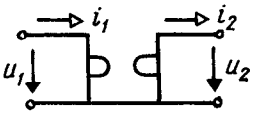
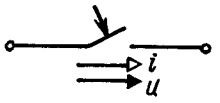
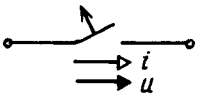
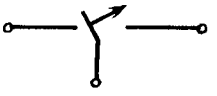
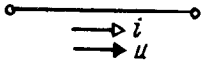
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Элементы схем замещения

№ № п/п	Наименование элемента, связь между напряжением и током	Обозначение и принятые положительные направления величин
1	Источник напряжения, $u = e$; $u \neq f(i)$	
2	То же, зависимый, управляемый напряжением (ИНУН) или током (ИНУТ)	
3	Источник тока, $i \neq f(u)$	
4	То же, зависимый, управляемый напряжением (ИТУН) или током (ИТУТ)	
5	Сопротивление потерь, $u = Ri$, где R = const	
6	Сопротивление потерь, нелинейное, $R = f(i)$	
7	Индуктивность, $u = L\frac{di}{dt}$, где L = const	
8	Индуктивность нелинейная, $L = f(i)$	
9	Емкость, $i = C\frac{du}{dt}$, где C = const	
10	Емкость нелинейная $C = f(u)$	
11	Сопротивление полное, сопротивление комплексное, $U = zI$; $\underline{U} = \underline{z}\,\underline{I}$	

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Продолжение табл.

№ № п/п	Наименование элемента, связь между напряжением и током	Обозначение и принятые положительные направления величин
12	Трансформация (идеальный трансформатор), $\frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1} = n$	
13	Вентиль, $R = 0$ при $i > 0$; $R = \infty$ при $u < 0$	
14	Нулатор, $i = 0$; $u = 0$	
15	Норатор, $i \neq f(u)$; $u \neq f(i)$	
16	Гиратор, $u_1 = R_{12} i_2$; $i_1 = G_{21} u_2$	
17	Ключ замыкающийся, $u = 0$ при $i \neq 0$; $i = 0$ при $u \neq 0$	
18	Ключ размыкающийся, те же соотношения	
19	Переключатель, те же соотношения	
20	Соединительная линия $u = 0$ при $i \neq 0$	

(линейных и нелинейных); они показаны в пятой — десятой строках таблицы. Проблема заключается в том, что для этих элементов используются условные обозначения соответственно резистора (рис. 4, *а*), конденсатора (рис. 4, *б*), индуктивной катушки (рис. 4, *в*). Причем согласно ГОСТ [2] четыре полуокружности обозначают индуктивную катушку, дроссель без сердечника, обмотку трансформатора, обмотку параллельного возбуждения машины постоянного тока. Три полуокружности служат для обозначения обмотки напряжения реле и измерительных приборов; две полуокружности — для обозначения токовой обмотки реле и измерительных приборов.

Это обстоятельство всегда приводит к путанице: то ли принципиальная схема, то ли схема

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

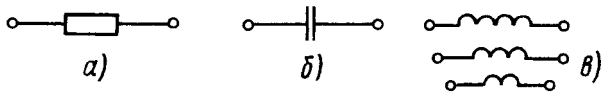


Рис. 4. Условные обозначения пассивных элементов схем замещения, используемые в учебной и научной литературе: *а* — активное сопротивление; *б* — емкость; *в* — индуктивность

замещения; то ли конденсатор, то ли емкость и т. д. Задача стояла так: придумать такие условные обозначения, которые, с одной стороны, были бы похожи на те, которые в настоящее время используются, но с другой стороны, отличались от условных обозначений соответствующих элементов цепей и, конечно, были удобны при изображении схем замещения. Предлагаемые условные обозначения сопротивления, индуктивности и емкости удовлетворяют этим требованиям. "Клюшка" для нелинейных элементов широко используется в литературе и рекомендуется существующим стандартом [2].

Итак, условные обозначения индуктивности и емкости отличаются соответственно от обозначений индуктивной катушки и конденсатора только тем, что соединительные линии не прерываются. Этот принцип нельзя использовать для сопротивления, так как получаемое при этом условное обозначение совпадает с обозначением предохранителя [2]. Для индуктивности используются две полуокружности, а не три, как чаще всего принято, так как при двух полуокружностях четко фиксируется положение "клюшки". Что касается названия сопротивления, то здесь рекомендуется термин "сопротивление потерь", а не "активное сопротивление" [1]. Дело в том, что слово "активное" используется в настоящее время в трех совершенно разных значениях; активное сопротивление (соответственно активная мощность); активный автономный двухполюсник, когда на зажимах имеется напряжение в режиме холостого хода [8]; активный неавтономный четырехполюсник, например, активные фильтры. Целесообразно ликвидировать хотя бы первое значение. Полное комплексное сопротивление (11-я строка) отличается от сопротивления потерь только наличием отрезка, делящего прямоугольник пополам.

На рис. 5 показаны условные обозначения идеального трансформатора или трансформации [9], которые используются в современной литературе. В соответствии с уже выбранным условным обозначением индуктивности (7-я строка таблицы) и выбирается условное обозначение трансформации (12-я строка). Кстати, последнее название более удачное, чем "идеальный трансформатор", так как в принципе все элементы схем замещения идеальные (реальных нет!) в том смысле, что каж-

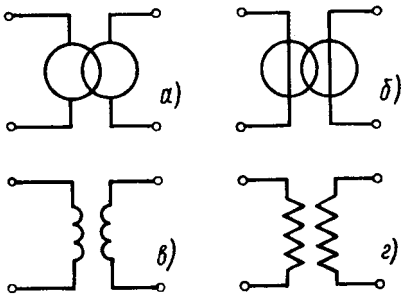


Рис. 5. Условные обозначения идеального трансформатора (трансформации), используемые в учебной и научной литературе

дый из них учитывает только одно из свойств соответствующего элемента цепи.

Условное обозначение вентиля (13-я строка) в отличие от диода, как элемента цепи, представляется зачерненным треугольником. Что касается таких сравнительно новых элементов, как нулатор, норатор и гиратор (14-, 15- и 16-я строки), то условные обозначения их выбраны по принципу наибольшего распространения в литературе, например в [6]. Условные обозначения ключа и переключателя (17-, 18- и 19-я строки) широко используются почти во всей литературе по теории электрических цепей. Наконец, соединительная линия (20-я строка), как элемент схемы замещения, обладает только одним свойством: при прохождении по ней любого тока, напряжение на ней равно нулю, т. е. все точки ее обладают одним потенциалом.

Обратим внимание, что принцип непрерывности соединительных линий в настоящее время уже используется в некоторых условных обозначениях (1-, 2-, 13-, 14-, 15-, 16-я строки).

Заключение. Из всех элементов схем замещения по существу только три (R, L, C) представлены здесь сравнительно новыми (вернее, несколько измененными) условными обозначениями. Остальные обозначения уже давно используются, надо лишь остановиться на лучшем из них; причем ни одно из представленных в таблице обозначений не совпадает с условным обозначением какого-либо элемента цепи по существующему стандарту [2], и это очень важно. Если обратиться к истории условных графических обозначений, то нетрудно убедиться в том, что они со временем изменялись,

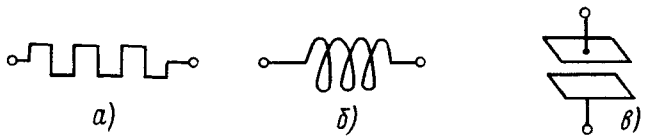


Рис. 6. Условные обозначения активного сопротивления [11], индуктивности [11] и емкости [10], которые использовались в прошлом

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вернее, упрощались [10]. Вначале рисовали картинки, стремясь к внешнему сходству; затем изображения постепенно упрощались и, наконец, превратились в условные обозначения. В качестве примера на рис. 6 представлены условные обозначения активного сопротивления, индуктивности и емкости, которые использовались не в столь уже отдаленном прошлом [10, 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 19880-74 "Электротехника.** Основные понятия. Термины и определения".— М.: Госстандарт, 1976.— 32 с.

2. **Единая** система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические в схемах.— М.: Госстандарт, 1983.— 496 с.

3. **Тер-Акопов А. К.** О системном подходе в преподавании электротехнических дисциплин (дискуссии).— Электричество, 1987, № 8, с. 71—74.

4. **Тер-Акопов А. К.** О пересмотре ГОСТ 19880-74 "Электротехника. Основные понятия. Термины и определения" (дискуссии).— Электричество, 1989, № 5, с. 91—92.

5. **Основы** теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 528 с.

6. **Матханов П. Н.** Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи.— М.: Высшая школа, 1981.— 333 с.

7. **Белецкий А. Ф.** Теория линейных электрических цепей.— М.: Радио и связь, 1986.— 543 с.

8. **Атабеков Г. И.** Теоретические основы электротехники; ч. 1.— М.: Энергия, 1978.— 319 с.

9. **Ионкин П. А., Даревский А. И., Кухаркин Е. С.** Теоретические основы электротехники, т. 1.— М.: Высшая школа, 1976.— 544 с.

10. **Каминский Е. А.** Техника чтения схем электроустановок.— М.: Энергия, 1972.— 120 с.

11. **Круг К. А.** Основы электротехники, т. 2.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1946.— 634 с.

[05.08.92]

Низкочастотная дисперсия емкости образцов пленок полиэтилентерефталата

БОРИСОВА М. Э., ГАЛЛАЙ И. Я., КОЙКОВ С. Н.

Санкт-Петербург

Процессы нестационарного электропереноса, накопления и релаксации заряда в пленочных полимерных диэлектриках имеют ряд особенностей, которые приводят к заключению о зависимости удельной проводимости γ этих пленок от координаты x по оси Ox, направленной перпендикулярно поверхности пленки [1, 2]. Основные экспериментальные данные, полученные ранее [2], удавалось объяснить на основе простой, трехслойной модели пленочного полимерного диэлектрика, приповерхностные области которого толщиной по $h_1/2$ с каждой стороны характеризуются повышенным значением удельной проводимости γ_1 по сравнению с проводимостью объема пленки γ_2.

Такая модель позволяет понять кинетику накопления гомозаряда под действием приложенного напряжения и его релаксации с постоянной времени τ_1 при плотном контакте с электродами и кинетику релаксации заряда с постоянной времени $\tau_2 \gg \tau_1$ при неплотном контакте или отсутствии контакта пленки с электродами. Она позволяет также объяснить разное направление тока и различное расположение максимумов тока при термостимулированной деполяризации (ТСД) в случае плотного контакта с электродами (определяется зависимость $\lg \tau_1$ от $1/T$) и при наличии изолирующих прокладок (определяется зависимость $\lg \tau_2$ от $1/T$). По этим зависимостям рассчитываются функции $\lg \gamma_1$ и $\lg \gamma_2$ от $1/T$. Оказалось, что при сравнительно низких температурах (комнатная температура или несколько более высокая) значения γ_1 на два и более порядков превышают γ_2, тогда как с повышением температуры различие между γ_1 и γ_2 уменьшается.

Выводы о неоднородности полимерных пленок по толщине с повышенной удельной проводимостью приповерхностных слоев γ_1 по сравнению с удельной проводимостью объема γ_2 имеют принципиальное значение, поэтому было необходимо дополнительно проверить трехслойную (двухкомпонентную) модель пленки на адекватность.

В данной работе исследовали зависимость от частоты емкости $C_x(\omega)$ и активного сопротивления $R_x(\omega)$ образцов пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в интервале частот от 200 до $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Измерения проводились с помощью специальной мостовой схемы, описание и технические параметры которой приведены в [3]. Образцы имели толщину $h = 20$ мкм. Алюминиевые электроды пло-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

щадью $S = 5{,}13$ мм^2 наносили термическим испарением в вакууме. Результаты измерений конденсаторных структур, сформированных на одном образце пленки с максимальной и минимальной частотной дисперсией C_x и R_x при $T = 20$ °С и $U_m = 10$ В, представлены на рис. 1.

Для анализа полученных результатов воспользуемся двухкомпонентной моделью диэлектрика (рис. 2, *а*), к которой сводится трехслойная модель с одинаковыми по своим свойствам приповерхностными слоями толщиной по $h_1/2$. Частотные характеристики этой модели могут быть проанализированы на основе решения системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} j = \gamma_1 E_1 + \varepsilon_0\varepsilon_1 \frac{dE_1}{dt} = \gamma_2 E_2 + \varepsilon_0\varepsilon_2 \frac{dE_2}{dt}\,; \\ h_1 E_1 + h_2 E_2 = -U, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где учтено также возможное различие диэлектрической проницаемости приповерхностных слоев ε_1 и объема пленки ε_2.

Двухкомпонентной (трехслойной) модели диэлектрика соответствует эквивалентная схема Максвелла (рис. 2, *б*) со значениями сопротивлений, емкостей и времен релаксации слоев:

$$R_1 = \frac{h_1}{\gamma_1 S}\,; \quad R_2 = \frac{h_2}{\gamma_2 S}\,; \quad C_1 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1 S}{h_1}\,; \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_2 S}{h_2}\,;$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1}{\gamma_1}\,; \; \tau_2 = R_2 C_2 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_2}{\gamma_2}\,. \qquad (2)$$

Частотная характеристика эквивалентной схемы Максвелла может быть приведена в соответствие с частотной характеристикой эквивалентной схемы Фойгта [4], характеризуемой в данном случае высокочастотной емкостью c_2, сопротивлением утечки r_2 и релаксатором из последовательно соединенных сопротивления r_1 и емкости c_1 (рис. 2, *в*). Схема Фойгта позволяет более просто, чем схема Максвелла, произвести сравнение расчетных характеристик $C_x(\omega)$, $R_x(\omega)$ с экспериментальными данными. Для схемы Максвелла, пользуясь символическим методом, получим частотную характеристику комплексной проводимости:

$$\dot{Y}(\omega) = \frac{1}{R_x(\omega)} + i\omega C_x(\omega) =$$

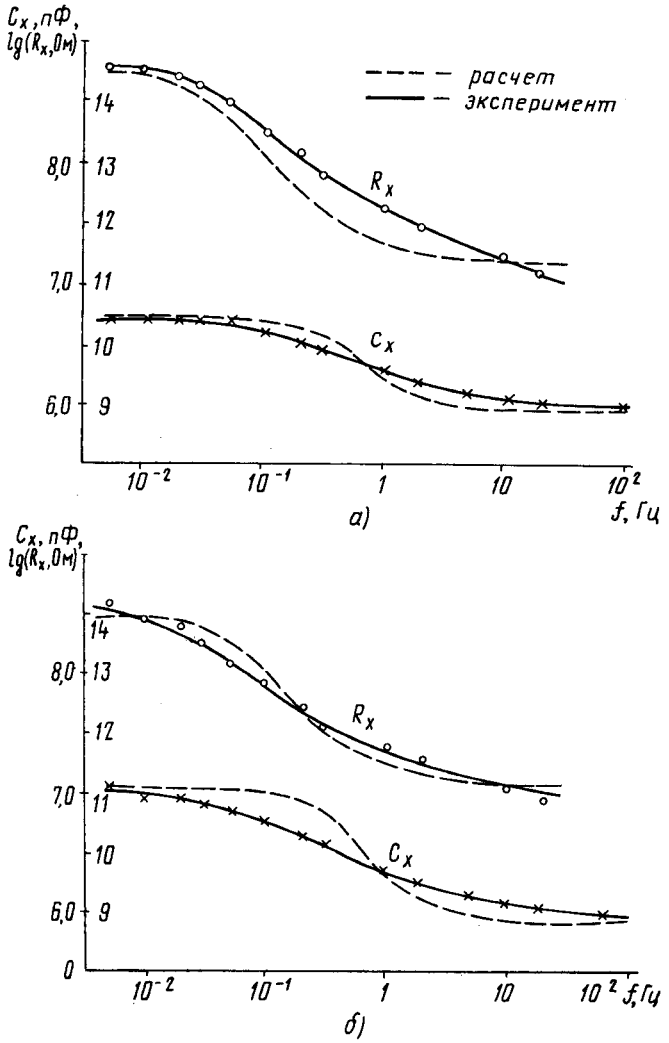


Рис. 1. Зависимости $C_x(\omega)$ и $R_x(\omega)$ для двух конденсаторных структур на пленке ПЭТФ

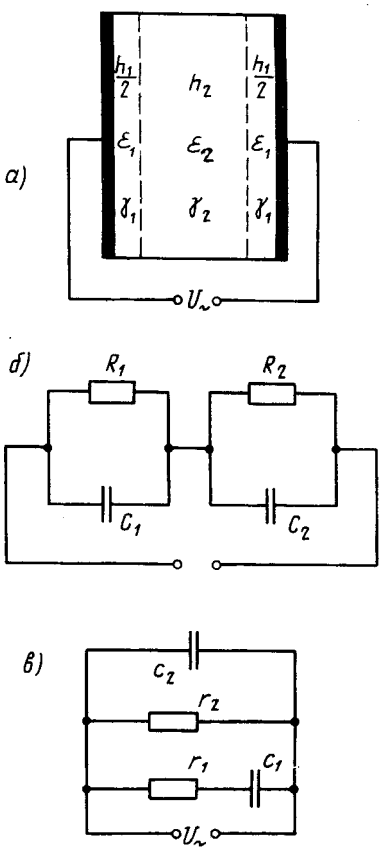


Рис. 2. Модель трехслойного (двухкомпонентного) диэлектрика (*а*) и эквивалентные ей схемы Максвелла (*б*) и Фойгта (*в*)

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

№ образца	Параметры схемы Фойгта				Параметры схемы Максвелла				Параметры двухкомпонентной модели диэлектрика		
	r_1, Ом	r_2, Ом	c_1, пФ	c_2, пФ	R_1, Ом	R_2, Ом	C_1, пФ	C_2, пФ	γ_1, См/м	γ_2, См/м	h_1, мкм
1	$3\cdot10^{11}$	$3\cdot10^{14}$	0,7	6,0	$3{,}3\cdot10^{9}$	$3\cdot10^{14}$	57,3	6,7	$1{,}4\cdot10^{-10}$	$1{,}3\cdot10^{-14}$	2,3
2	$2\cdot10^{11}$	10^{14}	1,0	6,0	$4{,}1\cdot10^{9}$	10^{14}	41,7	7,0	$1{,}55\cdot10^{-10}$	$3{,}8\cdot10^{-14}$	3,2

$$= \left[\frac{R_1}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{R_2}{1 + i\omega\tau_2}\right]^{-1} = \frac{(1 + i\omega\tau_1)(1 + i\omega\tau_2)}{(R_1 + R_2)(1 + i\omega v_1)}, \qquad (3)$$

где введено обозначение $v_1 = \dfrac{\tau_1 R_2 + \tau_2 R_1}{R_1 + R_2}$.

Для схемы Фойгта имеем

$$\dot{Y}(\omega) = \frac{1}{R_x(\omega)} + i\omega C_x(\omega) = \frac{1}{r_2} + i\omega c_2 + \frac{i\omega C_1}{1 + i\omega v_1} = \frac{(1 + i\omega v_1)(1 + i\omega v_2) + i\omega c_1 r_2}{r_2(1 + i\omega v_1)}. \qquad (4)$$

Сравнивая (3 и 4), получаем условия идентичности частотных характеристик двух эквивалентных схем:

$$\left.\begin{aligned} &v_1 = \frac{\tau_1 R_2 + \tau_2 R_1}{R_1 + R_2};\ v_1 v_2 = \tau_1\tau_2; \\ &r_2 = R_1 + R_2;\ v_1 + v_2 + c_1 r_2 = \tau_1 + \tau_2. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Из (4) получаем расчетные выражения для $R_x(\omega)$ и $C_x(\omega)$:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1}{R_x(\omega)} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1}\frac{\omega^2 v_1^2}{1 + \omega^2 v_1^2}; \\ &C_x(\omega) = c_2 + \frac{c_1}{1 + \omega^2 v_1^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Параметры модели можно определить при сравнении низкочастотного ($\omega \to 0$) и высокочастотного ($\omega \to \infty$) пределов (6) с экспериментальными данными:

$$\left.\begin{aligned} &\text{при } \omega \to 0 \quad R_x^0 = r_2;\ C_x^0 = c_1 + c_2; \\ &\text{при } \omega \to \infty \quad R_x^\infty = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2};\ C_x^\infty = c_2. \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Оценив параметры модели с помощью (7) и проведя вычисления по (6), получим расчетные кривые, которые, как видно из рис. 1, достаточно близки к экспериментальным. Можно отметить только, что на опыте наблюдается несколько более пологая зависимость $C_x(\omega)$, $R_x(\omega)$, чем расчетные кривые. Это может быть связано с плавным изменением удельной проводимости $\gamma(x)$ по толщине образца [2]. Таким образом, двухкомпонентная (трехслойная) модель диэлектрика является первым приближением, но дающим достаточно удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментально полученными зависимостями $C_x(\omega)$, $R_x(\omega)$.

В таблице приведены параметры модели Фойгта, рассчитанные по ним с помощью (5) параметры идентичной ей модели Максвелла и значения характеристик приповерхностных и внутреннего слоев полимерной пленки при допущении, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = 3{,}2$ (для (ПЭТФ). Видно, что параметры двухкомпонентной (трехслойной) модели соответствуют предположению о повышенной проводимости γ_1 приповерхностных слоев пленки, суммарная толщина которых h_1 составляет 0,1–0,15 от толщины пленки $h = 22$ мкм. Значение γ_1 превышает γ_2 в 10^4 раз.

Выводы. 1. Изучение частотных зависимостей $C_x(\omega)$ и $R_x(\omega)$ полимерной пленки ПЭТФ в диапазоне низких и инфранизких частот подтверждает полученный другими способами [1, 2] вывод о повышенной проводимости приповерхностных слоев пленки γ_1 по сравнению с проводимостью объема γ_2.

2. Толщина слоев с повышенной проводимостью на различных участках исследованного образца пленки может варьироваться в пределах от 2,3 до 3,2 мкм (при суммарной толщине пленки ПЭТФ $h = 22$ мкм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисова М. Э., Койков С. Н.** Электретный эффект в диэлектриках.— Изв. вузов. Физика, 1979, № 1.

2. **Электрические** свойства полимеров / М. Э. Борисова, С. Н. Койков, А. М. Лобанов, О. С. Романовская, Б. И. Сажин, В. П. Шуваев; Под ред. Б. И. Сажина. 3-е изд., перераб.— Л.: Химия, 1986.— 224 с.

3. **Галлай И. Я., Борисова М. Э.** Измерение емкостного сопротивления изоляции и тангенса угла потерь на инфранизких частотах.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и компоненты, 1990, вып. 4(81).

4. **Расчет** эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов / Б. П. Беленький, П. Н. Бондаренко, М. Э. Борисова и др.— М.: Радио и Связь, 1988.

[23.04.92]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

К расчету линейных цепей при полигармонических токах

ЗИНИН М. М., канд. техн. наук

Уфа

При расчете линейных цепей с полигармоническими токами и напряжениями методом комплексных амплитуд имеются трудности при записи выражений с комплексными амплитудами, соответствующими разным частотам [1]. Для устранения данных трудностей введем разновидность гиперкомплексных чисел [2]. Обозначим число

$$F\supset = \dot{F}_1 i_1 + \dot{F}_2 i_2 + \ldots + \dot{F}_k i_k + \ldots + \dot{F}_n i_n,$$

где $\dot{F}_k$ — комплексное число; i_k — символ; $F\supset$ — вводимое число.

Сложение и вычитание определяются следующим образом:

$$F\supset \pm H\supset = (\dot{F}_1 \pm \dot{H}_1)i_1 + (\dot{F}_2 \pm \dot{H}_2)i_2 + \ldots + (\dot{F}_n \pm \dot{H}_n)i_n.$$

Умножение

$$F\supset \times H\supset = \dot{F}_1\dot{H}_1 i_1 + \dot{F}_2\dot{H}_2 i_2 + \ldots + \dot{F}_n\dot{H}_n i_n,$$

по определению $i_l i_m = 0$, $l \neq m$, $i_k i_k = i_k$.

Деление

$$\frac{F\supset}{H\supset} = \frac{\dot{F}_1}{\dot{H}_1} i_1 + \frac{\dot{F}_2}{\dot{H}_2} i_2 + \ldots + \frac{\dot{F}_n}{\dot{H}_n} i_n.$$

Используя введенные числа, можно записать закон Ома для полигармонического случая:

$$Z\supset = \frac{U\supset}{I\supset} = \underline{Z}_1 i_1 + \underline{Z}_2 i_2 + \ldots + \underline{Z}_k i_k + \ldots + \underline{Z}_n i_n,$$

где $\underline{Z}_k$ — комплексное сопротивление на k-й частоте.

Законы Кирхгофа записываются так:

$$\sum_{k=1}^{n} I\supset_k = 0;$$

$$\sum_{j=1}^{m} U\supset_j = \sum_{j=1}^{m} E\supset_j.$$

Обозначения не расшифровываются вследствие очевидности.

Таким образом, с помощью предложенных чисел можно записать известные соотношения линейных цепей для полигармонического случая.

Многомерные векторно-топографические диаграммы являются естественным обобщением векторно-топографических диаграмм в двухмерном случае. Считаем, что векторно-топографические диаграммы, построенные для гармоник каждой частоты, являются проекциями многомерной векторно-топографической диаграммы. Тогда многомерная векторно-топографическая диаграмма является многогранником в $2n$-мерном пространстве, где n — число гармоник тока или напряжения двухполюсника линейной цепи.

Графическое изображение многомерного многогранника возможно не только с помощью использования плоскостей проекций [3], но и на аксонометрическом чертеже [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники, т. 1.— М.—Л.: Энергия, 1966, с. 282—285.

2. **Кантор И. Л., Солодовников А. С.** Гиперкомплексные числа.— М.: Наука, 1973.— 143 с.

3. **Куликов С. М.** Введение в начертательную геометрию многомерных пространств.— М.: Машиностроение, 1970.— 82 с.

4. **Первикова В. Н.** Основы многомерной начертательной геометрии.— М.: МЭИ, 1976, с. 25—31.

[08.10.92]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

О стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях

(Статья Ю. С. Железко, "Электричество", 1992, № 5)

ЗЕЛЬЦБУРГ Л. М.

В обсуждаемой статье приведен весьма важный и подробный анализ различных мероприятий по снижению потерь электроэнергии и повышению ее качества. Однако, если компенсация реактивной мощности, как правило, является целесообразной, то повсеместное снижение плотности тока, которое рекомендует Ю. С. Железко, нуждается в дополнительном анализе и уточнении.

Прошедшие дискуссии на страницах журналов "Электричество" и "Промышленная энергетика" показали, что действующая методика определения экономической плотности тока нуждается в пересмотре.

Как показано в [1], основная погрешность теоретической части действующей методики состоит в том, что она разработана без определения экономически оптимальных токов нагрузки стандартных проводников, которые в технико-экономических расчетах должны являться основными паспортными показателями. Это связано с необходимостью учета ограниченных материальных ресурсов, что подтверждается в [2–4].

Учитывая вышеизложенное, в [1] было установлено, что экономически оптимальная нагрузка *Ю* стандартного проводника с сечением *q*ё может быть определена по выражению

$$Ю = \sqrt{q ё K у.ё / B}, \qquad (1)$$

где $K_{г.с} = pK_с$ — годовые затраты линии длиной 1 км с сечением проводника $q_с$; $K_с$ — единовременные капитальные затраты; p — суммарный коэффициент годовых отчислений; B — удельная стоимость передачи электроэнергии при токе 1 А, сечении 1 мм² и длине линии 1 км, равная $B = 3\rho\tau Ц_{у.э}$; ρ — удельное сопротивление материала проводника; τ — годовое время использования максимума потерь; $Ц_{у.э}$ — цена 2 кВт·ч электроэнергии.

Оптимальному току $I_о$ соответствует экономически оптимальная плотность тока $j_о$, определяемая выражением

$$j_о = \frac{I_з}{q_о} = \sqrt{\frac{K_г}{Bq_о}} = \frac{K_г}{BI_з}, \qquad (2)$$

где $I_з$ — задаваемый ток нагрузки, определяемый с учетом компенсации реактивной мощности (КРМ) по формуле

$$I_з = \frac{P}{\sqrt{3}\,U}\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\varphi_к};$$

P — реактивная мощность нагрузки потребителя; U — напряжение сети; $\mathrm{tg}\,\varphi_к$ — коэффициент реактивной компенсирующей мощности; $K_г$ — годовые капитальные затраты; $q_о$ — оптимальное сечение.

Если учесть рекомендацию Ю. С. Железко и принять $\mathrm{tg}\,\varphi_к \approx 0{,}6$, то $I_з \approx 0{,}68\,\frac{P}{U}$.

Из формулы (2) видно, что оптимальная плотность тока (ОПТ) зависит не только от времени максимума потерь τ, но также от сечения проводника, тока нагрузки, капитальных затрат на линию и стоимости электроэнергии. Как известно, экономическая плотность тока по действующей методике от этих параметров не зависит, что является ее существенным недостатком.

В связи с относительно небольшими капитальными затратами на линии потребителей 0,4 и 10 кВ экономическая ОПТ оказывается ниже нормированных значений (1,2–1,4–1,6 А/мм²), что совпадает с рекомендациями Ю. С. Железко снижать плотность тока.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Что касается высоковольтных линий электропередачи 35—110 кВ, то вследствие относительно высоких капитальных затрат ОПТ в большинстве случаев оказывается больше нормируемых значений (1 ÷ 1,3 А/мм² для ВЛ и 1,2—1,6 А/мм для кабельных линий, что вызовет некоторое увеличение потерь электроэнергии, но зато обеспечит существенную экономию ресурса цветных металлов. Это создает благоприятную почву для отказа от дополнительных ресурсов цветных металлов путем соответствующего перераспределения алюминия и меди, выделяемых для линий электропередачи.

Согласно ПУЭ провода и кабели низковольтных сетей с годовым числом часов использования $T_{и}$ не более 5000 ч по экономической плотности тока не выбираются. На практике все низковольтные проводники выбираются по условиям нагрева. Это вызывает снижение напряжения у низковольтных электроприемников и, как следствие, снижение их производительности.

Расчеты показали, что увеличение сечений проводников до значений, определяемых по ОПТ, оказывается весьма эффективным. Если определять экономический эффект по Методическим рекомендациям [5], а экономическую эффективность как отношение эффекта к затратам $З$, т. е. $Э_{ж} = \frac{Э}{З} = \frac{Ц - З}{З}$ (где $Ц$ — цена электропередачи), то результаты будут следующие.

Для алюминиевых кабелей ААШвУ напряжение 1 кВ при выборе их по ОПТ по сравнению с выбором их по нагреву эффективность равна 1,5 ÷ 20 [1] в зависимости от различных факторов (нагрузки, капитальных затрат, стоимости электроэнергии и режима работы линии). Таким образом, эффективность снижения плотности тока для низковольтных сетей может оказаться соизмеримой с эффективностью КРМ. Что касается высоковольтных сетей, то здесь экономическая эффективность при увеличении плотности тока по сравнению с нормированными значениями составляет 1,5 ÷ 2,5.

Указанные значения эффективности могут быть скорректированы в зависимости от соотношения капитальных затрат и стоимости электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зельцбург Л. М.** Экономическая плотность тока.— Н. Новгород: ЦНТИ, 1990.

2. **Зейлигер А. И., Кузнецова О. Н., Файбисович Д. Д.** Учет ограниченных ресурсов цветного металла при технико-экономических обоснованиях электрических сетей.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1983, № 3.

3. **Дульзон Н. А., Кудрин Б. И.** Выбор сечений проводов по экономическим соображениям.— Электричество, 1988, № 7.

4. **Медников Е. И.** Экономические вопросы применения проводников в системах электроснабжения промышленных предприятий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1979.

5. **Методические** рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение НТП.— Бюллетень нормативных актов министерств и ведомств СССР, 1988, № 7.

Уважаемые авторы!

В текущем году редакция предполагает публиковать при каждой статье очень краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщать следующие сведения:

1. Год рождения

2. Какой факультет, какого вуза и когда закончил

3. Когда получил ученую степень, где и по какой тематике была защита

4. Место настоящей работы и должность

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ХРОНИКА

Уважаемые читатели!

В соответствии с решением XI Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу (Суздаль, 1991 г.) создана и зарегистрирована Министерством юстиции Российской Федерации межрегиональная Ассоциация "Автоматизированный электропривод" (удостоверение № 1116, выданное 24 июля 1992 г.).

Основная цель деятельности Ассоциации, являющейся общественной и бесприбыльной организацией, состоит в объединении и координации усилий специалистов для содействия научно-техническому прогрессу в области разработки, исследования, производства и эксплуатации электроприводов и их компонентов.

Для достижения этой цели Ассоциация планирует создание информационного банка, подготовку и распространение тематических обзоров по актуальным вопросам электропривода, организацию конференций, выставок и семинаров с привлечением зарубежных специалистов, организаций и фирм, оказание консультативных услуг, выполнение сертификационных исследований, участие в подготовке и переподготовке специалистов, рецензирование издаваемых монографий и учебников и т. д. Ассоциация планирует также, войдя в число учредителей журнала "Электротехника", регулярно освещать все аспекты своей деятельности на страницах журнала.

Коллективные и индивидуальные члены Ассоциации будут иметь приоритеты в указанных сферах ее деятельности, а также пользоваться финансовыми льготами. Для решения конкретных задач, отвечающих целям Ассоциации, при ней могут создаваться предприятия различных организационно-правовых форм и временные коллективы специалистов.

Деятельность Ассоциации будет осуществляться через ее отделения, создаваемые во всех регионах Российской Федерации. Предложения о создании филиалов Ассоциации направлены также в государства, входящие в состав СНГ.

Понимая, что успех деятельности Ассоциации целиком и полностью определяется инициативой ее членов и эффективным использованием их творческого потенциала, правление Ассоциации выражает надежду на ваше, уважаемые читатели, активное и широкое участие в ее деятельности и приглашает к такому сотрудничеству.

Президентом Ассоциации избран Юньков М. Г.; вице-президентами — Богачев Ю. П., Москаленко В. В., Рассудов Л. Н.; ответственным секретарем — Шинянский А. В.

Адрес Правления Ассоциации: 107078 Москва, Садовая Спасская ул., д. 1/2, кор. 2. Телефоны в Москве — 208-29-02 (ВНИИЭП), 362-75-41 (МЭИ), в Санкт-Петербурге — 234-89-64 (ДЭТИ).

Расчетный счет Ассоциации 1345670 в Электроприводбанке, кор. счет 161418 в РКЦ ГУ ЦБ РФ г. Москвы, МФО 201791

Правление Ассоциации

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Ассоциация инженеров силовой электроники

Влияние достижений современной силовой электроники на уровень промышленного развития общества в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений. Но не многие, даже из профессиональных инженеров, заметили качественный скачок в ее развитии, произошедший в середине 80-х годов. Традиционно достижения электроники ассоциировались с появлением новых поколений радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной техники и других средств передачи и обработки информации. При этом в тени оставалась существенная ветвь электронной техники, связанная с управлением потоками электрической энергии — силовая электроника.

Основной причиной такой "дискриминации" силовой электроники в общественном сознании являлось ограниченное внедрение в практическую сферу первых поколений силовых полупроводниковых приборов, обусловленное главным образом относительно низким уровнем их технических характеристик. Однако интенсивное развитие электронных технологий привело к созданию нового поколения силовых полупроводниковых приборов (мощных полевых транзисторов, запираемых тиристоров и др.), отличающихся высокой коммутационной способностью, полной управляемостью с помощью маломощных сигналов и быстродействием. Последний фактор позволил вывести уровень рабочих частот многих типов силовых приборов за звуковой диапазон и тем самым существенно улучшить масс-габаритные показатели силовых электронных устройств. Большие возможности новых технологий в области интеграции и гибридизации электронных компонентов были использованы для создания новых видов электронных устройств, объединяющих в единых модулях силовые и микроэлектронные элементы. Такие модули обладают более широкими функциональными возможностями и, следовательно, лучшими потребительскими свойствами. Все эти достижения стали базой революционных изменений в силовой электронике.

Синтез силовой электроники и электромеханики вывел на новую качественную ступень развития практически всю область электропривода, разрабатываемого и изготавливаемого в настоящее время ведущими электротехническими зарубежными фирмами. Обеспечение быстродействующей защиты электрических цепей, широкие возможности регулирования и преобразования параметров электрической энергии с текущим контролем и диагностикой технического состояния электронных устройств стали возможными на основе так называемых "интеллектуальных" или "разумных" схем, объединяющих как исполнительные силовые, так и управляющие микроэлектронные элементы в единых модулях, обычно рассчитанных на сопряжение с микропроцессорной техникой. В условиях обостряющихся экологических проблем особенно следует отметить большие возможности современной силовой электроники в обеспечении высокого качества электроэнергии (компенсации реактивной мощности, улучшении спектрального состава токов и напряжений и др.). Становится реальностью к концу этого века существенно расширить применение силовой электроники в электроэнергетических системах большой мощности, включая линии передач постоянным током.

За рубежом развитию силовой электроники в последние годы уделяют большое внимание. Особенно следует отметить успехи в этой области, достигнутые Японией. В нашей стране на начальных этапах становления силовой электроники также были значительные достижения, в частности, по созданию серии силовых тиристоров. В дальнейшем, особенно за последнее десятилетие, многие достигнутые позиции утеряны в силу ряда объективных причин. Разумная целенаправленная конверсионная политика в электронных отраслях российской промышленности и концентрация усилий ведущих специалистов этой области могут дать реальный шанс выхода отечественной силовой электроники на мировой уровень. Для достижения этих целей необходимы тесные контакты специалистов. Имевшиеся в прошлом межведомственные барьеры мешали этому. Распад СССР и ликвидация отраслевых министерств, с одной стороны, усложнили возможности общения специалистов, а с другой, создали условия для их неформального объединения.

В целях создания благоприятных условий для творческой активизации ученых, инженерно-технических работников и специалистов в области силовой электроники и смежных научно-технических направлений в марте 1992 г. в Москве создана Ассоциация инженеров силовой электроники (АИСЭ), которая является самоуправляемым общественным объединением. Президентом АИСЭ избран д. т. н. Ф. И. Ковалев. Для повышения профессионального уровня специалистов и развития силовой электроники Ассоциация:

организует информационную помощь членам АИСЭ, а также заинтересованным предприяти-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ям, промышленникам и предпринимателям;

способствует публикации научных трудов членов АИСЭ;

организует проведение семинаров, симпозиумов и конференций;

способствует установлению связей членов АИСЭ с зарубежными организациями и специалистами;

разрабатывает рекомендации, программы, проекты, информационные аналитические и справочные материалы по состоянию и перспективам развития силовой электроники, а также оказывает посреднические услуги в приобретении справочников и каталогов, издаваемых государственными и частными издательствами;

оказывает помощь в повышении квалификации специалистов и подготовке кадров, а также рекламе;

делегирует своих представителей в различные экспертные и проблемные советы по силовой электронике.

Ассоциация ставит своей целью сохранить и развить деловые связи и обеспечить контакты специалистов бывшего СССР. Уже сейчас среди ее членов видные специалисты России, Украины, Эстонии, Латвии, и др.

Желающие могут получить более подробную информацию о деятельности АИСЭ и условиях вступления в нее по адресу: Москва 105023, Электрозаводская ул., д. 21, АИСЭ. Телефон — (095) 963-18-15. Исполнительный директор АИСЭ к. т. н. В. А. Клейменов.

член правления АИСЭ,
проф., д. т. н. Ю. К. Розанов

Владимир Петрович Ларионов

(К 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники России, доктора технических наук, профессора Владимира Петровича Ларионова.

Научно-педагогическая деятельность В. П. Ларионова началась в Московском энергетическом институте в 1946 г. после окончания им электроэнергетического факультета этого института. В. П. Ларионов прошел путь от ассистента до профессора кафедры техники и электрофизики высоких напряжений, стал одним из ведущих специалистов страны, крупным ученым и педагогом.

В 1949—1957 гг. В. П. Ларионов работал во Всесоюзном электротехническом институте, где проводил исследования электрического разряда в длинных воздушных промежутках. Существенно новые данные о характеристиках основных стадий разряда, полученные

В. П. Ларионовым, внесли значительные изменения в представления о развитии разряда и стимулировали исследования в этой области в других организациях. Технические решения по молниезащите первых высотных зданий Москвы, разработанные при активном участии В. П. Ларионова, были реализованы при их строительстве и используются до настоящего времени.

В 1957 г. В. П. Ларионов был избран на должность доцента кафедры техники высоких напряжений МЭИ. В течение ряда лет работал заместителем заведующего кафедрой по научной работе, а в 1972—1988 гг. заведовал кафедрой. В эти же годы он руководил научно-методической комиссией по технике высоких напряжений Научно-методического Совета Минвуза СССР. Под руководством В. П. Ларионова проделана большая работа по созданию учебных планов и программ преподаваемых дисциплин, в значительной мере определившая содержание и уровень подготовки специалистов по технике высоких напряжений.

Он является одним из авторов учебника по технике высоких напряжений для вузов, третье издание которого вышло под

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

его общей редакцией в 1986 г., одним из авторов и титульным редактором учебника по ТВН для техникумов, автором и соавтором ряда учебных пособий, в том числе двух изданий пособия по лабораторным работам, выпущенных Энергоатомиздатом. По этим учебникам и пособиям учатся практически все студенты электроэнергетических и электротехнических специальностей.

Профессор В. П. Ларионов обосновал и развил новые научно-технические направления по применению высоких напряжений в устройствах радиосвязи и по молниезащите летательных аппаратов. Под его руководством и при его непосредственном участии были выполнены фундаментальные исследования коронного разряда при высоких частотах напряжения и электрической прочности высокочастотной изоляции для установок высокого напряжения. Результаты этих исследований обобщены им и его сотрудниками в монографии "Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты" и послужили основой для создания образцов новой техники.

В 60-х годах В. П. Ларионовым впервые у нас в стране начаты систематические исследования и разработки молниезащитных устройств летательных аппаратов. По его инициативе в 1977 г. в МЭИ на базе кафедры ТВН была организована лаборатория молниезащиты летательных аппаратов; В. П. Ларионов был назначен ее научным руководителем. Лаборатория внесла значительный вклад в повышение надежности и всепогодности авиационной техники, дала значительный технический и экономический эффект. На основе разработок лаборатории созданы ведомственные нормативные документы и рабочая документация конструкторов.

В последние годы научные интересы В. П. Ларионова лежат в сфере электромагнитного влияния молнии на бортовые системы летательных аппаратов, электромагнитной совместимости и стойкости. Им опубликовано более 150 научных и учебно-методических работ, получено 14 авторских свидетельств на изобретения. Под его руководством аспирантами и соискателями защищено 20 диссертаций.

Владимир Петрович постоянно ведет активную общественно-научную работу. Он является заместителем председателя Научного Совета по проблеме "Электромагнитная совместимость и стойкость радиоэлектронного, электронного и электротехнического оборудования" при Миннауки Российской Федерации, заместителем председателя научно-методической комиссии по технике высоких напряжений Учебно-методического объединения, членом редколлегии журналов "Электричество" и "Известия вузов. Энергетика", членом специализированных советов при МЭИ, ВЭИ и СПГТУ.

Плодотворная научно-педагогическая деятельность профессора В. П. Ларионова отмечена государственными наградами, ему присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации.

Преподаватели и сотрудники кафедры ТЭВН МЭИ, редакция и редколлегия журнала "Электричество"

В Московском Доме ученых

Здесь в конце октября собрались друзья, соратники и ученики известного российского физика, основоположника квантовой электроники Валентина Александровича Фабриканта, которому сейчас исполнилось бы 85 лет.

Любимый ученик С. И. Вавилова и Г. С. Ландсберга, он прожил большую жизнь, заполненную научной и преподавательской деятельностью, общественно-популяризаторской работой.

На вечере выступали люди, долгие годы работавшие рядом с В. А. Фабрикантом (Г. Н. Рохлин, А. В. Нетушил). От лица многочисленных учеников В. А. Фабриканта говорили Б. А. Векленко, А. Т. Глазунов, Б. С. Ринкевичюс.

Были зачитаны очень теплые воспоминания Б. М. Яворского. Необыкновенно емкую и точную характеристику В. А. Фабриканта как ученого и человека дал Л. М. Биберман.

В. А. Фабрикант уделял серьезное внимание методическим проблемам преподавания физики в школе, чему было посвящено выступление В. Г. Разумовского.

Валентин Александрович был всесторонне образованным человеком, увлекавшимся поэзией, живописью, музыкой. На вечере прозвучали стихи Хафиза, Шекспира, Верлена, Заболоцкого, Табидзе (в переводе Пастернака) и вокальные произведения Шуберта, Моцарта, Бетховена.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Леонид Михайлович Паластин

Скончался Леонид Михайлович Паластин, крупный ученый в области электромашиностроения, профессор, доктор технических наук, заслуженный изобретатель РФ.

Трудовая деятельность Л. М. Паластина началась на Харьковском электромеханическом заводе после окончания им в 1940 г. Харьковского электротехнического института.

Не прошло и года после окончания института, как началась Великая Отечественная война, и молодой специалист ушел на фронт. После окончания войны и демобилизации в 1946 г. Л. М. Паластин работал в Министерстве угольной промышленности. С 1950 г. научная и производственная деятельность Л. М. Паластина связана с Всероссийским научно-исследовательским институтом электромеханики (ВНИИЭМ). В 1954 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему "Теоретические и экспериментальные исследования однофазных синхронных генераторов для передвижных бензоэлектрических агрегатов".

Теоретические исследования и практическая деятельность Л. М. Паластина всегда были направлены на решение важных народнохозяйственных задач. Он внес большой вклад в теорию и практику создания однофазных и трехфазных синхронных генераторов для передвижных бензоэлектрических агрегатов, методов расчета и экспериментального исследования новых типов электрических машин.

Под руководством Л. М. Паластина выполнена серия разработок регулируемых машин постоянного и переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Каждая из этих разработок имеет большое народнохозяйственное значение.

В 1968 г. Л. М. Паластин защитил докторскую диссертацию на тему "Создание новых типов, разработка и внедрение в народное хозяйство различных типов электромашинных источников тока". Эта диссертация не только подвела итог определенному этапу его научной деятельности, но и явилась своего рода программой на будущее, в которой были поставлены новые большие задачи по созданию электрических источников питания. В этом же году Л. М. Паластину было присвоено звание заслуженного изобретателя РФ.

Большой известностью пользуются книги по электромашиностроению, написанные Л. М. Паластиным, которые отличаются широтой охвата и глубиной проработки рассматриваемых вопросов.

Он является автором более 50 научных статей и монографий, а также автором более 50 изобретений. Участие в Великой Отечественной войне, научная и трудовая деятельность Л. М. Паластина получили достойную оценку Родины. Он награжден орденами "Отечественной войны", "Трудового Красного Знамени", "Знак Почета" и медалями.

За большой вклад в развитие космической техники ему вручены медали имени С. П. Королева, имени Э. К. Циолковского, имени Ю. А. Гагарина.

Светлый образ Леонида Михайловича Паластина, замечательного человека и блестящего ученого, навсегда сохранится в сердцах его соратников по работе и друзей.

Группа товарищей

Поправка

В журнале "Электричество" № 5, 1992 г. допущена досадная опечатка.

Автором статьи "Расчет магнитной системы магнитожидкостного герметизатора" (с. 36–41) помимо указанных Орлова Д. В. и Перминова С. М. следует также считать канд. техн. наук Страдомского Ю. И.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Руденко Ю. Н., Семенов В. А. Координация и конкуренция в управлении энергообъединениями 1

Астахов Ю. Н., Зубанов К. К., Кавченков В. П., Пашенкова Т. Е. Использование методов теории подобия в прогнозировании выработки электроэнергии 13

Джюрич М. Б., Шкоклев И. А., Терзия В. В., Ристич М. Проблемы устойчивости многоагрегатной гидроэлектростанции "Джердап 2" 21

Булгаков А. А. Обобщенная модель вентильных преобразователей 25

Абрамкин Ю. В. Определение объемной плотности электромагнитных сил в нелинейной системе энергетическим методом 32

Вишневский А. М. Определение электрических и магнитных мультипольных моментов по результатам измерений на замкнутых поверхностях 50

Ермуратский П. В., Нетушил А. В. Энергетические процессы в цепях с электрической дугой 52

Капаев В. И., Маряшев В. И. Синтез программ определения места пониженного сопротивления изоляции в автономной системе электроснабжения транспортного средства 57

Тер-Акопов А. К. Об обозначениях элементов схем замещения 64

Борисова М. Э., Галлай И. Я., Койков С. Н. Низкочастотная дисперсия емкости образцов пленок полиэтилентерефталата 69

ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА 72

ДИСКУССИИ 73

ХРОНИКА 75

CONTENTS

Rudenko Yu. N., Semenov V. A.– Coordination and Competition in the Management of Power Pools 1

Astakhov Yu. N., Zubanov K. K., Kavchenkov V. P., Pashenkova T. E. Application of Methods of Similarity Theory in Forecasting Electricity Generation 13

Dzhyurich M. B., Shkoklev I. A., Terziya V. V., Ristich M.– Stability Problems of the Multi-Unit Hydro-Electric Power Station "Gerdap 2" 21

Bulgakov A. A.– A Generalized Model for Electronic Converters 25

Abramkin Yu. V.– Determining the Volume Density of Electromagnetic Forces in a Nonlinear System By an Energy Method 32

Vishnevsky A. M.– Determining Electric and Magnetic Multipole Moments From the Results of Measurements on Closed Surfaces 50

Ermuratsky P. V., Netushill A. V.– Energy Processes in Circuits With Electric Arcs 52

Kapaev V. I., Maryashev V. I.– Synthesis of Programs for Finding the Spot of Low Insulation Resistence in a Self-Contained Electric Power Sypply System for Transport Facilities 57

Ter-Akopov A. K.– On the Notation for Elements in Equivalent Circuits 64

Borisova M. E., Gallai I. Ya., Koikov S. N.– The Low-Frequency Dispersion of the Capacitance of Samples of Polyethyleneterephthalate Film 69

NOTES AND LETTERS 72

DISCUSSION 73

CHRONICLE 75

Художественный редактор **Т. А. Дворецкова** Технический редактор **Г. В. Преображенская**
Корректор **Н. И. Курдюкова**

Сдано в набор 15.01.93. Подписано в печать 12.02.93. Формат 60×88 $^1/_8$. Бумага офсетная № 2.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,8. Усл. кр.-отт. 10,28. Уч.-изд. л. 9,47. Тираж 1050 экз. Заказ 208

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Набрано на ордена Трудового Красного Знамени Чеховском полиграфическом комбинате
Министерства печати и информации Российской Федерации. 142300, г. Чехов Московской области.
Отпечатано в Подольском филиале, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 25

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Индекс 71106

Глобальная Коммерческая Телеинформационная Сеть

СИТЕК — КОМПЛЕКСНАЯ ПОДДЕРЖКА ВАШЕГО БИЗНЕСА

- КОНЪЮНКТУРА РЫНКА: валютные курсы, биржевые цены, прогнозы, аналитическая информация
- ТелеБАЗАР - торговля без посредников, тысячи прямых коммерческих предложений
- БАЗЫ ДАННЫХ: "Продажа недвижимости", "Производители и потребители", "Зарубежный партнер", "Банки", "Биржи"
- РЕКЛАМА Ваших товаров и услуг
- ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗДАНИЯ: экономика, финансы, право, менеджмент, маркетинг
- КОММУНИКАЦИИ: электронная почта, факсимильная, телексная, телеграфная связь
- ЭЛЕКТРОННЫЙ РАСЧЕТНЫЙ ЦЕНТР
- СЛУЖБЫ БЕЗОПАСНОСТИ: электронная подпись, криптозащита

Став абонентом СИТЕК, Вы сможете делать свой бизнес не выходя из офиса или квартиры, используя лишь ПЭВМ, модем и телефон

Вы не работали в сетях? Вам помогут курсы "СИТЕК от А до Я" в учебно-научном центре "МГТУ-МАСТАК"

СИТЕК - ЭТО ДВУХЛЕТНИЙ ОПЫТ В БИЗНЕСЕ, ЛИЦЕНЗИЯ МИНСВЯЗИ РОССИИ, ТЫСЯЧИ АБОНЕНТОВ, СОТНИ ГОРОДОВ

ПРИГЛАШАЕМ АГЕНТОВ, ДИЛЕРОВ, ДИСТРИБУТОРОВ ДЛЯ ВЗАИМОВЫГОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА И ОТКРЫТИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВ

МАСТАК

Научно-производственная фирма «МАСТАК»
111020, Москва, а/я 100
Тел.: (095) 360-8638, 360-8527, 360-6909
Факс: (095) 360-7874
Эл. почта: secret@mastak.msk.su

Запрашивайте бюллетень услуг СИТЕК — высылаем немедленно и бесплатно

ISSN 0013-5380. Электричество. 1993. № 3. 1–80.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru