

ISSN 0013-5380



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1991

•ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ•

8

ИЗДАЕТСЯ
С ИЮЛЯ
1880 ГОДА

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8
АВГУСТ
1991

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
ЭНЕРГЕТИКОВ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Научный подвиг Майкла Фарадея

(К 200-летию со дня рождения)

ШНЕЙБЕРГ Я. А., канд. техн. наук

Московский энергетический институт

*Великие люди сами сооружают себе пьедестал:
статую воздвигнет будущее.*

Виктор Гюго

Более полувека назад, в 1938 г., в архивах Лондонского Королевского общества был найден пакет, содержание которого вызвало огромный интерес не только ученых-физиков, но и широчайших кругов научной общественности. В пакете было запечатано письмо М. Фарадея, датированное 12 марта 1832 г., в котором было написано: «Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в запечатанном конверте в Архиве Королевского общества».

Фарадей в частности, писал:

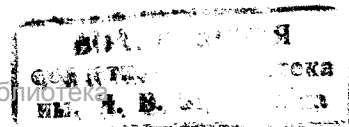
«...Результаты исследований привели меня к заключению, что на **распространение магнитного воздействия требуется время**, которое окажется весьма **незначительным**. Я полагаю, что электрическая индукция распространяется точно таким же образом... Я полагаю, что распространение магнитных сил **похоже** на колебания взволнованной водной поверхности... Я намерен применить теорию колебаний к магнитным явлениям, как это сделано по отношению к звуку и является наиболее **вероятным** описанием **световых** явлений. По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции. Это воззрение я хочу проверить экспериментально (т. к. я занят), я хочу, передавая это письмо на хранение Королевскому обществу, закрепить открытие за собой определенной датой и... иметь право в случае экспериментального подтверждения объявить эту дату датой моего открытия. В настоящее время, насколько мне из-

вестно, никто из ученых, кроме меня, не имеет подобных взглядов. Фарадей, 12.III.1832 г.»

В марте 1832 г., когда Фарадей в своем письме предвосхищает важнейшие выводы теории Максвелла о волновом характере распространения магнитного поля, будущему основоположнику этой теории выдающемуся английскому физiku Джемсу Клерку Максвеллу (1831—1879) не исполнилось и одного года от роду.

Научное предвидение и прозорливость Фарадея поистине поразительны: ведь от его воззрений на процесс «магнитных колебаний» остается один шаг к знаменитой максвелловой электромагнитной теории света, его теории электромагнитного поля, открывших новую эпоху в развитии не только электромагнетизма, но и всей современной физики.

Обратим внимание на то, что в этом письме Фарадей утверждает, что «**распространение магнитных сил похоже на колебания взволнованной водной поверхности**» (курсив наш Я. Ш.). Никто до него не сумел найти столь простой и осязаемый образ сложного электромагнитного явления. И до наших дней еще на школьной скамье мы впервые узнаем о магнитных силовых линиях — упругих и одновременно эластичных, которые впервые «увидел» Фарадей и придал им физическую реальность. Не случайно начало разработки оригинальной модели электромагнитного поля было положено Д. К. Максвеллом в 1855 г. в его работе с характерным названием «О Фарадеевых силовых линиях».





Выдающиеся научные исследования Фарадея в области электромагнетизма и в первую очередь открытие им явления электромагнитной индукции сыграли **основополагающую роль** в зарождении и последующем бурном развитии новых отраслей техники: электротехники, электромашиностроения, радиотехники.

Жизненный путь Майкла Фарадея — замечательный пример удивительной жажды знания, трудолюбия, неутомимой настойчивости в преодолении трудностей — неизбежных спутников новаторского творчества. Трудно поверить, что сын лондонского кузнеца, не имевшего возможность закончить даже начальную школу, путем самообразования и неустанного труда стал великим ученым, членом 68 академий и научных обществ мира, в том числе и почетным членом Петербургской академии наук.

Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 г. в бедной, но трудолюбивой семье, в которой с детства прививалась любовь к труду и рабочая честность. Отец Фарадея умер в 1810 г., а мать — простая необразованная женщина, воспитавшая троих детей, скончалась в 1838 г. и дожила до тех счастливых дней, когда ее любимец — младший сын — стал всемирно известным ученым.

Заработок отца был весьма скудным, порции хлеба за обедом становились все меньше и меньше, средств для обучения детей не хватало, и родители были вынуждены отдать старшего брата Роберта в ученики к кузнецу, 14-летнего Майкла — к владельцу книжной лавки и переплетной мастерской Ж. Рибо. Кто знает, попади Майкл в обучение к сапожнику или портному, вряд ли он с раннего

детства полюбил книги и стал интересоваться их содержанием.

Вначале он был разносчиком газет и, как говорят, зарабатывал себе на пропитание ногами, вставая в пять часов утра и таская увесистые пачки по лестницам однообразных двух- и трехэтажных каменных домов. Только по воскресеньям, доставив все газеты, Майкл мог уйти домой.

Год спустя, Майкл стали обучать переплетному делу. Он все более начинает увлекаться чтением книг, тем более, что хозяин мастерской, отмечая его ловкость и трудолюбие, всячески поощрял это увлечение.

Однажды в мастерскую принесли три маленьких томика «Химические беседы», написанных популярно и интересно швейцарской писательницей Морсе. Майкл буквально проглотил эти книжки и воспроизвел простейшие химические опыты, изложенные в книгах. Возможно, с этих опытов и начинается биография выдающегося изобретателя.

Когда в мастерскую принесли для переплета многотомное издание «Британской энциклопедии» (каждый том весил почти полпуда), Майкл внимательно прочел статью об электричестве и необычайно увлекся этой таинственной силой природы. Он начал демонстрировать сотрудникам и посетителям мастерской занимательный опыт с электризацией палочки сургуча, натираемой суконной тряпочкой. Затем, используя имевшиеся под руками инструменты, а также стеклянную бутылку, чугунный прут от сломанного камина, куски медной проволоки и остатки переплетных материалов, он по рисунку в «Энциклопедии» соорудил электрическую машину, которая действовала весьма эффективно и приводила в восторг всех, кто ее наблюдал. Шестнадцатилетний изобретатель очень гордился своим созданием, тем более, что в процессе ее изготовления ему пришлось работать не только руками, но и головой, упрощая и заменяя некоторые детали машины.

Молодой Фарадей все более ощущает недостаточность своих знаний и начинает регулярно посещать общеобразовательные лекции по физике и астрономии. Но у него не было лишнего шиллинга для оплаты этих лекций, и каждый раз старший брат давал ему деньги. Во многом овладевать знаниями ему помогали друзья, с которыми он посещал лекции. С их помощью он научился грамотно писать и четко излагать свои мысли. Он даже научился рисованию под руководством одного из жильцов дома своего хозяина.

Небезынтересно отметить, что Фарадей переплел для себя толстую тетрадь, в которую выписывал из книг наиболее любопытные факты, а также записывал и свои собственные мысли. Неудивительно ли, что 18-летний, еще никому не известный молодой человек отметил в своем «философском сборнике» (так он назвал свою тетрадь), что он собирает все эти материалы «с целью содействовать развлечению и образованию, а также подтверждению и опровержению теорий, постоянно возникающих в ученом мире». Но, как

утверждают биографы Фарадея, в этом сборнике самоуверенность юноши уживалась с «искренним сознанием своего невежества».

Переломным моментом в жизни Фарадея было знакомство с выдающимся английским ученым Хемфри Дэви (1778—1829). Его пригласил на лекцию знаменитого физика и химика в Королевском институте один из посетителей переплетной мастерской, большой любитель химии. Эти четыре последних лекции Дэви решили судьбу Майкла. Он был, возможно, одним из самых внимательных слушателей ученого, а сопровождавшие лекцию эксперименты вызвали у него восхищение.

Майклу казалась несбыточной мечта заняться научной работой. Для этого он должен был попасть в одно из лондонских научных учреждений. Нужно было сделать решительный шаг, тем более, что к концу 1812 г. кончался срок контракта работы в мастерской.

По совету того же знакомого, пригласившего Фарадея на лекции, он посылает Дэви письмо вместе с записанными им его лекциями, аккуратно переплетенными в отдельную тетрадь. Вскоре получает ответ от Дэви, который отмечает его конспекты, обнаруживающие «большое прилежание, внимание и силу памяти». «Я буду рад, если смогу быть Вам полезен», — заканчивает письмо Дэви. Трудно представить радостное волнение, которое испытал Фарадей, много раз перечитывая письмо.

В конце января 1813 г. Майкл впервые встретился с Дэви, а 1 марта он получил от него приглашение занять освободившееся место лаборанта в лаборатории Королевского института. При этом Дэви предупредил Фарадея о нелегком пути ученого, стараясь рассеять иллюзии еще неопытного юноши. Вскоре Фарадей убедился в справедливости предупреждения Дэви. Он не только исполнял обязанности лаборанта, но был по существу и служителем, и слугой, и лакеем, в том числе и у леди Дэви. А когда в конце 1813 г. Дэви с женой уехали в путешествие по Европе, то взяли с собой Фарадея в качестве лакея и слуги.

Несмотря на знакомство со многими учеными, а также интересные впечатления, полученные во время поездки, Фарадею пришлось испытать немало унижений, горечь утраты иллюзий. Он даже намеревался вернуться в мастерскую, но давние мечты о научных исследованиях оказались выше всего, и с лета 1815 г. Фарадей помогает Дэви в проведении химических экспериментов, начинает заниматься самостоятельной работой. Вскоре выходят в свет его первые печатные статьи по химии, он привлекается к редактированию научного журнала, читает лекции в организованном им философском обществе, которое объединяло молодых людей, интересующихся научными проблемами, но не имеющими достаточных средств для осуществления своих планов.

Звездным часом в творчестве Фарадея, по-видимому, нужно считать момент, когда он узнал о необычайно интересном открытии датского физика Г. Х. Эрстеда (1777—1851) — действии электрического тока на магнитную стрелку. По образному выражению одного из ученых, с тех пор электро-

магнетизм привлек к себе не только железо, но и мысли виднейших европейских физиков¹.

В августе 1820 г. Дэви познакомил Фарадея с докладом Эрстеда, занимавшего всего три страницы текста. Они вместе повторили опыты датского физика, и с тех пор почти все важнейшие исследования Фарадея, принесшие ему мировую славу, были связаны с изучением электромагнитных явлений.

В опыте Эрстеда наблюдалось принципиально новое явление: здесь уже не было привычного притягивающего и отталкивающего действия «электрической силы»; магнитная стрелка компаса поворачивалась и становилась поперек провода с током. Эрстед предполагал, что силы, действующие на стрелку, распространяются по «круговому пути» вокруг провода, но многое еще оставалось неясным. Как говорили физики, Эрстед напал на след, но его не распутал.

Наиболее важные наблюдения и открытия вскоре (в 1820 г.) были сделаны крупнейшими французскими учеными: Араго, Ампером, Био и Саваром.

Д. Ф. Араго (1786—1853) в ноябре 1820 г. намагнитил стальную иглу при помощи электрического тока, а А. М. Ампер (1775—1836) той же осенью 1820 г. с присущим ему мастерством произвел серию оригинальных экспериментов и с математической точностью определил силу воздействия двух электрических токов, заложив основы новой отрасли науки, названной им электродинамикой.

Ампер впервые пришел к выводу об электрической природе магнетизма. Разработанная им гипотеза молекулярных круговых токов явилась первым шагом на пути к материалистической трактовке магнитных явлений. Изготовив проводочную спираль (соленоид), он показал, что при пропускании по ней тока она ведет себя как постоянный магнит, имеющий северный и южный полюсы, а между полюсами двух соленоидов происходят такие же взаимодействия, как между соответствующими полюсами постоянных магнитов.

Ж. Б. Био (1774—1862) и Ф. Савар (1791—1841) установили закон взаимодействия тока и магнита, впервые доказав, что «равнодействующая всех сил, исходящих из провода», подобно вектору направлена перпендикулярно плоскости, в которой находится проводник с током. Это позволяло объяснить вращательный характер движения проводника относительно магнита или магнита относительно проводника.

В сентябре 1821 г. Фарадей, внимательно изучавший все исследования, проводившиеся зарубежными физиками и воспроизводивший их эксперименты, впервые построил оригинальный прибор (рис. 1), в котором осуществлялось вращение магнита вокруг провода с током и провода

¹ Справедливости ради следует отметить, что впервые действие электрического тока на магнитную стрелку наблюдал итальянский физик Д. Романьози еще в 1802 г., однако тогда это явление не получило должной оценки. Но в научной литературе первой четверти XIX в. есть ссылки на то, что опыт Романьози был, возможно, известен Эрсту.

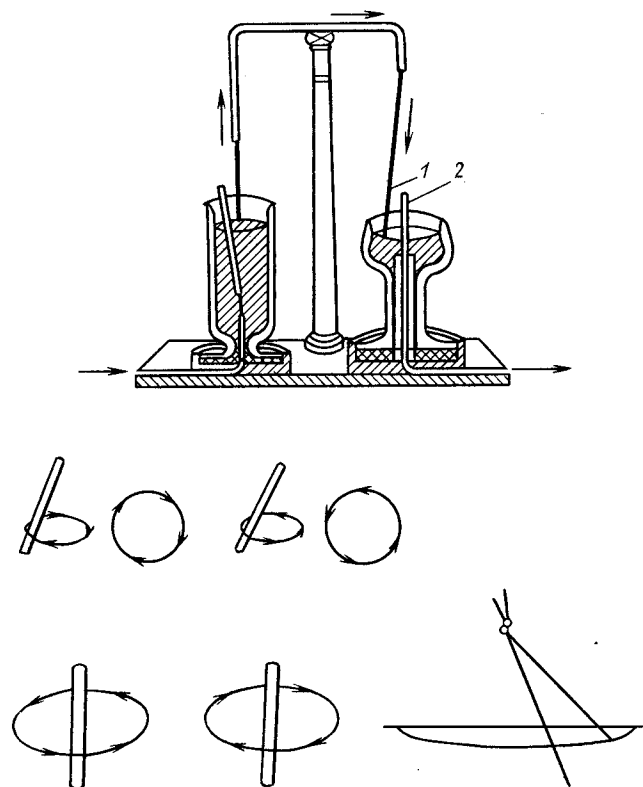


Рис. 1. Прибор, демонстрирующий вращение проводника (1) вокруг магнита (2) и магнита вокруг проводника (внизу — рисунок Фарадея)

вокруг магнита. Над своим прибором Фарадей, по его признанию, «долго ломал себе голову... даже ночами просыпался и думал». Не случайно подвижные контакты прибора могли реагировать на ничтожные силы, обеспечивая легкость движения.

Этот эксперимент наглядно иллюстрировал **возможность построения электродвигателя**. Фарадей опубликовал в научном журнале Королевского общества статью с историческим обзором явлений электромагнетизма.

После создания прибора он написал вторую статью по электромагнетизму «О новых электромагнитных движениях».

В том же 1821 г. Фарадей записывает в своем дневнике замечательные слова: «Превратить магнетизм в электричество». Такая новаторская научная проблема могла быть сформулирована только незаурядным исследователем, глубоко понимавшим сложные взаимосвязи и взаимопревращения различных сил природы. Такие материалистические представления лежали в основе философского мировоззрения Фарадея еще задолго до открытия закона сохранения и превращения энергии.

Действительно, достижения науки и практики, хорошо известные Фарадею, убедительно подтверждали его веру в «единство сил природы» (термин «энергия» в то время еще не употреблялся): взаимное превращение тепловой и механической, электрической и химической энергий. Вот как писал об этом в своем дневнике Фарадей: «Все силы природы в основе своей

едины. Тепло, расширяя пар в паровой машине, превращается в механическое движение. Механическое движение, как например, вращение колеса, остановленное трением тормоза, переходит обратно в тепло, нагревая тормоз и колесо. Такой взаимный переход должен несомненно существовать также между электричеством и магнетизмом... Магнитные силы должны порождать электрические явления. Но как это обнаружить?» Позднее (см. ниже) Фарадей сформулирует это более четко. Так, если электрический ток создает магнитное поле, то можно предположить существование обратного процесса: магнетизм превращается в электричество.

Вот таким поразительным для своего времени научным предвидением, основанном на прочном фундаменте знаний, владел Фарадей. И поэтому запись в его дневнике появилась не случайно. Но потребовалось десять (!) лет упорнейшего труда, чтобы практически решить поставленную задачу.

Имя Фарадея уже стало известным в ученых кругах, но он неустанно продолжал работать над своим самообразованием: изучал труды знаменитых физиков и химиков, тщательно их конспектировал, повторял многие эксперименты. По свидетельству его биографов, Фарадей «с юных лет питал отвращение к полужнанию. А знать для него значило: увидеть, измерить, взвесить».

И хотя большую часть времени он посвящал изучению электромагнитных явлений, ему удалось в 1823 г. впервые получить жидкий хлор, чего никак не мог осуществить Дэви. Кстати, это открытие Фарадея наложило отпечаток на его взаимоотношения с Дэви, который был необычайно огорчен тем, что ученик превзошел его, всемирно известного химика. Дэви все более убеждался в незаурядной одаренности и таланте молодого ученого.

Коллеги Фарадея выступили с предложением избрать его в число членов Лондонского Королевского общества, которое в Англии соответствовало Академии наук. Выборы в это высшее научное учреждение по традиции проводились далеко не просто: для выдвижения кандидата в члены общества должно было поступить письменное предложение, подписанное двадцатью членами общества. Затем это предложение обсуждалось на нескольких собраниях общества и тайным голосованием проводились выборы. В это время (1823 г.) президентом Королевского общества был сам Дэви. Вначале Дэви резко возражал против избрания Фарадея: он никак не мог примириться с мыслью о том, что его бывший лакей и ученик будет удостоен высшего научного звания. Однако под воздействием ряда ученых Дэви дал согласие на проведение выборов. 8 января 1824 г. Фарадей избирается членом Королевского общества. Как пишут биографы Фарадея, в баллотировочном ящике оказался лишь один черный шар, «и Фарадей никогда не узнал, голосовал ли Дэви за или против его избрания». Но в кругу друзей Дэви любил повторять, что среди его немаловажных для науки открытий самым большим было «открытие Фарадея».

В 1827 г. Фарадей получил «профессорскую кафедру» в Королевском институте и начал читать лекции, которые вызвали всеобщий интерес. Но чем бы ни занимался Фарадей, все его мысли были о «превращении магнетизма в электричество». Рассказывают, что он носил в кармане небольшую спираль из медной проволоки и тонкий железный брусок, нередко доставал эту своеобразную модель электромагнита и устанавливал спираль и брусок в разнообразные положения. Многие друзья и коллеги считали его чудачком.

Фарадей внимательно изучил несколько конструкций электромагнитов, созданных в 1825 г. его соотечественником Стэрдженом. Фарадею не давала покоя мысль о физической сущности явления, описанного в 1824 г. французским ученым Араго и названного им «магнетизмом вращения». Араго обнаружил странное поведение магнитной стрелки в изготовленном по его личному заказу чувствительном компасе. Для лучшей устойчивости и сохранности магнитная стрелка была помещена в массивную коробку из красной меди; коробка накрывалась медной крышкой. Араго специально избрал медную оправу, так как хорошо знал, что между медью и магнитом не происходит никакого взаимодействия. Но каково же было удивление Араго, когда, приподняв крышку и слегка повернув ее, он заметил, что стрелка компаса поворачивается в том же направлении. При неподвижной крышке стрелка также оставалась неподвижной.

Араго вначале утверждал, что колебания стрелки вызваны наличием примеси железа в медной оправе, но специальный химический анализ подтвердил отсутствие железа. Тогда Араго решил построить специальный прибор и выяснить, не будет ли вращаемый магнит увлекать медный диск (рис. 2). Опыт подтвердил догадку ученого: при вращении магнита (1) медный диск (2) начинал вращаться в ту же сторону, даже если между ними было проложено стекло или плотная бумага (чтобы исключить влияние потоков воздуха). Было очевидно, что при вращении магнита (но только при вращении!) в медном диске возникают какие-то магнитные силы. Недоумению ученых не было предела — ведь медь не притягивается магнитом и не намагничивается. И даже Ампер, к которому Араго обратился за советом, не смог объяснить этого явления, хотя и высказал предположение, что электрические силы, существующие, по его мнению, в магните, действуют на расстоянии на медный диск. И только Майкл Фарадей после открытия им явления электромагнитной индукции не только объяснил причину вращения диска, но и указал практический путь использования этого явления.

В течение долгих десяти лет день за днем Фарадей ставил опыт за опытом, которые тщательно записывал в лабораторный журнал. Таких опытов были тысячи, но «возбуждения электричества посредством магнетизма» достичь не удалось.

29 августа 1831 г. — памятный день не только в жизни Фарадея, но и в истории науки. Вот как он описывает свой первый эксперимент в лаборатор-

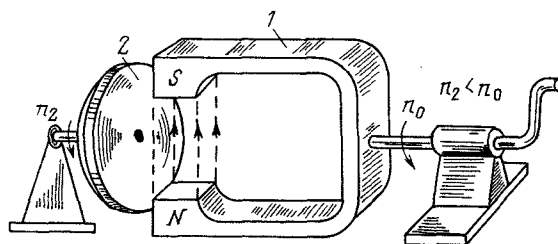


Рис. 2. Механизм, воспроизводящий опыт Араго и демонстрирующий принцип действия асинхронного двигателя

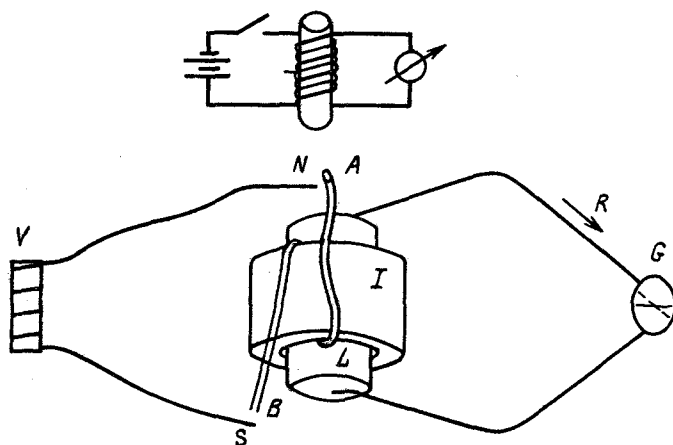


Рис. 3. Схема первого опыта с электромагнитной индукцией (внизу — один из рисунков Фарадея)

ном журнале: на деревянную катушку была намотана медная проволока длиной в 203 фута; между ее витками была намотана вторая проволока, изолированная от первой хлопчатобумажной нитью (рис. 3). Одна из спиралей соединялась с гальванометром, другая с сильной батареей из 100 пар пластин. При замыкании и размыкании электрической цепи стрелка гальванометра слабо отклонялась. Но при непрерывном прохождении тока через первую спираль гальванометр оставался неподвижным.

Очевидно, во вторичной цепи возникал ток. Но почему только при замыкании и размыкании первичной цепи? А каковы свойства этого тока? Поместив внутрь спирали, включенной во вторичную цепь, стальную иглу (рис. 4), Фарадей обнаруживает, что она намагничивается индуктированным током. Следовательно, этот ток обладает теми же свойствами, что и ток, полученный от гальванической батареи.

Но почему все-таки стрелка гальванометра неподвижна, когда ток проходит по первой спирали и даже нагревает ее? Сегодня на этот вопрос может ответить любой старшеклассник, а великий экспериментатор оставался наедине со своими сомнениями.

Было очевидно, что так как спирали между собой электрически не соединены, то действие первой на вторую осуществляется через среду, их окружающую. Естественно было предположить: как повлияет на отклонение стрелки гальванометра замена деревянной катушки железным кольцом? Ведь железо легко намагничивается током

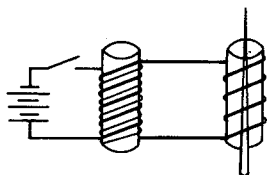


Рис. 4. Схема опыта с намагничиванием иглы

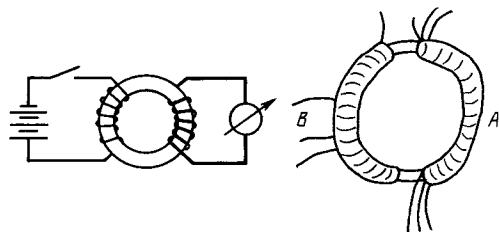


Рис. 5. Схема опыта, в котором картонный цилиндр заменен железным кольцом (внизу — рисунок Фарадея)

(рис. 5). Оказалось, что стрелка отклоняется на больший угол, т. е. среда, окружающая проводник с током, играет активную роль и может усиливать явление индукции: «Гальванометр мгновенно обнаруживал отклонение, причем оно было гораздо более значительным, чем в предыдущих случаях, в которых при батареях в десять раз более мощных применялась спираль *без железа*» (курсив *Фарадея*), — записывал он в своем лабораторном журнале. Отметим, кстати, что в опыте с железным кольцом и двумя спиралями можно увидеть прообраз простейшей конструкции трансформатора. В своих более поздних экспериментах Фарадей четко сформулирует понятие о силовых линиях, которым он придавал физическую реальность. На этом мы остановимся несколько позже.

Пытаясь выяснить причину возникновения индукционного тока только при замыкании и размыкании первичной цепи, Фарадей пытался логически представить физический процесс этого явления. При замыкании и размыкании цепи **возникало** и **исчезало** магнитное поле, создаваемое током. Другими словами, происходило изменение магнитного состояния среды, окружавшей первичную и вторичную спирали. Но ведь магнитное состояние среды можно осуществить и без электрического тока, применяя обыкновенные стержневые постоянные магниты.

Этот опыт Фарадей осуществил 24 сентября 1831 г. Он обмотал железный цилиндр медной изолированной проволокой, соединив ее концы с гальванометром. Цилиндр был помещен между двумя постоянными стержневыми магнитами, которые внизу соприкасались разноименными полюсами (рис. 6). При смыкании и размыкании концов магнитов стрелка гальванометра отклонялась. Это явление Фарадей назвал «магнитно-электрической индукцией», в отличие от первых наблюдений, названных «вольт-электрической индукцией». Позднее он подчеркнул, что принципиальной разницы между этими явлениями нет, и назвал их «электромагнитной индукцией».

Проходит более двух недель, и 17 октября 1831 г. Фарадей ставит самый убедительный эксперимент, дающий прямой ответ на поставлен-

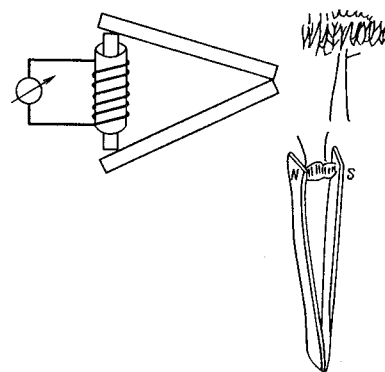


Рис. 6. Схема опыта с двумя постоянными магнитами (внизу — рисунок Фарадея)

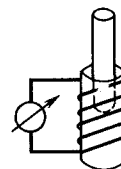


Рис. 7. Схема опыта, в котором магнит вводился и выводился из цилиндра с обмоткой

ную десять лет назад задачу. Если изменение магнитного поля, вызванное размыканием и замыканием магнитов, возбуждает в катушке ток, то это изменение можно вызвать еще более просто. На картонную катушку была намотана спираль из медной проволоки, соединявшейся концами с гальванометром (рис. 7). Затем Фарадей взял цилиндрический магнитный брусок (3/4 дюйма в диаметре, 8 1/2 дюймов длиной) и далее, — пишет он в своем журнале, — «...быстрым движением втокнул магнит внутрь спирали на всю его длину, и стрелка гальванометра испытала толчок. Затем я так же быстро вытащил магнит... и стрелка качнулась, но в противоположную сторону. Эти качания стрелки повторялись всякий раз, как магнит вталкивался или выталкивался. Это значит, что электрическая волна возникает только при движении магнита, а не в силу свойств, присущих ему в покое».

Итак, «магнетизм превращался в электричество» — гениальная гипотеза ученого была убедительно подтверждена!

А через несколько дней Фарадей осуществляет еще один эксперимент, с помощью которого наглядно объясняет явление, открытое Араго, и показывает возможность его практического использования. «Получив электричество из магнита вышеописанным образом, я полагаю, что опыт г-на Араго *может стать новым источником получения электричества, и надеялся, что... мне удастся сконструировать электрическую машину*» (курсив *Фарадея*). Опыт заключался в следующем. Фарадей принес в лабораторию большой подковообразный электромагнит, хранящийся до сих пор в музее Лондонского Королевского общества (рис. 8). К полюсам магнита он прикрепил «два стальных бруска» и в промежуток между ними ввел край медного диска. Край диска и его ось были соединены посредством

щеток с гальванометром. При вращении диска стрелка гальванометра «показывала наличие в нем электрического тока», причем стрелка испытывала не мгновенный толчок, а все время находилась в отклоненном положении, пока диск вращался. Это был *первый в мире электромашинный генератор* («диск Фарадея»), получивший позднее название униполярного генератора. С него начинается история электрических машин.

Действие своего генератора Фарадей объяснял так: медный диск можно представить в виде колеса с бесконечно большим числом спицрадиальных проводников. При вращении диска эти спицы — проводники пересекают магнитные силовые линии, и в них возникает индуктивный ток.

Мы уже подчеркивали заслугу Фарадея в установлении роли среды, окружающей проводники с током или магниты. «Линиями магнитных сил, — писал Фарадей, — я называю те линии, которые становятся доступными нашему зрению, когда мы рассматриваем расположение железных опилок вокруг полюсов магнита». Какое зримое, образное описание сложного физического явления. Кстати, до наших дней в школьных физических кабинетах именно так демонстрируются «силовые линии» магнитного поля.

«Фарадей, — писал Максвелл, — своим мысленным оком видел силовые линии, проходящие по всему пространству там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел промежуточную среду там, где они ничего не видели, кроме расстояния. Фарадей искал сущность явлений в том, что в действительности происходит в среде...» (курсив *Максвелла*).

Как указывает один из исследователей творчества Фарадея проф. П. С. Кудрявцев, Фарадей является **основателем физики электромагнитного поля**, физики эфира. Учение о физических силовых линиях («фарадеевские трубки»), натяжениями и давлениями которых об объяснял все действия токов, магнитов и наэлектризованных тел, является «центральным пунктом его физических воззрений» [1].

Фарадей убедительно отвергает господствовавшую долгое время в науке теорию дальнего действия, приближаясь в этом к воззрениям Эйлера и Ломоносова.

Фарадея нередко упрекают в том, что он не владел математикой и в более чем шести тысячах параграфов его «Экспериментальных исследований по электричеству» [2] нет ни одной математической формулы. Но Д. К. Максвелл подчеркивал, что хотя метод исследований Фарадея не был представлен в форме общепринятых математических символов, «его метод понимания явлений был также математическим» и его легко можно выразить в обычной математической форме.

Убедительной иллюстрацией справедливости слов Максвелла является формулирование Фарадеем закона электромагнитной индукции: «количество приведенного в движение электричества прямо пропорционально числу пересеченных силовых линий», что позднее стало выражаться широко известным выражением $d\Phi/dt$. Именно

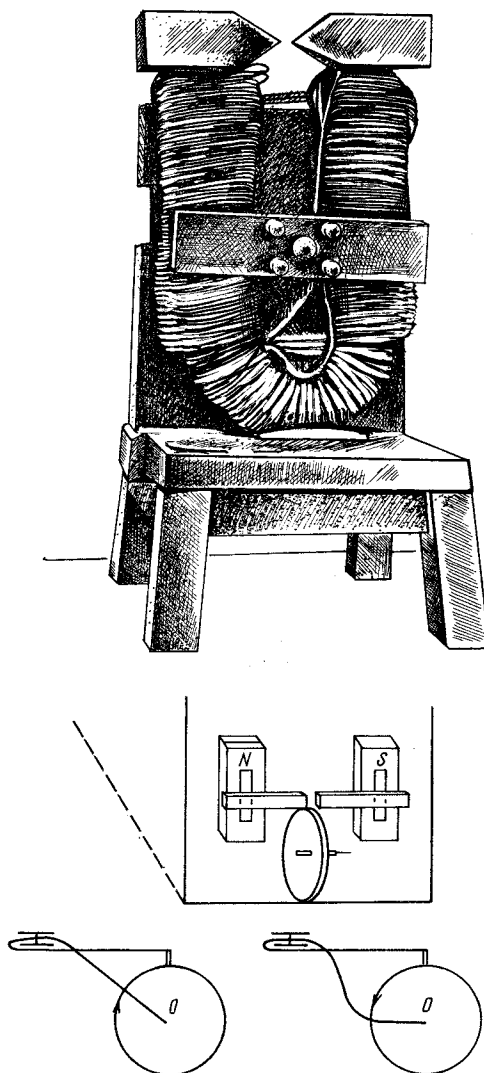


Рис. 8. Большой подковообразный электромагнит из Лондонского музея (внизу — схема рисунка Фарадея — изображение первого электромашинного генератора)

Максвеллу принадлежит заслуга развития и математической обработки идей Фарадея.

Перелистывая страницы Фарадеевского лабораторного журнала, содержание которого позднее было изложено в солидном труде [2], можно только поражаться широте и глубине его творческих поисков: широко известны открытые им законы электролиза, исследования разряда в вакууме и газах² (впоследствии на основе его наблюдений и выводов были открыты рентгеновские лучи и радиоактивность), открытие диамагнетизма и парамагнетизма, установление единой природы различных видов электричества — «животного», гальванического, статического, «магнитного», термоэлектричества, введение понятия «диэлектрик», открытие явления магнитного вращения плоскости поляризации света (еще М. В. Ломоно-

² Впервые оригинальные исследования явлений электролиза и электрического разряда в газах и вакууме с установлением ряда закономерностей провел в 1802 г. выдающийся русский физик и электротехник академик В. В. Петров (см. его труд «Известие о гальвани-вольтовых опытах», СПб, 1803).

сов предполагал выяснить влияние действия электричества на свет).

Как известно, изучая явления электролиза, Фарадей впервые установил количественные соотношения между единицей электричества и количеством выделенного вещества, ввел совершенно новую терминологию, характеризующую процессы электролиза. Это он сделал сознательно, чтобы отречься от многих ложных представлений о сущности этого явления. После консультаций со своим коллегой — профессором философии Кембриджского университета, знатоком древних языков, он ввел термины, сохранившиеся до наших дней: электролиз, электролит, электрод (по гречески «одос» — путь), анод и катод (по гречески «ана» — вверх, «ката» — вниз), ион (по гречески «идуший») и др. Он по-новому толковал механизм перемещения частиц вещества и, по мнению проф. П. С. Кудрявцева, впервые указал на «дискретность электрического заряда», что явилось основой электронной теории. Несмотря на то что Фарадей говорил, что он не любит слово «атом», его понимание атома было гораздо глубже, чем у его современников, он не считал атом неизменным «кирпичем мироздания» и предвидел неисчерпаемость его свойств.

Фарадей произвел весьма любопытный и изящный эксперимент, доказывающий общность свойств всех видов электричества, в том числе «животного». Он разыскал в аквариуме Лондонского музея электрического угря, надел на него своеобразное «седло» из тонкой медной пластинки (поблизости от места расположения его электрических органов) и показал, что «животное» электричество разлагает воду, создает магнитное поле.

Обобщая своих наблюдения, Фарадей в 1840 г. вплотную подходит к закону сохранения и превращения энергии: «Есть много процессов, при которых внешняя форма силы изменяется настолько, что происходит *видимое превращение одной силы в другую*. Так мы можем превратить химические силы в электрический ток или последний в химическую силу. Прекрасные опыты Зеебека и Пельтье показывают взаимный переход теплоты и электричества, а из других опытов Эрстеда и моих, вытекает взаимная обратимость электричества и магнетизма. *И нет такого случая, не исключая даже электрического угря и ската, где бы сила была создана или получена без соответственной затраты чего-либо другого*» (курсив **Фарадея**).

Результаты его выдающихся экспериментов с 1831 г. в течение 24 лет регулярно печатались в научном журнале «Philosophical transactions». Первая серия была посвящена явлению электромагнитной индукции, последняя — тридцатая — законам намагничивания (1855 г.). Весь гигантский труд Фарадея запечатлен в этих сериях. Как писал П. С. Кудрявцев, «Этот великолепный памятник научного творчества Фарадея представляет единственное и неповторимое научное произведение, в котором нашли свое отражение воззрения, мысли и труды великого ученого... Мир удивляется его гениальным открытиям, но не менее удивительна его сила воли и целеустремленность, побеждавшая все препятствия...» [1].

Напряженный повседневный труд не мог не сказаться на здоровье ученого. Уже в конце 1831 г., когда была завершена первая серия экспериментов по электромагнитной индукции, у Фарадея случился припадок «мозгового переутомления», пришлось временно прекратить работы в лаборатории.

Кроме научных исследований, Фарадей регулярно читал лекции в Королевском институте, выступал на знаменитых «пятницах», где ученые рассказывали о своих новых открытиях, и с большим увлечением в течение четверти века выступал в дни рождественских каникул с лекциями для юношества, сопровождавшимися занимательными опытами и пользовавшимися огромной популярностью. Фарадей по заслугам считался лучшим лектором Лондона. Несмотря на всемирную известность, он получал в Королевском институте весьма скромное жалование и был вынужден работать по частным заказам, выступать в судах в качестве эксперта по техническим вопросам. Вся жизнь он прожил в двухкомнатной скромной квартире «с углем и свечами». И только после настоячивых ходатайств научных коллег Фарадея указом короля ему была назначена государственная пенсия — 300 ф. ст. в год, что втрое превышало его жалование в институте.

Но здоровье Фарадея ухудшалось, особенно его огорчала заметная потеря памяти. Он продолжал научные исследования, но сократил число лекций и другие виды работы.

Следует отметить, что Фарадей не имел патентов на свои изобретения, он, как правило, не доводил их до возможности промышленного использования. Единственный патент был получен им в 1843 г. на оригинальный прибор для вентиляции маяков (Фарадей в течение 30 лет работал ученым консультантом при Управлении маяков). Этот патент он официально передал старшему брату, который когда-то давал Фарадею шиллинг для покупки билета на общеобразовательные лекции.

Несмотря на частые головокружения, плохую память, Фарадей, отказавшись от самых соблазнительных предложений с большими гонорарами, продолжал свои научные исследования вплоть до 1855 г. Он был вынужден прекратить постоянные эксперименты, потому что из-за плохой памяти несколько раз проводил опыты, которые были описаны в его лабораторном журнале полгода — год назад.

Но телом и душой Фарадей еще крепок. Ему уже было за 70, когда он, объехав на лодке по океану несколько маяков, дал свое авторитетное заключение о целесообразности замены масляных ламп электрическими фонарями. Он продолжал числиться директором лаборатории Королевского института, но все реже и реже заходил в свою лабораторию, поручив исследования своим помощникам.

Последний эксперимент, записанный им в лабораторном журнале, значился под номером 16 041. Это было 12 марта 1862 г.

В 1865 г. он подал заявление об освобождении от должности директора лаборатории, но

Совет Королевского института, поблагодарив его за многолетнюю плодотворную деятельность, попросил «нести эти попечения, только поскольку это будет ему приятно... и если он откажется от должности директора, то его квартира в институте останется за ним». Престарелый ученый, естественно, был очень обрадован такой заботой. Его единственным и верным другом оставалась жена, детей у них не было.

25 августа 1867 г., сидя в своем любимом кресле, Майкл Фарадей скончался.

Прошло ровно 160 лет со дня открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции и разработанных им основ теории электромагнитного поля. Эти и многие другие открытия великого физика не только не устарели за прошедшие годы, а наоборот, в свете современных достижений науки и техники их значение еще более возросло.

Как пророчески заявил выдающийся немецкий

ученый Герман Гельмгольц, до тех пор, пока люди пользуются благами электричества, они всегда с благодарностью будут вспоминать имя Фарадея. И, действительно, с именем Фарадея связаны важнейшие направления развития современной электротехники, физики, радиотехники.

«Никогда со времен Галилея, — писал знаменитый русский физик А. Г. Столетов, — свет не видел столь поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы, и едва ли скоро увидит другого Фарадея».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев П. С. История физики. — М.: Учпедгиз, т. 1, 1948.
2. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1. — М.: АН СССР, 1947.
3. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Энергетическая техника и ее развитие. — М.: Высшая школа, 1976.
4. Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники. — М.: Изд. МЭИ, 1991.

УДК 621.313.12.001.6

Экспертные системы диагностики электрооборудования

НАДТОЧИЙ В. М.

ВНИИЭ

Последние годы во многих странах мира наблюдается тенденция все более широкого применения новейших информационных технологий с использованием интеллектуальных систем. К таким системам относятся и экспертные системы (ЭС), представляющие собой программные комплексы, которые обеспечивают возможность приобретения знаний квалифицированных специалистов — экспертов в определенной проблемной области и использования этих знаний для оценки сложных ситуаций и выработки рекомендаций по оптимальному выходу из них.

ЭС являются технологией будущего и в настоящее время многие фирмы разрабатывают и практически используют ЭС в различных областях. Так, в США по данным [1] 35 % ЭС используются в военной промышленности, 18 % — в финансовой сфере, 18 % — для диагностики и обслуживания, 15 % — в промышленности, 6 % — на транспорте, 5 % — в торговле, 3 % — в других областях.

Постепенно увеличивается и количество проектов, связанных с применением ЭС в энергетике. В США, например, создана группа под руководством EPRI, которая разработала план использования ЭС на тепловых электростанциях (ТЭС) [2].

Работа EPRI в области диагностики (таблица) охватывают практически все оборудование ТЭС и направлены на раннее обнаружение дефек-

тов, позволяющее устранять их в плановом порядке. Для повышения эффективности планирования ремонтов на ТЭС Эдистон, например, создан диагностический контроль оборудования ТЭС

Диапазон частот	Характеристика контроля
Дозвуковой	Вибрации градирни и дымовой трубы (лазер с эффектом Допплера) Подсинхронный резонанс турбоагрегата (контроль крутильных колебаний)
Звуковой	Мерцание пламени в котле (силиконовый фотоэлемент) Вибрации вращающихся машин (акселерометры, лазеры) Протечки водогрейных труб котла (акустические микрофоны)
Ультразвуковой	Износ подшипников аксиальных вентиляторов (высокочастотные акселерометры) Ультразвуковой контроль турбин и котлов
Радио	Искрение в генераторе (радиочастотная эмиссия)
Микроволновый	Измерение влажности угля (микроволновый генератор)
Инфракрасный	Отбраковка котельных труб
Ультрафиолетовый	Контроль пламени котла
Рентгеновский	Контроль котлов, паропроводов
Гамма-излучение	Контроль износа (эмиссия гамма-излучений).

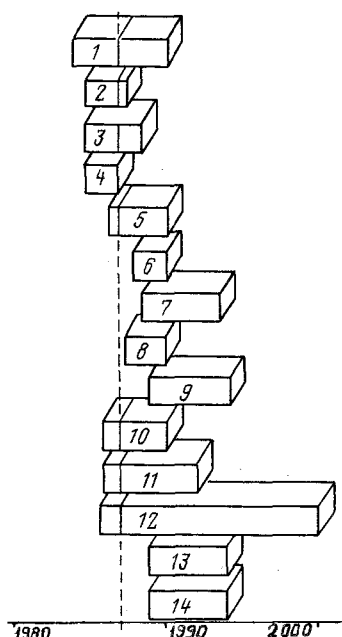


Рис. 1. Разрабатываемые и планируемые экспертные системы для электростанций: 1 — экспертная система оперативной диагностики турбоагрегата (*Westinghouse*); 2 — контроль коррозии (*Battelle Labs*); 3 — анализатор повреждений котельных труб (*EPRI*); 4 — экспертная система газовой турбины (*EPRI/Honeywell/GE/JCP&L*); 5 — указатель степени нагрева (*EPRI*); 6 — контроль состояния турбоагрегата (*EPRI*); 7 — советчик по оценке качества и чистоты угля; 8 — советчик по профилактическому обслуживанию (*EPRI*); 9 — советчик по потерям тепла; 10 — анализатор химических характеристик (*S & L*); 11 — советчик по эксплуатационным режимам станции (*EPRI*); 12 — экспертные системы управления; 13 — компьютеризованные технологические процессы; 14 — задачи планирования и строительства

ностический центр, объединивший все системы эксплуатационного контроля электростанции в единую систему диагностики. В *EPRI* начаты работы по применению ЭС в этих целях.

Что касается задач диагностирования повреждений, то ЭС уже применяются на некоторых ТЭС. Основанием для их внедрения явилось прежде всего увеличение «возраста» оборудования и необходимость снижения затрат на его обслуживание. На рис. 1 показаны основные ЭС, находящиеся в эксплуатации и в стадии разработки в США, а также предполагаемые сроки их полного освоения. Особое внимание уделяется трем главным направлениям: управлению, диагностике оборудования и информационной поддержке. На основе экономического анализа определены первоочередные разработки ЭС для решения следующих проблем в приоритетном порядке:

1. Тепловые характеристики ТЭС.
2. Профилактика повреждений водогрейных трубок котла.
3. Контроль эксплуатационного состояния турбоагрегата.
4. Анализ проблем водоподогревателя и конденсатора.
5. Оптимизация топливных характеристик котла.
6. Анализ химических характеристик.

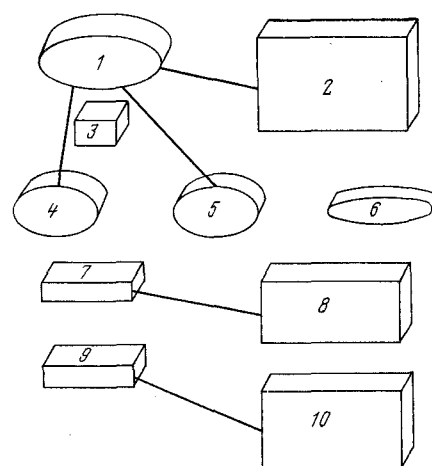


Рис. 2. Структура вибрационной экспертной системы турбины: 1 — данные; 2 — температура металла. Положение муфты. Вибрация 1-й оборотной частоты. Подсинхронная вибрация; 3 — если/то; 4 — основные повреждения; 5 — особые повреждения; 6 — вероятности; 7 — небаланс. Истирание. Изгиб; 8 — потеря массы. Эрозия. Не работает перепускной клапан. Износ подшипника; 9 — выравнивание линии вала. Жгут. Крепление. Трещина ротора; 10 — подшипник. Вертикальное смещение подшипника. Наклон подшипника. Муфта. Параллельное смещение муфты. Наклон муфты

7. Обучение пользованию экспертными системами.
8. Планирование ремонтов оборудования.
9. Контроль вентиляторов.
10. Оценка стоимости топлива.
11. Анализ состояния защитных покрытий.
12. Состояние пылеуловителей.
13. Обеспечение запчастями для ремонта.
14. Периодические консультации о состоянии агрегата.
15. Химический контроль влажности.
16. Тренажер по котлу с кипящим слоем.

Наибольший эффект ЭС могут принести в тех случаях, когда они используют оперативную информацию в процессе работы оборудования. Одной из таких систем является ЭС вибрационной диагностики турбины, структура которой показана на рис. 2. Система позволяет, в частности, обнаруживать трещины, возникающие во вращающихся частях турбины.

Одна из наиболее совершенных разработок в данной области является экспертная система оперативной диагностики турбогенераторов, созданная фирмой *Westinghouse* (США) и установленная в Техасской энергосистеме. [3, 4]. Система обслуживает 15 турбогенераторов на двух ТЭС и одной АЭС, при этом на типовом блоке мощностью 575 МВт диагностируются 425 потенциальных дефектов, а на блоке 750 МВт с водяным охлаждением обмотки статора турбогенератора — 525 дефектов.

На рис. 3 приведена общая структура этой региональной ЭС [3]. На каждой электростанции находится центр по сбору и обработке информации, поступающей от агрегатной системы эксплуатационного контроля, с выходом на местный терминал и устройством связи с единым диагностическим центром в г. Орландо. ЭС находится в диагно-

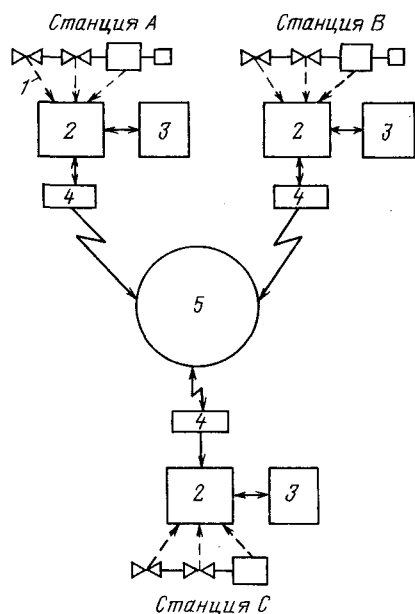


Рис. 3. Структура централизованной экспертной системы диагностики турбогенераторов: 1 — выходы от датчиков; 2 — центры сбора и обработки данных; 3 — местные средства отображения данных (дисплей и т. п.); 4 — модем; 5 — центр диагностики

стическом центре, оснащенном мощной ЭВМ, и работает в режиме советчика оперативного персонала. В центре, кроме того, обеспечено круглосуточное дежурство специалистов, наблюдающих за работой ЭС и способных уточнить и корректировать решения ЭС, обеспечивая таким образом повышение «квалификации» ЭС и наращивание базы правил.

База правил содержит более 3500 правил, относящихся к оценке теплового состояния генератора, перепада давления охлаждающей воды, характеристик системы масляных уплотнений и водородного охлаждения, системы возбуждения и регулирования напряжения, уровня вибрации вала и лобовых частей обмотки статора. По данным [5] коэффициент вынужденных простоев контролируемых ЭС турбоагрегатов снизился за период с 1984 по 1989 г. в среднем с 3,3 до 0,15 %, а коэффициент готовности увеличился с 94,9 до 97,3 %.

Упомянутая ЭС является единственной «региональной» системой. Другие разработчики ограничиваются пока созданием локальных целевых ЭС, предназначенных для контроля некоторых характеристик агрегатов или для оценки состояния отдельных его узлов. Так, в Японии разработана ЭС вибрационной диагностики турбоагрегата, состоящая из двух независимых блоков: системы оперативной диагностики и собственно экспертной системы. Общая структурная схема представлена на рис. 4. Система оперативной диагностики работает в реальном времени, требует большой скорости процессора и поэтому базируется на мини-ЭВМ. Она выполняет следующие основные функции.

Выявляются нарушения вибрационного состояния валопровода и определяются обобщенные причины повышенных вибраций: трение; мгновен-

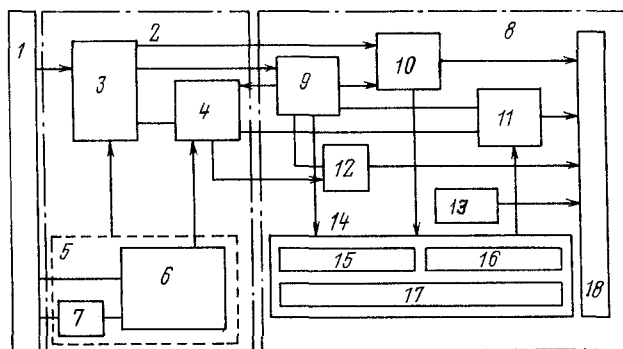


Рис. 4. Структура экспертной системы контроля и диагностики турбогенератора: 1 — электростанция; 2 — оперативный контроль; 3 — подсистема выявления отклонения параметров от нормы; 4 — подсистема контроля аномального состояния; 5 — база данных; 6 — данные о контролируемых процессах и ретроспективные данные; 7 — статистическая обработка и анализ; 8 — экспертная система; 9 — подсистема определения причин отклонения параметров от нормы; 10 — подсистема выработки рекомендаций; 11 — подсистема объяснений; 12 — подсистема диагностики с использованием ретроспективных данных об опыте эксплуатации; 13 — подсистема обучения оперативного персонала станции; 14 — база знаний; 15 — база знаний о контроле; 16 — база знаний об эксплуатации; 17 — база знаний о диагностировании; 18 — пользовательский интерфейс

ный небаланс или изгиб ротора; нарушение положения подшипников; повреждения в подшипниках; самовозбуждение вибрации; трещина ротора. Устанавливается связь с конструктивными и эксплуатационными данными (номер подшипника, сравнение с уставкой, режимные параметры). Производится первичный анализ данных контроля (спектральный анализ, оценка устойчивости подшипников, уточнение места повреждения).

ЭС находится в режиме ожидания и начинает работать только при появлении нарушений вибрационного состояния.

ЭС сформирована на базе рабочей станции EWS с языком программирования «С». В качестве инструментальной системы-оболочки выбрана система IREX, обеспечивающая легкий и быстрый ввод данных, возможность использования прямой, обратной и гибридной логики вывода решений с большой скоростью, построение связи фреймов по желанию пользователя. Структурная схема IREX приведена на рис. 5.

ЭС работает в режиме консультанта и выполняет следующие основные функции:

проводит детальную диагностику обобщенных причин неисправностей, установленных системой оперативной диагностики;

вырабатывает рекомендации по устранению неисправностей;

дает объяснение диагноза — как общего, так и детального.

Детальная диагностика, в основе которой лежит таблица связей возможных дефектов отдельных узлов агрегата с упомянутыми обобщенными источниками повышенных вибраций, организована в диалоговой форме с оператором. При этом оператор может запросить подтверждение всех данных измерений, вызвать данные прошлых осмотров, сравнить полученную информацию с ретроспективными данными и т. д.

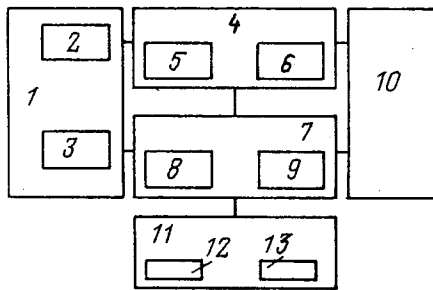


Рис. 5. Основная структура IREX: 1 — интерфейс для экспертов; 2 — редактор знаний; 3 — отладчик знаний; 4 — машина логических выводов; 5 — рабочая память; 6 — сеть Рети; 7 — управление базой знаний; 8 — система фреймов; 9 — составитель правил; 10 — пользовательский интерфейс; 11 — база знаний; 12 — фреймы; 13 — правила

Рекомендации по устранению дефектов также запрашиваются пользователем в диалоговой форме. Объяснительная функция осуществляет два вида мотивации: объяснение оперативного диагноза и объяснение логики перехода от оперативного к детальному диагнозу.

На основе разработанной ЭС-оболочки создан демонстрационный макет с двумя тестовыми примерами: повышенной вибрацией подшипника турбины из-за появления трения вследствие изменения температуры уплотнителя пара и повышенной вибрацией встроенного подшипника из-за нарушения его положения вследствие изменения внутреннего давления.

Поучительным является результат опроса потенциальных пользователей ЭС: диалоговая диагностическая система, как оказалось, не вызвала энтузиазма у оперативного персонала ТЭС. Пользователи, в основном, хотели бы, чтобы ЭС сама выдавала диагнозы необходимой глубины и, главное, давала бы рекомендации по управлению агрегатом. Детальный анализ причин повышенных вибраций более важен для ремонтного, чем для оперативного персонала. Поэтому одним из выводов авторов [6] является невозможность построения эффективной ЭС без тщательного изучения информации, в которой заинтересован пользователь.

Исследовательским отделом *Ontario Hydro* (Канада) совместно с *EPRI* (США) разработана ЭС для контроля турбогенератора (*GEMS*), программный комплекс которой состоит из двух независимых модулей: программы оперативного контроля и адаптационной программы-советчика [7]. Структурная схема комплекса *GEMS* приведена на рис. 6. Оба программных модуля базируются на ЭС-оболочке *ART*, выбранной из большого числа ЭС-оболочек, как наиболее подходящей для задачи контроля состояния объекта в реальном времени. Прототип ЭС сформирован на ЭВМ *Sun 3/60*, но может быть адаптирован и к рабочей станции *Unix* в зависимости от обстоятельств. К ЭС может быть подключено до 300 измерительных датчиков.

Особенностью ЭС *GEMS* является наличие специальной программы-советчика, которая позволяет пользователю изменять структуру и содержание базы знаний в зависимости от особенностей за-

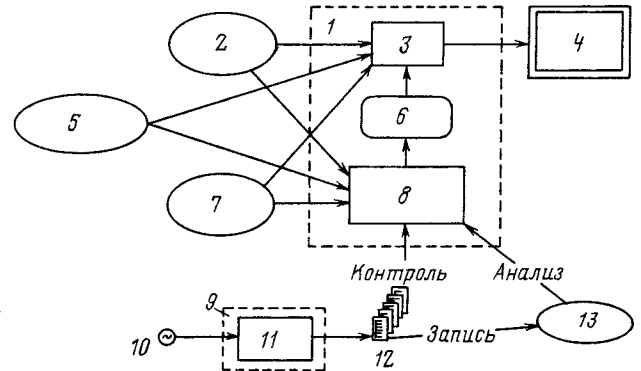


Рис. 6. Структура программного комплекса *GEMS*: 1 — программа контроля; 2 — файл описания генератора; 3 — экспертная система; 4 — рекомендация; 5 — файл характеристик датчиков; 6 — база знаний; 7 — файл требования пользователя; 8 — процедура оценки состояния; 9 — программа отбора и хранения данных; 10 — датчик генератора; 11 — сбор данных; 12 — последовательность фрагментов; 13 — файл логической проверки датчиков

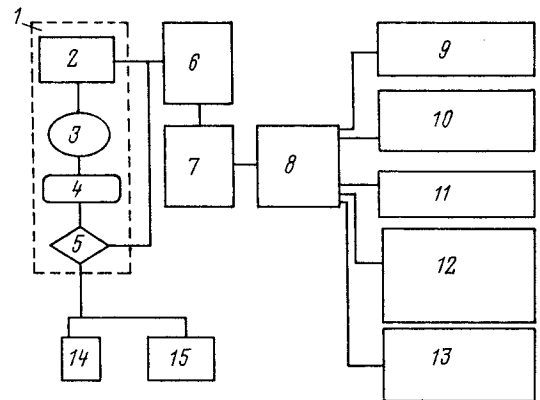


Рис. 7. Структурная схема ЭС *SCOPE*: 1 — компьютер; 2 — блок анализа измеряемых параметров; 3 — база знаний; 4 — экспертная система; 5 — диагностика; 6 — АЦП; 7 — (100—300) — канальная система сбора данных; 8 — преобразование сигналов; 9 — температура подшипников генератора; 10 — подпитка генераторов водородом; 11 — вибрация; 12 — детектор износа подшипника; 13 — контроль состояния системы смазки; 14 — дисплей; 15 — принтер

дачи контроля и специфики конструкции объекта. Поэтому *GEMS* может быть легко адаптирована к любому типу турбогенератора самим пользователем, не имеющим знаний в области программирования. Первые образцы прототипных ЭС *GEMS* предполагалось установить на одном из агрегатов в Канаде и на одном — в США.

Компанией *Bechtel Power Corporation* (США) разработана ЭС *SCOPE*, предназначенная для контроля отдельного турбогенераторного блока ТЭС [8] с его вспомогательными системами. ЭС разработана как типовая для серийных турбогенераторов и рассчитана на использование измерительной информации только от датчиков штатной системы контроля. Рабочие параметры, контролируемые этими датчиками, являются общими для большинства промышленных турбогенераторов, а именно:

температура подшипников;
расход водорода на подпитку объема газа в корпусе генератора;

износ подшипников;
чистота масла в системе смазки;
вибрации опорных узлов агрегата и т. п.
На рис. 7 приведена структурная схема разработанной ЭС.

Конкретная реализация ЭС *SCOPE* предназначена для контроля тех узлов турбоблока, которые наиболее всего подвержены износу. ЭС оценивает не только текущее значение контролируемых параметров, но и их изменение во времени, устанавливает диагноз при отклонении параметров от нормы, дает рекомендации по устранению обнаруженных неполадок и высказывает предположение о возможных сроках возникновения повреждений. По запросу пользователя ЭС отвечает, почему дается та или иная рекомендация.

ЭС *SCOPE* сформирована на базе ЭС-оболочки *Personal Consultant*, а в качестве компьютерной основы использована ПЭВМ *IBM PC AT*.

Отделом электростанций CEGB (Великобритания) разрабатывается ЭС для вибрационного контроля турбогенераторов [9]. Исходя из собственного опыта эксплуатации крупных турбогенераторов, английские специалисты считают, что вибрационный контроль является одним из наиболее эффективных средств предупреждения вынужденных остановов и повреждений турбоблоков и экономически быстро себя оправдывает. Поэтому была разработана долгосрочная программа создания ЭС, состоящая из трех этапов.

Общая структура такой «трехуровневой» системы приведена на рис. 8.

Первый уровень системы предназначен для сбора, анализа, хранения и обработки вибрационной информации и необходимых параметров агрегата. При этом обеспечиваются сигнализация о превышении допустимых уровней вибрации и представление данных в виде графиков и таблиц.

Второй уровень системы предназначен для оценки временных Трендов вибрационных параметров и оценки существенности их изменения.

Третий уровень является диагностической системой, выявляющей причины отклонения параметров от нормы, в том числе и в тех случаях, когда вибрационной информации недостаточно. Третий уровень представляет собой ЭС, построенную на правилах, связывающих дефекты с их признаками, и обеспечивающую использование текущей и ретроспективной информации и состоянии машины для уточнения диагноза и выработки рекомендации по ремонту.

Для оценки возможностей и целесообразности использования ЭС в системе оперативной вибрационной диагностики был разработан демонстрационный образец ЭС, охватывающий 20 дефектов различных элементов конструкции турбогенератора, которые могут быть связаны с вибрацией.

Первый уровень в виде системы централизованного контроля внедрен на нескольких ТЭС Великобритании и включен в объем нормальной постановки. Второй уровень проходит опробование в двух вариантах: как система, работающая в реальном времени, так и в виде интегрированной

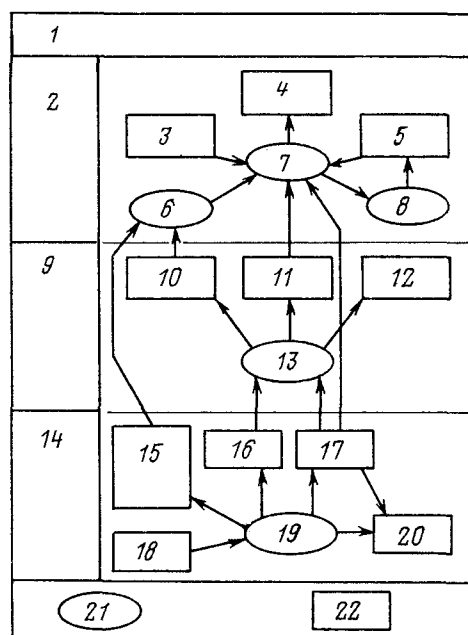


Рис. 8. Трехуровневая система контроля CEGB: 1 — трехуровневая система контроля; 2 — уровень III (диагноз); 3 — ручной ввод данных; 4 — диагноз; 5 — расчетные величины; 6 — определение повреждений; 7 — уровень III; 8 — математическая модель; 9 — уровень II (обнаружение); 10 — сигналы об опасных изменениях; 11 — хранение данных; 12 — дисплей уровня II; 13 — уровень II; 14 — уровень I (сбор данных); 15 — опасные уровни вибрации; 16 — проанализированные данные; 17 — хранение данных; 18 — входные данные; 19 — уровень I; 20 — дисплей уровня I; 21 — процесс; 22 — данные

подсистемы в составе системы оперативного контроля.

ЭС разрабатывается независимо от первых двух уровней общей системы и будет внедрена в виде отдельных опытных образцов на нескольких ТЭС. В последующий период предполагается интегрировать ЭС с системами контроля и диагностики, однако она будет работать в режиме ожидания и автоматически вводиться в действие только тогда, когда появится необходимость в более глубоком анализе возникшей ситуации.

Фирма *Radial Corp.* (США) разработала ЭС *Turbomac*, предназначенную для контроля и диагностики вибрационного состояния турбогенераторов [10], в целях исключения во многих случаях участия квалифицированных экспертов в оценке ситуации и принятии решений, что обходится весьма дорого. В основе логических правил ЭС *Turbomac* лежат вероятностные соотношения, выражающие связь между различными составляющими вибрации и их возможными физическими источниками.

ЭС *Turbomac* построена на базе ЭС-оболочки *Rulemaster*, которая, в свою очередь, состоит из двух основных программных комплексов: *Rulemaker* (для выработки правил) и *Radial* (интерпретатора правил). Язык программирования — «С». Подсистема приобретения знаний построена в диалоговой форме. Прототип ЭС содержит 154 вопроса к пользователю для заполнения базы

данных. Эти вопросы разбиты на следующие группы:

- данные предшествующих исследований;
- данные о системах инструментального контроля;
- результаты осмотров и ремонтов.

Ответы пользователя запрашиваются в следующей форме: «Есть», «Нет», «Может быть», «Не знаю». ЭС будет готова к работе в том случае, если пользователь подтвердит, что он удовлетворен введенными данными. Обычно пользователи отвечают на 55—80 % вопросов, генерируемых *Turbomac*.

Вырабатываемый диагноз сопровождается качественной оценкой вероятности существования данного дефекта в виде: «Имеет место», «Очень вероятно», «Вероятно», «Сомнительно», «Маловероятно», «Невероятно», «Отсутствует», «Не имеет отношения».

На экране дисплея отображается перечень выработанных диагнозов с оценками их вероятностей. Дополнительно пользователь может запросить следующую информацию: комментарии к диагнозу; признаки, подтверждающие диагноз; количество признаков, использованных при выводе диагноза; важнейшие неиспользованные признаки.

Правила в ЭС *Turbomac* формулируются в виде коротких фраз, указывающих, что для данного дефекта признак либо должен существовать всегда, либо может существовать, либо не может существовать никогда. В общей сложности ЭС содержит около 9000 таких правил, построена как продукционная система и считается в целом достаточно большой по объему.

Демонстрационный макет ЭС *Turbomac* был представлен персоналу ТЭС *Astoria*, причем возникли определенные сложности в установлении взаимопонимания между разработчиками ЭС и

персоналом, не знакомым с системами подобного рода. В разработанном варианте *Turbomac* не связана с измерительной системой вибрационного контроля, однако фирма считает выполненный проект первым шагом, который позволит ей в последующем создать мощную ЭС для оценки эксплуатационного состояния энергоблока.

В [11] описана специальная ЭС, предназначенная для оценки состояния изоляции обмотки статора крупных электрических машин, разработанная фирмой *ABB* (Швейцария). Поскольку изоляция обмотки статора является весьма сложной композицией, в настоящее время не существует какого-либо одного метода, с помощью которого можно было бы оценить эксплуатационное состояние изоляции и дать убедительное заключение о ее работоспособности. Современная концепция заключается в том, что обоснованные выводы о состоянии изоляции можно сделать только обобщая и сравнивая между собой результаты, полученные разными методами контроля, в том числе и осмотрами, а также сопоставляя данные по достаточно большому количеству однотипных машин.

Указанная концепция положена в основу и рассматриваемой ЭС, блок-схема которой приведена на рис. 9. По данным [11] ЭС находится в стадии проектирования.

В [12] описан контрольно-вычислительный комплекс, предназначенный для управления турбоагрегатом и разработанный фирмой *ACEA-BB*. Одной из составляющих комплекса является система оценки состояния турбоагрегата, работающая в реальном времени. Система состоит из независимых модулей, которые интегрируются в единую систему по желанию заказчика. К этим модулям относятся:

- вибрационный контроль;
- расход тепла;
- режимные параметры турбины;
- остаточный ресурс;
- режимные параметры генератора.

Система выполняет следующие функции: обработку данных с проверкой достоверности показаний датчиков, краткосрочное и долгосрочное запоминание данных, анализ и ретроспективное сравнение данных, оценку отклонений и трендов измеряемых величин, сравнение с уставками, постановку диагноза, выявление возможных неисправностей и выработку рекомендаций по управлению и обслуживанию агрегата. Экспертная система осуществляет две последние функции.

Разработчики считают, что применение ЭС в составе всего комплекса существенно повышает эффективность его использования и может в конечном счете повысить коэффициент готовности ТЭС минимум на 2 %.

Отечественные разработки ЭС для оценки состояния оборудования электростанций отражены в [13, 14]. Обе системы базируются на инструментальной ЭС-оболочке *МИМИР* и могут быть адаптированы к различным задачам диагностики. В настоящее время разработка находится на стадии демонстрационных моделей.

На основе анализа зарубежного и отечествен-

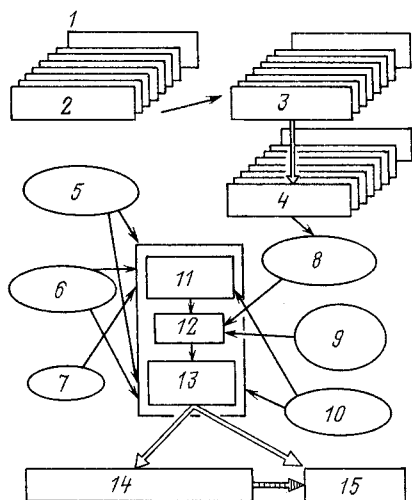


Рис. 9. Блок-схема экспертной системы оценки состояния изоляции фирмы *ABB* (Швейцария): 1 — осмотр; 2 — методы; 3 — диагноз; 4 — генератор; 5 — условия эксплуатации; 6 — ревизии; 7 — проектные характеристики; 8 — банк данных; 9 — формулы и правила; 10 — сопоставления; 11 — оценка состояния; 12 — знания; 13 — экспертная система; 14 — оценка состояния изоляции; 15 — сообщение

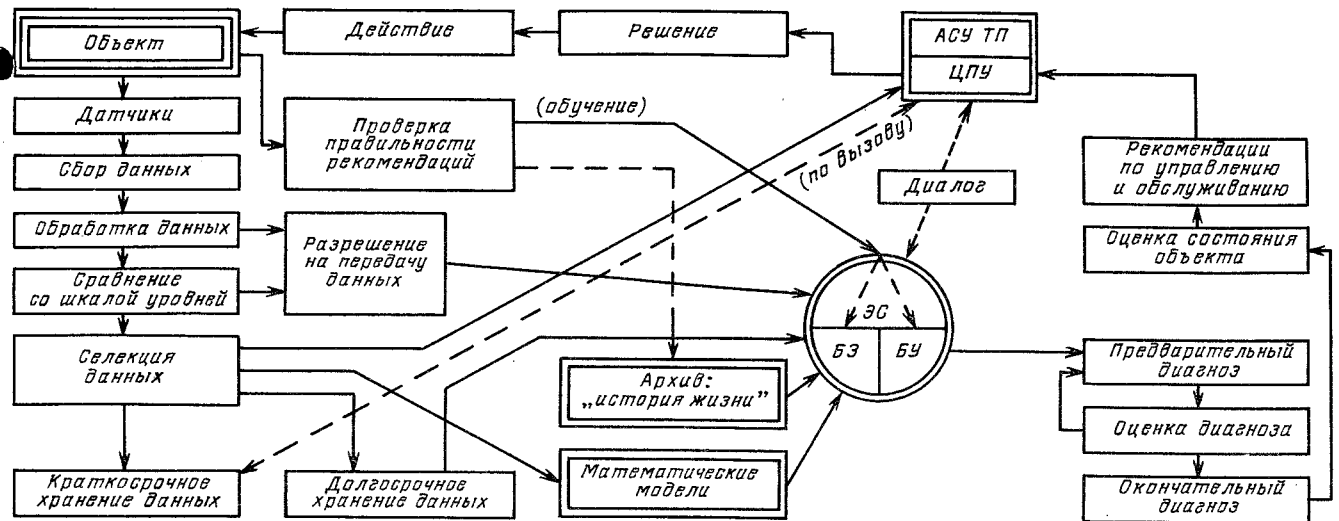


Рис. 10. Блок-схема автоматизированной экспертной системы оценки эксплуатационного состояния энергообъекта — АЭСЭС

ного опыта проектирования прикладных ЭС для задач диагностики оборудования электростанций может быть предложена следующая концепция построения автоматизированной экспертной системы для оценки эксплуатационного состояния энергообъекта (АЭСЭС).

Структурная схема АЭСЭС приведена на рис. 10.

АЭСЭС состоит из двух независимых систем: системы централизованного контроля (СЦК) и собственно экспертной системы (ЭС). Выходные параметры СЦК являются входными параметрами ЭС, которые используются при оценке эксплуатационного состояния объекта.

СЦК выполняет следующие основные функции: сбор и автоматическая обработка измерительной информации;

сопоставление результатов обработки с заданной шкалой уровней и передача на терминал пользователя сигнала о превышении уставок;

селекция данных для краткосрочного и длительного хранения в памяти, отображение этих данных по требованию пользователя;

передача данных для работы математических моделей;

передача выходных параметров контроля в экспертную систему.

ЭС при выработке заключения использует три вида информации: выходные параметры контроля СЦК, выходные данные математических моделей, документальную информацию об «истории жизни» объекта.

Математические модели могут быть заключены в независимом блоке — решателе, вход которого связан с измерительным комплексом СЦК, а выход — с базой знаний ЭС, либо встроены в комплекс СЦК или в комплекс ЭС.

Архив с «историей жизни» объекта может быть организован в виде стандартной независимой информационной системы с обращением к ней ЭС в случае необходимости, либо может содержаться непосредственно в базе знаний ЭС.

ЭС, получив необходимую входную информа-

цию из указанных источников, осуществляет последовательно следующие функции:

постановка предварительного диагноза, который может заключаться, например, в установлении предположительных значений (количественных, качественных, дуальных) тех параметров, по которым экспертами оценивается эксплуатационное состояние объекта (неисправности, повреждения, признаки и т. п.);

оценка достоверности предварительного диагноза: эта процедура требует особого внимания, хотя общего подхода к организации ее в базе умений указать, по-видимому, невозможно, поскольку она зависит прежде всего от структуры логического вывода, использованного при выработке предварительного диагноза;

оценка эксплуатационного состояния объекта, что является логическим завершением вышеуказанных процедур и в то же время — базой для новых логических процедур по выработке рекомендаций;

выработка рекомендаций по управлению и обслуживанию объекта.

Выработкой рекомендаций заканчивается активный цикл работы ЭС, и рекомендации передаются оперативному персоналу на его терминал.

ЭС не предназначается в качестве управляющей системы, а только лишь в качестве квалифицированного консультанта — советчика, поэтому окончательное решение и действия по управлению объектом осуществляет, естественно, человек. Однако для облегчения принятия решения человеком в ЭС предусматриваются две функции поддержки: объяснение мотивов выработки предлагаемых рекомендаций и прогноз возможных последствий в случае невыполнения рекомендаций. Обе функции осуществляются в диалоговом режиме по запросу пользователя.

Общий цикл работы ЭС по оценке возникшей ситуации на этом не завершается. ЭС требует проверки правильности алгоритма, по которому ею была выработана данная рекомендация. Для этого при очередной проверке (осмотре, ремонте)

объекта необходимо убедиться в наличии (степени развития) тех параметров оценки состояния, которые были определены ею на стадии предварительного диагноза. В случае обнаружения противоречивых данных необходимо скорректировать «правило» или «программу — рассуждение» и тем самым повысить «квалификацию» ЭС. Последняя процедура должна выполняться, разумеется, не пользователем, а соответствующими специалистами.

На этом общий цикл работы ЭС заканчивается.

ЭС работает в режиме ожидания, однако она может быть введена и вручную по требованию оператора, при этом на терминал пользователя могут быть вызваны данные, хранящиеся в базе знаний. Форма представления этих данных должна быть выбрана в процессе проектирования конкретной ЭС.

Изложенная концепция построения АЭСЭС положена в основу разработки экспертной системы вибрационного контроля гидрогенераторов [13].

Выводы. 1. Экспертные системы диагностики все более становятся предметом практической реализации для нужд электростанций.

2. Существующие разработки в области программных сред — инструментальных ЭС представляют широкие возможности для выбора наиболее целесообразных структур конкретных технологических ЭС, включая выбор концепции построения процедуры принятия решений: от структур, основанных на совокупности простых правил, до алгоритмов байесовской логики, использующей априорные вероятности. Возможно применение систем с прямым, обратным и гибридным логическими выводами.

3. Создание единой «объектовой» ЭС, охватывающей все эксплуатационные характеристики всего энергоблока и тем более электростанции в целом, на современном этапе не представляется возможным. Разработки ведутся в направлении создания локальных ЭС для отдельных узлов энергоблока или анализа отдельных его характеристик.

4. Функциональные возможности локальных ЭС, разработанных для конкретных технологических задач, должны обеспечивать легкую адаптацию этих ЭС к другим задачам аналогичных типов и допускать их совместимость с локальными ЭС иной архитектуры, что в перспективе позволит создать единую ЭС диагностики энергообъекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harvey P. Experts at Retail.— Datamation, April 1990, N 1.
2. Armor A. F. Expert systems for power plants: the floodgates are opening.— Power Engineering, July 1989.
3. Gonzales A., Osborn R. An expert system for on-line diagnosis of turbine generators.— Proceed. of CIGRE session-86, Paris, 1986, rep. 11-07.
4. Osborn R. Field experience with expert systems for on-line diagnosis of turbine generators.— Proceed. of CIGRE session-88, Paris, 1988, rep. 11-01.
5. Harper K., Bellows J., Osborn R. Expert systems improve preventive maintenance.— Electrical Light and Power, 1989, vol. 67, N 7, p. 22—24.
6. Turbine-generator on-line monitoring and diagnostic expert system / T. Fushimi, S. Matsumara, T. Koi et al.— Sympos. «Expert systems application to power plants», Stockholm—Helsinki, 1988.
7. Development of on-line monitoring of turbine generators at Ontario Hydro / B. Lloyd, H. Sedding, G. Stone, J. Braun — CIGRE Colloquium, Montreal, 1989.
8. Duggan P., Ashley-2 G. Artificial intelligence (expert system) — a tool for predictive maintenance.— Proceed. of Amer. Power Conf., 1987.
9. Fairney W. On-line vibration monitoring of large turbine-generators in the CEGB.— Proceed. of CIGRE session-88, Paris, 1988.
10. Reason J. Expert systems promise to cut critical machine downtime.— Power, March 1987, p. 19—21.
11. Schuler R. Methods for evaluating the condition of winding of rotating electrical machines.— CIGRE Colloquium, Montreal, 1989.
12. VGB Kraftwerkstechnik, 1988, N 6.
13. Экспертная система вибрационного контроля гидрогенераторов / Л. А. Бибер, Ю. Я. Любарский, В. М. Надточий, А. С. Цейтлин — Электричество, 1990, № 8.
14. Информационная экспертная система для обслуживающего персонала ГЭС / Ю. Я. Любарский, В. М. Надточий, Н. А. Ординян, Д. Е. Митрофанов — Электричество, 1991, № 3.

[15.03.91]

УДК 537.224

Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя

ИВАНОВ А. М., доктор техн. наук, ГЕРАСИМОВ А. Ф., канд. техн. наук

За последние годы разработан новый класс электротехнических устройств емкостного типа с высокой плотностью накопления электрической энергии, до нескольких джоулей на кубический сантиметр, получившие название в СССР молекулярных накопителей (МН), за рубежом (Япония) — «супер», «золотых» конденсаторов [1—3]. Данные устройства по своим зарядно-разрядным характеристикам являются аналогами конденса-

торов сверхвысокой емкости (фарадного диапазона), а их принцип действия, открытый еще в 1887 г. Гельмгольцем [4], основан на зарядении двойного электрического слоя, сформированного на межфазной границе электронного проводника и инертного электролита.

Накопление энергии в традиционных конденсаторах осуществляется электрическим полем в объеме диэлектрика, расположенного между

разноименно заряженными обкладками. Для конденсатора с плоскими параллельными обкладками единичной площадью 1 см^2 , расположенных на расстоянии d , значения удельной емкости C и предельной плотности энергии W определяются, как известно, диэлектрической проницаемостью ϵ и напряжением пробоя E диэлектрика [5]:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{1}{d}; \quad (1)$$

$$W = \epsilon \epsilon_0 E^2. \quad (2)$$

Предельная плотность энергии таких конденсаторов порядка 1 Дж/см^3 при $E \sim 10^6 \text{ В/см}$. Плотность энергии около $0,1\text{--}0,5 \text{ Дж/см}^3$ реализована в высоковольтных конденсаторах с тонкими диэлектрическими пленками, а также в низковольтных электрических конденсаторах с оксидным диэлектриком и объемно-пористыми электродами [5].

Принципиально другой подход к задаче создания емкостных накопителей электрической энергии состоит в использовании барьерного электрического поля, сформированного не в объеме макроскопического диэлектрика, а вблизи поверхности контакта материалов с различными электрофизическими свойствами (тип и величина проводимости, энергия выхода электрона и т. д.) [6].

Контактная пара, как основа накопительного элемента, должна обеспечивать получение максимальной плотности энергии W в объеме барьерного слоя при минимальном токе утечки $I_{\text{ут}}$ через барьерный слой, определяющем время хранения T накопленной энергии, и максимальной объемной проводимости σ контактирующих материалов, определяющей минимальное характерное время τ разряда барьерного конденсатора.

В данной статье представлены результаты сопоставительного анализа характеристик различных типов контактов с участием электронных и ионных проводников, представляющих интерес при создании устройств накопления электрической энергии (см. таблицу). Исследования структуры контактных переходов, имеющих микроскопическую природу, основываются на известных теоретических моделях, предсказывающих такие макропараметры контактов как C , d , E , W , $I_{\text{ут}}$.

Барьерное электрическое поле, или контактная разность потенциалов, является следствием пере-

распределения «электрической» и «химической» компонент электрохимического потенциала при установлении равновесия (выравнивании уровней Ферми) контактирующих материалов [6, 7]. Известным примером такого контакта, который может быть взят за основу, является контакт металл — полупроводник (или электронно-дырочный переход), емкостные свойства которого хорошо описываются моделью Шоттки [6]. В модели все доноры и акцепторы считают ионизованными и равномерно распределенными с концентрациями соответственно N_D и N_A в области перехода $x \leq d$, причем плотностью неосновных зарядов пренебрегают:

$$\rho = e(N_D - N_A) \text{ при } x \leq d; \quad (3)$$

$$\rho = 0 \text{ при } x > d. \quad (4)$$

Плотность поверхностного заряда Q , толщина d и дифференциальная емкость C барьера равны:

$$Q = e(N_D - N_A)d; \quad (5)$$

$$d = \frac{2\epsilon\epsilon_0}{e(N_D - N_A)}(V_s + V); \quad (6)$$

$$C = \frac{dQ}{dV} \epsilon\epsilon_0 \frac{1}{d}, \quad (7)$$

где $V_s = (\phi_1 - \phi_2)/e$ определяется разностью работ выхода ϕ_1 и ϕ_2 электронов контактирующих материалов.

Экспериментально установлено, что для целого ряда материалов высота барьера V_s находится в пределах от нескольких десятых долей вольта до единиц вольта [7] и может быть принята при численных оценках равной приблизительно 1 В .

Для слаболегированных полупроводников ($N \approx 10^{14}\text{--}10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\epsilon \approx 10\text{--}20$) объемный заряд распределен в слое толщиной $d \approx 10^{-6}\text{--}10^{-5} \text{ см}$ и имеет удельную емкость $C \approx 10^{-8}\text{--}10^{-7} \text{ Ф/см}^2$ при плотности энергии $W \approx 10^{-4}\text{--}10^{-2} \text{ Дж/см}^3$ и токе утечки $I_{\text{ут}} \approx 10^{-7}\text{--}10^{-4} \text{ А/см}^2$ ($1\text{--}10^3 \text{ А/Ф}$).

Как следует уже из модели Шоттки, на энергетические емкостные свойства барьера решающее воздействие оказывает концентрация легирования N . При увеличении концентрации легирования до $N \approx 10^{18}\text{--}10^{20} \text{ см}^{-3}$ барьерная емкость достигает значения $C \approx 10^{-6} \text{ Ф/см}^2$ ($W \approx$

Тип контакта	Плотность энергии в барьерном слое W , Дж/см ³	Время хранения энергии T , с	Время разряда τ , с	Области применения барьерного конденсатора	Особенности конструкции
Металл — полупроводник	$10^{-4}\text{--}10^{-2}$	$10^{-1}\text{--}10^{-4}$	$10^{-6}\text{--}10^{-8}$	Варианты микрофарадного диапазона	Планарная конструкция
Металл — сильнолегированный полупроводник	$10^{-1}\text{--}1$	$10^{-2}\text{--}10^{-3}$	$10^{-5}\text{--}10^{-7}$	—	—
Металл — скомпенсированный полупроводник	$1\text{--}10$	$10^4\text{--}10^5$	$10^{-2}\text{--}10^6$	—	—
Металл — инертный электрод	$10\text{--}10^2$	$10^5\text{--}10^6$	$10^{-6}\text{--}10^{-8}$ (без учета пористой структуры электрода)	Молекулярный накопитель энергии фарадного диапазона	Пористые электроды

≈ 1 Дж/см³). Однако одновременно наступает туннельный пробой барьера Шоттки [6]. Теоретически при определенном напряжении на таком контакте, когда исчезает перекрытие зон, туннельный ток должен был стремиться к нулю, но и в минимуме вольт-амперной характеристики имеет место значительный «избыточный» ток утечки [около 10^{-2} А/см² (10^4 — 10^5 А/Ф)], связанный с туннельными переходами через дополнительные уровни внутри энергетической щели, появляющиеся вследствие неоднородности контакта твердых тел и размытия краев зон сильнолегированных полупроводников [6, 8]. Применение сильнолегированных полупроводников с широкой запрещенной зоной (например, переход от кремния к арсениду галлия) снижает влияние размытости краев зон, однако ток утечки остается слишком большим [около $I_{\text{ут}} \approx 10^{-3}$ — 10^{-4} А/см² (10^2 — 10^3 А/Ф)], а время хранения энергии T мало, порядка 10^{-2} — 10^{-3} с.

При легировании скомпенсированными ($N_D = N_A$) количествами доноров и акцепторов [6, 8, 9] уровень Ферми сместится от края зоны проводимости (донорный n -полупроводник) к середине запрещенной зоны. Доноры и акцепторы окажутся полностью ионизованы за счет перехода электронов с уровня энергии доноров E_D на энергетически более выгодный уровень энергии акцепторов E_A . Образование барьерного заряда на контакте, например, металла со скомпенсированным полупроводником ($\varphi_{\text{ме}} > \varphi_n$) осуществляется в результате перехода электронов с занятых уровней ионизованных акцепторов (т. е. в результате их нейтрализации) на уровень Ферми металла E_F . Концентрация ионизованных акцепторов в отличие от барьера Шоттки оказывается зависящей от температуры и самосогласованной с величиной электрического поля через фактор Больцмана (разность энергии между валентной зоной E_v и уровнем акцепторов $E_v - E_A \gg kT$, $E_E - E_A \gg kT$):

$$\rho_- = eN(1 - \exp[-eV/kT]); \quad (8)$$

$$\rho_+ = eN = \text{const}, \quad (9)$$

а распределение потенциала по толщине барьера (объемного заряда) зависит от дебаевской длины $d_D^2 = \epsilon \epsilon_0 kT / e^2 N$ [7, 10]:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{2kT}{ed_D} \exp[-eV/2kT]; \quad (10)$$

$$x = \sqrt{2} d_D (\exp[eV/2kT] - \exp[eV_s/2kT]). \quad (11)$$

Так при $N \approx 10^{18}$ см⁻³ и $\epsilon \approx 5$ в зависимости от величины изгиба зон V_s толщина объемного заряда составляет (30—100) 10^{-8} см при емкости $C \approx (1-10) \cdot 10^{-6}$ Ф/см² и энергии W до 10 Дж/см³.

Ток утечки через контакт металла и скомпенсированного сильнолегированного полупроводника теоретически может быть достаточно малым: $I_{\text{ут}} \approx 10^{-10}$ А/см² (10^{-4} — 10^{-5} А/Ф), так как он обусловлен надбарьерным ($V_s \approx 1$ эВ) переносом электрона. Однако характерное время вывода накопленной энергии в такой системе резко увеличивается до 10^{-2} — 10^6 с из-за уменьшения

объемной электронной проводимости полупроводника до уровня порядка собственной $\sigma_n \approx 10^{-6}$ — 10^{-13} Ом⁻¹·см⁻¹ (поскольку возбуждение электронов в зону проводимости в скомпенсированном полупроводнике возможно только с занятого уровня E_A или из валентной зоны).

Повышение объемной электропроводности возможно, например, за счет увеличения подвижности ионизированных доноров и акцепторов путем перевода материала в жидкое состояние. К таким материалам, обладающим достаточно широкой запрещенной зоной (псевдощелью) и содержащим в достаточно высокой концентрации подвижные ионизованные донорно-акцепторные пары, могут быть отнесены жидкие скомпенсированные полупроводники (например, на основе расплавов селена, теллура [11]), ионные расплавы и электролиты — молекулярные диэлектрические жидкости, содержащие растворимые диссоциированные соли. Кроме этого, известны также твердые электролиты с высокой электропроводностью, имеющие аномальную подвижность одной из под решеток.

Температурный диапазон существования молекулярных жидкостей (-100 °С— $+150$ °С) делает их применение предпочтительным. Отсутствие «дальней» упорядоченности и наличие диффузной подвижности жидкого состояния приводит к тому, что контакт твердое тело (металл)—жидкость обладает рядом особенностей [7, 11]: 1) при диссоциации солей на ионы имеет место естественное скомпенсирование, или парное «легирование»; 2) ионы имеют относительно высокую подвижность ($\sigma \approx 10^{-3}$ — 1 Ом⁻¹·см⁻¹); 3) структура и параметры барьера слабо зависят от концентрации ионов N в объеме; 4) естественно формируется однородный контакт с твердым телом независимо от степени «шероховатости» его поверхности (возможность применения высокопористых материалов).

Исследования микроструктуры барьера (двойного электрического слоя) с участием жидких электролитов основываются на теории Гуи—Чепмена и ее модификациях Штерном, Бокрисом и др. [12, 13]. В силу подвижности самосогласованными (через фактор Больцмана) с электрическим полем («диффузная» часть двойного слоя) оказываются концентрации ионов

$$N_{\pm} = N \exp[\pm eV(x)/kT], \quad (11)$$

а толщина слоя составляет величину порядка дебаевской длины d_D . Расчеты показывают [12—14], что с ростом концентрации электролита эффективная толщина барьера уменьшается до молекулярных размеров («плотная» часть двойного слоя). В таком «молекулярном» конденсаторе электрическая энергия накапливается в основном в монослое сильно поляризованных молекул растворителя, диэлектрическая проницаемость которого много меньше объемной (например, для воды $\epsilon \approx 6$ [13] при объемной $\epsilon \approx 80$). Емкость поверхности составляет $C \approx 10^{-5}$ Ф/см², а плотность энергии $W \approx 10^2$ Дж/см³, что в 10 — 10^6 раз выше плотности

энергии твердотельных контактов.

С практической точки зрения выбор пары электрод (электронный проводник) — электролит (ионный проводник) ограничен следующими требованиями: 1) максимальной взаимной химической и электрохимической инертностью материалов; 2) максимальной объемной электропроводностью электролита; 3) максимальным напряжением разложения электролита. Наибольшую ионную электропроводность около ($1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\tau \approx 10^{-7} \text{ с}$) имеют концентрированные водные растворы щелочей и кислот при напряжении разложения около 1,2 В. Эти электролиты могут быть использованы в паре с углеродными материалами, металлами платиновой группы, соединениями типа карбидов и нитридов металлов. Группа неводных электролитов имеет более высокое напряжение разложения ($2 \div 3 \text{ В}$), однако их электропроводность в 30—100 раз ниже и соответственно уменьшается разрядный ток.

Экспериментально установлено, что ток утечки в перечисленных выше системах, обусловленный фоновыми окислительно-восстановительными электродными процессами, может быть уменьшен до 10^{-12} А/см^2 (или 10^{-7} А/Ф), что позволяет хранить энергию в течение 10^5 — 10^6 с .

Практически необходимым условием при создании накопителей энергии является также большая площадь поверхности электродных материалов. В качестве таковых могут быть использованы дисперсный углерод (10 — $10^2 \text{ м}^2/\text{см}^3$), никель Ренея (10 — $10^2 \text{ м}^2/\text{см}^3$), чернь платины (10 — $10^2 \text{ м}^2/\text{см}^3$), активированные высокопористые угли (10^2 — $10^3 \text{ м}^2/\text{см}^3$), обладающие достаточно высокой электронной проводимостью. Удельная емкость таких пористых материалов достигает 100 Ф/см^3 . Наименьший размер пор электрода ограничен размером молекул и сольватированных ионов электролита и толщиной двойного электрического слоя [т. е. значением около $(5$ — $10) \cdot 10^{-8} \text{ см}$]. Более мелкие поры, видимо, не могут быть использованы в процессах накопления и отдачи энергии.

Накопительный элемент состоит из двух пористых электродов толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров, разделенных ионопроводящим и, одновременно, электронноизолирующим сепаратором. В качестве сепаратора могут быть использованы известные пористые материалы, применяемые в химических источниках тока.

Максимальная теоретическая величина удельной энергии накопительного элемента без учета объема конструкции определяется удельной емкостью электродных материалов и напряжением электролиза электролита по формуле конденсатора с учетом последовательного соединения ем-

костей двух электродов и достигает значений около 50 Дж/см^3 .

Пористая структура электрода позволяет максимально увеличить удельную емкость и энергию «молекулярного» накопителя энергии, одновременно это значительно усложняет эквивалентную электрическую схему за счет ее пространственной распределенности и увеличивает характерное время вывода энергии при импульсном разряде. Рассмотрение динамических особенностей разряда и частотных характеристик представляет, однако отдельную задачу, выходящую за рамки данной статьи.

Выводы. 1. Показано, что при создании устройств накопления энергии на основе барьерного электрического поля, формируемого на поверхности контакта материалов с различными электрофизическими параметрами, предпочтительно использование контакта типа металл—жидкий электролит. При этом плотность энергии в объеме двойного электрического слоя достигает 10^2 Дж/см^3 , а время хранения накопленной энергии для систем с химически инертным электролитом составляет $10^5 \div 10^6 \text{ с}$.

2. Предельная величина плотности энергии в накопительном элементе, состоящем из двух высокопористых электродов с удельной поверхностью до $10^3 \text{ м}^2/\text{см}^3$, достигает 50 Дж/см^3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидоренко Н. С. Аномальная электрическая емкость и экспериментальные модели гиперпроводимости.— Доклады АН СССР, 1974, т. 216, № 6.
2. Sanada K., Hosokawa M. Electric double layer capacitor „Super Capacitor“.— NEC Research and Development, 1979, N 55, p. 21—28.
3. Fekido F. Electric double layer capacitor. Gold capacitor.— National Technical Report, 1980, N 26, p. 220.
4. Von Helmholtz H. Studien über elektrische Grenzschichten.— Ann. der Physik und Chemie, 1879, Bd VII, N 7.
5. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы.— Л.: Энергия, 1969.
6. Городецкий А. Ф., Кравченко А. Ф., Самойлов Е. М. Основы физики полупроводников и полупроводниковых приборов.— Новосибирск: Наука, 1966.
7. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела.— М.: Мир, 1980.
8. Милнс А., Фейхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник.— М.: Мир, 1975.
9. Губанов А. И. Квантово-электронная теория аморфных полупроводников.— М.: Изд. АН СССР, 1963.
10. Many A., Goldstein J., Grover N. Semiconductor surfaces.— N. Y.: Interscience, 19.
11. Катлер М. Жидкие полупроводники.— М.: Мир, 1980.
12. Петтер К. Электрохимическая кинетика.— М.: Мир, 1967.
13. O'Bockris I. Overview of the status of solid-liquid interface science.— Materials Science and Engineering, 1982, vol. 53, p. 47.
14. Bard A. J., Faulkner L. R. Electrochemical methods, fundamentals and applications.— N.— Y.: Wiley, 1980.

[15.02.91]

Проблемы трансформаторостроения на сессии СИГРЭ 1990 г.

ЛИЗУНОВ С. Д.

На сессии обсуждались доклады, представленные по двум предпочтительным темам:

тепловые процессы в трансформаторах;

большие генераторные трансформаторы.

Ниже приведен краткий обзор содержания докладов с учетом обсуждения на сессии.

1. Тепловые процессы в трансформаторах.

Вопросы нагрева и охлаждения трансформаторов часто привлекают внимание специалистов. С появлением методов прямого измерения температуры наиболее нагретой точки (ТНТ) появились новые возможности усовершенствования тепловых расчетов, а также непосредственного контроля ТНТ обмотки при перегрузках трансформаторов в эксплуатации.

1.1. Методы испытаний на нагрев и определения температуры. Методы определения превышения температуры масла при испытаниях согласно [1] могут давать существенную ошибку, особенно для трансформаторов, имеющих тепловую постоянную времени 5 ч и более (при постоянной времени, равной 10 ч, ошибка может достигать 7 К). Предложен метод определения превышения температуры по трем измерениям [2] по формуле

$$\Theta = \frac{\Theta_2 - \Theta_1 \Theta_3}{2\Theta_2 - \Theta_1 - \Theta_3}, \quad (1)$$

где Θ_3 — превышение температуры масла, примерно равное 0,95 или более ожидаемого установившегося превышения; Θ_1 — то же, но равно примерно 0,6 Θ_3 ; Θ_2 — то же в средней точке по времени между t_1 и t_3 .

Более точные результаты могут быть получены числовой экстраполяцией отсчетов от примерно 0,6 Θ к Θ_3 , с помощью которой можно получить установившееся превышение температуры, тепловую постоянную времени и их среднеквадратическую ошибку.

При этом ошибка составляет $\pm 0,5$ К, и может быть достигнуто сокращение времени испытания.

Рабочей группой 12.09 рекомендовано для экстраполяции применять следующую функцию [3]:

$$\Theta_i = \Theta[1 - \exp(t_0 - t_i)/\tau], \quad (2)$$

где Θ — установившееся превышение температуры; Θ_i — фактическое превышение при времени t_i ; t_0 — постоянная, позволяющая получить лучшее соответствие функции (2) большей части измерений; τ — постоянная времени для масла.

Первое измерение Θ_i производится через час после приложения испытательного тока. Критерием окончания испытания является 95 %-ный интервал доверия, равный 1 °С для Θ . При этом время испытаний может быть сокращено на 30—50 %.

Отмечаются следующие особенности современ-

ной практики определения температуры обмотки путем измерения сопротивления:

применение точного измерительного оборудования, использование компьютерной оценки и т. п. становится существенным в методах испытаний;

очень важно тщательное измерение холодного сопротивления обмотки. Приложение измерительного тока должно быть кратковременным. Температура трансформатора должна быть равновесной (использование насосов при их наличии);

должны быть предприняты необходимые меры для сокращения времени до первого измерения сопротивления кривой охлаждения, например до 0,5—1 мин;

длительность периода измерений должна быть равна 10—15 мин;

для экстраполяции должно быть использовано не менее 30 измерений;

применяемая для экстраполяции функция может представлять собой одну экспоненту или экспоненту с добавлением линейной составляющей для учета охлаждения масла;

постоянные для этой функции следует получить с помощью регрессивного анализа;

насосы и вентиляторы должны быть оставлены работающими при снятии кривой охлаждения (за исключением случая, указанного ниже).

Измерение средней температуры обмотки стандартизованным методом сопротивления иногда сопряжено с большими трудностями вследствие больших погрешностей и даже может оказаться вообще невозможным. После отключения источника обмотка быстро охлаждается, и ее сопротивление должно быть измерено как можно быстрее. В случае крупных трансформаторов это трудно осуществить из-за большой индуктивности. Обычные меры, применяемые для уменьшения переходной составляющей, включают увеличение постоянного тока до 5 % номинального (чтобы достичь быстрого насыщения и уменьшить индуктивность) и увеличение последовательного сопротивления. Эти меры уменьшают длительность переходного процесса, вызванного первоначальным скачком постоянного тока и дополнительным увеличением тока вследствие уменьшения сопротивления при охлаждении обмотки, но оказывают мало влияния на составляющую переходного процесса, вызванную циркулирующими токами. Эта составляющая преобладает в трансформаторах с замкнутыми цепями для циркуляции (например, обмотки НН, соединенные в треугольник, параллельные обмотки и т. д.), и длится так долго, что делает невозможными точные измерения сопротивления обмотки без специальных мер. Единственный надежный метод предотвращения значительных ошибок в измере-

ниях заключается в проверке наличия индуцированных напряжений на других, не обтекаемых током, обмотках или их частях при измерении сопротивления. В случае их наличия измерения могут производиться в соответствии со схемой на рис. 1, и тогда

$$R = u_R / i = (u - u_L) / i = (u_{AB} - \frac{n_1}{n_2} u_{ab}) / i = \\ = (u_{AB} + \frac{n_1}{n_2} u_{ba}) / i. \quad (3)$$

Для трехфазного трансформатора аналогичное выражение будет несколько сложнее. Чтобы определить максимальную длительность переходного процесса, необходимо устранить остаточную намагниченность изменением полярности при следующем измерении сопротивления [4].

Показано, что обычная практика определения суммарных потерь для испытаний на нагрев трехобмоточных автотрансформаторов (по формулам для трехобмоточных трансформаторов) при нагрузке всех трех обмоток дает завышенные значения (примерно на 4,5 %). Приведены более точные выражения для расчета общих потерь в автотрансформаторах по результатам трех опытов к. з. [4].

Показатели (x и y) экспонент превышения температуры масла над окружающей и обмотки над температурой масла при различной нагрузке, указанные в стандартах [1], являются приближенными и зависят от температуры масла [5]. Поэтому экстраполяция от номинальной нагрузки к перегрузке дает завышенные значения, поскольку показатель экспоненты градиента обмотка—масло $y = 1,6$ завышен. Это свидетельствует о том, что вязкость масла имеет неожиданно большое влияние на условия охлаждения.

Таким образом, коэффициенты x и y , приведенные в стандартах МЭК, требуют уточнения и могут быть использованы только при небольших коррекциях. Соответствующие коэффициенты для определения перегрузки могут быть получены непосредственно из испытаний.

Сравнение данных прямых измерений и результатов, полученных из испытаний на нагрев по МЭК [1], показывает, что ТНТ может быть определена с приемлемой точностью на основании результатов испытаний на нагрев. Такой расчет может быть сделан многоконтурным методом, при этом поправки кривой охлаждения основаны не на постоянных времени масла, как это рекомендовано МЭК [6], а по средней температуре масла в охладителях. Во время испытания в случае системы охлаждения ONAF вентиляторы должны оставаться включенными после отключения трансформатора, в противоположность [1], а в случае OFAF насосы должны оставаться включенными, а вентиляторы остановлены согласно [1]. Подтверждено значение 1,3 коэффициента превышения ТНТ над температурой верхнего масла [7]. Все же мнение о возможности определения ТНТ по результатам испытаний на нагрев разделяется только половиной специалистов. Другая половина считает необходимым прямые измерения ТНТ [8].

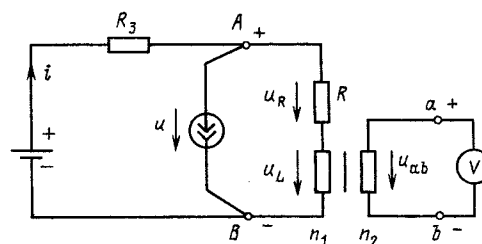


Рис. 1. Принципиальная схема измерений сопротивления обмотки с поправкой на индуцированное напряжение

Анализ растворенных газов при заводских испытаниях на нагрев практикуется почти всеми изготовителями. Рекомендованное время испытаний составляет не менее 12 ч, в течение которого полные потери выделяются в трансформаторе. Критерии оценки результатов этих испытаний, разработанные РГ-12-06, нашли широкое применение [9].

Некоторые потребители требуют проведения испытаний для определения фактической перегрузочной способности. IEEE подготовлены соответствующие рекомендации.

1.2. Прямое измерение температуры наиболее нагретой точки. Оценки нагрева, срока службы и допустимой перегрузки основываются на ТНТ. Только сравнительно недавно появилась возможность прямого измерения ТНТ посредством устройств волоконной оптики. Имеются два принципиально различных подхода. Первый связан с измерением температуры в одной точке, в этом случае оптический датчик помещен в конце оптического световода. Инфракрасное излучение после прохождения световода отражается чувствительным элементом датчика (на основе галлия и мышьяка) с изменением длины волны в зависимости от температуры датчика. Отраженный сигнал после преобразования характеризует температуру. Маслостойкий датчик имеет диаметр 1 мм и длину 5 мм, диаметр оптического световода 0,5 мм. Оптический световод покрыт двойным слоем акрилата для механической защиты. Имеются световоды длиной от 3 до 500 м. Диапазон рабочей температуры устройства от 0 до 200 °С, разрешающая способность 0,1 °С, точность ± 1 °С.

Второй метод, о котором сообщается впервые, основан на эффекте Реймана и позволяет получать результаты измерения температуры с регулярными интервалами вдоль длины световода [10]. В этом случае весь световод является датчиком температуры. Световая волна при прохождении вдоль волокна создает обратные рассеянные сигналы, которые в определенных условиях являются функцией температуры. Используя оптическую технику, можно определить среднюю температуру дискретной длины световода. Длительность измерения при приемлемой температурной разрешаемости может быть в пределах 10 мин. Ниже приведена типичная спецификация для распределенной волоконно-оптической системы измерения температуры:

длина волоконно-оптического световода 4 км (макс);

точность по расстоянию 1 м;
дистанционное разрешение 1 м;
точность по температуре $\pm 2^\circ\text{C}$;
температурное разрешение 1°C ;
время измерения 1—10 мин.

Большим преимуществом использования распределенного датчика является то, что в этом случае нет необходимости знать точное положение наиболее нагретой точки, что необходимо в первом методе.

Имеются определенные трудности установки чувствительного элемента датчика; некоторые изготовители размещают его на проводниках, другие — в пространстве между катушками.

Размещение распределенного датчика намного труднее [10].

Многие авторы подчеркивают важность прямого измерения ТНТ как для непосредственного знания величин при нагреве, так и для проверки математической модели, отражающей стационарные и динамические условия нагрузки.

Несмотря на важные преимущества прямого измерения, его использование все еще ограничено, в основном, экспериментальными работами. Возможно, надежность в течение длительного срока и проблемы градуировки не были достаточно продемонстрированы. Тем не менее оптические датчики выполнимы и не отражаются на работоспособности трансформатора.

1.3. Допустимая температура наиболее нагретой точки при перегрузках. Согласно преобладающему мнению предельно допустимая ТНТ при перегрузках ограничивается ее значением, при котором в изоляции начинается образование пузырьков газа, грозящих вызвать электрический пробой изоляции. Резкое ускорение старения изо-

ляции с повышением ее температуры заставляет устанавливать предельное значение ТНТ на уровне $130\text{--}140^\circ\text{C}$. Были проведены экспериментальные работы по определению условий образования пузырьков газа. Установлено, что однозначно нельзя определить температуру, при которой начинается образование пузырьков. Наиболее важными факторами, влияющими на образование пузырьков, являются:

- влагосодержание изоляции;
- газосодержание масла;
- гидростатическое давление в месте ТНТ;
- длительность ТНТ;
- степень риска, определяемая частотой случаев и условиями в системе.

Если рассматривать безопасное предельное значение при единичном воздействии, то оно по общему мнению составляет 140°C и приемлемо как с точки зрения старения, так и отсутствия образования пузырьков газа.

Результаты экспериментов на моделях, а также расчетов с помощью математической модели позволяют сделать следующие выводы:

1. Статическое давление столба масла высотой 1 м может увеличить критическую температуру начала образования пузырьков газа на $15\text{--}20^\circ\text{C}$.

2. Система защиты масла эластичной мембраной, поддерживающей низкое газосодержание масла, может повысить критическую температуру на 20°C .

3. Начальная нагрузка перед перегрузкой может снизить влагосодержание в витковой изоляции до значений менее половины среднего влагосодержания целлюлозной изоляции в трансформаторе. Это может повысить критическую температуру на $15\text{--}25^\circ\text{C}$.

4. Так как масло и обмотки имеют постоянную времени, большая нагрузка может быть допущена в течение короткого времени, прежде чем температура проводника достигнет опасного значения, т. е. допустимая перегрузка без образования газовых пузырьков является функцией времени.

Рис. 2, 3 и 5 иллюстрируют роль влагосодержания и газосодержания в масле. Примерная температура образования пузырьков газа для трех кривых на рис. 2 составляет 190°C при влагосодержании 0,5 %, 165°C при 1,0 % и 135°C при 2,0 %. При таких же трех значениях влагосодержания температура образования пузырьков возрастает до 204, 187 и 158°C соответственно при мембранной защите масла и 5 % азота, растворенного в масле.

Для сопоставления в табл. 1 приведены допустимые ТНТ согласно последней публикации МЭК-354 «Руководство по нагрузке» и публикации IEEE-756 «Руководство по нагрузке силовых трансформаторов мощностью свыше $100\text{ МВ}\cdot\text{А}$ ».

1.4. Диагноз старения путем определения содержания CO_2 и CO [11]. При термическом старении целлюлозной изоляции образуются газы (H_2 , CO_2 , CO) и различные углеводороды. Исследования образцов целлюлозной изоляции в

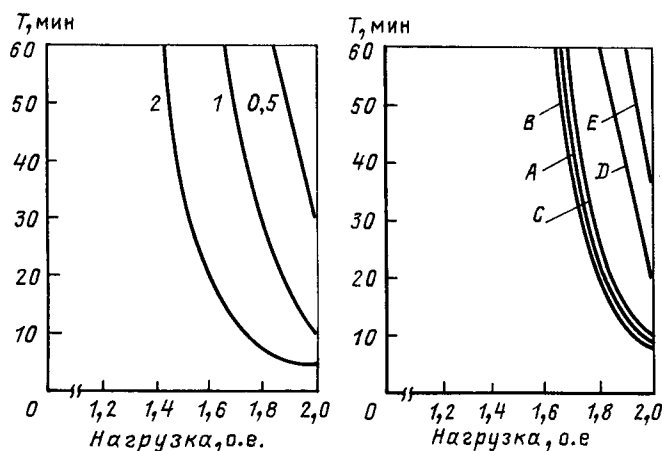


Рис. 2.

Рис. 3.

Рис. 2. Зависимости времени создания условий для образования пузырьков газа от перегрузки при среднем влагосодержании твердой изоляции (%) от перегрузки в долях от номинальной нагрузки (предшествующая нагрузка до 0,75 номинальной, азотная защита с давлением азота $1,5 \cdot 10^5$ Па)

Рис. 3. Зависимости времени создания условий для образования пузырьков газа от перегрузки при предшествующей нагрузке 0,75 в долях номинальной: А — открытый расширитель; В — азотная защита $1,2 \cdot 10^5$ Па; С — то же, $1,5 \cdot 10^5$ Па; D — расширитель с мембраной, 5 % азота в масле; E — то же, 0 % азота в масле

Таблица 1

Вид нагрузки	Допустимые значения ТНТ	
	IEEE	МЭК (большие трансформаторы)
Нагрузка, соответствующая нормальному сроку службы	120 °С	120 °С
Допустимая нагрузка сверх номинальной	130 °С	—
Длительная перегрузка	140 °С	130 °С
Кратковременная перегрузка	180 °С	160 °С

процессе их термического старения позволили определить соотношения между общим количеством выделившейся суммы газов $\text{CO}_2 + \text{CO}$ за время полного старения и степенью старения, определяемой по значениям механической прочности и степени полимеризации целлюлозной изоляции (бумаги и картона).

На рис. 4 приведено соотношение количества выделившегося газа при старении до определенной степени полимеризации, а на рис. 5 — скорость выделения газов в зависимости от температуры.

Для оценки состояния изоляции необходимо учесть, что витковая изоляция (бумага) и остальная изоляция (главным образом, картон) имеют разную температуру. С учетом этого, а также учитывая, что бумага витковой изоляции, имея более высокую температуру, выделяет около 80 % газа, были получены следующие граничные значения количества суммы газов (в зависимости от веса витковой изоляции):

- нормальные условия (срок службы 30 лет) — менее 0,53 мл/г;
- умеренно ускоренное старение — 0,53—2,1 мл/г;
- ненормальное ускоренное старение — более 2,1 мл/г.

Эти граничные значения нанесены на графике рис. 6. Если скорость образования суммы газов $\text{CO}_2 + \text{CO}$ в трансформаторе равна, например, $1 \cdot 10^{-6}$ мл/г·ч, то трансформатор будет иметь срок службы более 30 лет (А). Если же скорость увеличится, то срок службы может быть менее 30 лет (В), если вновь уменьшится (С), то срок службы — более 30 лет.

На основании проведенных анализов в Японии выведены из эксплуатации несколько трансформаторов и заменены новыми. Метод позволяет ставить диагноз о степени старения изоляции без отключения трансформатора.

1.5. Современная практика перегрузки трансформаторов. Большинство трансформаторов эксплуатируется с нагрузкой ниже номинальной. Возможно, это происходит из-за недостатка информации и знания надежных запасов по перегрузке. Однако экономическая целесообразность диктует более рациональное использование трансформаторов.

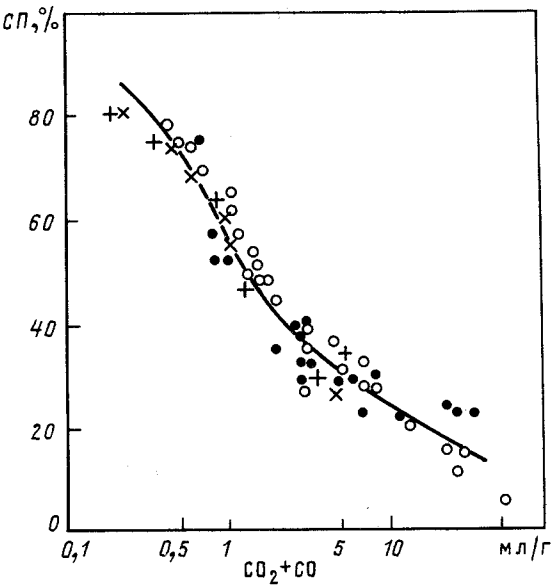


Рис. 4. Зависимость средней степени полимеризации (СП) от количества суммы газов $\text{CO}_2 + \text{CO}$ на единицу веса целлюлозной изоляции при ее тепловом старении в трансформаторном масле (для бумаги: $\circ$ — добавлен кислород; $\bullet$ — добавлена вода, $\times$ — без добавки кислорода и воды; для картона: $+$ — без добавки кислорода и воды)

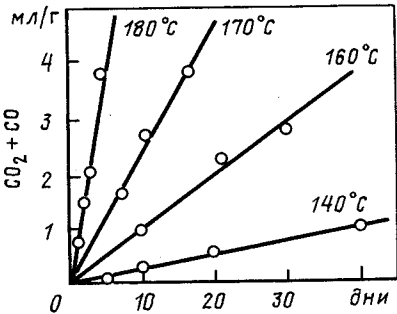


Рис. 5. Образование газов $\text{CO}_2 + \text{CO}$ в зависимости от времени нагрева при разной температуре

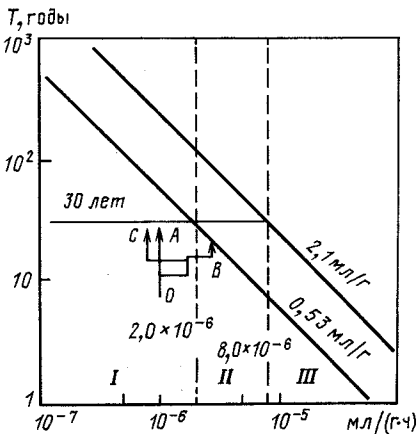


Рис. 6. Соотношение скорости образования газов $\text{CO}_2 + \text{CO}$ и времени старения бумаги в трансформаторе, Т: I — область нормального старения; II — область умеренно ускоренного старения; III — область сильно ускоренного

Нижеприведенные данные относятся, главным образом, к практике *CEGB* (Великобритания).

Генераторные трансформаторы обычно работают при нагрузке не выше номинальной; если случаются перегрузки, они не превышают 1,05 номинальной нагрузки. Даже в аварийных условиях в системе перегрузки 1,1 номинальной нагрузки могут быть только относительно короткое время. В случае сетевых трансформаторов практика более часто соответствует рекомендациям МЭК-354. Обычно устанавливаются два трансформатора, и при выходе из строя одного из них оставшийся должен нести полную нагрузку. При этом применяется концепция «длительной аварийной нагрузки» согласно МЭК-354. Однако в настоящее время ТНТ ограничивается 120 °С, причем при ее определении применяется допущение — умножение на коэффициент 1,1 градиента «средняя обмотка — среднее масло». На практике могут быть существенные отличия от этих правил в зависимости от особенностей конкретных трансформаторов и рекомендаций изготовителей.

Изучение повреждений в эксплуатации не дает указаний на их связь с перегрузками.

Большинство экспертов считают 140 °С максимально допустимой ТНТ при любых условиях перегрузки. Допустимый пик нагрузки — 1,35—1,5 номинальной в зависимости от длительности перегрузки и окружающей температуры. Некоторые потребители требуют проведения испытаний с определенным графиком перегрузки, чтобы подтвердить способность трансформатора выдерживать их. Приемочным критерием при таких испытаниях является согласованный с потребителем допустимый уровень растворенных в масле газов.

1.6. Заключение к разделу 1. Приведенные данные по измерениям фактического значения температуры наиболее нагретой точки и ее допустимости для изоляции позволяют совершенствовать политику и практику определения допустимых перегрузок трансформаторов.

Широкое применение опτικο-волоконных датчиков температуры наиболее нагретой точки позволяет получить необходимую информацию для определения фактического нагрева трансформатора и усовершенствования тепловой модели, принятой в стандартах.

2. Большие генераторные трансформаторы. Большие генераторные трансформаторы (БГТ) являются одной из основных частей энергосистемы, и их повреждение вызывает потерю блока источника энергии и очень большие убытки. Недавно несколько БГТ сверхвысокого напряжения были повреждены в эксплуатации без видимых причин. Поэтому необходимо детальное исследование проблемы.

2.1. Повышение рабочего напряжения. БГТ имеют очень высокую капитализированную стоимость нагрузочных потерь. Поэтому для создания более экономичного проекта применяется магнитопровод с высокой индукцией — 1,75—1,85 Тл. Значение индукции ограничивается повышениями рабочего напряжения.

Ограничения накладываются также требова-

нием МЭК о том, что БГТ должны выдерживать повышения напряжения до 1,4 номинального в течение 5 с при внезапном сбросе нагрузки. Между тем, по сообщениям, были зарегистрированы перенапряжения от 1,13 в течение 12 с до 1,3 в течение 3 мин. В последнем случае температура в магнитопроводе достигала 250 °С при номинальной индукции 1,65 Тл, что привело к повреждению изоляции магнитопровода.

Сообщалось об очень большом перевозбуждении в системе, состоящей из большого генератора, питающего сеть 420 кВ через два БГТ и длинную двухцепную линию. После к. з. в сети 420 кВ могли иметь место два режима:

а) отключение на стороне ВН БГТ. Это нормальный случай, и повышение напряжения составляет примерно 1,34 номинального;

б) отключение на конце длинной линии. Вследствие резонанса на 5-й и 7-й гармониках в токе насыщения для двухцепной линии на вводе БГТ возникают очень высокие напряжения. Расчеты были получены значения 1,93—2,3 номинального при обычных характеристиках системы. Их длительность составляет несколько секунд, и они должны учитываться при координации изоляции трансформатора [2, 12].

С другой стороны, применение правильной последовательности отключения в сочетании с защитой от перевозбуждения на принципе «напряжение—частота» позволяют устранить возбуждение генератора. В этом случае максимальное восстанавливающееся напряжение при отключении выключателя на ВН БГТ составило 1,13 номинального в течение 0,8 с. Поэтому кратковременное перевозбуждение обычно не вызывает проблем.

2.2. Поле рассеяния. Проблемы, связанные с полем рассеяния ВГТ, возникают, главным образом, вследствие очень больших токов в обмотках НН, их междофазных соединениях, отводах и вводах. Эти токи создают сильное магнитное поле, способное индуцировать напряжение и циркулирующие токи в частях магнитопровода, в его крайних листах, а также в стенках и крышке бака. Циркулирующие токи в листах магнитопровода могут нарушить изоляцию листов и вызвать пожар в железе.

Для устранения или уменьшения нежелательных последствий рекомендуются следующие меры: разделение крайних листов или применение шунтов для защиты магнитопровода;

уменьшение магнитного поля у поверхности магнитопровода применением двухслойной обмотки НН с началом и концом обмотки вверх;

удаление обмотки НН от стержня магнитопровода с помощью разделения обмотки ВН на две концентрические части;

применение электромагнитных экранов между отводами НН и конструктивными узлами, а также баком.

Особо обращается внимание на аналогичные решения для БГТ с предусмотренными большими перегрузками в течение длительного времени.

Ударные токи, насыщающие магнитопровод, могут индуцировать большие токи в контурах, образуемых деталями прессовки. Болтовые контакты в этих конструкциях могут приобрести очень высокую температуру в короткое время [12].

Шины, присоединяемые к выводам обмоток НН, в эксплуатации в некоторых случаях существенно увеличивают температуру стенок бака по сравнению с той, что была получена при испытаниях на заводе без этих шин [13].

Широко применяется для обмоток НН транспортированный провод — состоящий из большого количества проводников (до 85), склеенных эпоксидной смолой, придающей проводу большую механическую прочность при температуре до 140 °С.

Считается целесообразным заваривать разъем бака, что позволяет избежать циркулирующих через болты токов, вызывающих высокие температуры и разложение уплотняющих материалов.

В качестве уплотняющих материалов, достаточно стойких к возникающей температуре, применяются пробка и нитрильная резина, опыт применения которых положителен.

2.3. Повреждения в эксплуатации. Высокая повреждаемость БГТ напряжением 765 кВ в системе АЕР (American Electric Power Corporation, США) вызвала необходимость проведения исследований причин повреждений и введения изменений в спецификацию приемочных испытаний. Система эксплуатируется свыше 20 лет и имеет 24 БГТ (765/25 кВ, бронева конструкция, слоевая обмотка ВН), 72 автотрансформатора и 84 шунтирующих реактора. За это время были повреждены 8 БГТ, их повреждаемость составила 2,3 % в год. Все повреждения связаны с нарушением изоляции. Большинство повреждений происходило при полном отсутствии каких-либо возмущений в системе, таких как повышений рабочего напряжения, коммутаций, замыканий и пр. 5 БГТ были повреждены в течение первого года их эксплуатации, в том числе в течение первых месяцев, дней и даже часов. 3 повреждения произошли, когда БГТ были отключены от генератора и возбуждались со стороны 765 кВ.

Были проведены подробные исследования возможных причин повреждений. При этом обращено внимание на следующее. Испытательные грозовые и коммутационные импульсы, предусмотренные стандартами, являются представителями большого разнообразия форм, встречающихся в эксплуатации. Правомерность такого представительства для более низких классов напряжения доказана многолетней практикой. Однако для более сложной изоляции, какой является изоляция БГТ 765 кВ, положение может быть другим. Обращено внимание на необходимость учета влияния рабочего напряжения, увеличивающего скачок импульсных напряжений, при координации испытательных напряжений и остающегося напряжения разрядника. Общепринято считать, что прочность изоляции при коммутационных импульсах (КИ) составляет

83 % прочности при полном грозовом импульсе (ПГИ). Однако при отрицательной полярности КИ масляные промежутки более 200 мм имеют прочность только 60—70 % прочности при ПГИ отрицательной полярности. Кроме того, несколько последних повреждений связаны со статической электризацией, возникающей при больших скоростях масла в изоляционных каналах и других местах.

Поскольку большинство повреждений БГТ имело место при спокойных условиях системы, по-видимому, необходимо повысить испытательное напряжение возбуждением промышленной частоты.

Комбинированный эффект формы импульсов, положения выводов, не подвергнутых прямому воздействию импульса, скорости масла, могущей создать электростатическую электризацию, и другие условия в эксплуатации могут вызвать существенные отличия от условий испытаний на заводе. Поэтому была принята программа усовершенствования спецификации испытаний из пяти разделов: 1) увеличение испытательных напряжений для увеличения запасов изоляции; 2) отказ от жесткого требования значения импеданса к. з., что позволяет упростить обмотки и изоляцию; 3) анализ конструкции с точки зрения уменьшения электрических, механических и тепловых воздействий; 4) анализ прочности изоляции при нестандартных формах воздействий; 5) усовершенствование приемочных испытаний изоляции с целью более полного учета условий эксплуатации.

Высокая повреждаемость отмечена также в системе Гидро—Квебек (Канада). За последнее время здесь были повреждены шесть БГТ мощностью 400 МВ·А напряжением 735/13,8 кВ (стержневая конструкция, обмотка ВН дисковая). Повреждалась главная изоляция. Были проведены исследования возможных форм грозовых коммутационных перенапряжений, воздействующих на трансформатор. Выявлено, что перенапряжения в изоляции трансформатора при испытаниях КИ (амплитуда 1425 кВ) меньше, чем при реальных воздействиях в эксплуатации [14].

2.4. Переходные процессы. БГТ обычно имеют большой коэффициент трансформации. Обмотка НН может подвергаться сильным воздействиям переходных напряжений, трансформируемых емкостным и индуктивным путем при питании со стороны ВН.

Иногда применяется заземленный электростатический экран между обмотками ВН и НН, чтобы устранить емкостную передачу. Однако это увеличивает размеры БГТ.

В Европе защита обмоток НН обычно выполняется с помощью внешних конденсаторов, подключаемых между фазой и землей, однако при вводе в середину обмотки ВН и при воздействии срезанных импульсов очень высокие напряжения могут возникать в средней части обмотки НН. В этом случае электростатический экран может оказаться необходимым.

Несколько больших трансформаторов с РПН

были повреждены в эксплуатации из-за резонансных явлений.

Резонансные перенапряжения в обмотках при частотах менее 250 кГц могут иметь амплитуды в 10 раз выше, чем при линейном распределении в основной части обмотки ВН, и в 20 раз — чем в регулировочной обмотке [15].

В результате измерений при частотах порядка 1 МГц было обнаружено многократное (в 70—270 раз) увеличение напряжения в регулировочной обмотке вследствие резонанса. При таких высоких частотах большие трудности представляют сами измерения. Фактически в эксплуатации перенапряжения будут меньше, так как воздействие ограничено во времени и синхронность воздействия порядка 6 импульсов вряд ли возможна. Однако все же перенапряжения такого характера могут быть значительно больше напряжения на входе трансформатора.

Измерения на подстанции показывают также, что очень крутые воздействующие импульсы, возникающие в элегазовых расцепителях (РУ) при пробоях изоляции, возбуждают резонансные повышения напряжения непосредственно в начале обмотки до двойного значения против напряжения, воздействующего на трансформатор в зависимости от места повреждения и конфигурации РУ. Грозные разрядники в этом случае не могут защитить трансформатор. В то же время были выражены сомнения в необходимости при проектировании трансформаторов учитывать воздействие такого характера с амплитудой, равной нормированной для испытательного ПГИ. Защитные меры необходимо предусматривать в РУ и присоединенной сети.

Анализ прочности изоляции при нестандартных воздействиях производится путем расчета в следующем порядке: 1) различные комбинации длительности фронта и времени до полуспада импульса для ПГИ и КИ; 2) разное положение вводов обмотки НН при воздействии ПГИ на обмотку ВН; 3) реакция обмотки НН (ВН) при воздействии импульса с крутым фронтом и большой длительностью на ввод ВН (НН) (эти расчеты позволяют определить собственные резонансные частоты); 4) перенапряжения в обмотке НН (ВН) при приложении колебательного КИ к обмотке ВН (НН). Частота колебаний выбирается равной основной частоте, определенной в п. 3, а затухание принимается таким, чтобы отношение двух последующих пиков составило 0,9.

2.5. Усовершенствование испытаний. Целью испытаний трансформаторов является: во-первых, проверить соответствие гарантированным параметрам и, во-вторых, проверить качество и надежность в эксплуатации. Универсальное применение находят стандарты на испытания (МЭК, ANSI и др.). Однако некоторые особенности больших трансформаторов и, в частности, БГТ не полностью учитываются этими стандартами. Это следует из представленных докладов. Обсуждались недостатки существующих методов испытаний, а также новые требования к испытаниям.

В докладе [13] предложены два испытания

на активной части: точное измерение активного сопротивления обмоток, особенно НН, в качестве контроля большого числа соединений параллельных проводников и опыт к. з. при 20 % номинального тока для определения местных нагревов с помощью термовизора.

При высокой капитализированной стоимости потерь важно измерять потери с достаточной точностью. Для трансформаторов большой мощности это трудная задача. Чтобы избежать искажения синусоидальной формы кривой напряжения при измерениях потерь холостого хода, необходимо иметь источник большой мощности с низким собственным сопротивлением. Приемлемый предел содержания высших гармоник в кривой напряжения не должен превышать 5 %, в этом случае справедлива формула МЭК для поправки [13].

При измерении нагрузочных потерь возникают другие проблемы: необходимость в источнике, способном обеспечить выдачу номинального тока трансформатора, и обеспечение высокой точности измерений при коэффициенте мощности до 1 %. Современные измерительные системы обеспечивают точность 1,5—2 %.

На основе проведенных исследований причин повреждений БГТ в докладе [16] сделан вывод о необходимости существенного изменения спецификации испытаний изоляции. Введены два дополнительных испытания:

а) Прямое включение (ПВ), имитирующее включение трансформатора на максимуме рабочего напряжения. ПВ представляет собой воздействие импульсов 1,2/2000 мкс с амплитудой, равной 1,3 номинального напряжения, при выбранном для испытаний положении переключателя.

б) Специальное испытание ПГИ, которое воспроизводит случай отключения БГТ от генератора. При этом испытании выводы обмотки НН либо остаются изолированными (не подключенными к шинам), либо к ним подсоединяется небольшая емкость на землю (20 нФ), имитирующая емкость шин. На обмотку ВН при этом испытании воздействует стандартный ПГИ.

Старая и новая спецификации испытаний, предложенные в докладе [16] для БГТ мощностью 500 МВ·А и напряжением 25/765 кВ (АЕР), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вид испытания	Напряжения для старой и новой спецификаций испытаний (кВ)			
	Старая		Новая	
Обмотки	765	25	765	25
Прямое включение на полное возбуждение	—	—	812*	—
Полный грозовой импульс	1800	150	2050	200
Срезанный грозовой импульс	2070	175	2360	230
Коммутационный импульс	1500	—	1700	—
Индукционное напряжение	785/690**	—	883/795***	—

Примечания. * — При положении переключателя, соответствующем напряжению 765 кВ. ** — Длительность 720 циклов и 1 ч. *** — Длительность 5 с и 1 ч.

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, новой спецификации существенно увеличены уровни испытательных напряжений. Заметим, что это находится в противоречии с тенденцией, существующей в СССР. В докладе [17] описан БГТ на напряжение 500 кВ со значительно сниженными испытательными напряжениями.

Методы приведенных выше испытаний соответствуют требованиям *ANSI*. При этом последовательность приемочных испытаний была принята следующей: прямое включение на полное возбуждение, специальное испытание полным грозовым импульсом, коммутационный импульс, полный грозовой импульс, индуцированное напряжение (ИН). К требованиям стандартов *ANSI* добавлены следующие:

1. Так как БГТ 765 кВ имеют большую емкость, были изменены требования к фронту ПГИ (+30 %) и разрешено увеличить его до 2 мкс. Что касается длины ПГИ, рекомендовано сохранить допуск (—20 %) и придерживаться его как можно ближе.

2. Заказчик (*AEP*) выбирает два положения переключателя для испытаний ПГИ и ИН на первом трансформаторе. Приемочные испытания последующих БГТ данного типа проводятся при одном положении, выбранном по результатам испытаний первого.

3. Следующее изменение касается статической электризации. Все насосы должны быть в работе до и во время испытания ИН. Специальное испытание было выполнено на первом БГТ для определения времени стабилизации токов электризации (см. ниже).

4. Следующее изменение заключается во введении требования измерений как уровня радиопомех (*RIV*), так и кажущегося заряда ЧР на всех незаземленных выводах при испытаниях ИН.

5. Три модификации были введены в методы испытания ИН, предписываемые *ANSI*. Первое — это замена периода 7200 циклов, установленных *ANSI*, на 5 с, нормированные МЭК. Второе: как указано выше, уровни испытательных ИН были подняты до значений 2,0/1,8 рабочего. Третья модификация заключается в следующем. Согласно *ANSI* уровень *RIV* во время одночасового испытания должен составлять не более 100 мкВ с повышением не более 30 мкВ, все эти измерения — после кратковременного повышения напряжения. *AEP* потребовала, чтобы отметка уровня до 100 мкВ была произведена также непосредственно перед кратковременным повышением напряжения.

Перед испытаниями технологическая обработка изоляции трансформаторов 765 кВ согласно существующему опыту должна обеспечить следующие параметры изоляции: содержание в масле твердых частиц размером 3—150 мкм — менее 1500 в 10 мл; влагосодержание — менее 10 частей на миллион по весу.

2.6. Исследование статической электризации. В докладе [16] приводится описание исследований статической электризации в связи с повреждениями БГТ. Установлено, что наибольшая элект-

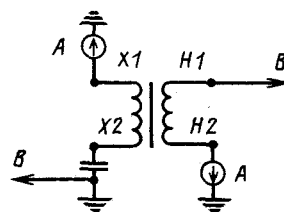


Рис. 7. Измерение тока утечки при статической электризации: А — электрометр; В — измерение ЧР

ризация возникает при 20 °С (при более низкой температуре опыты не проводились) и уменьшается с повышением температуры. При 20 °С максимальное увеличение напряженности на краю катушки в модели за счет электризации составило 10 %. С помощью модели была определена максимальная скорость масла, равная 0,22 м/с, оптимальная с точки зрения электризации и охлаждения.

Статическая электризация была проверена на невозбужденном БГТ. Электрометры были подсоединены к точке *X1* обмотки НН (рис. 7) и *H2* обмотки ВН для измерения тока утечки при электризации. С других выводов производились измерения ЧР. Ток электризации в точке *H2* достиг наибольшего значения 120 нА через 15 мин после запуска насосов (рис. 8), что примерно соответствовало увеличению напряженности в модели, указанному выше. Масло при этом имело температуру 31 °С (склонность масла к статической электризации — 102 мкКл/м³).

За 15 мин до испытания ИН были включены насосы системы охлаждения и были оставлены в работе во время испытания. В соответствии с результатами предварительных исследований температура во время испытаний была принята равной около 20 °С. Уровни ЧР составляли 55—85 мкВ и 151—259 пКл на обмотке ВН и 35—43 мкВ и 348—467 пКл на обмотке НН.

2.7. Дальнейшие усовершенствования испытаний. В докладе [16] предлагаются следующие направления дальнейших исследований:

1. Анализ воздействия на изоляцию различных форм перенапряжений, включая воздействия

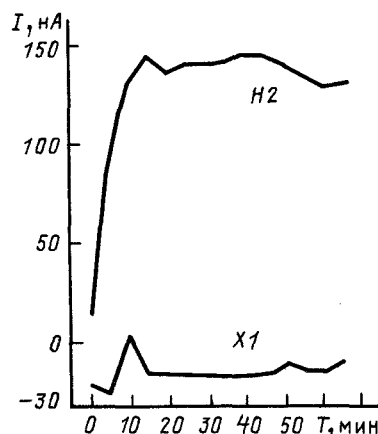


Рис. 8. Зависимость тока утечки при статической электризации в схеме на рис. 7 от времени

при близком включении и выключении электро-снабжения, при наложении импульсов на напряжение 50 Гц, при однофазных замыканиях и пр.

2. При заводских испытаниях необходимо учитывать сильное влияние положения неиспытываемых концов обмоток на параметры воздействующих испытательных ПГИ, срезанных грозовых импульсов и ПВ и, что особенно важно, на собственные частоты не только испытываемых обмоток, но и подключенных линий, а через соединенные в треугольник обмотки НН — на другие две фазы трехфазной группы. Способы учета этих влияний при испытаниях подлежат разработке.

3. Необходимо принять во внимание фактические параметры имеющихся импульсных генераторов, которые не всегда позволяют получить требуемые параметры испытательных воздействий. Одно из возможных решений — увеличение амплитуды в качестве компенсации отклонения формы импульса.

4. Исследования показывают, что испытательное напряжение для испытаний ПВ должно быть увеличено до двойного номинального напряжения.

5. Исследования тепловой и механической стойкости должны быть существенно расширены.

2.8. *Перегрузки и охлаждение.* Очень большие генераторы часто питают два БГТ. Это вызвано транспортными ограничениями для больших трансформаторов, а также соображениями надежности энергоснабжения: в случае выхода из строя одного трансформатора второй может нести повышенную нагрузку. При этом может быть допущена более высокая температура и включены дополнительные охладители. Для этого же в трансформаторе может быть применена термостабильная бумага. В докладах [12, 15] описаны такие трансформаторы. Некоторые потребители требуют, чтобы БГТ имели повышенную перегрузочную способность. Например, требуется, чтобы температура не превышала значений, указанных в стандартах, но при длительной нагрузке, равной 130 % номинальной.

При повреждении одного из двух параллельно работающих БГТ оставшийся может подвергаться действию больших токов к. з. (например, на 40 %, как в случае, описанном в [12]).

2.9. *Переключатели.* В некоторых странах переключатели в БГТ не применяются, в других применяются переключатели под нагрузкой и без. Часто переключатели не используются за все время эксплуатации БГТ. Проведенный анализ повреждаемости БГТ показывает, что наиболее часто повреждаются переключатели РПН и вводы [13]. Большинство повреждений переключателей происходит вследствие образования сульфата серебра на поверхности серебряных пластин контактов из-за наличия даже малого содержания серы в трансформаторном масле. Был произведен следующий опыт с переключателем РПН, имеющим контакты с серебряными пластинами. Масло содержало 0,5 частей серы на миллион по весу. Уже через 7 суток в масле при температуре 75 °С и номинальном токе через кон-

такты было отмечено заметное увеличение сопротивления контактов. Свободная сера перешла сульфат серебра темного цвета на контактах. Рекомендуются профилактические переключения редко используемых переключателей каждый год. Много проблем возникает также в связи с переключателями для переключений без нагрузки. В большинстве случаев в качестве профилактики требуется, по крайней мере, раз в год произвести переключения по всем позициям.

2.10. *Заклучение к разделу 2.* Большие генераторные трансформаторы классов напряжения 500 и 750 кВ в некоторых случаях имеют высокую повреждаемость. Спецификация приемочных испытаний этих трансформаторов не отвечает условиям их эксплуатации и особенностям конструкции.

Предложения о введении существенных изменений в спецификацию испытаний, по мнению их авторов, позволяют привести испытания в лучшее соответствие воздействиям в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Power transformers: temperature rise.— IEC, Publication 76-2.
2. Hurter T. Special report for group 12 (transformers).— CIGRE, 1990, rep. 12.00.
3. Heat-run test procedure for power transformers.— Electra, 1990, N 129.
4. Godéc Z. How to eliminate some systematic errors in transformer temperature-rise measurements.— CIGRE, 1990, rep. 12.101.
5. A survey of facts and opinions on the maximum safe operating temperature of power transformers under emergency conditions.— Electra, 1990, N 129.
6. Loading guide oil-immersed power transformers.— IEC, Revision of Publication 354. Draft 14 (Central Office) 71-111, 1987.
7. Nordman H., Hironniemi E., Pesonen A. J. Determination of high-spot temperature rise at rated load and at overload.— CIGRE, 1990, rep. 12.103.
8. Direct fibre-optic high-spot temperature measurement in an operating transformer / J. Poittevin, J. Samat, I. Hénnebique, A. Tanguy — CIGRE, 1990, rep. 12.106.
9. Dietrich W. Final report of Working group 06 of Study Committee 12 (transformers).— Electra, 1982, N 82.
10. Thermal assessment of transformers / A. White, M. R. Daniels, G. Bibby, S. Fisher — CIGRE, 1990, rep. 12.105.
11. Goto K., Tsukioka H., Mori E. Measurement of winding temperature of power transformers and diagnosis of ageing deterioration by detection of CO₂ and CO.— CIGRE, 1990, rep. 12.102.
12. Some designing, testing and reliability problems related to large generator transformers / P. Jezerski, M. Kazmierski, A. Ketner, M. Kozlowski — CIGRE, 1990, rep. 12.201.
13. Kroon C. Large generator transformers.— CIGRE, 1990, rep. 12.208.
14. Dielectric stress in 735 kV generator transformers under operating and test conditions / R. Malewski, J. Douville, L. Lavalley, D. Tschudi — CIGRE, 1990, rep. 12.203.
15. Flottmeyer F., Kotschnigg J. Aspects of design, tests and operation of an 850 MV. A standardized generator transformer.— CIGRE, 1990, rep. 12.206.
16. Rationale and implementation of a new 765 kV generator step-up transformer specification / L. B. Wagenaar, J. M. Schneider, J. H. Provanzana et al.— CIGRE, 1990, rep. 12.202.
17. Large space saving generator transformer for seismic regions / I. A. Boroday, V. M. Chornogotsky, R. P. Dotuk, L. N. Shifrin — CIGRE, 1990, rep. 12.204.

[20.03.91]

Защита от перегрузки по току проводов воздушных линий электропередачи¹

ПЕТРОВА Т. Е., канд. техн. наук, ФИГУРНОВ Е. П., доктор техн. наук

Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта

Допустимые длительные токи для проводов линий электропередач регламентированы ПУЭ [1] и зависят от многих факторов, к которым относятся такие, как допустимая температура провода, температура окружающей среды, скорость движения воздуха. Как правило, учет влияющих факторов всегда осуществляется с определенным запасом. Так, допустимая температура проводов в ПУЭ [1] принята равной 70 °С, а для тех же проводов, используемых на электрифицированных железных дорогах, длительно допустимая температура принимается 90 °С и выше [2]. Поэтому в реальных условиях в особых случаях линию электропередачи можно перегружать; особенно это относится к послеаварийным и вынужденным режимам, плановым и аварийным отключениям [3, 4]. Для того чтобы надежно предупредить возможность случайного перегрева и пережога проводов в подобных режимах, линию электропередачи необходимо оборудовать соответствующей релейной защитой.

Требования к условиям функционирования защиты от перегрузки определяются тем, какие выдержки времени могут быть допущены при разных температурах провода. Во многих случаях рекомендуется команду на отключение формировать при нагреве проводов до нормативного значения длительно допустимой температуры. Однако такое решение не всегда можно признать обоснованным, поскольку длительно допустимая температура для провода не опасна и она приводит лишь к недоиспользованию перегрузочной способности линии. Более высокие температуры могут вызвать нарушение прочности металла, однако для такого исхода необходимо время, причем тем большее, чем меньше отличается температура от длительно допустимой [5]. Поскольку это время может достигать значения не только единиц, но и десятков минут, и в течение него можно принять меры для уменьшения нагрузки линии (или произойдет ее естественное уменьшение), то использование такого перехода позволит существенно влиять на устойчивость электрооборудования без снижения надежности функционирования линии.

Таким образом, для обоснования требований к защите линии от перегрузки необходимо совместное рассмотрение теоретических основ процесса нагрева провода и его термической прочности, что является особенностью статьи. Полученная математическая модель функционирования защиты от перегрузки в наиболее обобщенном ви-

де требует использования ЭВМ (микропроцессора) с входной информацией либо о температуре провода, либо о токе, скорости ветра и температуре окружающей среды. Упрощенная модель, ориентированная на некоторые предельные значения влияющих факторов, может быть выполнена в виде реле тока с зависимой выдержкой времени на интегральных микросхемах.

Рассмотрены алгоритмы функционирования защиты для двух случаев. В первом из них предполагается, что стрела провеса провода при перегрузке не выходит за пределы нормативного габарита (линии 6—35 кВ, контактные сети постоянного и переменного тока городского и железнодорожного транспорта, а также линии более высокого напряжения с повышенными габаритами). Второй случай относится к линиям напряжением 110 кВ и выше, для которых допустимая перегрузка ограничивается не термической прочностью проводов, а габаритами до земли [4]. Экспериментальные исследования и проверка теории осуществлялись на специальном аэродинамическом стенде, на котором скорость ламинарного воздушного потока могла изменяться до 10 м/с, а токи в проводах — до 2000 А.

Наиболее достоверно судить о температуре провода можно при использовании различного рода датчиков температуры. Однако из-за сложностей, связанных с конструкцией и эксплуатацией гальванической развязки (при установке датчиков непосредственно на проводах ЛЭП) и каналов передачи данных, такой способ пока не получил широкого распространения, равно как и способ построения натурных аналогий, хотя перспективы этих направлений представляются обнадеживающими. Так, например, в [6] описана разработанная в США система, состоящая из датчиков и радиопередатчиков, устанавливаемых на проводе линии электропередачи и наземной приемной станции. Система измеряет, хранит в памяти и может передавать дальше данные о значениях электрического тока, напряжения, температуры провода и окружающего воздуха, скорости ветра. Установленная на ВЛ 66 кВ, такая система дала возможность увеличить нагрузку линии на 23 % выше расчетной, что позволило сэкономить более 300 тыс. долл за счет отказа от перемонтажа одной из ВЛ. Такая система, при всех ее достоинствах и отмеченных выше недостатках, оставляет открытым вопрос о том, при каких условиях линию надо отключать.

Косвенные данные о температуре провода, как известно, можно получить на основании анализа математической модели процесса его нагрева; при этом необходимо учитывать изменения тока в ли-

¹ Статья печатается в порядке обсуждения. Отклик на статью см. в разделе «Дискуссии».

нии и условий окружающей среды. Особенностью приведенных ниже обоснований является то, что в их основу положены одновременно две математические модели: уточненная модель процесса нагрева провода и модель его термической прочности. Структурная схема защиты с косвенным определением температуры приведена на рисунке, где Q — выключатель линии; TA — трансформатор тока; BK — датчик температуры окружающей среды; BV — датчик скорости ветра, AK — вычислительный комплекс (комплект защиты), на входы которого поступает информация от трансформатора тока и датчиков температуры окружающей среды и скорости ветра; EA — выходной орган защиты. По сути в дальнейшем речь пойдет об установлении правил функционирования вычислительного комплекса AK .

Математическая модель процесса нагрева провода строится, как известно, на основе уравнения баланса энергии [7]:

$$W_c + W_p = W_n + W_{окр},$$

где $W_c = P_c dt$ — энергия джоулевых потерь, выделенных в сопротивлении единицы длины провода при протекании по нему тока за время dt , Вт·с/м; $W_p = P_p dt$ — энергия солнечной радиации, поглощаемая единицей длины провода за время dt , Вт·с/м; $W_n = C m d\theta$ — энергия, расходуемая на повышение температуры единицы длины провода, Вт·с/м; $W_{окр} = \alpha F \theta dt$ — энергия, выделяемая единицей длины провода в окружающую среду за время dt , Вт·с/м; P_c — мощность джоулевых потерь в единице длины провода, Вт/м; P_p — мощность солнечной радиации, воздействующей на единицу длины провода, Вт/м; t — текущее время, C — удельная теплоемкость материала провода, Вт·с/(кг·°C); m — масса единицы длины провода, кг/м; θ — перегрев провода, т. е. разность между его температурой t и температурой окружающей среды $t_{окр}$ ($\theta = t - t_{окр}$), °C; α — результирующий коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); F — площадь поверхности единицы длины провода, численно равная его периметру, м²/м.

С учетом приведенных выражений уравнение теплового баланса за время неустановившегося теплового процесса (математическая модель процесса нагрева) принимает вид:

$$d\theta/dt + A\theta = B, \quad (1)$$

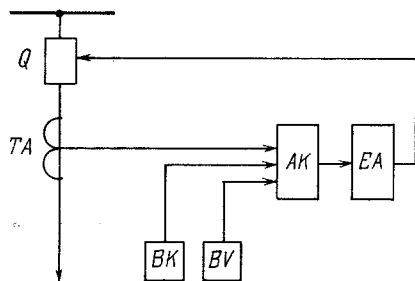


Схема устройств защиты от перегрузки с косвенным определением температуры

где

$$\left. \begin{aligned} A &= \alpha F / C m; \\ B &= (P_c + P_p) / C m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если принять постоянными величины, входящие в выражения (2), то решением уравнения (1) является

$$\theta = \theta_y - (\theta_y - \theta_{нач}) \exp(-A\tau), \quad (3)$$

где $\theta_y = B/A$ — установившееся значение перегрева при $\tau = \infty$, °C; $\theta_{нач}$ — начальное значение перегрева при $\tau = 0$, °C.

Экспериментальная проверка показывает, что расчет по формуле (3) при условии, что входящие в выражения (2) величины принимаются постоянными, может дать погрешность при температурах, характерных для условий кратковременной перегрузки (100 °C и выше) в 20 % и более (десятки градусов), что совершенно неприемлемо. Рассмотрим более подробно входящие в выражения (2) величины, поскольку адекватность модели (1) реальному процессу нагрева провода зависит от правильности выбора их значений, тем более, что некоторые из них сами зависят от температуры. Для обеспечения надежности работы линии электропередачи в условиях перегрузки влияние тех факторов, которые в эксплуатации изменяются, однако специально не контролируются, следует учитывать для наихудшего случая, т. е. приводящего к наибольшему нагреву провода. Это касается, например, направления ветра, влажности воздуха, степени турбулизации воздушного потока, прозрачности атмосферы, мощности солнечного излучения и т. п.

Как известно, различают три элементарных способа переноса теплоты: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. Вследствие весьма малых значений коэффициента теплопроводности воздуха охлаждение провода за счет теплопроводности не учитывают. Поэтому результирующий коэффициент теплоотдачи α применительно к рассматриваемой задаче принимают состоящим из суммы конвективной составляющей α_k и составляющей α_l , учитывающей перенос тепла излучением. Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи определяется числами Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu) и Прандтля (Pr) [8]. Для цилиндра, находящегося в потоке воздуха, имеем

$$Re = vD/\nu; \quad Nu = \alpha_k D/\lambda, \quad (4)$$

где v — скорость воздушного потока, м/с; D — диаметр цилиндра, м; ν — кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C).

Численные значения ν и λ приведены в [8], они зависят от температуры воздуха. При атмосферном давлении 0,0981 МПа и температуре окружающей среды — $50 \leq t_{окр} \leq 40$ °C с достаточной точностью можно вычислять их значения по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 13,75 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0069 t_{окр}); \\ \lambda &= 2,44 \cdot 10^{-2} (1 + 0,0069 t_{окр}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Форма провода отличается от цилиндрической, и это является одной из причин, по которым теоретические расчеты нуждаются в корректировке на основе экспериментальных данных.

Для цилиндра, находящегося в потоке воздуха, имеют место следующие соотношения [8]:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,5 k_{\tau} k_n \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,38}, [5 < \text{Re} < 10^3]; \\ \text{Nu} &= 0,25 k_{\tau} k_n \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,38}, [10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5]. \end{aligned}$$

Здесь k_{τ} — коэффициент, учитывающий турбулентность воздушного потока; k_n — коэффициент, учитывающий направление потока. Для ламинарного воздушного потока $k_{\tau}=1$, для турбулизированного $k_{\tau}=1,5$ — $1,6$. Если угол между направлением потока и осью цилиндра равен 90° (поперечный обдув), то $k_n=1$, если же этот угол равен 0° (продольный обдув), то $k_n=0,5$ [4, 8].

Число Прандтля, характеризующее соотношение молекулярных свойств переноса количества движения и теплоты, для сухого воздуха равно $\text{Pr}=0,71$ и в указанном диапазоне температур окружающей среды остается постоянным [8]. Во влажном воздухе оно несколько возрастает, и учет этого фактора ведет к некоторому завышению расчетной температуры нагрева провода. Используя выражения (4) и (5), а также учитывая, что форма провода, свитого из отдельных проводников, отличается от цилиндрической, получаем:

$$\alpha_k = 2,89 k_{\tau} k_n \left(\frac{v}{D_s} \right)^{0,5}, [5 < \text{Re} < 10^3]; \quad (6)$$

$$\alpha_k = 4,42 k_{\tau} k_n a \frac{v^{0,6}}{D_s^{0,4}}, [10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5], \quad (7)$$

где D_s — эквивалентный диаметр провода, форма которого отлична от цилиндрической, м; $a = \lambda / v^{0,6} \approx 1 - 0,0008 t_{\text{окр}}$. Эквивалентный диаметр определяют как $D_s = F / \pi$, где F — периметр провода, м.

В свою очередь, из геометрических соотношений для провода, свитого из отдельных проволок, следует:

$$F = p \pi d \left[1 - \frac{2 \arcsin \sqrt{1 - 0,25 \left(\frac{d}{D-d} \right)^2}}{360} \right],$$

где p — число проволок в наружном слое провода; D — диаметр провода, м; d — диаметр проволок, уложенных в наружном слое провода.

Если отсутствуют справочные данные, то величину p вычисляют по формуле

$$p = (D/d - 1) \pi,$$

округляя полученное значение до ближайшего меньшего целого числа.

Согласно [3] возле проводов воздушной линии электропередач практически всегда имеется движение воздуха со скоростью не менее 1 — 2 м/с. При полном безветрии (штиле) в полевых условиях также возникает слабое движение воздуха, которое влияет на условия охлаждения проводов. Рекомендации по учету теплоотдачи в

этих условиях приведены в [4]. Наши наблюдения показывают, что и для полного штиля можно использовать формулу (4), полагая $v = 0,2$ — $0,25$ м/с.

Составляющая $\alpha_{\text{л}}$ вычисляется на основе известной формулы Стефана — Больцмана:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{л}} &= \frac{5,67 \xi}{T - T_{\text{окр}}} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] = \\ &= \frac{5,67 \xi}{T - T_{\text{окр}}} \left[\left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right], \end{aligned}$$

где T — температура провода, К; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, К; ξ — степень черноты провода (коэффициент лучеиспускания).

Для новых алюминиевых и сталеалюминиевых проводов степень черноты составляет $0,15$ — $0,32$, для окисленных и загрязненных — $0,6$ — $0,8$. В диапазонах температур провода $40 \leq t \leq 160^\circ\text{C}$ и температур окружающей среды — $20 \leq t_{\text{окр}} \leq 55^\circ\text{C}$ при $t > t_{\text{окр}}$, охватывающих практически все режимы, которые могут представить интерес для защиты от перегрузки, с погрешностью менее 3% можно пользоваться формулой:

$$\alpha_{\text{л}} = \xi(4,06 + 0,071 t_{\text{окр}} + 0,04 \Theta). \quad (8)$$

Удельная теплоемкость материала провода (медь, алюминий, сталь, их сочетания) в рассматриваемом диапазоне температур линейно зависит от температуры [8]. При $-20 \leq t \leq 160^\circ\text{C}$ с погрешностью не более $0,5\%$ можно записать:

$$C = C_0(1 + \beta_c t) \approx C_0/(1 - \beta'_c t), \quad (9)$$

где C_0 — теплоемкость при температуре 0°C , Дж/(кг·°C); β_c , β'_c — температурные коэффициенты, $1/^\circ\text{C}$. Для меди $C_0 = 384$, $\beta_c = 0,279 \times 10^{-3}$, $\beta'_c = 0,271 \cdot 10^{-3}$; для алюминия $C_0 = 886$, $\beta_c = 0,534 \cdot 10^{-3}$, $\beta'_c = 0,507 \cdot 10^{-3}$; для стали $C_0 = 437$, $\beta_c = 1,076$, $\beta'_c = 0,971$.

Теплоемкость C_x провода, выполненного из x различных металлов, в соответствии с уравнением массовой теплоемкости [8] вычисляется по формуле

$$C_x = \sum_{i=1}^x C_i m_i / \left(\sum_{i=1}^x m_i \right) = \sum_{i=1}^x C_i S_i \gamma_i / \left(\sum_{i=1}^x S_i \gamma_i \right),$$

где C_i — теплоемкость i -го металла, Дж/(кг·°C); m_i — масса единицы длины i -го металла в проводе, кг/м; S_i — площадь поперечного сечения i -го металла в проводе, м²; γ_i — плотность i -го металла, кг/м³. Плотность меди равна 8900 кг/м³, алюминия — 2703 кг/м³, стали — 7800 кг/м³.

Аналогичным образом вычисляется и температурный коэффициент теплоемкости провода, состоящего из разных металлов. Так, для большого числа сечений проводов марки АС диаметром до 20 мм $C_0 = 700$ — 770 Дж/(кг·°C), $\beta_c = (0,68$ — $0,75) \cdot 10^{-3}$ $1/^\circ\text{C}$, $\beta'_c = (0,64$ — $0,70) \times 10^{-3}$ $1/^\circ\text{C}$.

Мощность тепловых потерь равна

$$P_c = I^2 r_0 (1 + \beta_c t), \quad (10)$$

где I — ток в проводе, А; r_0 — сопротивление

ние единицы длины провода при температуре 0°C , Ом/м; β_r — температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент сопротивления для меди равен $0,0038\ 1/^\circ\text{C}$, для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов — $0,0034\ 1/^\circ\text{C}$.

Отношение сопротивления провода к его удельной теплоемкости для диапазона температур от 0 до 160°C с погрешностью менее 1% можно представить в виде

$$\frac{r_0(1+\beta_r t)}{C_0(1+\beta_c t)} \approx \frac{r_0}{C_0} (1+\beta_1 t).$$

Коэффициент β_1 для медных проводов равен $0,0034\ 1/^\circ\text{C}$, для алюминиевых $0,0027\ 1/^\circ\text{C}$, для проводов АС можно принять значение $0,0024\ 1/^\circ\text{C}$.

Количество тепла, получаемого от солнца нагреваемой плоской поверхностью в единицу времени, равно [9] $P_p = E A_p L \cos Z$, где E — интегральная поверхностная плотность потока солнечного излучения, Вт/м²; A_p — коэффициент поглощения солнечного излучения; L — площадь поверхности нагреваемого тела, м²; Z — зенитное расстояние, т. е. угол между солнечным лучом и нормалью к нагреваемой поверхности, град. Значение E (верхнее рабочее) в соответствии с ГОСТ 15150-69 принимается равным $1125\ \text{Вт/м}^2$. Коэффициент поглощения A_p для окисленных проводов может быть принят равным $0,6$, для новых проводов — $0,15$ — $0,25$. Интеграл величины $L \cos Z$ по освещаемой солнцем поверхности цилиндра равен диаметру D последнего. Поскольку, однако, форма провода отличается от цилиндрической, то примем $D = D_3$; тогда

$$\frac{P_p}{C} = \frac{E A_p D_3}{C_0} (1 - \beta'_c t) = \frac{E A_p F}{\pi C_0} (1 - \beta'_c t). \quad (11)$$

Учитывая, что $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$ и $t = \Theta + t_{\text{окр}}$ и подставляя выражения (8)—(11) в (2), получаем вместо (1) математическую модель процесса нагрева провода:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Theta}{d\tau} - A_3 \Theta^3 - A_2 \Theta^2 + A_1 \Theta &= B; \\ A_1 &= \frac{[\alpha_k + \xi(4,06 + 0,071 t_{\text{окр}})](1 - \beta'_c t_{\text{окр}}) +}{C_0 m} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ E A_p \beta'_c / \pi F - I^2 r_0 \beta_1}{C_0 m}; \\ A_2 &= \frac{[\alpha_k + \xi(4,06 + 0,071 t_{\text{окр}})] \beta'_c + 0,04 \xi (1 - \beta'_c t_{\text{окр}})}{C_0 m} F; \\ A_3 &= \frac{0,04 \xi \beta'_c F}{C_0 m}; \\ B &= \frac{I^2 r_0 (1 + \beta_1 t_{\text{окр}}) + E A_p F (1 - \beta'_c t_{\text{окр}}) / \pi}{C_0 m}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

решение которой может быть найдено лишь численными методами.

Ограниченный диапазон температур нагрева провода при перегрузках позволяет упростить модель (12). Исследования на аэродинамическом стенде показали, что для проводов диаметром $20\ \text{мм}$ и менее отношение α/C очень слабо зави-

сит от температуры. Так, даже при скорости ветра $1\ \text{м/с}$ в диапазоне от 40 до 140°C это отношение для провода А185 изменяется не более чем на 3% . При более сильном ветре эти изменения практически незаметны. Объясняется это тем, что в результирующем коэффициенте теплоотдачи $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$ составляющая α_l , определяющая основное изменение α от температуры, имеет существенно меньшее значение, чем составляющая α_k . Кроме того, и теплоемкость с увеличением температуры возрастает. В результате температурная зависимость величины α/C в этих условиях проявляется слабо. Для повышения точности расчетов при температурах, характерных для условий перегрузки, рекомендуется величины α_l и C во втором слагаемом выражения (1) принимать соответствующими длительно допустимой температуре t_d провода. В этом случае отношение α/C можно принимать не зависящим от изменения температуры и для проводов диаметром более $20\ \text{мм}$. Тогда уравнение (12) преобразуется к виду (1), где

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{C_0 m} \left\{ (1 - \beta'_c t_d) \alpha + \frac{E A_p \beta'_c}{\pi} F - I^2 r_0 \beta_1 \right\}; \\ B &= \frac{1}{C_0 m} \left\{ I^2 r_0 (1 + \beta_1 t_{\text{окр}}) + \frac{E A_p F}{\pi} (1 - \beta'_c t_{\text{окр}}) \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Температуры проводов МФ100, А185, ПБСА50/70, ПБСМ95, вычисленные по формулам (3) и (13) для разных значений токов ($E=0$), совпали с данными, полученными на аэродинамическом стенде, с погрешностью не более $\pm 3^\circ\text{C}$.

Полагая, что длительно допустимый ток I_d провода соответствует длительно допустимой температуре t_d его нагрева, получаем из (3) и (13) при $\tau = \infty$ (в амперах):

$$I_d = \sqrt{\frac{[\alpha(t_d - t_{\text{окр}}) - E A_p / \pi] F}{r_0 (1 + \beta_1 t_d) (1 + \beta'_c t_d)}}.$$

Если при перегрузках стрела провеса не выходит за пределы нормативного габарита, то алгоритм функционирования защиты строится с учетом условий термической прочности провода. Прочность провода зависит не только от его температуры, но и от длительности воздействия последней. Для целого ряда металлов, в том числе алюминия и стали, удовлетворительное соответствие опытным данным дает математическая модель длительной статистической прочности, описываемая уравнением Ларсона — Миллера [5]:

$$\tau_p = \exp(M/T - N), \quad (14)$$

где τ_p — время до разрушения металла, с; M — температурно-временной параметр Ларсона — Миллера, зависящий от напряжения металла; T — абсолютная температура металла, К; N — постоянная металла.

Коэффициенты M и N для разного типа проводов могут быть найдены на основе опытных или нормативных данных. Такие данные приведены, в частности, в [2], и на их основе для алюминиевых

и сталеалюминиевых проводов получены значения $M=20800$ К, $N=50,3$. При воздействии на провод неизменной температуры он может быть разрушен, если длительность воздействия τ будет больше τ_p . Разрушения не последует, если $\tau \leq k_3 \tau_p$, где k_3 — коэффициент запаса равен $0,85-0,9$. Условием срабатывания защиты в этом случае, очевидно, является: $\tau/\tau_p \geq k_3$. Такой алгоритм реализован, например, в защите [10], получающей информацию о температуре провода с помощью датчика температуры и в памяти которой заложена зависимость (14). Если температура провода не измеряется, а вычисляется (рисунок), то при изменяющемся токе контролируемое время τ следует разбить на отдельные малые интервалы Δt (5—10 с), в течение которых температура меняется мало и ее приближенно можно принять постоянной. В этом случае условие срабатывания защиты принимает вид

$$\sum_{i=1}^{n_{\min}} \Delta t_i / \tau_{pi} \geq k_3, \quad (15)$$

где Δt_i — длительность i -го интервала времени, с; τ_{pi} — время до разрушения металла провода при воздействии температуры t_i , соответствующей i -му интервалу времени, с; $n_{\min}$ — минимальное число последовательно следующих друг за другом интервалов времени, при котором выполняется условие (15).

Подставив в (15) выражение (14), получим условие срабатывания защиты от перегрузки в виде

$$\sum_{i=1}^{n_{\min}} \Delta t_i \exp \left(N - \frac{M}{273 + t_{\text{окр } i} + \Theta_i} \right) k_3, \quad (16)$$

где $t_{\text{окр } i}$ — температура окружающей среды для i -го интервала времени, °С; Θ_i — перегрев провода в конце i -го интервала времени, вычисляемый по формулам (3) и (13).

Если в качестве АК (рисунок) используется ЭВМ, то удобно все интервалы времени Δt_i принять одинаковыми. Таким образом, правила функционирования комплекса АК для защиты от перегрузки следующие:

через заданные малые промежутки времени Δt_i по формулам (3) и (13) вычисляется температура $t_i = \Theta_i + t_{\text{окр } i}$;

эта температура сравнивается с длительно допустимой t_d ;

с того момента, как начало выполняться соотношение $t_i \geq t_d$, осуществляется вычисление суммы, соответствующей левой части условия (16);

в момент времени, когда начинает выполняться условие (16), подается сигнал через орган ЕА (рисунок) на отключение выключателя Q;

если же до выполнения условия (16) температура t_i стала меньше t_d , то накопленная сумма, вычисляемая в соответствии с левой частью выражения (16), сбрасывается на нуль (это условие не учитывает накопления термической усталости металла из-за того, что перегрузки бывают сравнительно редко, а экспериментальные данные на этот счет отсутствуют).

В упрощенном виде комплекс АК (рисунок) может быть выполнен в виде реле тока с зависимой выдержкой времени. Как правило, блоки ВК и ВП при этом не используются, а время-токовая характеристика $\tau = f(I)$ реле отвечает некоторым предельным условиям, например, скорости ветра 1 м/с, температуре окружающей среды 40 °С летом и 5 °С зимой. Такую время-токовую характеристику можно получить следующим образом. Принимаем условие, что защита АК начинает работать при $I \geq I_d$, при этом температура провода достигла значения t_d . Задаваясь разными значениями токов $I > I_d$, определяем по формулам (3) и (13) и условию (16) для каждого из них $\tau = \Delta t_i n_{\min}$ и строим зависимость $\tau = f(I)$. Такая зависимость хорошо аппроксимируется, как показывают расчеты, выражением

$$\tau = \frac{H}{(I/I_d)^q - 1},$$

где H — коэффициент, зависящий от марки провода и принятых условий окружающей среды, с; q — показатель степени, равный 1—2.

Так, например, для провода А185 при скорости ветра 1 м/с и температуре окружающей среды 40 °С для $q=1$ имеем $H_{40}=90$ с, а для $q=2$ $H_{40}=317$ с. Соответственно при температуре окружающей среды 5 °С для $q=1$ имеем $H_5=56$ с, а для $q=2$ $H_5=162$ с.

Если перегрузка длится незначительное время и защита АК сработать не успевает, то при последующих перегрузках время срабатывания должно сокращаться в зависимости от скорости снижения температуры провода после окончания перегрузки, иначе при АПВ может быть пережог. Подобное устройство описано, например, в [11].

В тех случаях, когда перегрузка ограничивается допустимыми габаритами до земли, алгоритм функционирования упрощается. Используя, например, номограммы, приведенные в [3], достаточно просто можно вычислить допустимую температуру t_d провода, при которой стрела его провеса достигает предельного по условиям нормативного габарита значения. Условие срабатывания защиты в этом случае имеет вид:

$$\Theta_i + t_{\text{окр } i} \geq k_3 t_d. \quad (17)$$

Как и ранее, величина Θ_i вычисляется по формулам (3) и (13). Первые два и последний шаг правил функционирования комплекса АК остаются такими же, как в предыдущем случае. Третий шаг формулируется так: «с момента начала выполнения соотношения $t_i \geq k_3 t_d$ подается сигнал через орган ЕА на отключение выключателя Q».

Особого рассмотрения требует вопрос о месте установки датчиков температуры окружающей среды ВК и скорости ветра ВВ. Для коротких линий и контактных сетей они могут быть установлены, очевидно, в открытых распродустройствах подстанций. Это наиболее простое в техническом отношении решение. Для линий большой протяженности (сотни километров) без ответвлений может появиться необходимость установки таких датчиков в нескольких местах, существенно отличающихся климатическими условиями, с устройст-

вами передачи информации от них к вычислительному комплексу АК, как, например, в [6]. При этом, однако, информация от всех датчиков ВК должна предварительно пройти через максиселектор, выделяющий наибольшее значение окружающей температуры, а информация от всех датчиков ВВ — через миниселектор, выделяющий наименьшее значение скорости ветра.

Выводы. 1. Отключение линии в тех случаях, когда температура провода достигает длительно допустимого значения, не может быть признано обоснованным, поскольку такой режим опасности не представляет. Если же температура провода становится больше длительно допустимой, то отключение линии целесообразно лишь тогда, когда длительность воздействия температуры становится опасной, приводя к снижению предела прочности материала провода, либо стрела его провеса достигает предельно допустимого значения по условиям нормативных габаритов. Допустимая выдержка времени при перегрузке, определяемая этими обстоятельствами, для провода А185 при изменении тока от $1,1I_d$ до $2I_d$ изменяется примерно от 20 мин до 1 мин.

2. Математическая модель процесса нагрева провода достаточно хорошо подтверждается экспериментально и позволяет определять наибольшую температуру провода в зависимости от протекающего по нему тока с учетом температуры окружающей среды, скорости ветра и солнечной радиации.

3. На основе совокупного использования математических моделей процесса нагрева провода и его термической прочности определены условия, при которых защита от перегрузки должна срабатывать. Сформулирован алгоритм функционирования вычислительного комплекса для определе-

ния условий отключения линии на основе информации от датчиков тока в линии, температуры окружающей среды и скорости ветра.

4. Показана возможность использования для защиты от перегрузки реле тока с зависимой время-токовой характеристикой для предельных значений параметров окружающей среды, описана методика построения таких характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Правила** технического обслуживания и ремонта контактной сети электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1981.
3. **Справочник** по электроснабжению и электрооборудованию. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А. А. Федорова. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. **Бургсдорф В. В., Никитина Л. Г.** Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. — Электричество, 1989, № 11.
5. **Закономерности** ползучести и длительной прочности. Справочник / Под ред. С. А. Шестерикова. — М.: Машиностроение, 1983.
6. **Rodriguer A., Yinger R. L.** Conductor-temperature monitoring increases transmission line ratings. — Transmission and distribution, 1989, N 3, p. 144—148.
7. **Основы** теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, В. Г. Кураев и др.; Под ред. Г. В. Буткевича. — М.: Высшая школа, 1970.
8. **Тепло- и массообмен.** Теплотехнический эксперимент. Справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. — М.: Энергониздат, 1982.
9. **Карвовский Г. А.** Электрооборудование и окружающая среда. Выбор и защита. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. **А. с. 1341074 (СССР).** Устройство для защиты контактной сети от перегрева током / Петрова Т. Е., Фигурнов Е. П. — Оpubл. в Б. И., 1987, № 36.
11. **А. с. 1381640 (СССР).** Реле перегрузки / Зайцев В. А., Петрова Т. Е., Самойленко И. А., Фигурнов Е. П. Оpubл. в Б. И., 1988, № 10.

[10.09.90]

УДК 621.318.1.017.621.317.384

Цифровой осциллографический метод измерения потерь в магнитных материалах

ФИОРИЛЛО Ф., НОВИКОВ А. А.

Италия — СССР

Вопрос о разработке точных методов измерения потерь в магнитных материалах является ключевым при решении задач моделирования процессов перемагничивания и создания новых материалов. В ряде источников [1—3] можно найти описание различных методов измерения, отличающихся как по диапазону частот перемагничивания материала, так и по используемым аппаратным средствам. Классическими можно считать калориметрический метод, метод ваттметра, которые, однако, не обеспечивают приемлемой точности измерений и практически не поддаются автоматизации вследствие отсутствия специализированной аппарату-

ры, работающей в достаточном диапазоне частот. Более того, существующие установки обеспечивают обычно лишь простейшие законы перемагничивания материала (синусоидальная форма магнитного потока), в то время как в зависимости от закона перемагничивания $B(t)$ потери могут изменяться на 20—30 %.

Не менее важным вопросом является возможность компьютерной обработки получаемой информации с целью выявления статистических закономерностей, в частности, для прогнозирования свойств материалов и выработки предложений по оптимальной их эксплуатации.

Измерение потерь цифровым осциллографическим методом. Предлагаемый ниже способ измерения потерь был разработан и практически осуществлен авторами в лаборатории магнитных измерений Национального Электротехнического института им. Галилео Феррари (Италия, г. Турин). За основу принята методика «цифрового» способа измерения потерь [4]. При использовании указанной методики на исследуемом образце материала (рис. 1) выполняются две обмотки (с числами витков $W1$ и $W2$), первая из которых является обмоткой намагничивания, а вторая — обмоткой контроля формы индукции (dB/dt). Очевидно, что

$$U_{W2} = S_m W 2 \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

где U_{W2} — э. д. с. обмотки $W2$; S_m — сечение магнитопровода.

Интегратор *INT* формирует напряжение, пропорциональное мгновенному значению индукции $B(t)$. Желаемая форма $B(t)$ формируется контроллером персонального компьютера *PC*. С помощью цифроаналогового преобразователя *D/A* формируется временная зависимость $B(t)$ в аналоговом виде, которая подается на операционный усилитель мощности *AMP*, формирующий напряжение на обмотке намагничивания *W1*. Аналого-цифровые преобразователи *A/D* обеспечивают ввод мгновенных значений индукции и тока намагничивания в компьютер.

С помощью компьютера вычисляется полная удельная мощность потерь на единицу объема материала $P_{\text{tot}} V$ в соответствии с соотношением

$$P_{\text{tot V}} = \frac{1}{T} \int_0^T H(t) \left(\frac{dB}{dt} \right) = \frac{W1f}{S_m l_m W2} \int_0^T i_h(t) U_{W2}(t) dt, \quad (2)$$

где P_{tot} — удельные потери в материале на единицу объема, Вт/м³; $H(t)$ — напряженность магнитного поля, А/м; $i_h(t)$ — ток обмотки намагничивания, А; l_m — средняя длина магнитной силовой линии, м; $f = 1/T$ — частота перемагничивания материала, Гц.

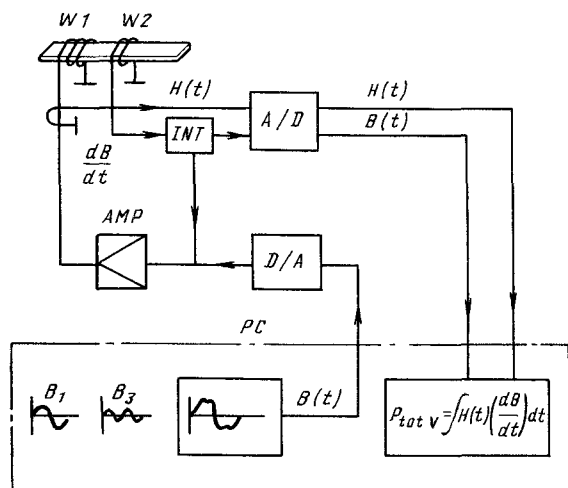


Рис. 1. Цифровой классический способ измерения потерь

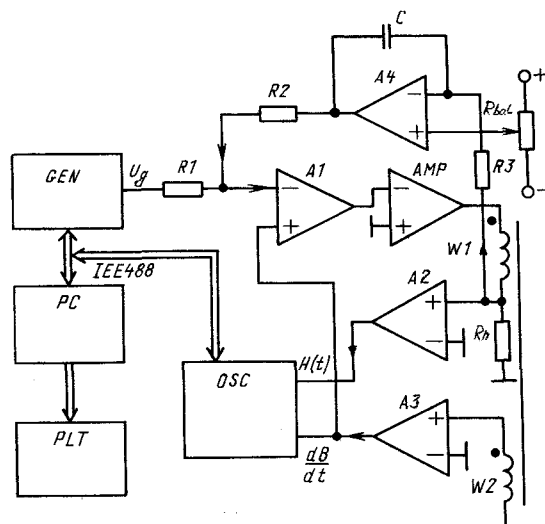


Рис. 2. Усовершенствованная схема цифрового способа измерения потерь

Описанная методика позволяет программировать закон изменения магнитной индукции в материале и контролировать его соблюдение с помощью системы автоматического регулирования, состоящей из элементов $W2$, AMP , INT . Однако эксперименты показали, что вследствие неидеальности параметров компонентов измерительной схемы и наличия интегратора в контуре регулирования указанная схема может быть использована лишь на частотах 50—100 Гц, что явно недостаточно даже для исследования материалов на промышленной частоте 50 Гц с учетом третьей гармоники. Кроме того, дрейф нуля операционного усилителя мощности AMP приводит к наличию постоянной составляющей тока в обмотке $W1$, и, следовательно, асимметрии петель гистерезиса. Наконец, не используются возможности компьютера для хотя бы частичной автоматизации процесса измерений.

Принципиальным отличием новой измерительной схемы (рис. 2) и методики измерений является то, что для контроля формы потока перемagnetизования в материале используется не собственно величина индукции $B(t)$, а величина dB/dt , которая, будучи аналитически или численно рассчитана для любого требуемого закона перемagnetизования, программным образом реализуется компьютером *PC (Sinclair QL)*.

Полученная функция преобразуется в аналоговый сигнал программируемым генератором *GEN* (*Wavetek 275*), управляемым от компьютера через быстродействующий интерфейс *IEE 488*. (Здесь и далее указываются названия приборов, использованных в реальной установке, параметры которых приведены в табл. 1.) Выходной сигнал генератора (пропорциональный dB/dt) сравнивается с напряжением вторичной обмотки *W2* операционным усилителем *A1* (*PAR 113*), выполняющим функции усилителя рассогласования, и усиленный сигнал ошибки подается на усилитель мощности *AMP* (*KEPCO*). Намагничивание материала осуществляется обмоткой *W1*, сигнал, пропорциональный току намагничивания, снимается с эталонного ре-

Таблица 1

Основные параметры приборов, использованных в установке для измерения потерь

Назначение	Осциллограф	Программируемый генератор	Операционный усилитель	Операционный усилитель мощности
Тип	DATA 6000	Wavetek 275	PAR 113	КЕРКО ВОР72
Фирма и страна	Data Precision, США	Wavetek San Diego, Inc, Мексика	Princeton Applied Research Corp., США	Kerco, Inc, США
Частотный диапазон	0—36 мГц	0—12 мГц	0—0,3 мГц	0—0,05 мГц
Интерфейс связи с ЭВМ	IEE 488	IEE 488	не управляется	не управляется
Диапазон измеряемых или формируемых сигналов	RS232 0,5—5 В	1 мВ — 10 В	—12 В — +12 В	72 В, 5 А

зистора R_h . Два усилителя типа PAR 113 (A2 и A3), усиливающие сигналы тока и напряжения на обмотке W2, используются лишь при измерениях на инфранизкой частоте (1 Гц и ниже).

Описанные элементы образуют систему автоматического регулирования, контролирующую точность отслеживания dB/dt . Для симметрирования петель гистерезиса в измерительную схему введены интегратор A4 и элементы R1, R2, R3, C. Балансировка системы осуществляется резистором R_{bal} .

Сигналы dB/dt и $H(t)$ [точнее, $I_h(t)$], поступают на входы цифрового осциллографа OSC типа DATA 6000, осуществляющего расчет потерь мощности в материале в соответствии с соотношением (2), а также контроль амплитуды магнитной индукции (описание указанных операций приведено ниже). Осциллограф управляется с помощью компьютера Sinclair QL, который осуществляет начальную установку шкал осциллографа, загрузку его внутренней программы расчета и т. п. Связь между устройствами осуществляется интерфейсом IEE 488. Данные осциллографа для дополнительной обработки могут передаваться в компьютер через этот же порт ввода — вывода. Результаты вычислений в графическом виде выводятся на бумагу с помощью плоттера PLT типа HP COLOR PRO через интерфейс RS 232.

Реализация заданного закона перемагничивания $B(t)$ осуществляется путем представления его гармоническим рядом:

$$B(t) = \sum_{n=1}^N B_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (3)$$

где n — номер гармоники; ω — основная частота, рад/с; φ_n — фазовый сдвиг n -й гармоники, рад; B_{nm} — амплитудное значение индукции n -й гармоники. Тл; N — число учтенных гармоник.

Компьютер представляет в цифровой форме функцию

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1}^N n\omega B_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n). \quad (4)$$

При проведении измерений на частотах промышленной сети представляется интересным режим перемагничивания с учетом первой и третьей гармоник:

$$B(t) = B_{1m}[\sin \omega t + b \sin(3\omega t + \varphi_3)], \quad (5)$$

где b — относительная амплитуда третьей гар-

моники, т. е.

$$B = B_{3m}/B_{1m}.$$

При этом на выходе генератора необходимо сформировать напряжение

$$U_g(t) = W2S_m\omega B_{1m}[\cos \omega t + 3b \cos(3\omega t + \varphi_3)], \quad (6)$$

причем относительная амплитуда b и фаза φ_3 в процессе эксперимента изменяются в пределах $0 \leq b \leq 0,3$, $0 \leq \varphi_3 \leq 180$ с шагом Δb и $\Delta \varphi_3$, соответственно.

Зависимости потерь мощности P_{tot} от b и φ_3 снимаются при постоянстве амплитуды магнитной индукции B_m :

$$B_m = \max_{0 \leq t \leq T} B(t) = \text{const}, \quad (7)$$

что вызывает необходимость изменения B_{1m} в процессе эксперимента.

Алгоритм управляющей программы компьютера Sinclair QL реализующей указанные операции, приведен на рис. 3. В начале работы программы (блок 2) осуществляется ввод параметров процесса измерения (частота f , амплитуда индукции B_m , шаг изменения относительной амплитуды и фазы третьей гармоники Δb , $\Delta \varphi_3$, соответственно, а также параметры измеряемого материала, сердечника S_m , l_m , обмоток перемагничивания W1, W2). Блок 3 через интерфейс IEE 488 осуществляет установку чувствительностей входов цифрового осциллографа DATA 6000, определяет выводимые на экран сигналы (напряжения, пропорциональные dB/dt , току намагничивания, интеграла от произведения этих величин, пропорционального мощности потерь и т. д.), а также обеспечивает загрузку внутренней программы осциллографа, производящей указанные вычисления. Блоки 4, 5, совместно с блоками 13, 14, 15, 16 представляют собой два вложенных цикла, которые осуществляют формирование закона изменения магнитной индукции $B(t)$ при изменяющейся с заданным шагом амплитуде и фазе третьей гармоники. При каждом сочетании b , φ_3 , в блоке 6 осуществляются вычисление B_{1m} (7) и табуляция $U_g(t)$ (6), а затем передача данных в генератор Wavetek через порт IEE 488 для формирования требуемого сигнала (блок 7). При необходимости оператор может симметризовать петли перемагничивания резистором R_{bal} , а также несколько изменять вручную амплитуду сигнала генератора для достижения заданного значения B_m . Амплитуда индукции вычисляет-

ся осциллографом DATA 6000 путем интегрирования напряжения, пропорционального dB/dt , и его числовое значение выводится на экран осциллографа. Оператор вводит в компьютер данные о значении потерь (блок 8), после чего осуществляется обработка данных измерения: вычисление составляющих потерь по формулам, приведенным ниже (блоки 9—11), и запись данных на магнитный носитель (блок 12). Обработку данных завершает блок 17, обеспечивающий построение трехмерных графиков — планов потерь и двумерных — сравнения экспериментальных и расчетных данных. Ниже приведена программа компьютера осциллографа:

10 IP=MAX (BUF .A2)	110 BALB=UT1+UT2
20 IN=MIN (BUF .A2)	120 BALB=BALB/2
30 BALI=IP+IN	130 B=INTGXO - BALB
40 SUMI=IP - IN	140 UINT=MAX (B)
50 BALI=BALI/SUMI	150 DSPL (UINT)
60 DSPL (BALI)	160 MUL .A1=BUF .XO*BUF .A2
70 BUF .XO=0 - BUF .A1	170 INTG A1=INTG (MUL.A1)
80 INTGXO=INTG (BUF .XO)	180 XSIFARI=20 mS
90 U11=MAX (INTGXO)	190 WPER=CR:MAX (INTGA1)
100 U12=MIN (INTGXO)	200 DSPL (WPER)

Программа обеспечивает контроль симметрии цикла перемагничивания путем вычисления амплитудного значения тока намагничивания отрицательной и положительной полуволны (операторы 10—60), выдает информацию о небалансе петли на осциллограф в виде параметра BALI. Операторы 70—150 интегрируют значения dB/dt и индицируют значение B_m (параметр UINT). Операторы 160—200 вычисляют и индицируют мощность потерь (параметр WPER).

Оценка погрешности разработанного измерительного стенда может быть произведена путем вычисления погрешностей величин — составляющих выражения (2):

$$\delta_z = \delta_s + \delta_l + \delta_f + \delta_u + \delta_i,$$

где δ_s , δ_l — погрешность измерения параметров S_m и L_m соответственно; δ_f — погрешность задания частоты перемагничивания; δ_u , δ_i — погрешность измерения напряжения на обмотке W2 и тока намагничивания соответственно;

(Здесь предполагается, что операция интегрирования представляет собой ряд последовательных действий умножения — суммирования.)

Погрешности δ_s и δ_l определяются точностью измерения геометрических размеров сердечников магнитопровода и составляют не более 0,5 %. Частота перемагничивания устанавливается генератором Wavetek с точностью не менее 0,01 %. Измерение напряжений и токов осуществляется осциллографом DATA 6000, который гарантирует точность измерений и операций не менее 0,2 % при использовании девятибитного аналого-цифрового преобразователя. Определенную методическую погрешность вносит схема измерения тока и напряжения за счет нагрузки обмотки W2 входным сопротивлением осциллографа. Это определяет

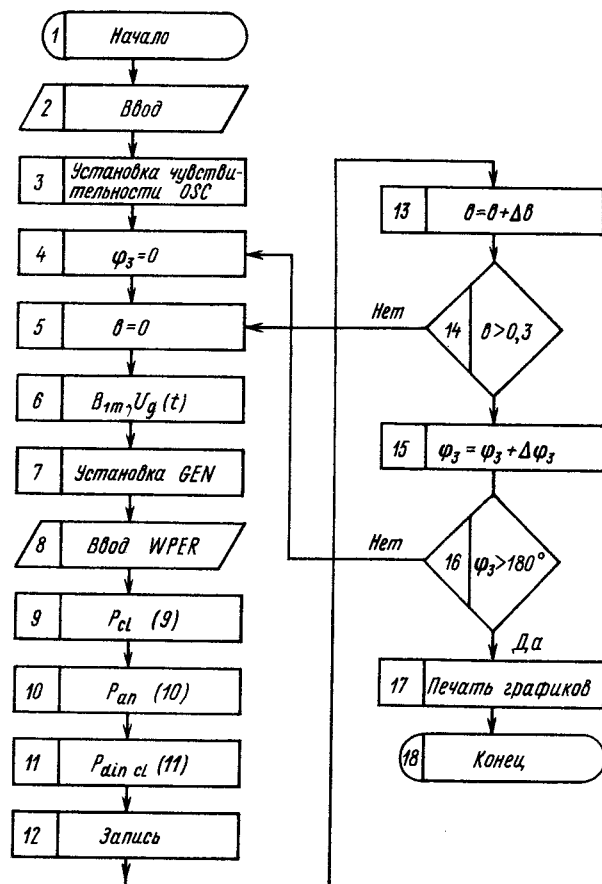


Рис. 3. Алгоритм управляющей программы компьютера Sinclair

увеличение приведенного к обмотке W1 тока намагничивания, а также наличие фазовых сдвигов между напряжением и током за счет индуктивности рассеяния между измерительными обмотками. Однако при входном сопротивлении осциллографа 1 МОм, сопротивлении датчика тока R_h около 5—10 Ом, индуктивности рассеяния порядка 500 мкГн на частотах до 500 Гц указанные погрешности не превышают 0,01 %. Класс точности резистора датчика тока R_h —0,1 %. Таким образом, суммарная погрешность вычисления потерь мощности в материале не превышает 1,6 %.

Дополнительная погрешность при измерении возникает вследствие необходимости идентифицировать режим перемагничивания при заданной амплитуде магнитной индукции B_m . Значение B_m , как показано выше, вычисляется путем интегрирования сигнала dB/dt , что определяет дополнительную методическую погрешность порядка 0,2 %. Таким образом, в указанном диапазоне частот перемагничивания стенд гарантирует общую погрешность измерения не более 2 %. Проверка стенда осуществлялась в режиме синусоидального потока (на частоте 50 Гц ваттметром фирмы BOANO с классом точности не более 1 %).

Полное управление устройствами в схеме с помощью компьютера позволяет легко адаптировать ее для работы с различными типами измеряемых материалов, выполненных в виде тороидальных сердечников, лент, стандартных устано-

вок типа *Ebstein* [5] путем незначительного изменения управляющей программы компьютера.

Уточненные математические модели потерь в магнитных материалах и их экспериментальная проверка. Для инженерного расчета промышленных трансформаторов и электрических машин является чрезвычайно важной разработка точных зависимостей потерь в магнитных материалах для режима несинусоидального магнитного потока с учетом третьей, пятой и более высоких гармонических составляющих. В большинстве случаев такой расчет осуществляется весьма приближенно, когда потери рассчитываются как сумма потерь на гистерезис и вихревые токи (так называемая классическая составляющая потерь). В действительности измеренные экспериментальные потери оказываются гораздо большими, указанная добавка получила название аномальных потерь.

Таким образом, полные потери

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{hist}} + P_{\text{din}} = P_{\text{cl}} + P_{\text{an}} + P_{\text{hist}}, \quad (8)$$

где P_{hist} — потери на гистерезис, Вт/кг; P_{din} — динамические потери, Вт/кг; P_{cl} — потери на вихревые токи (классические потери), Вт/кг; P_{an} — аномальные потери, Вт/кг.

Здесь и далее речь идет об удельных потерях в материале на единицу его массы, которые могут быть легко пересчитаны на единицу объема или для данного типоразмера сердечника при помощи соотношения

$$P_{\text{tot V}} = P_{\text{tot } \sigma},$$

где σ — плотность материала, кг/м³.

Потери на гистерезис являются характеристическим материалом и практически не поддаются аналитическому расчету или аппроксимации. Поэтому указанный параметр обычно определяется экспериментально путем измерения потерь на инфранизкой частоте перемагничивания (как правило,

1 Гц), а затем пересчитывается к частоте измерения.

Классическая составляющая потерь P_{cl} определяется вихревыми токами в материале, т. е. в основном его удельным сопротивлением. Несложно показать, что мгновенное значение мощности потерь определяется выражением

$$P_{\text{cl}} = \frac{d^2}{12\rho\sigma} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2,$$

где d — толщина образца материала, м; ρ — удельное сопротивление, Ом·м.

Подставляя в последнее выражение соотношение (5) и интегрируя мгновенное значение потерь за период, получаем

$$P_{\text{cl}} = \frac{\pi^2 f^2 d^2 B_{1m}^2}{6\rho\sigma} (1 + 9b^2). \quad (9)$$

Джорджи Бертоtti (G. Bertotti) на основании модели статистического распределения потока магнитной индукции в сердечнике материала предложил аппроксимирующую зависимость для аномальной составляющей потерь [6].

$$R_{\text{an}}(t) = \frac{G_v S_m}{\rho\sigma^2} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{3/2},$$

где G_v — константа, характеризующая распределение поля в материале.

Подставляя в последнее выражение зависимость dB/dt и интегрируя полученное выражение для нахождения средней мощности потерь, получаем:

$$P_{\text{an}} = \frac{G_v S_m}{\rho\sigma^2} (2\pi f B_{1m})^{3/2} f \int_0^t |\cos\omega t + 3b \cos \times \\ \times (3\omega t + \varphi_3)|^{3/2} dt. \quad (10)$$

Материалы для проведения измерений на низкой частоте при несинусоидальном потоке

Таблица 2

Материал	Тип образца	d , мм	L , мм	H , мм	S_m , мм ²	M_p , г	ρ , Ом·м	σ , кг/м ³
CEEE55N	полоса	0,294	298	30,2	8,87	20,2	5,5E — 7	7650
A18/4	полоса	0,215	301	30	6,44	14,5	5,1E — 7	7480
Metglas	лента	0,025	—	25	0,62	—	1,3E — 8	7200

Параметры сердечников, использованных для проведения измерений

Таблица 3

№ серии	Материал	Тип сердечника	L_{med} , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	M , г	K	$W1, W2$
1	CEEE55EN	Ebstein	940	—	—	—	5	700
2	A18/4	Ebstein	940	—	—	—	3	700
3	Metglas	тороид	129	42,5	40,2	27,6	—	176
4	Metglas	тороид	129	42,5	40,2	27,6	—	19

В табл. 2, 3; H — ширина пластины или ленты; L — длина пластины; M_p — масса одной пластины; L_m — длина средней магнитной линии; D_1, D_2 — внешний и внутренний диаметры тороидального сердечника; K — число пластин на стороне квадрата при измерении в стандарте Ebstein; M — суммарная масса всего сердечника.

Примечания 1. Аморфные материалы перед проведением измерений прошли термическую обработку в среде водорода при температуре 370 °C в течение двух часов.

2. Серия измерений № 4 осуществлялась на частоте 500 Гц.

Вычисление последнего интеграла осуществляется подпрограммой, реализующей метод трапеций.

Для сравнения уточненной модели потерь (8) — (10) с приближенной, учитывающей лишь гистерезис и классическую составляющую, проводилась аппроксимация динамических потерь P_{din} выражением (9) с некоторым эмпирически найденным коэффициентом пропорциональности A :

$$P_{\text{din cl}} = AB_{\text{mf}}^2(1 + 9b^2). \quad (11)$$

Выражения (8) — (11) использованы для обработки данных экспериментов в управляющей программе компьютера *Sinclair* (блоки 9—11). При этом использованы различные типы материалов: гранеориентированной структуры *CEEE55EN* (3 % Si), неориентированной структуры *A18/4* (3 % Si), аморфные — *Metglas 2605S-2* [5]. Измерения проводились на частоте 1 Гц для определения потерь на гистерезис, и на частоте 50 Гц для определения динамической составляющей. Для материала аморфной структуры произведены также измерения потерь на частоте 500 Гц с целью проверки зависимостей (8) — (11) в частотном диапазоне. Параметры материалов и выполненных на их основе сердечников приведены в табл. 2 и 3, соответственно.

Основные результаты измерений иллюстрируются рис. 4—7. На рис. 4, 5 приведены планы потерь в материале *Metglas 2605S-2* на частотах 50 и 500 Гц, соответственно, в зависимости от амплитуды и фазы третьей гармонической составляющей потока. Амплитудные значения индукции перемагничивания B_m и составляющие потерь для чисто синусоидального режима приведены в табл. 4. На графиках отчетливо виден вклад динамических потерь, вызываемых влиянием третьей гармоники при возрастании b .

На рис. 6, 7 дано сравнение результатов экспе-

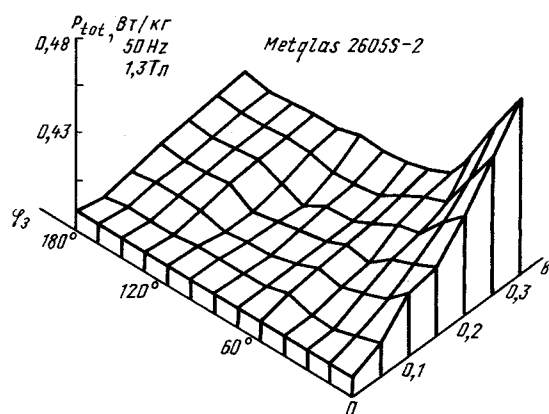


Рис. 4. План полных потерь в материале *Metglas 2605S-2* на частоте перемагничивания 50 Гц при амплитуде магнитной индукции 1,3 Тл в зависимости от амплитуды и фазы третьей гармоники

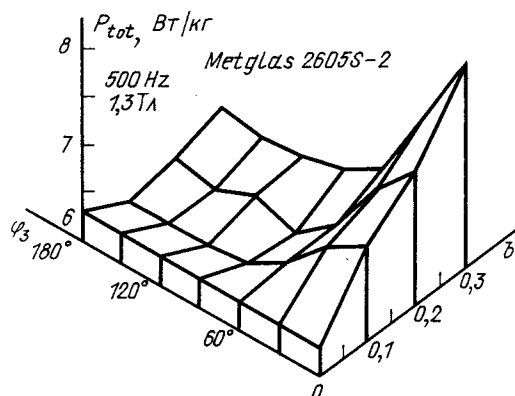


Рис. 5. План полных потерь в материале *Metglas 2605S-2* на частоте перемагничивания 500 Гц при амплитуде магнитной индукции 1,3 Тл

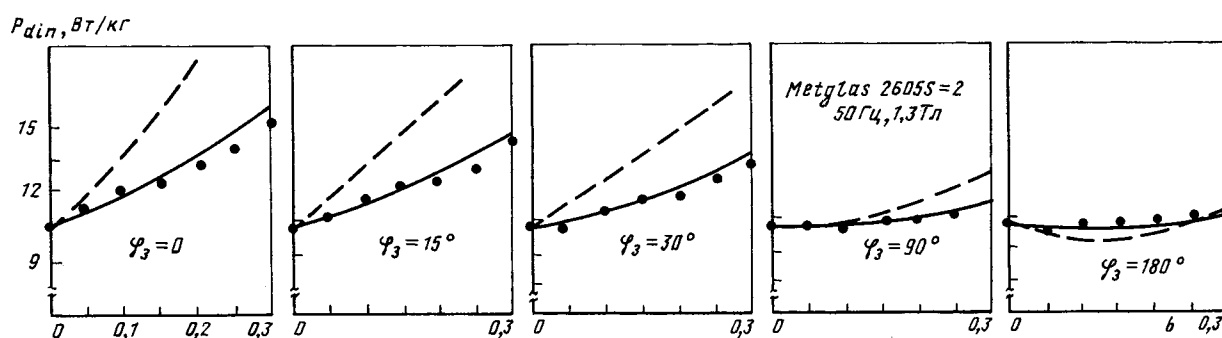


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов при частоте перемагничивания 50 Гц: ———— расчет по соотношениям (8) — (10); ----- расчет по соотношению (11); . . . эксперимент

Таблица 4
Составляющие потерь в магнитных материалах на частоте 50 Гц синусоидального магнитного потока

Материал	B_m , Тл	P_{tot} , Вт/кг	P_{hist} , Вт/кг	P_{cl} , Вт/кг	P_{an} , Вт/кг
CEEE55EN	1,7	1,34	0,54	0,24	0,56
A18/4	1,5	1,65	1,16	0,1	0,39
Metglas	1,3	0,389	0,288	0,001	0,1

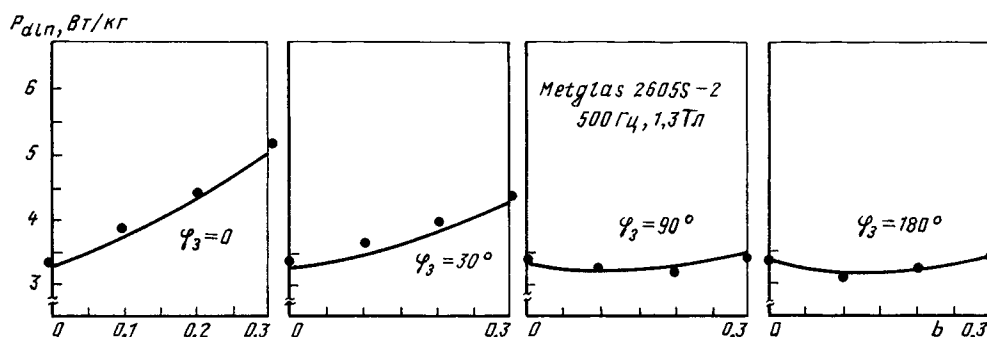


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов при частоте перемагничивания 500 Гц: — расчет по соотношениям (8) и (10); . . . — эксперимент

римента и расчетов потерь по формулам (9) — (11) для материала Metglas 2605S-2. При этом статическая составляющая потерь (P_{hist}) исключена из рассмотрения. Пунктирными кривыми изображен ход приближенной аппроксимирующей зависимости (11), представляющей потери чисто классической составляющей. Из графиков видно, что указанная аппроксимация дает погрешность до 20 % в зависимости от величин b и φ_3 , в то время как точные зависимости (9), (10) имеют расхождение с теорией не более 2 %. Наиболее показателен в этом плане тот факт, что значения аномальных потерь в материале рассчитаны для частот 50 и 500 Гц с одинаковыми значениями константы G_0 . Расхождение в аппроксимации потерь не превышает 3 % при десятикратном изменении частоты. Аппроксимирующая зависимость (11) в этом случае дает ошибку около 100 % (на рис. 7 не указана).

Таким образом, для точного расчета потерь в электрических машинах на промышленной частоте можно использовать соотношения (8) — (10) практически при любом режиме работы машины.

Выводы. 1. Предложенная методика и экспериментальная установка для измерения потерь в магнитных материалах обеспечивает точность измерения не ниже 2 % в режиме несинусоидального магнитного потока на частотах до 500 Гц. Комплекс разработанных программ позволяет автоматически документировать результаты измерений в графическом и табличном виде.

2. Экспериментально проверены уточненные математические модели расчета динамических потерь в магнитных материалах, которые могут быть использованы для расчета типовых режимов перемагничивания электрических машин, работающих на частоте промышленной сети.

3. Построение подобных измерительных комплексов позволяет существенно упростить и повысить качество измерений важнейших характеристик магнитных материалов для проведения исследовательских работ и выходного контроля при их серийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытание магнитных материалов и систем / Под ред. А. Я. Шихина. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Организация измерительно-вычислительных комплексов для магнитных измерений и магнитного контроля / Л. Я. Аронов, Д. К. Пискунов, Ю. В. Селезнев, В. Ю. Селезнев. Омск: Омский политех. ин-т, 1988.
3. Каплан Л. М. Средства измерения динамических магнитных параметров ферромагнитных материалов на частотах до 1 мГц. — М.: Изд. стандартов, 1984.
4. Moses A. J., Shirkoochi G. H. Iron loss in non-oriented electrical steels under distorted flux condition. — IEEE Trans. on Magnetics, 1987, vol. MAG-23, N 5.
5. Nathasing D. M., Liebermann H. H. Transformer applications of amorphous alloys in power distribution systems. — IEEE Trans. on Power Delivery, 1987, vol. PWRD-2, N 3.
6. Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. — IEEE Trans. on Magnetics, Jan. 1988.

[28.03.91]

УДК 621.315.61.048.81.001.57

Многофакторная математическая модель термонапряженной электроизоляции

ИЕРУСАЛИМОВ М. Е., доктор техн. наук, СОКОЛОВСКИЙ С. А., канд. техн. наук, РАДЧЕНКО С. Г., канд. техн. наук, РОМАНЕНКО Ю. В., инж., ЛАПАЧ С. Н., инж.

Полимерные материалы широко используются в качестве электроизоляции, однако единой методики ее проектирования не существует [1]. В [2—4] показана возможность крайне неравномерного распределения напряженности электрического поля в пронизываемой потоком тепла электроизоляции между плоскими и коаксиальными электродами.

Вопрос об одновременном учете геометрических, электро- и теплофизических факторов, а также мощности теплового потока и уровня напряжения при создании современной полимерной электроизоляции изучен недостаточно, особенно в динамических режимах. Цель настоящей статьи заключается в разработке физически

не противоречивой математической модели термо-напряженной изоляции (ТНИ) для определения оптимальных и предельных условий ее эксплуатации, обоснованного выбора материалов и требований к ним.

Конструкции ТНИ и применяемые диэлектрики.

В различных высоковольтных аппаратах можно выделить участки ТНИ между параллельными электродами (плоская шина — корпус, торец обмотки — ярмо и т. п.). ТНИ между коаксиальными электродами встречается также достаточно часто (средняя часть проходного изолятора, одножильный кабель и др.). Во многих случаях участки изоляции можно рассматривать как сегменты (рис. 1) такой ТНИ, в пределах угла σ которых все характеристики вдоль радиусов одинаковы. Это представление ТНИ достаточно универсально, так как, оставляя неизменной толщину d изоляции 3 в радиальном направлении и увеличивая неограниченно радиус $R_в$ внутреннего электрода 2, переходим к плоской ТНИ. В общем случае внутренний тепловыделяющий электрод 2 может быть сложным (например, с ферритовым сердечником 1) или иметь полость, а толщиной наружного 4 можно пренебречь из-за его высокой теплопроводности. Поэтому для указанных конструкций задача сводится к изучению явлений вдоль одной координаты R .

Физическое и физико-химическое состояния полимерных диэлектриков, непосредственно определяемые температурой T , оказывают существенное влияние на характер и величину их электрической проводимости γ . При этом, как правило, наблюдается значительное увеличение γ с ростом T , что достаточно точно аппроксимируется полученным на основе экспериментальных данных выражением

$$\lg \gamma = a n T^{-b} + \lg \gamma_0, \tag{1}$$

где $a=0,35$; $b=223 \text{ K}$; $\gamma_0=10^{-15}$; $n=1,0138-1,0225$ для различных полимерных материалов при $T=253-353 \text{ K}$.

Экспериментально установлено, что при этих T относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r практически неизменна и что γ и ϵ_r от напряженности E электрического поля не зависят.

Кроме того, экспериментально определена зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от T для резконеоднородного поля (рис. 2), причем допустимая для полимерной изоляции напряженность $E_{доп}$ принята равной наименьшей $E_{пр}$ при выборке из 10 точек для каждого значения T .

Метод и алгоритм определения наибольших значений температуры и напряженности электрического поля в объеме ТНИ. Для любого момента времени t свойства изоляции описываются известными уравнениями термо- и электродинамики:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (\chi \nabla T) + p &= c \rho \partial T / \partial t; \\ \nabla \cdot (\gamma E) + \nabla \cdot (\partial D / \partial t) &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

Для анализа всю конструкцию (рис. 1) удобно представить в виде имеющих номера $k=0, 1, 2, \dots, z$ коаксиальных слоев толщиной ΔR , в пределах которых параметры материалов и характеристики процессов неизменны, а удаление слоя от оси равно $R_k=k\Delta R$.

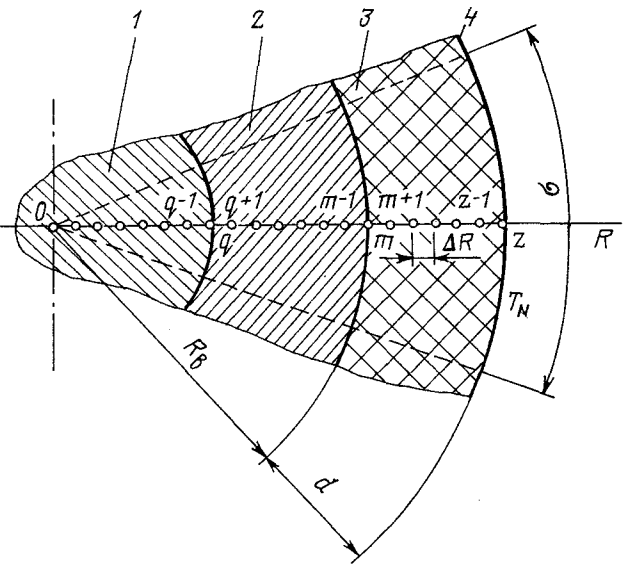


Рис. 1. Фрагмент термонапряженной электроизоляционной конструкции коаксиального типа

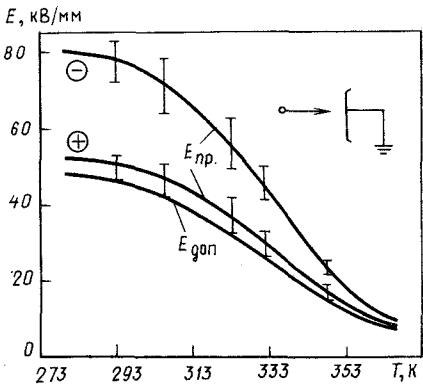


Рис. 2. Зависимости электрической прочности $E_{пр}$ эпоксидного заливочного компаунда ЭЗК-6м от полярности напряжения и температуры

С другой стороны, различным элементам конструкции целесообразно присвоить определенный индекс $j=1, 2, \dots$ например: ферриту — 1 (и для него k принимает значения $k=0, \dots, q-1$), внутреннему медному электроду — 2 ($k=q, q+1, \dots, m-1$), полимеру — 3 ($k=m, m+1, \dots, z-1$) и т. д. до n (на рис. 1 $n=4$).

Тогда система (2) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot [\chi_k(t) \nabla T_k] + [p_b(t)]_j &= c_j \rho_j \partial T / \partial t; \\ \nabla \cdot [\gamma_k(t) E_k(t)] + \nabla \cdot [\partial \epsilon_0 \epsilon_{kr}(t) E_k(t) / \partial t] &= 0, \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

где с учетом (1) $\gamma_k(t) = \gamma_0 + \int_0^t [\partial \gamma_k(T) / \partial T] [\partial T(t) / \partial t] dt$.

В качестве краевых условий используем непрерывность теплового потока на границах j -го и $(j-1)$ -го элементов, т. е.

$$\chi_{j-1} \nabla T|^{j-1} = \chi_j \nabla T|^j, \tag{4}$$

условие теплоотдачи в точке z из последнего z -го слоя в наружную среду с температурой

$T_N = T_M(t)$ при коэффициенте теплоотдачи α , т. е.

$$\chi_n \nabla T|_z^n = \alpha (T_N - T_z), \quad (6)$$

а также значения потенциалов φ_1 внутреннего и φ_n наружного электродов.

Конкретные исследования были проведены для ТНИ между обмотками последнего каскада высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля (ВТВМ), у которого к ферритовому магнитопроводу 1 плотно прилегает первичная обмотка 2, для которой принято $\varphi = 0$. При этом все потери в 1 и 2 относим к обмотке, считая ее пустотелой с $p_2 = \text{const}$. Низкий уровень пульсаций (0,1... 0,2 %) выходного постоянного напряжения U ВТВМ [5] позволяет принять $\varphi_n = U$ и пренебречь потерями из-за релаксации электрического поля. Тогда для ТНИ

$$p_k(t) = \gamma_k(t) E_k^2(t). \quad (7)$$

В (6) α определяется скоростью v (м/с) охлаждающего воздуха [6] и для случая «гладкая стенка — воздух»

$$\alpha = 5,6 + 4v. \quad (8)$$

Используя более удобные индексы $j=2=\mathcal{E}$ и $j=3=\text{И}$ для коэффициентов температуропроводности соответственно внутреннего электрода $\beta_{\mathcal{E}} = \chi_{\mathcal{E}}/C_{\mathcal{E}}\rho_{\mathcal{E}}$ и изоляции $\beta_{\text{И}} = \chi_{\text{И}}/C_{\text{И}}\rho_{\text{И}}$, систему (2) представляем в виде

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\mathcal{E}} (\nabla^2 T_k + p/\chi)_{\mathcal{E}} &= \partial T_{k\mathcal{E}}/\partial t; \\ \beta_{\text{И}} (\nabla^2 T_k + \gamma_k E_k^2/\chi)_{\text{И}} &= \partial T_{k\text{И}}/\partial t; \\ \nabla \cdot (\gamma_k E_k)_{\text{И}} + \varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}} \partial (\nabla \cdot E_k)_{\text{И}}/\partial t &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

с краевыми условиями

$$\chi_{\mathcal{E}} \nabla T_{m\mathcal{E}} = \chi_{\text{И}} \nabla T_{m\text{И}}; \quad \chi_{\text{И}} \nabla T_{z\text{И}} = \alpha (T_N - T_{z\text{И}}); \quad T_N = \text{const}. \quad (10)$$

Обозначая индексом t параметры электрода и изоляции в момент времени t , а индексом τ — те же параметры через интервал Δt и переходя к конечным разностям, из (9) получаем систему

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\mathcal{E}} \left[\frac{\Delta^2 T_k}{\Delta R^2} + \frac{\Delta T_k}{R_k \Delta R} + \frac{p}{\chi} \right]_{\mathcal{E}} &= \left[\frac{T_k^t - T_k^{\tau}}{\Delta t} \right]_{\mathcal{E}}; \\ \beta_{\text{И}} \left[\frac{\Delta^2 T_k}{\Delta R^2} + \frac{\Delta T_k}{R_k \Delta R} + \frac{\gamma_k E_k^2}{\chi} \right]_{\text{И}} &= \left[\frac{T_k^t - T_k^{\tau}}{\Delta t} \right]_{\text{И}}; \\ (k \Delta^2 \varphi_k + \Delta \varphi_k)^{\tau} &= \left[k \Delta^2 \varphi_k + \Delta \varphi_k - \frac{\varphi_k \Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(k \Delta^2 \varphi_k + \Delta \varphi_k + \frac{k \Delta \varphi_k \Delta \gamma_k}{\gamma_k} \right) \right]_{\text{И}}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

которую при составлении программы для ЭВМ удобно преобразовать в систему уравнений вида $T_k^t = f(T_k^{\tau})$ с включением уравнений (10). Определив T_k^t , по (1) можно найти соответствующие значения γ_k . Расчет распределения потенциалов φ_k в объеме ТНИ производится решением системы, получаемой путем модернизации последнего уравнения системы (11):

$$\left. \begin{aligned} [(m+1) \varphi_{m+1}]^{\tau} &= \varphi_{m+1} \left\{ (m+1) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} \times \right. \\ &\quad \left. \times [\gamma_m + m \gamma_{m+1}] \right\}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} [k \varphi_{k-1} - (2k+1) \varphi_k + (k+1) \varphi_{k+1}]^{\tau} &= \\ &= \varphi_{k-1} \left[k \left(1 - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} \gamma_k \right) \right] - \varphi_k \times \\ &\times \left\{ (2k+1) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} [(k+1) \gamma_k + k \gamma_{k+1}] \right\} + \\ &+ \varphi_{k+1} \left\{ (k+1) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} [\gamma_k + k \gamma_{k+1}] \right\}; \\ \dots \dots \dots \\ [(z-1) \varphi_{z-2} - (2z-1) \varphi_{z-1} + z \varphi_z]^{\tau} &= \\ &= \varphi_{z-2} \left[(z-1) \left(1 - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} \gamma_{z-1} \right) \right] - \varphi_{z-1} \times \\ &\times \left\{ 2z-1 - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} [z \gamma_{z-1} + (z-1) \gamma_z] \right\} + \\ &+ \varphi_z \left\{ z - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{И}}} [\gamma_{z-1} + (z-1) \gamma_z] \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

По рассчитанным потенциалам определяются для момента τ распределение E и объемных зарядов Q в ТНИ. Расчеты проводятся на ЭВМ по программе TERMA [4], в которой изменение T рассчитывается с шагом $\Delta t \leq 0,25 \Delta R^2 / \beta_{\text{И max}}$ до установившегося режима. Установлено [7], что процесс разогрева электрически нагруженного диэлектрика в этих условиях сопровождается движением волн объемных зарядов, которая взаимосвязана с движением волны E в режиме нестационарной теплопроводности.

Амплитуда E_m этой волны в различных точках ТНИ не должна превышать $E_{\text{доп}}$ при соответствующей температуре. Разность $\Delta E = E_{\text{доп}} - E_m$ наиболее информативна в оценке работоспособности ТНИ, так как движение этих волн может привести к кратковременному возникновению в локальных объемах изоляции напряженности электрического поля, намного большей, чем в стационарных режимах.

Обобщенные факторы и функции отклика многофакторных математических моделей ТНИ. Для оптимизации ТНИ приходится варьировать значения факторов $R_b, d, \gamma, \varepsilon_r, \chi_{\text{И}}, \chi_{\mathcal{E}}, p, \alpha, T_N$ и при каждом их сочетании выполнять полный расчет по программе TERMA, чтобы для различных R определить T_{max}, E_m и сравнить их с допустимыми. Это весьма трудоемко. Применение статистических многофакторных моделей [8] значительно эффективней. Поэтому значения ΔE в слоях изоляции возле электродов, в среднем слое и в промежуточных приняты для таких моделей в качестве функций отклика: $\hat{y}_1 = \Delta E_1 = \Delta E(R = R_b + \Delta R/2)$; $\hat{y}_2 = \Delta E_2 = \Delta E(R_b + 2\Delta R)$; $\hat{y}_3 = \Delta E_3 = \Delta E(R_b + 0,5d)$; $\hat{y}_4 = \Delta E_4 = \Delta E(R_b - 2\Delta R)$; $\hat{y}_5 = \Delta E_5 = \Delta E(R_z - \Delta R/2)$. Кроме того, принято: $\hat{y}_6 = E_6 = E(R_z - \Delta R/2)$; $\hat{y}_7 = T_{\text{max}}(R = R_b)$; $\hat{y}_8 = \Delta T = T_{\text{доп}} - T_{\text{max}}(R = R_b)$; $\hat{y}_9 = \nabla T = (T_{k-1} - T_k)/\Delta R$, где $T_{\text{доп}}$ — допустимая для данного диэлектрика температура. Для всех девяти моделей $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_9$ указанные выше простые факторы сведены к четырем обобщенным факторам — электрофизическому X_1 , геометрическому X_2 , теплоотвода в наружную среду X_3 и теплофизическому X_4 . Диапазоны их изменения установлены применительно к созданию блоков ВТВМ.

Фактор X_1 связан с постоянной $\tau = \epsilon_0 \epsilon_{rH} / \gamma$ релаксации зарядов в изоляции, а его вид $X_1 = -\lg(\tau \gamma_0 / \epsilon_0) = an^0 - \lg \epsilon_{rH}$ — с аппроксимирующей функцией согласно (1). Для применяемых диэлектриков $X_1 = 0,301 - 1,082$ (рис. 3, а).

Соотношение $X_2 = R_b \ln[(R_b + d)/R_b]$ выбрано как применяющееся для Лапласова поля между коаксиальными электродами [9], и при $R_b = 10 - 12$ мм, $d = 4 - 10$ мм оно лежит в диапазоне 3,45—7,27 мм (рис. 3, б).

Условия эксплуатации ВТБМ предусматривают их обдув воздухом при $T_N = 273 - 313$ К и $v = 4 - 12$ м/с. Учитывая (8), получаем, что $X_3 = \alpha T_N = 10^3 (5,897 - 16,777)$ Вт/м² (рис. 3, в).

Для обобщения теплофизических параметров удобно тепловыделение в феррите радиусом R_f и обмотке отнести только к обмотке. Тепло, выделяющееся в отрезке конструкции длиной l , передается изоляции только в радиальном направлении в виде теплового потока плотности h , поэтому $\pi(R_b^2 - R_f^2)l = 2\pi R_b l h$.

Для рассматриваемых конструкций ВТБМ $h = 0,5p(R_b + R_f)(R_b - R_f)/R_b = 0,875pK\Delta R$,

где $K = (R_b - R_f)/\Delta R$.

С другой стороны, из (4) для точки m

$$h = -\chi_s \partial T / \partial R|_s; h = -\chi_{и} \partial T / \partial R|_{и}.$$

Это позволяет найти вогнутость температурного профиля на границе раздела двух сред:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{и} - \left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_s = h \left(\frac{1}{\chi_s} - \frac{1}{\chi_{и}} \right) = 0,875pK\Delta R \frac{\chi_{и} - \chi_s}{\chi_{и}\chi_s}. \quad (13)$$

Разделив (13) на $K\Delta R \cdot 10^{-5}$, получаем обобщенный теплофизический фактор

$$X_4 = -\frac{10^{-5}}{K} \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} = -0,875p \frac{\chi_{и} - \chi_s}{\chi_{и}\chi_s} \cdot 10^{-5}, \quad (14)$$

который для рассматриваемых условий равен (3,428—8,085) К/м² (рис. 3, г).

Обоснование плана многофакторных моделей ТНИ. Для моделей выбран равномерный симметричный многофакторный регулярный план типа $3^4/27$, поскольку в нем теоретическая информационная эффективность извлечения полезной информации из результатов экспериментов для модели главных эффектов составляет 100 % [10]. Существенно, что план является робастным, т. е. он устойчив по отношению к выбору конкретной структуры уравнения регрессии, а также, что он обеспечивает квази-Д-оптимальность практически любой модели, построенной по результатам эксперимента. Как показала проверка, максимальный коэффициент парной корреляции между любыми эффектами по всем полученным девяти моделям не превышал 0,36, что позволяет устойчиво оценивать коэффициенты этих моделей.

Разработка математических моделей и анализ их статистических характеристик проводились с помощью пакета прикладных программ «Планирование, регрессия и анализ моделей» [11].

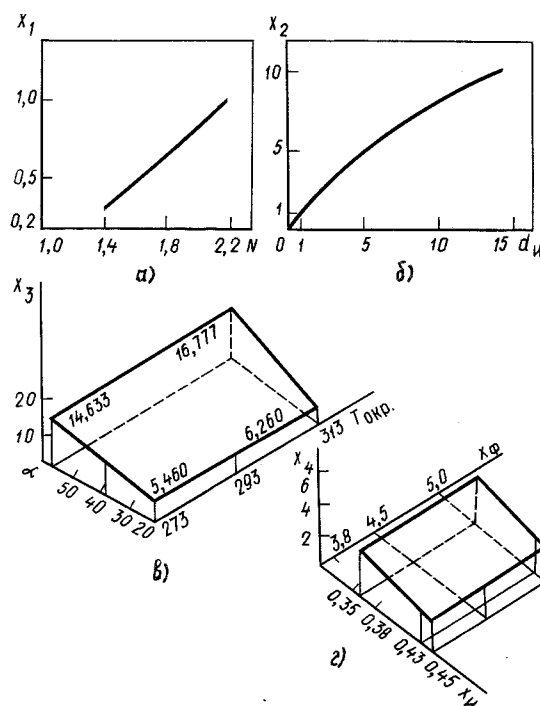


Рис. 3. Диапазоны изменения обобщенных факторов: а — электрофизического X_1 ; б — геометрического X_2 ; в — теплоотдачи X_3 ; г — теплофизического X_4

Характеристики многофакторных математических моделей ТНИ. Статистические характеристики полученных математических моделей $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_9$ приведены в таблице. В качестве условного значения среднеквадратичная погрешность результатов для каждой функции отклика было выбрана равной 3 % среднего значения всех результатов этого отклика.

Все математические модели высоковольтной ТНИ электрических аппаратов характеризуются весьма хорошей устойчивостью коэффициентов к случайным составляющим первичных результатов: числа обусловленности для четырех моделей равны единице, а для остальных не превышают 9,64:

$$\begin{aligned} y_1 &= 15,347 - 5,251x_4 - 3,890x_3 - 3,102x_2 + \\ &\quad + 2,336x_1 + 1,274x_3x_4 - 1,268z_3 + 1,106x_1x_4 + \\ &\quad + 0,905z_4 + 0,872x_2z_4 + 0,803x_1x_2; \\ y_2 &= 17,641 - 4,748x_4 - 3,925x_3 - 3,226x_2 - \\ &\quad - 1,629z_3 + 0,992x_3x_4 + 1,496x_1 + 1,180x_1x_2 + \\ &\quad + 1,136x_1x_4 + 1,171z_4 + 0,871z_1z_2x_3 + 0,579z_1x_3; \\ y_3 &= 20,619 - 4,733x_4 - 4,719x_3 - 1,557x_2 - \\ &\quad - 1,358z_3 + 1,264x_3x_4 + 0,536z_4; \\ y_4 &= 22,604 - 5,666x_3 - 5,313x_4 - 2,285x_1 - \\ &\quad - 1,459z_3 - 1,562x_1x_4 - 1,615x_1x_3 - 0,671z_1x_2z_3 - \\ &\quad - 1,052z_1 + 0,830x_2x_3z_4; \\ y_5 &= 23,592 - 6,723x_3 - 4,550x_4 + 2,181z_2x_3x_4 + \\ &\quad + 2,130z_2z_3x_4 + 2,021z_2x_4 - 2,441x_1x_3x_4 - 1,611z_3 - \\ &\quad - 1,025x_2x_3z_4 - 2,030x_1z_4 + 1,420z_1x_2x_3 + \\ &\quad + 1,670x_2z_3x_4 - 1,157x_1x_3; \end{aligned}$$

Параметры статистического анализа	Условные обозначения	Значения параметров для модели $\hat{y}_j$								
		$\hat{y}_1$	$\hat{y}_2$	$\hat{y}_3$	$\hat{y}_4$	$\hat{y}_5$	$\hat{y}_6$	$\hat{y}_7$	$\hat{y}_8$	$\hat{y}_9$
Условные дисперсия и средне-квадратичная погрешность	S_y^2	0,2121	0,2801	0,3827	0,4598	0,5010	0,1073	99,0378	0,1144	0,00340
Число обусловленности	S_y	0,4605	0,5292	0,6186	0,6781	0,7078	0,3276	9,9518	0,3382	0,0583
Отношение максимального собственного числа к минимальному	cond 1	1,00	2,39	1,00	4,72	5,19	9,64	1,00	1,00	4,42
Проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели	cond 2	1,00	3,59	1,00	3,87	4,84	8,28	1,00	1,00	5,99
	$S_{ад}^2$	2,6071	1,5356	0,9796	1,8646	3,2527	0,5812	100,85	0,6945	0,00256
	$F_{расч}$	12,29	5,40	2,56	4,06	6,49	5,42	1,02	6,07	0,75
	$F_{табл}$	1,64	1,67	1,57	1,62	1,69	1,83	1,51	1,59	1,62
	$f_{ад}$	16	15	20	17	14	10	25	19	17
	α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Величина и значимость коэффициента множественной корреляции	R	0,9884	0,9932	0,9929	0,9917	0,9919	0,9972	0,7080	0,9987	0,9975
	f_k	10	11	6	9	12	16	1	7	9
	$f_{расч}$	16	15	20	17	14	10	25	19	17
	$F_{табл}$	67,5	99,9	233,5	112,1	70,9	110,2	25,1	1036,6	370,4
	α	3,69	3,73	3,87	3,68	3,8	4,5	7,8	3,8	3,7
	α	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Средняя погрешность аппроксимации	$\tilde{e}_y$	9,33*	8,0	4,3	5,7	5,3	4,1	2,4	4,44**	1,9
Для рассеивания, объясняемая моделью	$Q_{\hat{y}}$	0,9769	0,9865	0,9859	0,9834	0,9838	0,9944	0,5013	0,9974	0,9949

Примечания: * Без учета одного результата опыта вблизи нуля значений $\hat{y}_1$. ** Без учета трех результатов опытов вблизи нуля значений $\hat{y}_8$.

$$y_6 = 10,921 - 2,320z_2x_3x_4 + 2,737x_1x_4 + 1,530x_4 + 1,879x_1 - 1,690x_1z_2x_4 - 1,911z_2x_4 + 0,631x_1x_2x_4 + 0,855x_1x_2 - 1,237x_1z_2z_3 + 1,222x_2z_4 - 0,784z_2 + 1,034x_3 + 0,575x_2 + 0,702x_3x_4 - 0,887x_1z_3 + 0,650x_2x_3z_4;$$

$$y_7 = 331,724 + 9,689x_4;$$

$$y_8 = 11,274 - 9,689x_4 - 7,581x_3 - 4,983x_2 - 1,923z_3 + 1,879x_3x_4 - 1,470x_2x_4 + 1,093z_4;$$

$$y_9 = 1,940 + 0,539x_4 + 0,065x_1z_2x_4 + 0,057z_2x_3x_4 - 0,059x_1x_4 + 0,001x_1x_2z_3 - 0,050x_1x_3x_4 + 0,063z_2x_4 - 0,058x_3x_4 - 0,050z_4,$$

где

$$x_1 = 2,360(X_1 - 0,658);$$

$$x_2 = 0,615(X_2 - 5,619);$$

$$x_3 = 0,180(X_3 - 11,230);$$

$$x_4 = 0,385(X_4 - 5,490);$$

$$z_1 = 1,929(x_1^2 - 0,228x_1 - 0,579);$$

$$z_2 = 2,422(x_2^2 - 0,330x_2 - 0,546);$$

$$z_3 = 1,567(x_3^2 - 0,058x_3 - 0,642);$$

$$z_4 = 2,195(x_4^2 - 0,293x_4 - 0,558).$$

Проверка гипотезы об адекватности моделей показала, что при принятом значении средне-квадратичных погрешностей адекватность моделей следует считать удовлетворительной.

Информативность математических моделей (кроме модели $\hat{y}_7$) весьма высокая: множественный коэффициент корреляции изменяется в пределах 0,9884—0,9987. Статистическая значимость коэффициента множественной корреляции также весьма высокая.

Средняя погрешность аппроксимации составила от 1,9 % до 9,3 %. Доля рассеивания по результатам, объясняемая математической моделью, составляет 0,9769—0,9974, а для $\hat{y}_7$ — 0,5013.

Из вышеприведенного следует, что полученные математические модели можно использовать в целях оптимизации ТНИ по различным критериям качества при разнообразных исходных условиях.

Вычислительный эксперимент с математическими моделями. Многофакторная оптимизация ТНИ была проведена с использованием метода случайного поиска и равномерно распределенных ЛП_T-последовательностей [12]. Для откликов должно выполняться условие $10 < \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_5 \leq 15$; $\hat{y}_8 \rightarrow \max$ при различных значениях обобщенных факторов.

В первой задаче ($X_1 = 1,082$, $X_2 = 7,274$, $X_3 \rightarrow \text{opt}$, $X_4 \rightarrow \text{opt}$) получено: $\hat{y}_8 = 1,076$ при $X_3 = 16,692$ и $X_4 = 4,192$, т. е. при заданных и неизменных электрофизических и геометрических параметрах ТНИ оптимизацией ее теплофизических характеристик и условий теплоотдачи получены такие их значения, при которых максимальная рабочая температура в ТНИ всегда ниже допустимой не менее чем на 1,076 К, и при этом запас ΔE электрической прочности составляет 10—15 кВ/мм во всех точках изоляции.

Для $X_1 = 1,082$, $X_2 = 3,452$, $X_3 \rightarrow \text{opt}$, $X_4 \rightarrow \text{opt}$ наибольшее значение $\hat{y}_8 = 7,482$ получается при $X_3 = 16,565$ и $X_4 = 5,079$.

Для случая $X_1 = 1,082$, $X_2 = 3,452$, $X_3 \rightarrow \text{opt}$, $X_4 = 8,085$ оптимизация ТНИ приводит к $\hat{y}_8 = 6,273$ при $X_3 = 14,298$.

Выводы. 1. Разработана обобщенная многофакторная математическая модель термонапряженной изоляции (ТНИ), учитывающая ряд параметров (геометрические размеры, электро- и теплофизические свойства диэлектрика, нестационарные условия и режимы эксплуатации), которые сведены к четырем обобщенным факторам. В качестве функций отклика приняты важнейшие характеристики ТНИ (запас электрической прочности, абсолютное значение напряженности электрического поля, максимальная температура в нагреваемой изоляции и др.), определяющие ее работоспособность.

2. Использование при моделировании функций отклика симметричного регулярного плана типа $3^4/27$ обеспечило устойчивость к выбору структуры многофакторного уравнения регрессии и квази-Д-оптимальность всех полученных моделей.

3. На основе этих полиномиальных моделей разработана инженерная методика выбора опти-

мальных сочетаний обобщенных факторов и рациональных режимов эксплуатации ТНИ.

4. Проведение вычислительного эксперимента позволило оптимизировать электроизоляционную конструкцию высоковольтного трансформаторно-выпрямительного модуля напряжением 100 кВ и показало высокую эффективность применения разработанной методики создания высоковольтной ТНИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mehrfaktorenalterung der polymeren isolation von Hochspannungsumformern* / M. Ierusalimov et al.— Technische universitat Dresden, II Wissenschaftliche Konf. der Sektion Elektrotechnik mit internationaler Beteiligung, 10-12 Nov. 1987, Themengruppe H, N HI-II, S. 35—37.
2. Сканив Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей).— М.: Госфизматиздат, 1958.
3. Криштафович И. А., Соколовский С. А., Романенко Ю. В. Электрические характеристики полимерной изоляции в теплонапряженных высоковольтных устройствах.— Известия вузов. Энергетика, 1989, № 11.
4. Соколовский С. А., Романенко Ю. В. Математическая модель термонапряженной электроизоляции в динамическом режиме.— Техническая электродинамика, 1990, № 4.

5. Костиков В. Г., Никитин И. Е. Источники электропитания высокого напряжения РЭА.— М.: Радио и связь, 1986.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем.— М.: Мир, 1963.
7. Соколовский С. А., Романенко Ю. В., Криштафович И. А. Особенности пробоя полимерной изоляции при термоударах.— Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовой и полупроводниковой техники: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. М.: ВЭИ, 1989.
8. Соколовский С. А., Радченко С. Г., Романенко Ю. В. Моделирование высоковольтной термонапряженной изоляции (ТНИ) электроаппаратов на основе обобщенных факторов.— Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной преобразовательной, силовой и полупроводниковой техники: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. М., ВЭИ, 1989.
9. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
10. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента.— М.: Наука, 1976.
11. Информационный листок о научно-техническом достижении № 88-007. Пакет прикладных программ ПРИАМ.— Киев: УкрНИИТИ, Киевское отд., 1988.
12. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров задач со многими критериями.— М.: Наука, 1981.

[06.09.90]

УДК 537.523.2.001.6

Возникновение одноэлектродного разряда в области первой критической частоты

БЕСХЛЕБНЫЙ С. И.

Введение. Одноэлектродным электрическим разрядом принято называть разряд, локализованный возле одного из электродов в силу резкой неоднородности электрического поля в промежутке. Под первой критической понимают такую частоту переменного напряжения ($F_{кр}$), при превышении которой обнаруживается первое понижение напряжения возникновения разряда по отношению к его пороговому значению на постоянном напряжении. Это понижение напряжения возникновения разряда на частотах, превышающих первую критическую, объясняется накоплением положительного объемного заряда внутри промежутка [1—7].

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по возникновению ВЧ-разряда в промежутках с резконеоднородными электрическими полями типа острие — плоскость [1—6]. Однако в силу большого разнообразия, сложности и запутанности явлений и процессов, определяющих развитие газового разряда, пока нет общепринятой качественной модели, которая бы однозначно интерпретировала все экспериментальные результаты. Ниже в качестве обсуждения приводится описание механизма возникновения разряда как на частоте ниже первой критической, так и выше нее. При этом имеются в виду

разрядные промежутки типа острие — плоскость, для которых порог положительной короны определяется вспыхивающими импульсами, напряжение возникновения которых U_v ниже напряжения возникновения импульсов Тричела U_t , определяющих порог отрицательной короны. В качестве газовой среды рассматривался атмосферный воздух, являющийся электроотрицательным газом. Все количественные оценки даны для острия диаметром 1 мм с полусферическим кончиком, удаленным от плоского электрода на 4 см.

Модели формирования предразрядных процессов. Частота ниже первой критической. В основу предполагаемой модели развития разряда на этой частоте положены следующие факты. Во-первых, ВЧ-разряд инициируется при пороговом напряжении U_n , численно равном пороговому напряжению вспыхивающих импульсов положительной короны U_v во время отрицательного полупериода (—ПП) ВЧ-напряжения, импульсом Тричела [4, 5]. Ясно, что при этом напряжение на острие недостаточно для его развития, так как $U_n < U_t$. Во-вторых, перед возникновением импульса Тричела наблюдаются предразрядные импульсы во время +ПП [4]. В-третьих, согласно предварительным оценкам, положительные ионы, создаваемые в зоне ионизации на этой частоте, не способны

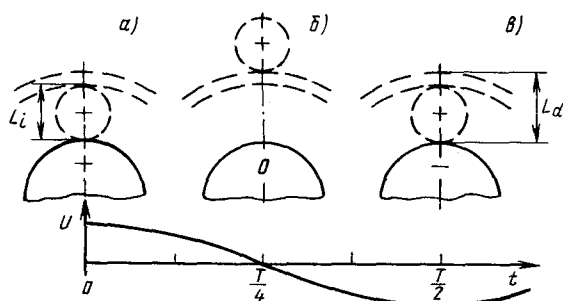


Рис. 1. Дрейф положительных ионов, созданных предразрядным импульсом, прошедшим в +ПП. Штриховой линией отмечены граница зоны ионизации L_i и путь L_d , проходимый положительным ионом за четверть периода на частоте меньше первой критической

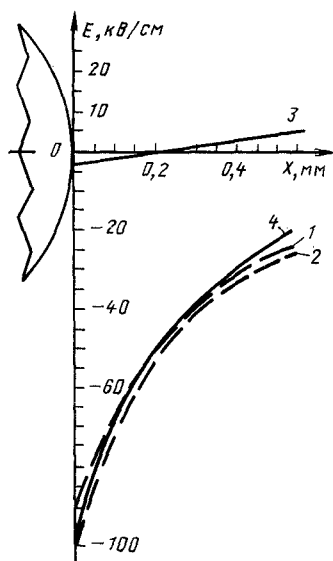


Рис. 2. Распределение электрических полей вдоль оси разрядного промежутка во время —ПП: 1 — внешнего поля E_v при напряжении на острие $U_n = U_v = 7,65$ кВ; 2 — внешнего поля E_T при $U_T = 8,1$ кВ; 3 — поля объемного заряда $E_{o.3}$; 4 — результирующего поля E_z

накапливаться в ней потому, что путь L_d , проходимый положительным ионом в результате дрейфа в переменном электрическом поле за промежуток времени, равный четверти периода ($T/4$), оказывается больше длины зоны ионизации (L_i) [1, 7].

Предположим для упрощения последующих расчетов, что положительный объемный заряд N_+ , создаваемый одним предразрядным импульсом, равномерно распределен в сфере диаметром, равным размеру зоны ионизации. Тогда положение этого объемного заряда, созданного в максимум положительного потенциала на острие, с течением времени будет изменяться, как показано на рис. 1. Из него видно, что спустя промежуток времени, равный $3T/4$ после создания N_+ , он полностью нейтрализуется на острие. В течение же промежутка времени, равного $T/2$ с момента образования N_+ , его электрическое поле накладывается на внешнее электрическое поле, создаваемое напряжением, приложенным к острию. При этом во время +ПП результирующее электрическое поле уменьшается у поверхности острия (рис. 1, а), а во время —ПП оно увеличивается полем этого заряда (рис. 1, в).

Для количественного сравнения напряженностей электрического поля объемного заряда ($E_{o.3}$) и внешнего поля (E) на рис. 2 приведены

распределения этих полей вдоль оси разрядного промежутка во время —ПП. При вычислении $E_{o.3}$ предполагали на основании равенства $U_n = U_v$, что число положительных ионов N_+ , оставляемых предразрядным импульсом того же порядка, что и число ионов, создаваемых всплесчным импульсом: примерно $2 \cdot 10^7$. Результирующая напряженность электрического поля вычислялась по формуле

$$E_z = E_v + E_{o.3}, \quad (1)$$

где E_v — напряженность поля при напряжении на острие $U_v = U_n = 7,65$ кВ.

Даже эти приближенные количественные оценки показывают, что во время —ПП напряженность результирующего поля E_z может достигать значения, равного E_T и соответствующего напряженности внешнего электрического поля у поверхности острия при напряжении на нем, равном пороговому напряжению импульсов Тричела: $U_T = 8,1$ кВ. Поэтому мы предполагаем, что разряд на частоте ниже первой критической инициируется импульсом Тричела в —ПП благодаря влиянию электрического поля объемного заряда от предразрядного импульса, прошедшего в предыдущий +ПП, хотя пороговое напряжение $U_n < U_T$. Очевидно, что рассматриваемый механизм возникновения импульса Тричела носит статистический характер: не каждый предразрядный импульс способен в последующий —ПП создать условия для его развития, а только тот, для которого в момент его появления складываются наиболее благоприятные условия.

Частота выше первой критической. Модель формирования предразрядных процессов на этой частоте основана на следующих фактах. Во-первых, ВЧ-разряд инициируется предначальным стримером при пороговом напряжении $U_n < U_v < U_s$ (U_s — пороговое напряжение предначальных стримеров положительной короны) в момент максимума напряжения во время +ПП [4, 5]. Очевидно, что напряжение, приложенное к острию, не обеспечивает достаточных условий для его развития. Во-вторых, перед возникновением предначального стримера, инициирующего ВЧ-разряд, регистрируются предразрядные импульсы в момент максимума напряжения во время +ПП (наблюдаются также и предразрядные импульсы во время —ПП) [4]. В-третьих, на этой частоте положительный объемный заряд способен накапливаться в зоне ионизации, поскольку теперь путь, проходимый положительным ионом в результате дрейфа во внешнем поле за промежуток времени, равный $T/4$, меньше длины зоны ионизации [1, 8].

Подробное исследование процессов образования лавин и дрейфа положительного объемного заряда, оставляемого ими, показывает, что на частотах, незначительно превышающих первую критическую, способен накапливаться только положительный заряд N_+ от лавин, проходящих в —ПП, тогда как N_+ от лавин, проходящих в +ПП, полностью нейтрализуется на острие за промежутки времени, равный T . Это хорошо видно из рис. 1, 3 и 4. На рис. 3 показано распреде-

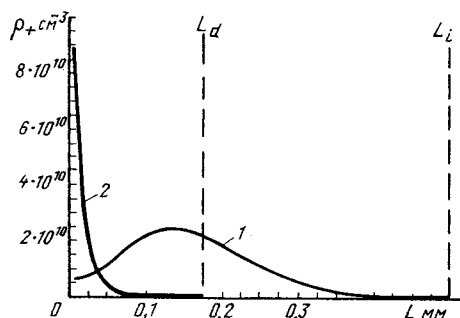


Рис. 3. Распределение плотности объемного заряда, оставляемого одиночной лавиной вдоль оси разрядного промежутка: 1 — прошедшей в —ПП; 2 — прошедшей в +ПП. Обозначения для L_i и L_d — те же, что на рис. 1

ление плотности объемного заряда ρ_+ вдоль оси разрядного промежутка, созданного как лавиной, прошедшей в —ПП (кривая 1), так и лавиной, прошедшей в +ПП (кривая 2). Для разрядного промежутка, представленного выше, $F_{кр} = 1$ МГц, поэтому все вычисления проделаны для $F = 1,38$ МГц и напряжения на острие, равного $U_n = 7,3$ кВ, по методике, описанной в [7—9]. Характер смещения N_+ , созданного лавиной, прошедшей в +ПП, по-прежнему иллюстрирует картина на рис. 1, с той только разницей, что теперь путь, проходимый ионами за четверть периода (L_d), меньше, чем размер зоны ионизации (L_i). Но поскольку практически все созданные ионы сосредоточены на расстоянии от поверхности острия, меньшем L_d (см. кривую 2 на рис. 3), то спустя промежуток времени, равный $3T/4$, этот положительный объемный заряд полностью нейтрализуется на острие. Смещение заряда N_+ , созданного лавиной, прошедшей в —ПП, показано на рис. 4. В течение первой четверти периода часть N_+ , расположенного на расстоянии менее L_d от поверхности острия, нейтрализуется на нем. Оставшийся N_+ совершает колебательное движение вдоль оси разрядного промежутка. Если лавины проходят в каждый —ПП, то в этом случае будет происходить накопление N_+ .

Электрическое поле этого заряда будет искажать внешнее поле. Характер этого искажения показан на рис. 5, на котором представлено распределение электрического поля, создаваемого накапливаемым положительным объемным зарядом. Расчеты каждой последующей лавины и оставляемого ей N_+ проводились с учетом искажающего действия как уже накопленного к данному моменту времени положительного объемного заряда, так и разового влияния N_+ от лавины, проходящей в +ПП (во время отрицательного полупериода). Предполагалось, что в каждый полупериод стартует только одна лавина. На этом же рисунке приведено распределение поля объемного заряда от единичной лавины, прошедшей в +ПП, когда искажением внешнего поля можно пренебречь (кривая 2*). Все вычисления проводились с использованием ЭВМ по методике, изложенной в приложении.

Из рис. 5 видно, что внешнее электрическое поле усиливается полем накапливаемого N_+ на

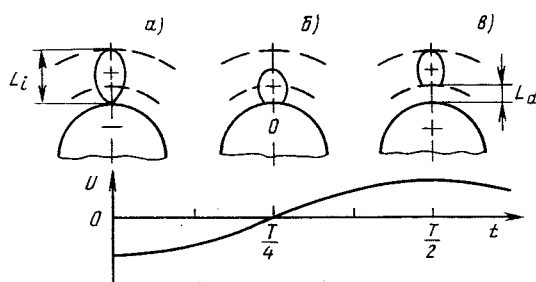


Рис. 4. Дрейф положительных ионов, созданных лавиной, прошедшей в —ПП. Обозначения для L_i и L_d — те же, что на рис. 1

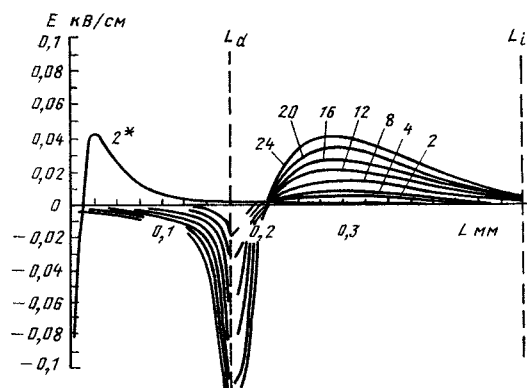


Рис. 5. Распределение электрического поля накапливающегося объемного заряда вдоль оси разрядного промежутка. Цифры над кривыми указывают порядковые номера полупериодов, счет начинается с отрицательного. Кривая 2* соответствует полю N_+ одиночной лавины, прошедшей в +ПП. Обозначения для L_i и L_d — те же, что на рис. 1

расстоянии 0,2 мм от поверхности острия в —ПП и ослабляется в +ПП. На расстоянии более 0,2 мм искажение внешнего поля носит обратный характер. Влияние поля объемного заряда от одиночной лавины, прошедшей в +ПП (кривая 2*), аналогично, однако длина первого участка теперь не превышает 12 мкм, а второй практически равен длине всей зоны ионизации. При этом расчет одиночных лавин, развивающихся в искаженном электрическом поле, показал, что размеры лавин, проходящих во время —ПП, увеличиваются, тогда как размеры лавин, проходящих в +ПП, даже несколько уменьшаются по сравнению с размерами лавин, проходящих в неискаженном поле.

Чтобы понять механизм формирования предразрядных процессов на этой частоте, предлагается также учесть нарастание числа одновременно развивающихся (в тот или иной полупериод) лавин по следующей схеме. Как известно, в разрядном промежутке, содержащем электроотрицательный газ, накапливается и отрицательный объемный заряд N_- [6]. Можно считать, что N_- практически весь создается лавинами, проходящими в —ПП, и он накапливается за зоной ионизации. Действительно, все электроны, создаваемые лавиной, прошедшей в +ПП, нейтрализуются на острие, тогда как после прохождения лавин в —ПП практически все созданные ей электроны, попадая в область слабого электрического

поля, образуют число отрицательных ионов, примерно равное количеству положительных (для одиночной лавины в нашем случае оно было примерно равно $2 \cdot 10^3$). Во время +ПП эти отрицательные ионы, входя в зону ионизации и разрушаясь в области сильного электрического поля, являются эффективным источником свободных электронов, инициирующих новые лавины [8]. Поэтому по мере накопления N_+ и увеличения размера лавин, проходящих в —ПП, идет и накопление N_- , следовательно, нарастает и число одновременно развивающихся лавин в +ПП. С другой стороны, число лавин, одновременно развивающихся в —ПП, также должно увеличиваться. Это связано с тем, что число положительных ионов, создаваемых лавинами, прошедшими в +ПП растет. Они при нейтрализации на острие в —ПП бомбардируют его поверхность и создают вторичные электроны, инициирующие лавины в этот полупериод. Естественно, что увеличение числа положительных ионов, создаваемых в +ПП, влечет соответствующее нарастание числа вторичных электронов и увеличение числа лавин, одновременно развивающихся в —ПП.

Таким образом, модель предразрядного процесса можно представить в виде такой последовательности событий. За счет созданного внешним источником ионизации начального электрона в момент максимума напряжения либо в положительный, либо отрицательный полупериод проходит одиночная лавина. Если она прошла в +ПП, то благодаря бомбардировке острия положительными ионами, оставленными ей, в последующий —ПП для поддержания дальнейшего процесса должен быть создан у поверхности острия хотя бы один новый электрон. Тогда и в этом случае во время —ПП будет иметь место хотя бы одна лавина. Она оставляет N_+ и N_- . Для поддержания непрерывного процесса также необходимо, чтобы благодаря N_- в последующий +ПП был создан хотя бы один свободный электрон у границы зоны ионизации. Тогда начинается процесс постепенного накопления N_+ и N_- . Как следствие накопления N_+ будет увеличиваться размер лавин, проходящих в —ПП, а значит и количество оставляемых или отрицательных ионов. Это неизбежно ведет к увеличению числа одновременно развивающихся лавин в +ПП, а затем и в —ПП. Таким образом, амплитуда предразрядных импульсов, как совокупности некоторого числа одновременно развивающихся лавин, постепенно нарастает и достигает значения, необходимого для их регистрации с помощью системы, описанной в [4, 5]. При этом процесс, видимо, находится уже на такой стадии, что несмотря на статистический характер включенных в него явлений, он не может прекратиться (в [2, 4, 5] ни разу не удавалось наблюдать только предразрядные импульсы, не завершающиеся ВЧ-вспышкой). Конечным результатом такой «раскачки» амплитуды предразрядных импульсов становится перерастание одного из них в предначальный стример, инициирующий разряд в положительный полупериод.

Естественно, что рассмотренный механизм

развития предразрядного процесса также носит статистический характер. Не каждый электрон, созданный внешним источником ионизации, способен создать соответствующую последовательность событий, завершающуюся предначальным стримером, а только тот, который появляется при подходящих условиях. Многое в дальнейшем развитии предразрядного процесса зависит и от стечения обстоятельств, при которых возникает каждая последующая серия лавин.

Вывод. Представленные выше две модели формирования предразрядных процессов позволяют дать качественное объяснение ранее полученным экспериментальным результатам. При этом на частотах, меньших первой критической, достаточно воспользоваться только первой из предложенных моделей, тогда как на частотах, превышающих первую критическую, необходимо для объяснения экспериментов привлекать обе модели и учитывать возможность перехода от одного механизма формирования к другому. Однако следует отметить, что для окончательного ответа на вопрос о механизме формирования разряда на частотах в области первой критической частоты требуются дополнительные, более строгие количественные оценки, которые бы позволили получить необходимые численные критерии возникновения разряда на частотах как меньших, так и свыше первой критической.

Приложение. Порядок и методика расчета поля накапливающегося объемного заряда. Прежде всего для заданной геометрии разрядного промежутка, частоты и напряжения, приложенного к нему, вычисляется внешнее электрическое поле на оси промежутка E , длина зоны ионизации L_i и путь L_d , проходимый ионом за четверть периода, по методике, предложенной в [10]. Затем вычисляются зависимость общего числа положительных ионов, создаваемых лавиной, заряда N_+ и радиуса головки лавины r_L от проходимого ею пути, а также распределение плотности объемного заряда ρ_+ вдоль оси промежутка. После этого можно рассчитать поле этого объемного заряда (или сохранившейся его части) на оси промежутка и вносимые им искажения. По этой же схеме рассчитывается последующая лавина, но все ее параметры вычисляются уже в искаженном результирующем поле промежутка напряженностью E_z и т. д.

Все количественные оценки проводились только в пределах зоны ионизации методом численного интегрирования. Для этого вся зона ионизации вдоль оси разрядного промежутка разбивалась на некоторое число участков (M). Коэффициент ионизации α вычислялся по двум формулам:

$$\alpha = 6460 \exp(-190/E) \text{ и } \alpha_{\text{эф}} = 0,2(E - 24,5)^2, \quad (\text{П-1})$$

взятым соответственно из [1] и [11]. Общее число создаваемых лавиной положительных ионов в зависимости от пройденного ею пути l_k определялось по формуле

$$N_{+k} = n_0 \left[\exp \left(\sum_{j=1}^{j=k} \alpha_j \Delta l_j \right) - 1 \right]. \quad (\text{П-2})$$

Размер головки лавины в зависимости от пройденного ею пути вычислялся по методике, предложенной в [9]. При этом выражение для радиуса головки лавины, приведенное в [9], было преобразовано к следующему виду:

$$r_{lj} = \left\{ \sum_{k=1}^{k=j} [(An_k \Delta l) / K_k + B \sqrt{l_k E_k^3 \Delta l}] \right\}^{1/3} \quad (\text{П-3})$$

Далее вычислялись объем выделенных цилиндрических слоев, радиус которых равнялся r_{lj} , а высота Δl — ширине выделенных на оси участков, и плотность объемного заряда положительных ионов в каждом слое в предположении, что они в нем распределены равномерно. Проекция вектора напряженности электрического поля объемного заряда на ось разрядного промежутка от каждого слоя в заданной точке на оси рассчитывалась по полученной нами формуле:

$$E_{jk} = (e\rho_{+j}/2\varepsilon_0)[|(l_k - l_j) + a| - |(l_k - l_i - a| + \sqrt{r_{lj}^2 + [(l_k - l_j) - a]^2} - \sqrt{r_{lj}^2 + [(l_k - l_j) + a]^2}]. \quad (\text{П-4})$$

Проекция напряженности поля от всего объемного заряда лавины в заданной точке на оси определялась так:

$$E_{0,3} = \sum_{j=1}^{j=M} E_{jk}. \quad (\text{П-5})$$

Вычисление E осуществлялось по формуле (1), приведенной в основном тексте статьи.

В выражениях (П-1) — (П-5) приняты следующие обозначения: $j, k=1, 2, \dots, M$ — номер выделенных участков; α_k, n_k и E_k — значения соответствующих величин в средней точке k -го участка; r_{lk} — радиус головки лавины, дошедшей до середины k -го участка; l_k — расстояние от поверхности острия вдоль оси промежутка до сере-

дины k -го участка; Δl — ширина участка; $a = \Delta l/2$; A и B — некоторые константы по [9]; $n_0=1$ — начальное число электронов, инициирующих лавины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты / М. А. Аронов, Е. С. Колечицкий, В. П. Ларионов и др.; Под ред. В. П. Ларионова — М.: Энергия, 1969.
2. Айтс М. Х., Бесхлебный С. И., Куду К. Ф. Наблюдение за возникновением и развитием световых и токовых импульсов ВЧ короны в диапазоне частот 0,15—1,5 МГц — Уч. зап. Тарт. ун-та, 1977, вып. 443.
3. Куду К. Ф. Исследования по формированию одноэлектродных разрядов. — Тез. докл. II Всесоюз. совещан. по физике электрического пробоя газов, ч. I. Тарту, 1984.
4. Бесхлебный С. И., Куду К. Ф. Исследование возникновения одноэлектродного ВЧ разряда на смешанном напряжении. Уч. зап. Тарт. ун-та, 1988, вып. 809.
5. Бесхлебный С. И., Куду К. Ф. Исследование возникновения одноэлектродного ВЧ разряда при перенапряжениях. Уч. зап. Тарт. ун-та, 1988, вып. 809.
6. Токи несамостоятельного электрического разряда в промежутке острие — плоскость в воздухе в диапазоне частот 0,03—1 МГц / А. А. Жуков, В. Н. Крупин, Я. И. Микицей и др. — Уч. зап. Тарт. ун-та, 1988, вып. 809.
7. Бесхлебный С. И., Жуков А. А., Куду К. Ф. К механизму возникновения одноэлектродного разряда на частотах, меньших первой критической частоты. Тез. докл. III Всесоюз. конф. по физике газового разряда ч. I. Киев, 1986.
8. Бесхлебный С. И., Жуков А. А., Куду К. Ф. Возникновение одноэлектродного ВЧ разряда в воздухе на частоте вблизи критической. Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по физике газового разряда, ч. I. Махачкала, 1988.
9. Эфендиев А. З., Абдурахманов Т. А. Формирование лавины в стример. — Деп. рукопись — Махачкала: Дагестан. гос. ун-т, 1973, № 6931-73.
10. Abou-Seada M. S. IEEE Industry Applications Society, 15-th Annual Meeting Records, 1980, vol. 4, p. 1118—1122.
11. Аронов М. А., Тарасова Т. Н. Разрядные напряжения некоронирующих воздушных промежутков различной конфигурации при высокой частоте. Электричество, 1981, № 6.

[02.08.90]

О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов

КОВАЛЕВ А. П., канд. техн. наук

Анализ и обеспечение безопасности занимают особое место в проблемах надежности систем энергетики. В настоящее время в методическом плане эта проблема как следует даже не осмыслена [1]. В сборнике рекомендованных терминов АН СССР безопасность определена как свойство, характеризующее надежность объектов энергетики. Под безопасностью понимается свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [2].

Под технологическим объектом в статье будем понимать производство, опасное в отношении взрыва (пожара) от источников инициирования этих аварий электрического происхождения. Под опасным состоянием электрооборудования, находящегося под напряжением, будем понимать такое его состояние, когда оно при случайном повреждении способно выделить в окружающую его среду электрический источник, мощность и длительность которого достаточна для воспламенения окружающей его опасной среды. Под опасным состоянием среды будем понимать независимое случайное загазирование помещения, в котором находится электрооборудование (цех, выработка шахты) или случайное независимое соприкосновение горючего материала с электрооборудованием. Под опасным состоянием средств защиты будем понимать такое их состояние, когда при случайном повреждении на защищаемом элементе происходит отказ в срабатывании защитных средств. Опасное состояние среды и средств защиты обнаруживается либо с помощью автоматической системы диагностики, либо в результате профилактики.

Опасные состояния среды и средств защиты, которые не обнаруживаются с помощью автоматических средств диагностики будем относить к скрытым опасностям. Для необслуживаемого в процессе эксплуатации электрооборудования и средств защиты интенсивность восстановления стремится к нулю. Основная задача обеспечения безопасности технологического объекта в период эксплуатации заключается в обеспечении взрывобезопасности и пожаробезопасности на нем, т. е. в почти полном исключении взрывов (пожаров) за счет надежной работы средств технологических и электрических защит, четкой работы обслуживающего персонала.

Как же решить такую задачу, как определить какой надежностью должны обладать средства защиты, как оценить работу обслуживающего персонала, чтобы вероятность аварии или катастрофы на исследуемом объекте была минимальной? В первую очередь нужно определить, какова должна быть допустимая вероятность катастрофы в течение года на рассматриваемом объекте.

Под аварией на технологическом объекте будем понимать случайное появление взрыва или по-

жара, сопровождающееся материальными убытками за счет порчи оборудования и прекращения технологического цикла. Под катастрофой будем понимать случайно происшедшую аварию, при которой гибнут люди.

В СССР существуют нормативные документы, регламентирующие вероятность взрыва и пожара на технологических объектах. Производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном участке в течение года не превышала величины 10^{-6} [3]. Вероятность возникновения пожара в электрическом и другом единичном изделии не должна превышать величины 10^{-6} в течение года [4].

Специалисты США и Японии принимают величину 10^{-6} как тот уровень, к которому следует стремиться, на промышленных предприятиях [5]. Величина 10^{-6} означает, что на 1 000 000 однотипных технологических объектов, опасных в отношении взрыва или пожара и за которыми установлено наблюдение, статистически допускается одна катастрофа (авария) в течение года.

Многие современные потенциально опасные производства спроектированы так, что вероятность крупной аварии (катастрофы) оценивается величиной порядка 10^{-4} [6]. Используя нормы вероятности появления аварий и катастроф, предлагаемые в [3—5], поставленную выше задачу можно сформулировать следующим образом: какую статистическую информацию о исследуемом технологическом объекте нужно собрать в течение времени T , чтобы определить его уровень безопасности (взрывобезопасности и пожаробезопасности), и, если он окажется выше нормируемого (10^{-6}), то такие организационные и технические мероприятия нужно использовать в эксплуатации объекта, чтобы вывести его на нормируемый уровень, т. е. почти полностью исключить аварии и катастрофы на данном предприятии.

Взрыв и пожар — разные явления, но в терминах теории вероятностей они происходят по одной логической схеме и имеют общую математическую модель. Взрыв происходит при случайном появлении опасного источника (короткое замыкание) и случайном появлении опасной концентрации взрывоопасного газа в месте появления открытого источника. Пожар происходит при случайном появлении неотключаемого короткого замыкания и случайном нахождении вблизи поврежденного элемента горючего материала.

Взрыв (пожар) в зависимости от различных производств может произойти при случайном совпадении двух, трех, четырех и более независимых аварийных событий.

Под минимальным взрывоопасным (пожароопасным) совмещением независимых аварийных событий технологического объекта (в данном случае системы «электрооборудование — защита —

окружающая среда» будем понимать такой минимальный набор элементов, находящихся в опасном состоянии, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из взрывоопасного (пожароопасного) состояния.

В одном таком взрывоопасном (пожароопасном) совмещении одна часть минимального набора независимых элементов должна указывать (в зависимости от их состояния) на формирование открытого источника, другая часть элементов — на формирования опасного состояния электрических и технологических защит и последняя группа элементов должна показывать, как формируется опасная среда.

В общем случае рассмотрим минимальное взрывобезопасное (пожаробезопасное) совмещение, состоящее из x_k , $k = \overline{1, n}$ независимых элементов $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$. Пусть состояние каждого элемента системы описывается случайной функцией $x_k(t)$.

Случайный характер изменения функции $x_1(t)$ во времени состоит в следующем. Существуют чередующиеся случайные по длительности отрезки времени $\eta_0^{(0)}, \eta_0^{(1)}, \eta_1^{(0)}, \eta_1^{(1)}, \dots, \eta_i^{(0)}, \eta_i^{(1)}, \dots$, из которых последовательно $x_1(t) = 0$ и $x_1(t) = 1$. Промежутки $\eta_i^{(0)}$ для элемента x_1 безопасные, а $\eta_i^{(1)}$ опасные ($i = \overline{1, r}$). Аналогичной функцией $x_2(t)$ описывается поведение во времени и элемента x_2 , где через $\alpha_0^{(0)}, \alpha_0^{(1)}, \dots, \alpha_j^{(0)}, \dots, \alpha_m^{(0)}$ обозначаются случайные по длительности его безопасные состояния [$x_2(t) = 0$], а через $\alpha_0^{(1)}, \alpha_1^{(1)}, \dots, \alpha_j^{(1)}, \dots, \alpha_m^{(1)}$ — опасные состояния [$x_2(t) = 1$].

Функция $x_k(t)$ описывает поведение элемента x_k , где через $\delta_0^{(0)}, \delta_0^{(1)}, \dots, \delta_v^{(0)}, \dots, \delta_v^{(1)}$ обозначаются случайные по длительности отрезки времени, на которых $x_k(t) = 0$, а через $\delta_0^{(1)}, \delta_1^{(1)}, \dots, \delta_v^{(1)}, \dots, \delta_v^{(1)}$ — случайные отрезки, на которых $x_k(t) = 1$. Промежутки $\delta_v^{(0)}$ для элемента x_k безопасные, а $\delta_v^{(1)}$ опасные ($v = \overline{1, p}$).

Для элемента x_n вводим аналогичную функцию $x_n(t)$, где безопасные состояния характеризуются чередующимися отрезками $\rho_0^{(0)}, \rho_1^{(0)}, \dots, \rho_\gamma^{(0)}, \dots, \rho_\gamma^{(0)}$, а опасные — соответственно $\rho_0^{(1)}, \rho_1^{(1)}, \dots, \rho_\gamma^{(1)}$. Промежутки $\rho_\gamma^{(0)}$ для элемента x_n безопасные, а $\rho_\gamma^{(1)}$ опасные ($\gamma = \overline{1, l}$).

В этом описании катастрофе соответствует момент случайного совпадения во времени промежутков $\eta_i^{(1)}, \alpha_j^{(1)}, \dots, \delta_v^{(1)}, \dots, \rho_\gamma^{(1)}$. Время до первой катастрофы обозначим через $\tau_1^{(0)}$ (рис. 1). Задача состоит в том, чтобы через статистические характеристики случайных функций $x_k(t)$ вычислить среднее время до первой катастрофы τ_1 , его стандарт σ_1 и функцию распределения $F_1(t)$. О статистической природе этих функций предположим: вероятность переходов из безопасного состояния в опасное за промежуток времени Δt равна $\lambda_k \Delta t + o(\Delta t)$, где $o(\Delta t)$ означает, что появление более одного опасного состояния в интервале $t + \Delta t$ является величиной высшего порядка малости по сравнению с Δt .

Вероятность переходов из опасного состояния в безопасное за время Δt примем равной

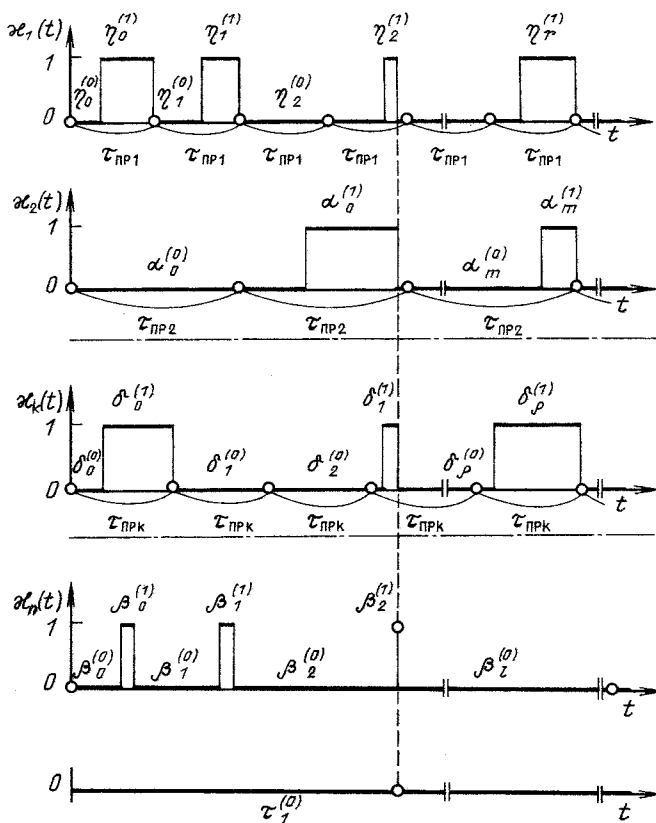


Рис. 1

$\mu_k \Delta t + o(\Delta t)$. Предположим, что эти вероятности не зависят от предшествующего течения процесса $x_k(t)$. Величины λ_k и μ_k являются параметрами рассматриваемого процесса. Параметр λ_k характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются на опасные, а μ_k — частоту или скорость смены опасных промежутков времени на безопасные.

Принятые допущения означают, что $x_k(t)$ можно рассматривать как процесс Маркова с двумя состояниями: 0 — безопасное, а 1 — опасное. Катастрофа в системе наступает в момент встречи процессов $x_k(t)$ в состоянии 1, т. е. когда $x_1(t) = 1, x_2(t) = 1, \dots, x_k(t) = 1, \dots, x_n(t) = 1$.

Выразим значения τ_i, σ_i и $F_i(t)$ через параметры процессов $x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t), \dots, x_n(t)$. Для этого совокупность этих процессов рассмотрим как однородный марковский процесс $x_k(t)$ с $2k$ дискретными состояниями и непрерывным временем. Система в любой момент времени t может находиться только в одном из конечного множества состояний:

$$\{e_1(0, 0, 0, \dots, 0), e_2(1, 0, 0, \dots, 0), \dots, e_i(1, 1, 0, \dots, \dots, 0), \dots, e_{2n}(1, 1, 1, \dots, 1)\}.$$

При случайном попадании системы в состояние $e_{2n}(1, 1, 1, \dots, 1)$ происходит катастрофа. Этот процесс полностью характеризуется матрицей интенсивностей переходов вида

$$P_k = \begin{pmatrix} Q_{k-1} & \begin{matrix} \lambda_k & 0 & \vdots & 0 \\ \lambda_k & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \lambda_{k-1} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \mu_k & 0 \\ \mu_k & \ddots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \mu_k \end{matrix} & Q_{k-1}^1 & \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \dots 0 \mu_2 \mu_1 \mu_3 \dots \\ \dots \mu_{k-1} \end{matrix} & \begin{matrix} 00 \dots 0 \\ 00 \dots 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 - C_2^{(k)} \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \lambda_k \\ 1 \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Матрица интенсивностей переходов (1) справедлива для $k \geq 3$.

Для случая, когда $k=2$

$$P_2 = \begin{pmatrix} 1 - C_1^{(2)} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & 1 - C_2^{(2)} & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & 1 - C_3^{(2)} & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$C_1^{(2)} = \lambda_1 + \lambda_2; \quad C_2^{(2)} = \mu_1 + \lambda_2; \quad C_3^{(2)} = \lambda_1 + \mu_2;$$

$$Q_2 = \begin{pmatrix} 1 - C_1^{(2)} & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & 1 - C_2^{(2)} & 0 \\ \mu_2 & 0 & 1 - C_3^{(2)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В матрице (1) матрицы Q_{k-1} и Q_{k-1}^1 отличаются между собой только диагональными элементами, которые определяются следующим образом: $1 - C_i^k$, $i = 1, 2^k - 1$. Величины C_i^k определяются суммой элементов i -й строки.

Среднее время до первой катастрофы τ_i , стандарт этого времени σ_i и функцию распределения $F_i(t)$, если в начальный момент времени система находилась в состоянии e_i , найдем из системы уравнений [7, 8]:

$$\tau = (I - Q)^{-1} \xi; \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{(2N - I)\tau - \tau_{sq}}; \quad (5)$$

$$\dot{P}(t) = P(t)B, \quad (6)$$

где I — единичная матрица; Q — матрица, полученная из матрицы P_k с помощью исключения поглощающего состояния (строку из элементов 0, 0, ..., 1 и соответствующий столбец); $N = (I - Q)^{-1}$ — фундаментальная матрица; $B = (P_k - I)$ — матрица, полученная в результате разности матриц интенсивностей переходов и единичной; ξ — вектор-столбец, все элементы которого равны единице; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^{2^n}$; $\sigma = [\sigma_i]_{i=1}^{2^n}$; $\tau_{sq} =$

$=[\tau_i^2]_{i=1}^{2^n}$ — векторы-столбцы; $\dot{P}(t) = [p_i(t)]_{i=1}^{2^n}$; $P(t) = [p_j(t)]_{j=1}^{2^n}$ — векторы-строки.

При выполнении условия имеем

$$[\tau_i]_{i=1}^{2^n-1} = [\sigma_i]_{i=1}^{2^n-1}. \quad (7)$$

Функцию распределения времени до первой катастрофы, если в начальный момент времени система находилась в состоянии e_i , можно представить в виде

$$[F_i(t)]_{i=1}^{2^n-1} = [1 - \exp(-t/\tau_i)]_{i=1}^{2^n-1} \quad (8)$$

В общем случае, когда условие (7) не выполняется, функцию распределения времени до первой катастрофы определим следующим образом:

$$F_1(t) = 1 - \sum_{j=1}^{2^n-1} p_j(t). \quad (9)$$

Величины $p_j(t)$ находятся из системы уравнений (6) известными методами [9].

Используя матрицу интенсивностей переходов (1) — (3) и систему уравнений (4), получаем нижнюю оценку для τ_1 :

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_1 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n (\mu_1 + \mu_2) (\mu_1 + \mu_3) \dots (\mu_1 + \mu_n) \dots (\mu_{n-1} + \mu_n) \times}{\lambda_1 \lambda_2 \dots (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2) (\mu_1 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_3) \times} \\ &\rightarrow \frac{\times (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \dots (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_{n-1})}{\times (\mu_1 + \mu_n + \lambda_1 + \lambda_n) (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \dots (\mu_1 + \dots} \\ &\rightarrow \frac{\dots + \mu_n + \lambda_1 + \dots + \lambda_n)}{\dots} \end{aligned} \quad (10)$$

При выполнении условия $\lambda_k \ll \mu_k$, $k = \overline{1, n}$ из формулы (10) находим

$$\tau_1 \approx \frac{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}. \quad (11)$$

Используя матрицу (1) и систему уравнений (5), при этих же условиях получаем, что $\tau_1 = \sigma_1$, а это значит,

$$F_1(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right). \quad (12)$$

Подставляя в формулу (11) $\lambda_k = 1/\bar{d}_k$, $\mu_k = 1/d_k$ и в тех случаях, когда $\bar{d}_k \gg 100d_k$ и $d_n \ll d_k$, $k = \overline{1, n-1}$, используя формулы (11) и (12), интенсивность аварий (катастроф) можно определить следующим образом:

$$H \approx \prod_{k=1}^{n-1} d_k / \prod_{k=1}^n \bar{d}_k, \quad (13)$$

где $\bar{d}_k$, d_k — средний интервал времени нахождения элемента системы в безопасном и опасном состояниях соответственно; d_n — средний интервал времени между появлениями опасного источника.

Как видно из рис. 1, среднее время d_k нахождения элемента x_k в опасном состоянии, если задана периодичность профилактики этого элемента τ_{npk} и известна функция распределения интервалов времени нахождения элемента в безопасном состоянии (в нашем случае это экспоненциальная

функция распределения), определится как разность между $\tau_{\text{пр}k}$ и наработкой на опасное состояние T_k в интервале $[0, \tau_{\text{пр}k}]$:

$$d_k = \tau_{\text{пр}k} - T_k = \tau_{\text{пр}k} - \int_0^{\tau_{\text{пр}k}} \exp(-t/\bar{d}_k) dt = \tau_{\text{пр}k} - \bar{d}_k \times [1 - \exp(-\tau_{\text{пр}k}/\bar{d}_k)]. \quad (14)$$

В тех случаях, когда профилактические проверки электрических и технологических защит и окружающей технологический объект среды, входящих в одно минимальное взрывоопасное (пожароопасное) совмещение, целесообразно проводить в одно и то же время, т. е. когда

$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{пр}1} = \tau_{\text{пр}2} = \dots = \tau_{\text{пр}k}$ и если $\tau_{\text{пр}k}/\bar{d}_k < 0,01$ формула (14) примет вид

$$d_k \approx \tau_{\text{пр}}^2 / (2\bar{d}_k). \quad (15)$$

Подставляя (15) в формулу (13), возможно для минимального взрывоопасного (пожароопасного) совмещения, состоящего из $n \geq 2$ независимых элементов, для данного технологического объекта выбирать такой максимально возможный интервал времени между проверками технологических, электрических защит и наличия опасной окружающей среды, чтобы вероятность катастрофы от этого совмещения находилась на уровне действующих нормативных документов:

$$\tau_{\text{пр}} \approx \sqrt[2n-2]{2^{n-1} H \bar{d}_n \prod_{k=1}^{n-1} \bar{d}_k^2}. \quad (16)$$

Если для данного минимального взрывоопасного (пожароопасного) совмещения заданы различные сроки профилактических осмотров для защит, реагирующих на случайное изменение технологического процесса, появление токов к. з. либо опасной концентрации газа вблизи технологической установки, то максимально возможное время между профилактическими проверками систем отключения коммутационных аппаратов, на которые воздействует максимальная токовая защита при к. з. в зоне ее действия (для обеспечения вероятности катастрофы на технологическом объекте от этого совмещения на уровне действующих нормативных документов), определим, пользуясь формулами (13), (15), (16) следующим образом:

$$\tau_{\text{пр}} \approx \sqrt[2m]{\frac{2^{n-1} H \bar{d}_n \prod_{k=1}^{n-1} \bar{d}_k^2}{\prod_{i=1}^{n-(m+1)} \tau_{\text{пр}i}^2}}, \quad (17)$$

где n — общее число элементов, входящее в минимальное взрывоопасное (пожароопасное) совмещение; m — число коммутационных аппаратов, для которых определяется $\tau_{\text{пр}}$ ($m < n-1$); $\tau_{\text{пр}i}$ — интервал времени между профилактическими осмотрами i -го элемента; H — допустимая частота аварий (катастроф) для данного минимального взрывоопасного (пожароопасного) совмещения.

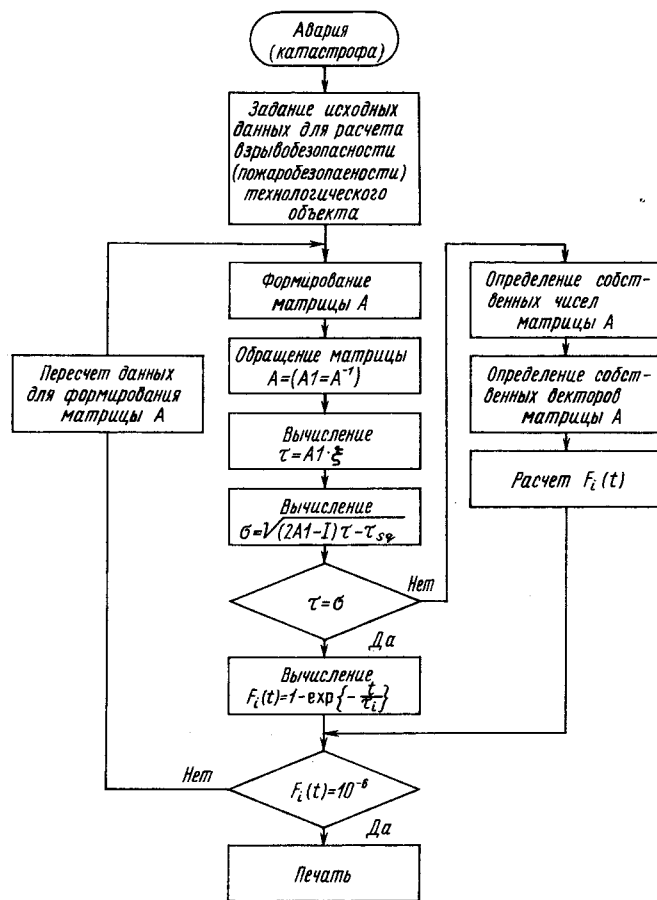


Рис. 2

С использованием матриц интенсивностей переходов (1) — (3), системы уравнений (4) — (6), формулы (14) была разработана программа для расчетов на ЭВМ основных характеристик безопасности технологического объекта для любого $n \geq 2$. Структурная схема программы приведена на рис. 2.

Пример использования предлагаемой модели для оценки взрывобезопасности технологического участка угольной шахты приведен в [10].

Пример. Пожар на участке угольной шахты от малоомощных ($P_n = 17$ кВт) двигателей лебедок наступает при совпадении во времени следующих четырех событий: к. з. во вводной коробке двигателя; отказ в срабатывании максимальной токовой защиты в пускателе (максимальная защита группового автоматического выключателя нечувствительна к к. з. во вводной коробке удаленного двигателя лебедки); отказ в срабатывании реле утечки; наличие горючего материала на двигателе лебедки.

Заданы следующие исходные данные [11]. Средний интервал времени между отказами в срабатывании реле утечки $\bar{d}_1 = 244$ ч, интервал времени между проверками реле утечки $\tau_{\text{пр}1} = 6$ ч, средний интервал времени между появлениями горючего материала на корпусе двигателя лебедки $\bar{d}_2 = 490$ ч, интервал времени между проверками наличия горючего материала на двигателе лебедки $\tau_{\text{пр}2} = 24$ ч, средний интервал времени между

отказами в срабатывании максимальной токовой защиты в пускателе $\bar{d}_3 = 2352$ ч, средний интервал времени между появлениями к. з. во вводной коробке двигателя лебедки $\bar{d}_4 = 2384$ ч, среднее время существования опасного источника $d_4 = 5,56 \cdot 10^{-5}$ ч.

Требуется определить через какое время необходимо проверять максимальную защиту в пускателе $\tau_{пр}$, питающему удельный двигатель лебед-

ки, чтобы вероятность пожара от к. з. во вводной коробке двигателя в год была на уровне 10^{-6} [2], т. е. $H = 1,14 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1}$. Точное значение для $\tau_{пр} = 3667$ ч было получено с помощью ЭВМ. Структурная схема программы приведена на рис. 2. При расчетах использовались исходные данные примера, система уравнений (4)–(6) и формулы (14). Для $n=4$ и матрица интенсивностей переходов (1) принимает вид

$P_4 =$	$1 - C_1^{(4)}$	λ_1	λ_2	λ_3	0	0	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	μ_1	$1 - C_2^{(4)}$	0	0	λ_3	0	0	0	λ_4	0	0	0	0	0	0	0	0
	μ_2	0	$1 - C_3^{(4)}$	0	0	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	$1 - C_4^{(4)}$	λ_1	λ_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	μ_3	0	μ_1	$1 - C_5^{(4)}$	0	0	0	0	λ_4	0	0	0	0	λ_2	0	0
	0	0	μ_3	0	0	$1 - C_6^{(4)}$	0	0	0	0	λ_4	0	0	0	λ_1	0	0
	0	0	0	0	0	0	$1 - C_7^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	λ_4	λ_3	0	0
	μ_4	0	0	0	0	0	0	$1 - C_8^{(4)}$	λ_1	λ_2	0	0	0	0	0	0	0
	0	μ_4	0	0	0	0	0	μ_1	$1 - C_9^{(4)}$	0	λ_3	0	λ_2	0	0	0	0
	0	0	μ_4	0	0	0	0	μ_2	0	$1 - C_{10}^{(4)}$	0	0	λ_3	λ_1	0	0	0
	0	0	0	μ_4	0	0	0	μ_3	0	0	$1 - C_{11}^{(4)}$	λ_1	λ_2	0	0	0	0
	0	0	0	0	μ_4	0	0	0	μ_3	0	μ_1	$1 - C_{12}^{(4)}$	0	0	0	0	λ_2
	0	0	0	0	0	μ_4	0	0	0	0	μ_2	0	$1 - C_{13}^{(4)}$	0	0	0	λ_1
	0	0	0	0	0	0	μ_4	0	0	0	0	0	0	$1 - C_{14}^{(4)}$	0	λ_3	0
	0	0	0	0	μ_2	μ_1	μ_3	0	0	0	0	0	0	0	$1 - C_{15}^{(4)}$	λ_4	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

где $\lambda_1 = 1/\bar{d}_1$; $\mu_1 = 1/d_1$; $\lambda_2 = 1/\bar{d}_2$; $\lambda_3 = 1/\bar{d}_3$; $\mu_3 = 1/d_3$; $\lambda_4 = 1/\bar{d}_4$; $\mu_4 = 1/d_4$.

Коэффициенты $C_1^{(4)}$, $C_2^{(4)}$, ..., $C_{15}^{(4)}$ определяются суммой элементов соответствующей строки: $C_1^{(4)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$; $C_2^{(4)} = \mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$; $C_3^{(4)} = \lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_4$; $C_4^{(4)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \lambda_4$; $C_5^{(4)} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_4$; $C_6^{(4)} = \lambda_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_4$; $C_7^{(4)} = \mu_1 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_4$; $C_8^{(4)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4$; $C_9^{(4)} = \mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_4$; $C_{10}^{(4)} = \lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3 + \mu_4$; $C_{11}^{(4)} = \lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \mu_4$; $C_{12}^{(4)} = \mu_1 + \lambda_2 + \mu_3 + \mu_4$; $C_{13}^{(4)} = \lambda_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4$; $C_{14}^{(4)} = \mu_1 + \mu_2 + \lambda_3 + \mu_4$; $C_{15}^{(4)} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_4$.

Приближенное значение для $\tau_{пр}$ при $n=4$ и $m=1$ можно получить, используя формулу (17):

$$\tau_{пр} = \sqrt{\frac{16H\bar{d}_1\bar{d}_2\bar{d}_3\bar{d}_4}{\tau_{пр1}^2\tau_{пр2}^2}}.$$

Подставляя исходные данные примера, получаем:

$$\tau_{пр} = 2879 \text{ ч.}$$

Относительная ошибка при использовании приближенной формулы (17) для данного примера составила 21,5 %.

Выводы. 1. На основе марковских случайных процессов предложен один из возможных методов оценки взрывобезопасности (пожаробезопасности) технологического объекта. В качестве исходных данных используется среднее время нахождения элемента в безопасном $\bar{d}_k$ и опасном d_k состояниях.

2. Предложенная математическая модель по-

зволяет определять основные характеристики безопасности технологического объекта при любом соотношении опасного и безопасного состояний элементов, входящих в минимальное взрывоопасное (пожароопасное) совмещение, выбирать максимально возможный интервал времени между профилактиками средств электрических и технологических защит с тем, чтобы вероятность аварий или катастроф на нем была на уровне действующих нормативных документов.

3. Математическая модель позволяет анализировать влияние необслуживаемых в процессе эксплуатации элементов на взрывобезопасность (пожаробезопасность) технологического объекта. В этом случае в матрице (1) для необслуживаемых элементов следует полагать $\mu_k = 0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко Ю. Н., Ушаков И. А. О безопасности как одном из свойств надежности систем энергетики. — Изв. вузов. Энергетика и транспорт, 1985, № 2, с. 5–11.
2. Надежность систем энергетики. Терминология. Сборник рекомендуемых терминов. АН СССР. Комитет научнотехнической терминологии. Научный совет по комплексным проблемам энергетики. — М.: Наука, 1980, вып. 95. — 44 с.
3. ГОСТ 12.1.010—76. Взрывобезопасность. Общие требования.
4. ГОСТ 12.1.004—85. Пожарная безопасность. Общие требования.
5. Хенли Дж., Куамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой. Под общ. ред. В. С. Сыромятникова. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
6. Легасов В. А. Проблема безопасного развития техносферы. — Коммунист, 1987, № 8, 92–101.
7. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. — М.: Наука, 1970. — 271 с.

8. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов и др.; Под общ. ред. Б. В. Гнеденко.— М.: Радио и связь, 1983, 376 с.
9. Бронштейн И. Н., Семьяндяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов.— М.: Наука, 1986.— 544 с.

10. Ковалев П. Ф., Ковалев А. П., Сердюк Л. И. Методика расчета взрывобезопасности электрифицированного участка угольной шахты.— Промышленная энергетика, 1989, № 1, с. 25—32.
11. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок.— М.: Недра, 1980.— 410 с.

[25.01.91]

УДК 621.311.28(211):614.825.001.6

Электробезопасность на передвижных электроустановках районов Крайнего Севера

АЛЬТШУЛЕР Э. Б., доктор техн. наук,
САЖИН А. И., инж., ШЕВЦОВ Ю. В., канд. техн. наук

Завоз-втуз при Норильском горно-металлургическом комбинате им. А. П. Завенягина

Промышленное развитие районов Крайнего Севера страны сопровождается непрерывным ростом энерговооруженности труда. При этом электрообеспечение многочисленных передвижных электроустановок мощностью более 100 кВт для изысканий, разведочных работ, бурения, работ на трассах трубопроводов различного назначения и др. обеспечивается от источника, работающего в режиме глухозаземленной нейтрали на напряжении 380 В. Эксплуатация передвижных электроустановок в тяжелых климатических условиях характеризуется большим числом отказов электрооборудования и ошибок персонала. Это обуславливает повышенную вероятность поражения человека электрическим током.

В то же время обеспечение электробезопасности путем применения защитных мер, используемых в центральных и южных районах страны, не всегда эффективно. Это объясняется тем, что повсеместное распространение многолетнемерзлого грунта с большими значениями удельного сопротивления ρ (тысячи и десятки тысяч Ом·м) создает трудности в сооружении заземляющего устройства (ЗУ) в системе зануления или зануления в сочетании с повторным заземлением. Для выполнения требований ПУЭ [1], согласно которым сопротивление ЗУ в высокоомных грунтах должно быть не более 40 Ом, необходимы значительные затраты (десятки тысяч рублей), которые в конечном итоге могут оказаться неоправданными как с технических, так и с экономических точек зрения. Использование защитного отключения затрудняется отсутствием аппаратуры, способной надежно работать в условиях низких отрицательных температур.

Выбор защитных мер в передвижных электроустановках производится, как правило, путем использования принципа однотипности, опыта эксплуатации и простоты выполнения. Поэтому обычно в качестве основного технического решения принимается зануление в сочетании с заземлением нейтрали генератора, оценка эффективности работ которых применительно к условиям Крайнего Севера проведена в данной статье.

Многофакторность проблемы обеспечения электробезопасности требует анализа достаточно широкого круга вопросов, а именно: оценки параметров электрической сети в различных аварийных ситуациях, определения электрических характеристик естественных и искусственных заземлителей, расчета распределения токов однофазного замыкания, потенциалов по металлоконструкциям и на поверхности грунта, анализа работы технических средств, обеспечивающих защиту, и т. д.

Рассмотрим некоторые наиболее общие вопросы обеспечения электробезопасности передвижных электроустановок на примере бурового комплекса на Крайнем Севере. На момент начала монтажных работ на буровом комплексе должен быть сооружен заземлитель, который необходим на довольно короткий период, составляющий в среднем 10 дней, так как за это время завершается обустройство всего комплекса и монтаж буровой установки. При этом появляются элементы естественного заземлителя в виде металлических фундаментов сооружений технического и бытового назначения, эстакад кабельных линий, паров, тепло-, водоснабжения и др. На начальном этапе обустройства бурового комплекса необходимо решать задачу обеспечения электробезопасности средствами, не требующими значительных затрат, поскольку в процессе бурения скважины сопротивление растеканию тока со стороны бурового комплекса будет снижаться.

Рассмотрим возможные случаи попадания человека под напряжение при эксплуатации электрооборудования передвижной электроустановки и проанализируем их с помощью расчетной схемы, изображенной на рис. 1. Изменяя в реальных пределах параметры схемы, оценим их влияние на значение тока, протекающего через тело человека в различных аварийных режимах. При этом рассмотрим следующие случаи:

ситуация I — человек касается фазного провода при нормальном режиме работы электрической сети, т. е. $Z_{T1}=1000$ Ом, $Z_{K1}=Z_{K2}=Z_{T2}=Z_{T3}=\infty$;

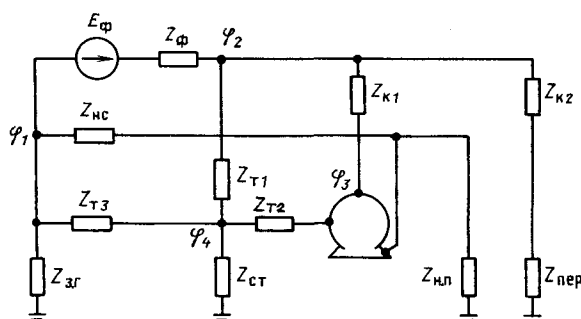


Рис. 1. Расчетная схема: $Z_{з.г}$ — сопротивление заземлителя нейтрали генератора, Ом; Z_{Φ} — сопротивление фазного провода, Ом; $Z_{н.с}$ — сопротивление нулевого защитного проводника (НЗП) с учетом естественных зануляющих проводников на участке от нейтрали генератора до потребителя, Ом; $Z_{н.п}$ — суммарное сопротивление повторного заземлителя и участка НЗП от заземлителя до потребителя, Ом; $Z_{ст}$ — сопротивление растеканию тока со стоп ног человека, Ом; $Z_{пер}$ — сопротивление замыкания на землю, Ом; $Z_{т1}$, $Z_{т2}$, $Z_{т3}$ — сопротивление тела человека, учитываемое в соответствии с аварийной ситуацией, Ом; $Z_{к1}$, $Z_{к2}$ — сопротивление, имитирующее однофазное к. з., Ом; φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 — потенциалы узлов в расчетной схеме, В

ситуация 2 — человек касается фазного провода и корпуса электрооборудования (нормальный режим), т. е. $Z_{т1}=1000$ Ом, $Z_{т2}=0$, $Z_{к1}=Z_{к2}=Z_{т3}=\infty$;

ситуация 3 — человек касается корпуса электрооборудования, расположенного вблизи места однофазного к. з. (ОКЗ), т. е. $Z_{т2}=1000$ Ом, $Z_{к1}=0$, $Z_{т1}=Z_{т3}=Z_{к2}=\infty$;

ситуация 4 — человек касается корпуса электрооборудования, расположенного вблизи генератора при удаленном ОКЗ, т. е. $Z_{т3}=1000$ Ом, $Z_{к1}=0$, $Z_{т1}=Z_{т2}=Z_{к2}=\infty$;

ситуация 5 — человек касается корпуса электрооборудования при ОКЗ на землю и обрыве металлических связей системы зануления, т. е. $Z_{т2}=1000$ Ом, $Z_{к2}=0$, $Z_{т1}=Z_{т3}=Z_{к1}=\infty$.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) составим систему уравнений, позволяющую определить ток, протекающий через человека. Поскольку в схеме только четыре узла, эту систему целесообразно решать методом узловых потенциалов, записав ее в матричной форме

$$\begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{41} & \dots & y_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_4 \end{pmatrix},$$

где проводимости представлены в следующем виде:

$$y_{11} = \frac{1}{Z_{\Phi}} + \frac{1}{Z_{н.с}} + \frac{1}{Z_{т3}} + \frac{1}{Z_{з.г}};$$

$$y_{12}=y_{21} = -\frac{1}{Z_{\Phi}}; y_{13}=y_{31} = -\frac{1}{Z_{н.с}};$$

$$y_{14}=y_{41} = -\frac{1}{Z_{т3}}; y_{22} = \frac{1}{Z_{\Phi}} + \frac{1}{Z_{т1}} + \frac{1}{Z_{к1}} +$$

$$+ \frac{1}{Z_{к2}+Z_{н.п}}; y_{23}=y_{32} = -\frac{1}{Z_{к1}}; y_{24}=y_{42} = -\frac{1}{Z_{т1}};$$

$$y_{33} = \frac{1}{Z_{н.с}} + \frac{1}{Z_{н.п}} + \frac{1}{Z_{к1}} + \frac{1}{Z_{т2}}; y_{34}=y_{43} = -\frac{1}{Z_{т2}};$$

$$y_{44} = \frac{1}{Z_{т1}} + \frac{1}{Z_{т2}} + \frac{1}{Z_{т3}} + \frac{1}{Z_{ст}}; I_3=I_4=0;$$

$$-I_1=I_2 = \frac{E_{\Phi}}{Z_{\Phi}},$$

где I_1 , I_2 , I_3 и I_4 — узловые токи соответственно узлов 1, 2, 3 и 4.

Напряжение прикосновения $U_{пр}$ определяется разностью потенциалов соответствующих точек расчетной схемы. Тогда, учитывая, что $Z_{\Phi} \ll Z_{т}$, а $Z_{н.с} \ll Z_{н.п}$ для ситуации 1 имеем

$$U_{пр1} = \frac{E_{\Phi} Z_{т}}{Z_{т} + Z_{ст} + \frac{Z_{з.г} Z_{н.п}}{Z_{з.г} + Z_{н.п}}}. \quad (1)$$

При выполнении требований ПУЭ отношение

$$\frac{Z_{з.г} Z_{н.п}}{Z_{з.г} + Z_{н.п}} \leq 40 \text{ Ом}$$

и составляет менее 5 % от слагаемого $(Z_{т} + Z_{ст})$. Тогда (1) можно привести к известному виду

$$U_{пр1} = \frac{E_{\Phi} Z_{т}}{Z_{т} + Z_{ст}}.$$

При нормальной работе электрической сети прикосновение человека к фазному проводу (ситуация 1), как известно, безопасно только в случае большого сопротивления току со стоп ног человека, что наблюдается в зимнее время, или при нахождении человека на поверхности, обладающей изолирующими свойствами. При прикосновении к фазе летом ($Z_{ст}=200$ Ом) [2] человек оказывается под напряжением 180 В, а защитные автоматы при токе 0,18 А не срабатывают. Результатом такой ситуации будет поражение человека электрическим током, время протекания которого может быть ограничено только его собственной реакцией.

В ситуации 2 напряжение прикосновения определяется выражением

$$U_{пр2} = \frac{E_{\Phi} Z_{т}}{Z_{\Phi} + Z_{т} + \frac{Z_{н.с}}{1 + \frac{Z_{н.с}}{Z_{з.г} + \frac{Z_{н.п} Z_{ст}}{Z_{н.п} + Z_{ст}}}}}. \quad (2)$$

В связи с тем что $Z_{\Phi} \ll Z_{т}$ и $Z_{н.с} \ll Z_{т}$, напряжение прикосновения, как известно, будет равно фазному напряжению сети.

Прикосновение человека к фазе и корпусу электроустановки (ситуация 2) — наиболее опасная ситуация, при которой заземление и зануление не обеспечивают электробезопасности человека как зимой, так и летом. В настоящее время вопрос электробезопасности в этих двух ситуациях может решаться организационными мероприятиями или применением специального защитного отключения. Последнее должно найти бо-

лее широкое применение в передвижных электроустановках [3, 4].

В ситуациях 3 и 4 напряжения прикосновения в значительной степени зависят от параметров сети зануления. Так, в ситуации 3

$$U_{\text{пр3}} = \frac{E_{\text{ф}} Z_{\text{т}}}{\left(1 + \frac{Z_{\text{ф}}}{Z_{\text{н.с}}}\right) \left(Z_{\text{т.с}} + Z_{\text{з.г}} \left(1 + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{н.п}}}\right)\right) + Z_{\text{ф}} \left(1 + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{н.п}}}\right)}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{т.с}} = Z_{\text{т}} + Z_{\text{ст}}$.

С учетом соотношения значений параметров расчетной схемы (рис. 1)

$$Z_{\text{ф}} \left(1 + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{н.п}}}\right) \ll Z_{\text{з.г}} \left(1 + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{н.п}}}\right)$$

выражение (3) может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\text{пр3}} = \frac{E_{\text{ф}} Z_{\text{т}}}{Z_{\text{т.с}} \left(1 + \frac{Z_{\text{ф}}}{Z_{\text{н.с}}}\right) \left(1 + \frac{Z_{\text{з.г}}}{Z_{\text{т.с}}} + \frac{Z_{\text{з.г}}}{Z_{\text{н.п}}}\right)}. \quad (4)$$

Значения напряжений прикосновения в этой ситуации в первую очередь определяются сопротивлением $Z_{\text{ст}}$. Поэтому в зимний период безопасность обеспечивается за счет защитных свойств высокоомного мерзлого грунта. Летом напряжения прикосновения превышают допустимые. При этом снижение сопротивления заземления нейтрали генератора приводит к росту $U_{\text{пр3}}$.

Кроме нулевого провода, достаточно эффективным средством защиты в этой ситуации является использование естественных металлических связей, соединяющих нейтраль генератора с корпусом электрооборудования (рис. 1). Они существенно снижают сопротивление $Z_{\text{н.с}}$ петли фаза — нуль, а соответственно, и время срабатывания защитной аппаратуры.

В ситуации 4 напряжение прикосновения определяется следующим выражением:

$$U_{\text{пр4}} = \frac{E_{\text{ф}} Z_{\text{т}}}{Z_{\text{т.с}} \left(1 + \frac{Z_{\text{ф}}}{Z_{\text{н.с}}}\right) \left(1 + \frac{Z_{\text{н.п}}}{Z_{\text{т.с}}} + \frac{Z_{\text{н.п}}}{Z_{\text{з.г}}}\right)}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что снижение $Z_{\text{н.п}}$ приводит к увеличению $U_{\text{пр4}}$. При этом справедлива следующая зависимость:

$$U_{\text{пр3}} / U_{\text{пр4}} = Z_{\text{н.п}} / Z_{\text{з.г}}.$$

Данное соотношение позволяет сделать вывод, что постепенное забуривание скважины и соответствующее уменьшение $Z_{\text{з.г}}$ приводит к росту $U_{\text{пр3}}$ и соответствующему ухудшению условий электробезопасности в поселке буровиков, находящемся на расстоянии 120—150 м от буровой установки. Расчеты показывают, что при $Z_{\text{з.г}} = 1 \text{ Ом}$ (лето) в ситуации 3 при изменении значения $Z_{\text{н.с}}$ от 0,05 до 0,4 Ом напряжение прикосновения изменяется от 59,1 В до 141,5 В, что допустимо только при срабатывании защиты за время менее 0,3 с [5]. В зимнее время $U_{\text{пр3}}$ значительно меньше до-

пустимого значения ввиду большого сопротивления $Z_{\text{ст}}$.

На рис. 2 представлены зависимости значений $U_{\text{пр3}}$ от сопротивления ЗУ генератора в ситуациях 3 и 4, рассчитанные при изменении сопротивления $Z_{\text{з.г}}$ в диапазоне от 0 до 100 Ом. Семейства кривых приведены для различных значений $Z_{\text{ф}}/Z_{\text{н.с}}$ и $Z_{\text{н.п}}$, при $Z_{\text{ст}} = 0$. Напряжение прикосновения в ситуации 3 имеет максимальное значение, зависящее только от отношения $Z_{\text{ф}}/Z_{\text{н.с}}$. При изменении $Z_{\text{з.г}}$ и $Z_{\text{н.п}}$ в реальном диапазоне сопротивлений напряжения прикосновения в ситуациях 3 и 4 приобретают значения от 10 В до 155 В. В случае обрыва нулевого провода сопротивление $Z_{\text{н.с}}$ может достигнуть значений $10 Z_{\text{ф}}$. Тогда в обеих ситуациях напряжение прикосновения может достигнуть 180 В (рис. 2). Такое напряжение безопасно при времени отключения менее 0,28 с. Однако при обрыве нулевого провода сопротивление цепи «фаза — нуль» значительно увеличивается, следовательно, падает ток ОКЗ и за указанное время защитные автоматы срабатывать не успевают.

Если целостность нулевого провода и других металлических связей не нарушена, то при времени отключения менее 0,5 с требования [5] соблюдаются. Существенно снижается сопротивление $Z_{\text{н.с}}$ при использовании в качестве дополнительного нулевого проводника металлоконструкции тепло- и водоснабжения. Поэтому для повышения уровня электробезопасности следует обеспечить надежность металлических связей корпуса электроприемников с нейтралью генератора по нулевому проводу и металлоконструкциям.

Поскольку напряжения прикосновения в формулах (4) и (5) существенно зависят от отношения $Z_{\text{ф}}/Z_{\text{н.с}}$, то, кроме снижения сопротивления $Z_{\text{н.с}}$, возможно увеличение $Z_{\text{ф}}$ включением в нейтраль добавочного, небольшого по величине, сопротивления $Z_{\text{доб}}$ между нулевой точкой генератора и местом присоединения нулевого проводника и ЗУ. Влияние этого сопротивления на работу потребителей не существенно. Сопротивление $Z_{\text{доб}}$ можно подобрать таким образом, чтобы автоматы защиты срабатывали при токах ОКЗ и соблюдался режим работы сети, удовлетворяя условиям электробезопасности.

В некоторых случаях, при использовании в качестве нулевых проводников трубопроводов с большой индуктивностью в месте присоединения к нейтрали можно включить емкость, компенсирующую индуктивность нулевого провода. Тогда сопротивление $Z_{\text{н.с}}$ снижается, увеличивается ток ОКЗ и улучшаются условия электробезопасности.

Прикосновения человека к корпусу электрооборудования при ОКЗ на землю (ситуация 5) в реальных условиях передвижной электроустановки не представляет опасности, даже если общее сопротивление заземляющего устройства не удовлетворяет требованиям ПУЭ. Напряжение прикосновения при этом определяется следующим выражением:

$$U_{\text{пр5}} = \frac{E_{\text{ф}} Z_{\text{т}}}{Z_{\text{т.с}} + (Z_{\text{ф}} + Z_{\text{пер}}) \left(1 + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{н.п}}} + \frac{Z_{\text{т.с}}}{Z_{\text{з.г}}} \times \right)}$$

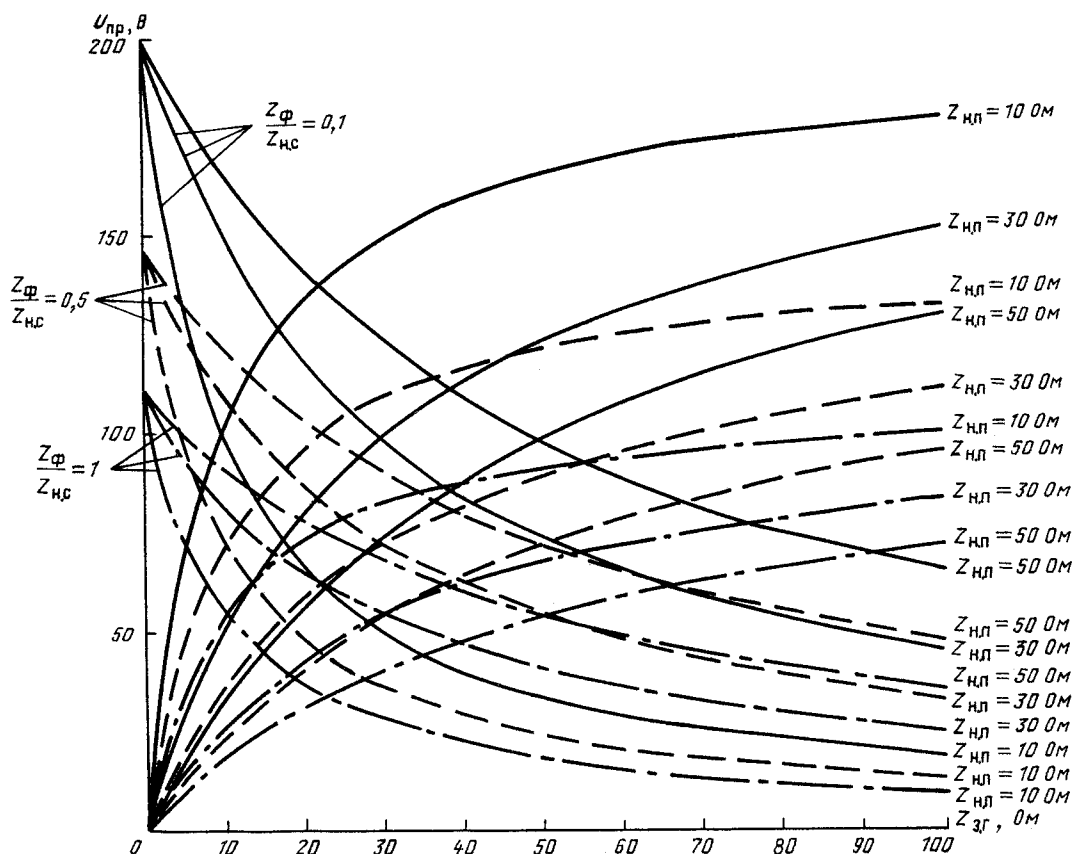


Рис. 2. Зависимости напряжения прикосновения (ситуации 3 и 4) от сопротивления заземляющего устройства генератора

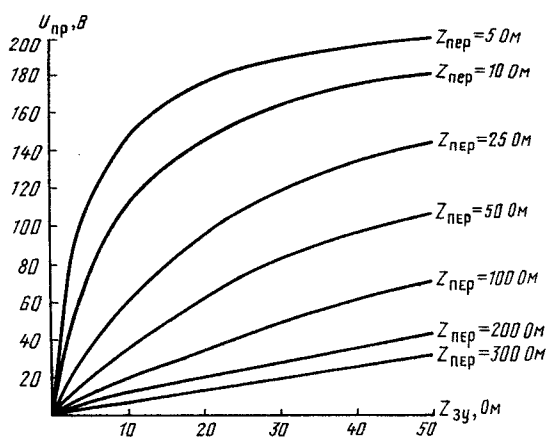


Рис. 3. Зависимости напряжения прикосновения (ситуация 5) от сопротивления ЗУ

$$\rightarrow \left(1 + \frac{Z_{н.с}}{Z_{т.с}} + \frac{Z_{н.с}}{Z_{н.л}}\right)$$

Если учесть, что $Z_{ф} \ll Z_{пер}$, $Z_{н.с} \ll Z_{т.с}$ и $Z_{н.с} \ll Z_{н.л}$, $Z_{зг} \ll Z_{т.с}$, то

$$U_{пр5} = \frac{E_{ф} Z_{т.с}}{Z_{т.с} \left(1 + \frac{Z_{пер}}{Z_{зг}}\right)}; \quad Z_{зг} = \frac{Z_{н.л} Z_{з.г}}{Z_{н.л} + Z_{з.г}}$$

На рис. 3 показаны зависимости $U_{пр5}$ в функции от $Z_{зг}$ при $Z_{т.с} = 1000$ Ом и различных значениях $Z_{пер}$. При $4 \text{ Ом} < Z_{зг} \leq 40 \text{ Ом}$ напряжения прикосновения могут принимать значения от 2 В до 194 В. Учитывая, что для Крайнего Севера $Z_{пер} \geq 200 \text{ Ом}$, $Z_{зг} < 50 \text{ Ом}$ и $Z_{т.с} > 1200 \text{ Ом}$, $U_{пр5}$ не превосходит 36 В. В этой ситуации напряжение неповрежденных фазных проводов по отношению к зануленному оборудованию будет менее 250 В, что удовлетворяет режиму работы сети 0,4 кВ [6].

Вышеприведенные теоретические положения были экспериментально проверены на буровых комплексах БУ-2500, эксплуатируемых на севере Тюменской области. Исследования проводились в период монтажа буровой установки и строительства жилого поселка, а также при бурении скважины.

Обзор современных методов экспериментальных исследований параметров электробезопасности показал, что косвенные методы определения $U_{пр}$, применяемые в сетях напряжением выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью, для сетей 0,4 кВ неприемлемы. Это объясняется тем, что в этих электроустановках напряжением выше 1 кВ ток однофазного короткого замыкания практически полностью протекает через ЗУ и, следовательно, наводит на ЗУ определенный потенциал. То есть, измеряется $U_{пр}$ при известном искусственно введенном токе через землю и делается пересчет на расчетный ток ОКЗ.

В электроустановках 0,4 кВ с занулением токораспределение заранее неизвестно. Существу-

ет значительная асимметрия токов в фазных проводах, а повышающий потенциал ток не равен току ОКЗ. В то же время при замыкании на корпус через добавочное сопротивление необходимо иметь в виду то, что сопротивление заземляющих связей нелинейно зависит от тока, и эта функция заранее неизвестна. Кроме того, при малых значениях $U_{пр}$ сложно отстроиться от помех. Поэтому проводились опыты реального ОКЗ с осциллографированием интересующих параметров.

Сопротивление тела человека имитировали резистором сопротивлением 1 кОм, а сопротивление растеканию тока со стоп ног человека — металлической пластиной площадью 625 см² с грузом и массой 50 ± 5 кг. Было проведено осциллографирование 20 различных аварийных ситуаций в апреле — мае и в начале октября месяца, т. е. в периоды замерзшего и талого верхнего слоев грунта.

При удаленном ОКЗ в электрической сети бурового комплекса ток колеблется в пределах 235—273 А. При разрыве нулевого провода или нарушении естественных связей он составляет 170—210 А. По нулевому проводу, как правило, протекает порядка 30—40 % тока ОКЗ. Разрыв естественной металлической связи незначительно снижает ток ОКЗ, однако при этом возрастает ток нулевого провода.

Запись значений падения напряжения между нейтралью генератора и местом ОКЗ дает достаточно большой разброс (35—145 В). Выполненный анализ показал, что при наличии всех металлических связей этот параметр имеет минимальные значения. Данную ситуацию можно объяснить низким сопротивлением совокупности нулевого провода и естественной заземляющей сети. При разрыве двух-трех связей падение напряжения составляет 45—90 В, причем разрыв нулевого провода сопровождается продолжительным переходным процессом. При разрыве трех-четырех связей напряжение возрастает до 145 В. При разрыве всех связей касание корпуса поврежденного электроприемника аналогично прикосновению к фазному проводу и является наиболее опасной ситуацией.

Измеренные напряжения прикосновения на территории бурового комплекса в зимнее время не превышали 2,8 В, в летнее — 1 В. Полный потенциал, наводимый на заземляющем устройстве при разрыве нулевого провода и нескольких естественных связей при ОКЗ, изменяется, и является переходный процесс, при котором колебания потенциала составляют от 10 до 100 В. При наличии металлических связей наводится наибольший потенциал, равный 30 В.

Сравнение экспериментальных $U_{пр}$ показывает, что летом эти значения у места ОКЗ возросли при небольшом их снижении у буровой (вблизи генератора). Полный потенциал летом в 2 раза меньше, как и напряжение между нулем генератора и местом ОКЗ, что указывает на этот параметр, а величина полного потенциала определяется не сопротивлением растеканию, которое летом уменьшилось в 15 раз, а распределением напряжения на фазном, нулевом проводе и заземляющих связях. Экспериментальные значения $U_{пр}$ оказались меньше теоретических, поскольку в расчетах не учитывалось выравнивание потенциалов на территории комплекса.

Выводы. 1. При несоответствии требуемых ПУЭ норм по сопротивлению заземления реальным значениям напряжения прикосновения в передвижных электроустановках 0,4 кВ для районов Крайнего Севера не превышают нормируемых в любой сезон года. Нормирование заземляющих устройств передвижных электроустановок напряжением 0,4 кВ, работающих с глухозаземленной нейтралью, следует выполнять по величине допустимого напряжения прикосновения с учетом времени срабатывания защиты.

2. При монтаже передвижных электроустановок следует соединять все металлические нетоковедущие части электрооборудования с естественными заземлителями, используя трубопроводы или специально проложенные полосы заземления. Контроль условий электробезопасности в передвижных электроустановках с глухозаземленной нейтралью необходимо проводить по напряжению прикосновения. На буровых установках достаточно проверки целостности нулевого провода и наличия связей по металлическим конструкциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоиздат, 1985.
2. Альтшулер Э. Б. Обеспечение допустимого напряжения прикосновения в электроустановках районов Крайнего Севера.— Электрические станции, 1981, № 7.
3. Шипунов Н. В. Защитное отключение.— М.: Энергия, 1968.
4. Ревякин А. И., Кашолкин Б. И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках.— М.: Энергия, 1980.
5. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений и токов.— М.: Госстандарт СССР, 1982.
6. Мотуско Ф. Я. Защитные устройства в электроустановках.— М.: Энергия, 1973.

[30.05.90]

Импульсная электрическая прочность изолирующих подвесок ВЛ высших классов напряжения

АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., доктор техн. наук, ГЕРАСИМОВ Ю. А., канд. техн. наук

Ленинградский государственный технический университет

Выполненными в последние годы исследованиями на высоковольтных стендах [1—3] выявлен чрезвычайно медленный рост разрядных напряжений гирлянд тарельчатых изоляторов длиной свыше 4 м при воздействии грозových импульсов напряжения отрицательной полярности. В результате импульсная электрическая прочность гирлянд ВЛ 1150 кВ оказалась значительно меньше прогнозируемой при проектировании линии, что привело к существенному снижению ее грозоупорности. Такая тенденция изменения импульсной прочности гирлянд тарельчатых изоляторов при отрицательной полярности грозových импульсов напряжения ставит под сомнение возможность создания воздушных линий более высоких напряжений, 1800—2000 кВ, которые по прогнозам имеют значительно лучшие технико-экономические характеристики, чем ВЛ 1150 кВ [4].

В [2] было показано, что применение полимерных изоляторов позволяет полностью решать эту проблему, поскольку линейная зависимость разрядных напряжений от длины полимерной изолирующей подвески сохраняется во всем диапазоне исследованных длин — вплоть до 8 м.

Однако в связи с отставанием развития производства полимерных изоляторов от потребностей сетевого строительства следует ориентироваться на применение тарельчатых изоляторов на ВЛ ультравысокого напряжения в течение длительного времени. Поэтому необходимо исследовать сравнительную эффективность различных мероприятий, обеспечивающих повышение электрической прочности гирлянд тарельчатых изоляторов. В [2] было показано значительное влияние экранирования нижней и верхней части гирлянды. В настоящей статье приведены результаты исследований импульсной прочности изолирующей подвески крайней фазы из изоляторов ПСК-210А, ПС-300А, ПС-400А и ЛК 300/500 с макетом фазы 8ХАС-300/39. Результаты

исследований приведены в таблице и на рис. 1. На рис. 2 показаны схемы экранирования гирлянд.

Из приведенных данных видно, что разрядные напряжения гирлянд тарельчатых изоляторов при грозových воздействиях отрицательной полярности существенно (примерно на 30—35 %) ниже, чем при положительной полярности. Это различие больше, чем для подвесок с расширенной фазой [3] (см. кривые 2 и 5 на рис. 1). Причем разрядные напряжения изолирующих подвесок с обычной и расширенной фазой при положительной полярности импульсов близки.

Уменьшение угла схода провода, числа цепей изоляторов и приближение нижних изоляторов к проводу приводят к увеличению импульсной прочности в пределах 10 % (рис. 3).

Электрическая прочность изолирующей подвески при отрицательной полярности импульсов может быть увеличена на 10—12 % путем установки тороидального экрана соосно с гирляндой вблизи траверсы опоры.

Более эффективным способом повышения импульсной прочности является экранирование узла крепления провода к гирлянде. Установка тороидального экрана в нижней части гирлянды или поперечных экранов на проводе по обе стороны от зажима позволяет увеличить разрядные напряжения отрицательной полярности на 30 % при неизменных характеристиках положительной полярности.

Экранирующее влияние расщепленного провода может быть существенно усилено, если заглубить нижние изоляторы гирлянды внутрь провода. При этом верхние составляющие расщепленной фазы выполняют роль экрана, соосного с гирляндой. Следует учесть, что на проводах с относительно малыми радиусами расщепления эффективное заглубление осуществить невозможно из-за больших размеров стеклотелы изоляторов (диаметр тарелки ПСК-210А равен 410 мм), превосходящих

Конструкция гирлянды; номер рисунка со схемой экранирования; номер графика на рис. 1	Разрядное напряжение $U_{0,5}$ (МВ) гирлянды с длиной подвески $l_p=8,1$ м из изоляторов различных типов для положительной (+) и отрицательной (—) полярности импульса							
	52 ПСК-210А		46 ПС-300К		41 ПС-400А		2 ЛК-300/500	
	+	—	+	—	+	—	+	—
Неэкранированная гирлянда; рис. 2, а;								
№№ 1, 2, 7	4,05	2,73	3,57	2,62	4,40	3,47	4,16	4,34
Экран наверху гирлянды; рис. 2, б; № 3	4,06	3,12						
Экран внизу гирлянды; рис. 2, в; № 4	3,67	3,76					4,43	4,38
Поперечные экраны на проводе; рис. 2, г;								
№ 4	3,72	3,70	3,47	3,25	4,17	3,67	4,31	4,42
Расширенная фаза $r_p=1$ м; рис. 2, д; № 5	4,00	3,35	3,41	3,10			3,92	4,12
Заглубление гирлянды в расширенную фазу; рис. 2, е; № 6		4,10		3,87				

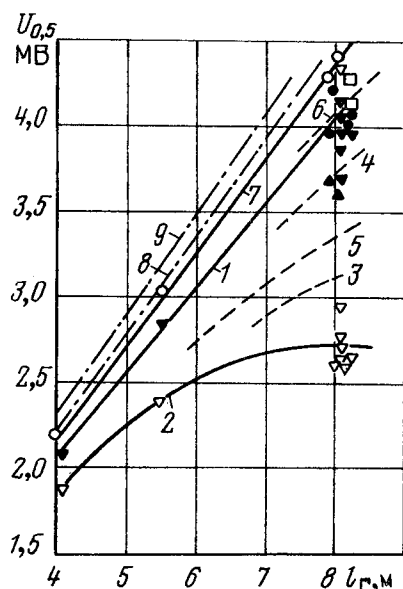


Рис. 1. Зависимости 50 %-ных разрядных напряжений изолирующих подвесок из изоляторов ПСК-210А (1, ∇ , 2, ∇ , 3—6), ПС-300К ($\blacktriangle$), ПС-400А ($\blacksquare$), ЛК-300/500 (1, $\bullet$, 7) с проводом $r_p=0,52$ м (1—4, 7—9) и $r_p=1,0$ м (5, 6) от длины гирлянды при воздействии импульсов 1,2/50 мкс положительной (1, 8) и отрицательной (2—7, 9) полярностей: 1, 2, 7 — без экранирования; 3 — экран, соосный с гирляндой у траверсы; 4 — экран, соосный с гирляндой у провода, поперечные экраны соосно проводу; 5 — расширенная фаза; 6 — заглубление одного изолятора в расширенную фазу; 7 — полимерная подвеска; 8, 9 — воздушный промежуток провод — стойка

расстояние между составляющими. Заглубление гирлянды возможно при разведении верхних составляющих провода в узле подвески. Технически это выполняется путем установки распорок между верхними составляющими по обе стороны от гирлянды. Таким способом были выполнены исследования изолирующей подвески с проводом $r_p=1,0$ м и разведением верхних составляющих на 1,2 м. Опыты проводились при заглублении до 6 изоляторов гирлянды $52 \times \text{ПСК-210А}$ ($a \approx 1$ м). Зависимости $U_{0.5} = f(a)$ приведены на рис. 3. Наибольшие разрядные напряжения получены для изолирующей подвески с заглублением в провод 1—2 нижних изоляторов выше верхних составляющих провода ($a > 0$) уменьшается экранирующее влияние провода, и импульсная прочность резко снижается.

Таким образом, импульсная прочность изолирующих подвесок с гирляндами стеклянных тарельчатых изоляторов может быть значительно повышена путем экранирования узла подвески провода (вплоть до $E_{0.5} \approx 450$ кВ/м) или заглубления 1—2 изоляторов гирлянды в расширенную фазу (вплоть до $E_{0.5} \approx 500$ кВ/м).

Исследования изолирующих подвесок из полимерных длинностержневых изоляторов подтвердили их существенные преимущества в сравнении с тарельчатыми изоляторами. Сохраняется линейная зависимость разрядных напряжений обеих полярностей (рис. 1) от длины гирлянд со средними разрядными напряжениями $E_{0.5}^+ = 500$ кВ/м и $E_{0.5}^- = 550$ кВ/м. Разрядные напряжения отрицательной полярности выше, чем положительной. При этом принципиальное значение имеет не материал изолятора, а его конструкция. Гирлянды из полимерных длинностержневых изоляторов имеют минимальное число металлических элементов — оконцевателей изоляторов. В наиболее благоприятном случае гирлянда не имеет сочленений и выполнена из одного полимерного изолятора, а прочность изолирующей под-

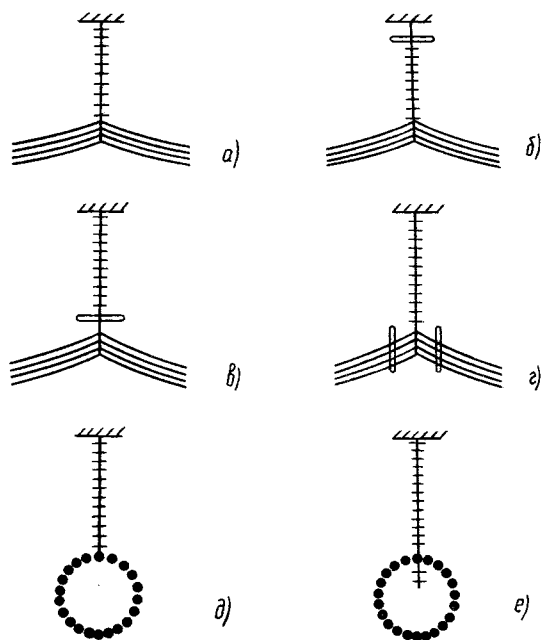


Рис. 2. Схемы экранирования гирлянд

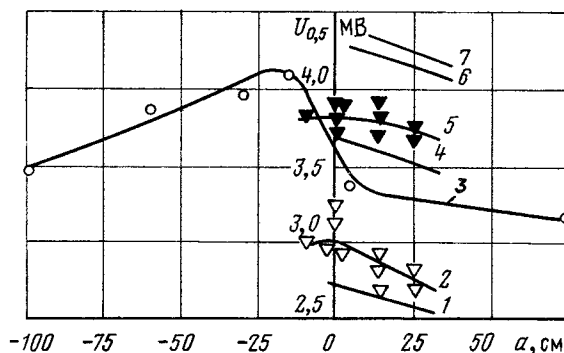


Рис. 3. Зависимости 50 %-ных разрядных напряжений изолирующих подвесок крайней фазы от расстояния (a) при положительной (4, 5, 6) и отрицательной (1, 2, 3, 7) полярностях: 1, 4 — $r_p=0,52$ м, $46 \times \text{ПС-300К}$; 2, 5 — $r_p=0,52$ м, $52 \times \text{ПСК-210А}$; 3 — $r_p=1,0$ м, $52 \times \text{ПСК-210А}$; 6, 7 — $r_p=0,52$ м, $2 \times \text{ЛК-300/500}$ (полимерные)

вески приближается к электрической прочности воздуха. Увеличение числа металлических элементов, сочленений изоляторов, ведет к снижению разрядного напряжения. Так, при увеличении числа сочленений от одного до трех разрядное напряжение снижается на 3—7 %.

Для изолирующих подвесок из полимерных изоляторов практически отсутствует влияние угла схода провода на импульсную прочность, не обнаружено различия разрядных напряжений одно- и двухцепных гирлянд, получена слабая зависимость $U_{0.5}$ от удаления гирлянды от провода (рис. 3).

Сравнительные испытания показали, что установка поперечных экранов на проводе или экранов, соосных с гирляндой, не приводит к увеличению импульсной прочности полимерной подвески. Слабый эффект получен при заглублении гирлянды в провод.

Таким образом, при любом типе изолирующей подвески проводов (гирлянды тарельчатых изоляторов, полимерные изоляторы) может быть обеспечена высокая импульсная прочность и соответственно достаточно вы-

сокая грозоупорность воздушных линий ультравысокого напряжения.

Выводы. 1. Экранирование узла сочленения провода с гирляндой позволяет обеспечить значительное повышение импульсной прочности гирлянд тарельчатых изоляторов при отрицательной полярности импульсов.

2. Наиболее эффективным способом экранирования является заглубление одного-двух изоляторов гирлянды внутрь расщепленного провода. Такой способ обеспечивает линейный рост разрядных напряжений со средней разрядной напряженностью $E_{0,5} = 500$ кВ/м. При длине гирлянды 8 м импульсное разрядное напряжение отрицательной полярности составляет 4 МВ.

3. Наиболее высокая импульсная прочность получена для полимерной изолирующей подвески: $E_{0,5} \approx 550$ кВ/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилин А. В., Китаев Г. И. Влияние полярности и формы грозовых перенапряжений на электрическую прочность длинных гирлянд. — Электрические станции, 1987, № 2.
2. Импульсная электрическая прочность гирлянд изоляторов ВЛ УВН / В. А. Горошкина, Е. Н. Анисимов, А. С. Гайворонский, А. Г. Овсянников Тез. докл. ВНТС, Новосибирск. — М.: Информэнерго, 1989.
3. Александров Г. Н., Герасимов Ю. А. Исследования электрической прочности изолирующей подвески воздушных линий высших классов напряжения. — Электричество, 1989, № 4.
4. Астафеев А. М., Курносов А. И. К выбору класса напряжения ВЛ УВН. — Электричество, 1990, № 6.

[25.09.90]

УДК 621.315.1.027.8.015.4.001.57

Математическое моделирование параметрического резонанса на второй гармонике при коммутации в сети СВН

КАТУНЯН В. И., инж., ЛЕВИУШ А. И., канд. техн. наук

Возникновение параметрического резонанса на второй гармонике при коммутациях на ВЛ сверхвысокого напряжения (СВН) может быть причиной значительных перенапряжений, опасных для высоковольтных аппаратов, и неправильных действий устройств релейной защиты. Необходимо исследовать это явление, чтобы либо предупредить его возникновение, либо предотвратить нежелательное воздействие его на устройства релейной защиты. Ранее была разработана математическая модель, с помощью которой проводилось исследование условий возникновения резонанса на второй гармонике при включении ВЛ СВН на холостой ход¹. Рассмотренная математическая модель может быть использована применительно к более сложным схемам электропередачи, включающим, например, две линии, и при разных видах коммутации. Конфигурация сети и вид коммутации определяют изменения в математической модели, а именно число и вид дифференциальных уравнений, количество логических построений, описывающих коммутации, а также количество ветвей, моделирующих нелинейности реакторов и автотрансформаторов, в зависимости от их числа в сети.

В настоящей статье продолжены исследования условий возникновения параметрического резонанса на второй гармонике при различных рода коммутаций. Рассмотрена электропередача 1150 кВ (рис. 1), включающая две последовательно соединенные линии: ВЛ1 с двумя реакторными группами, протяженность ее 395 км, и ВЛ2 протяженностью 500 км с тремя реакторными группами. К шинам ПС2 может подключаться автотрансформатор АТ2, нагруженный на систему 2. В схеме замещения предусмотрены коммутирующие аппараты, позволяющие коммутировать любую часть электропередачи независимо друг от друга, что дает

возможность моделировать разные режимы работы электропередачи (холостой ход, цикл ОАПВ, включение под нагрузку и т. д.). Причем, различные режимы работы электропередачи осуществляются простым заданием временных параметров соответствующих коммутирующих аппаратов.

Математическая модель такой электропередачи строится на принципах, рассмотренных в указанной в ссылке статье авторов, но содержит 78 дифференциальных уравнений: 25 уравнений на каждую фазу и три общих уравнения, описывающих токи в обмотках низкого напряжения автотрансформаторов АТ1, АТ2, АТ3. Исследованные режимы работы указанной электропередачи следующие: включение на холостой ход ВЛ1 со стороны ПС1 (рис. 2, а); включение под нагрузку в цикле ОАПВ фазы А линии ВЛ1 при подключенном к шинам ПС2 автотрансформаторе АТ2, нагруженном на маломощную систему 2 (рис. 3, а); замыкание в транзит ВЛ1 при работающей ВЛ2 и подключенном в шинах ПС2 ненагруженном АТ2 (рис. 4, а); подключение ненагруженного АТ2 к шинам ПС2 на заранее включенной под нагрузку электропередаче (рис. 5, а).

Параметры сети. Система со стороны ПС3 достаточно мощная ($X_{\text{сист}3} = 73$ Ом), со стороны ПС1 $X_{\text{сист}1} = 200$ Ом и со стороны ПС2 настолько маломощная ($X_{\text{сист}2} = 2000$ Ом), что ею в большинстве случаев пренебрегаем. Автотрансформаторы АТ1, АТ2, АТ3 — типа АОДЦН-667000/1150/500, реакторы РОДЦ-300000/1150.

При одновременном включении на холостой ход всех трех фаз ВЛ1 (рис. 2, а) в момент прохождения кривой напряжения фазы А через нуль ($\varphi_A = 0$) наибольший уровень второй гармонике, измеряемой со стороны ПС2 через 1 с, зафиксирован в фазе А при $X_{\text{сист}1} = 82,5$ Ом и составляет почти 65 % (рис. 2, б). При реальном значении $X_{\text{сист}1} = 200$ Ом содержание второй гармонике около 10 %. Время использования центрального процесса для расчета одной точки составляет

¹ Левиуш А. И., Катунян В. И. Исследование на математической модели параметрического резонанса на второй гармонике для анализа работы релейной защиты ВЛ. — Электричество, 1990, № 1.

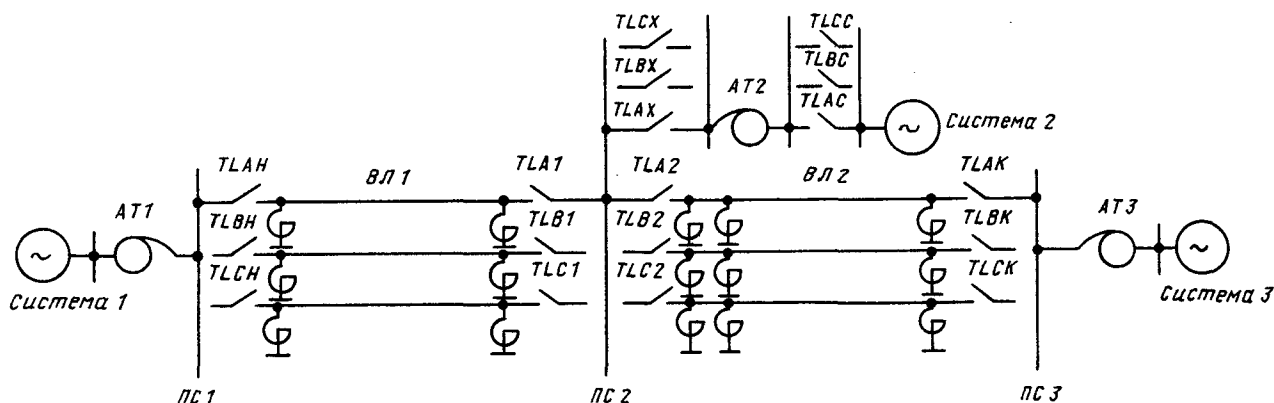


Рис. 1. Схема электропередачи 1150 кВ

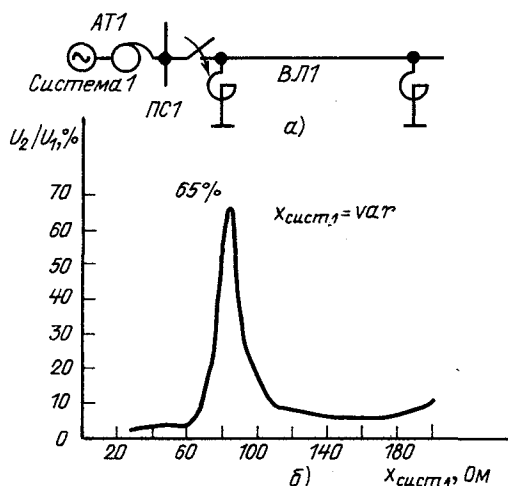


Рис. 2. Схема электропередачи (а) и резонансная кривая при включении ВЛ 1150 кВ длиной 395 км на холостой ход (б)

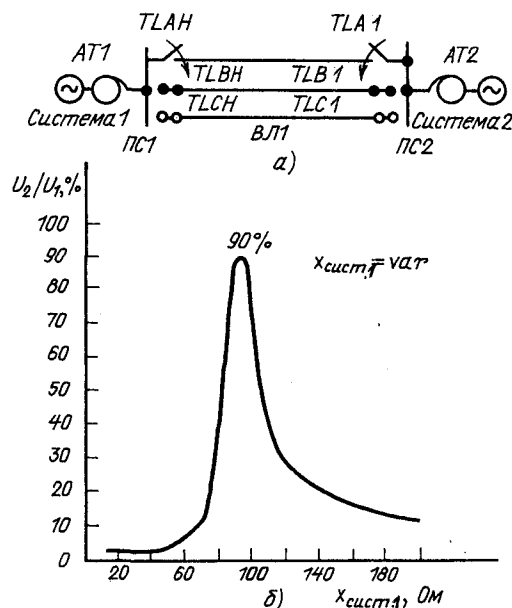


Рис. 3. Схема электропередачи (а) и резонансная кривая при замыкании в транзит в цикле ОАПВ ВЛ 1150 кВ длиной 395 км (б)

приблизительно 15 мин на ЭВМ ЕС-1046 или почти 100 мин на персональном компьютере класса XT.

При включении под нагрузку в цикле ОАПВ фазы *A* линии *ВЛ1* при подключенном к шинам *ПС2* *АТ2*, нагруженном на систему 2, фазы *B* и *C* предварительно включены, что задается начальными условиями. Фаза *A* включается со стороны *ПС1* через время $T1 = 0,4$ с, а затем замыкается в транзит через $T2 = 1,4$ с. Очередность включения и указанные значения $T1$ и $T2$ задаются соответственно выключателями фазы *A*—*ТЛАН* и *ТЛА1* (рис. 3, *a*). Уровень второй гармоники измерялся со стороны *ПС2* дважды: перед замыканием в транзит и через 0,4 с после замыкания в транзит. Расчеты показали, что по истечении 1 с после одностороннего включения *ВЛ1* вторая гармоника имеет высокий уровень, максимум наблюдается при $X_{\text{сист.1}} = 95$ Ом и составляет в «наихудшей» фазе 90 % (рис. 3, *б*). После включения под нагрузку уровень второй гармоники быстро снижается и через 0,4 с составляет уже 1—2 %, что соответствует представлениям о физике явления.

При реальных значениях сопротивлений систем $X_{\text{сист } 1} = 200 \text{ Ом}$ и $X_{\text{сист } 2} = 2000 \text{ Ом}$ уровень второй гармоники в «худшей» фазе со стороны *ПС2* составляет всего 14 % при той же последовательности измерений, т. е. через 1 с после одностороннего включения со стороны *ПС1*.

Время, необходимое для вычисления уровня второй гармоники в одной точке, на персональном компьютере класса XT около 4 ч 30 м.

В рассмотренном режиме линия *ВЛ2* разомкнута. Если же *ВЛ2* замкнута и к шинам *ПС2* подключен ненагруженный автотрансформатор *АТ2*, то включение под нагрузку линии *ВЛ1* при постановке ее под напряжение (рис. 4, а) также сопровождается резонансными явлениями на второй гармонике, но зависимость уровня второй гармоники от $X_{\text{сист}}$ имеет другой характер. Линия *ВЛ1* включается тремя фазами одновременно с двух сторон в момент прохождения кривой напряжения фазы *А* через ноль.

Измерение второй гармоники через 1 с показало, что в этом случае наибольший уровень ее имеет место при $X_{\text{сист}} = 65 \text{ Ом}$ (рис. 4, б); уровень практически одинаков во всех трех фазах и на шинах ПС2 равен 36—39 %.

Кривая имеет ярко выраженный пик и уже при $X_{\text{снст}}=80$ Ом уровень второй гармоники падает до 6 %. Машинное время расчета на персональном компьютере класса XT в одной точке составляет около 5—5,5 ч.

В реальных условиях, когда $X_{\text{снз1}} = 200 \text{ Ом}$ и $X_{\text{снз3}} = 73 \text{ Ом}$, при одновременном включении под нагрузку с двух сторон *ВЛ* наибольший уровень второй гармоники 4,8 %. Если при указанных сопротивлениях систем сначала включить *ВЛ* со стороны *ПС1*,

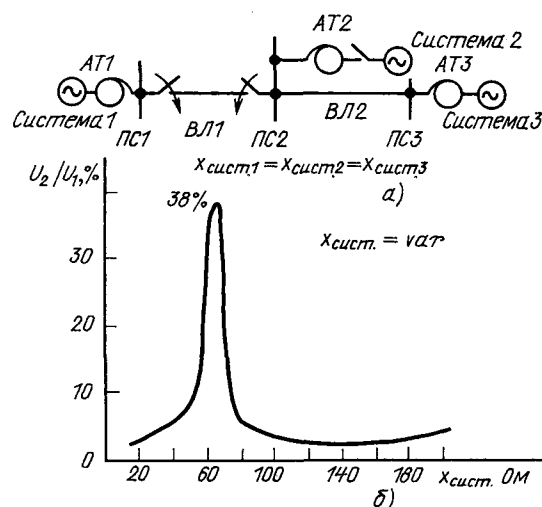


Рис. 4. Схема электропередачи (а) и резонансная кривая при одновременном с обеих сторон замыкании в транзит ВЛ1 (б). К шинам ПС2 подключены ВЛ2 и ненагруженный АТ2

то через 1 с в конце линии ВЛ1 уровень второй гармоники в «худшей» фазе 12 %, а после включения под нагрузку спустя еще 1 с уровень второй гармоники наибольший — 4,6 %, т. е. в обоих случаях вторая гармоника практически отсутствует.

Если указанную очередность операций выключателями использовать применительно к резонансным условиям, то включение сначала на холостой ход при $X_{\text{сист } 1} = 65 \text{ Ом}$ не вызовет появления высокого уровня второй гармоники. Измеренный через 1 с этот уровень составляет в «худшей» фазе 6 % (см. рис. 2, б). Однако после включения под нагрузку измеренный спустя 1 с уровень второй гармоники в «худшей» фазе составляет около 25 %, что несколько ниже, чем при одновременном с двух сторон включении линии (38 %). Очевидно, что в этом случае указанный порядок включения ВЛ1 не является эффективной мерой для снижения уровня второй гармоники.

В случае подключения ненагруженного автотрансформатора АТ2 к шинам ПС2 на работающей электропередаче (рис. 5, а) коммутация АТ2 осуществлялась одновременно всеми тремя фазами в момент прохождения напряжения фазы А через нуль ($\varphi_A = 0$). Этому моменту соответствует максимальное установившееся значение потокосцепления АТ2 в фазе А. При этих условиях наибольший уровень второй гармоники, измеряемый через 1 с после коммутации на шинах ПС2, составляет 265 % при $X_{\text{сист } 1} = X_{\text{сист } 3} = 72,5 \text{ Ом}$ (рис. 5, б). Резонансная кривая после резко выраженного пика стремительно снижается и при $X_{\text{сист}} = 200 \text{ Ом}$ уровень второй гармоники не превышает 8 %. В реальных условиях, когда $X_{\text{сист } 1} = 200 \text{ Ом}$ и $X_{\text{сист } 3} = 73 \text{ Ом}$, подключение автотрансформатора в режиме

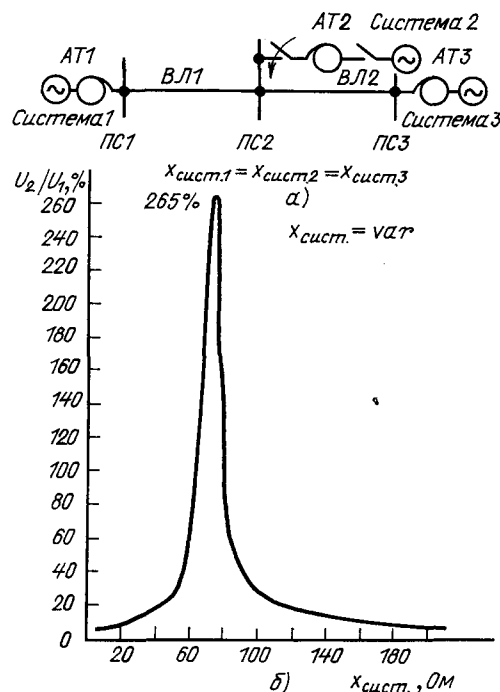


Рис. 5. Схема электропередачи (а) и резонансная кривая при трехфазном подключении ненагруженного АТ2 к шинам ПС2 на замкнутой в транзит электропередаче (б)

холостого хода к шинам ПС2 работающей электропередачи не вызывает появления второй гармоники, ее уровень во всех фазах менее 1 %.

Для расчета в одной точке на персональном компьютере класса ХТ требуется около 4 ч 30 м.

С целью исключения перенапряжений при резонансных условиях в случае подключения ненагруженного автотрансформатора АТ2 к шинам ПС2 на работающей электропередаче необходимо, чтобы подключаемый автотрансформатор находился под напряжением со стороны обмотки среднего напряжения.

При таком порядке включения вторая гармоника отсутствует, ее уровень на шинах ПС2 не превышает 1 % по отношению к первой гармонике. Очевидно, что такая очередность включения является весьма эффективной мерой предотвращения резонансных явлений на второй гармонике для рассматриваемой сети.

Выводы. 1. Параметрический резонанс на второй гармонике может возникать не только при включении ВЛ СВН на холостой ход, но и при других видах коммутации в сети СВН.

2. Изменение очередности коммутации в некоторых случаях значительно ограничивает уровень второй гармоники.

[04.03.91]

Расчет магнитных свойств магнитотвердых эластомеров

БРУКОВ Н. В., АЛЕКСЕЕВ А. Г.

В последнее время все более широкое распространение в различных отраслях науки и техники находят изделия из полимерных композиционных материалов с магнитными свойствами (ПКММ), основными компонентами которых являются различные полимеры или эластомеры и наполнители с ферромагнитными свойствами. Из областей применения ПКММ можно упомянуть электротехнику (двигатели, генераторы), копировальную и полиграфическую технику (магнитные проявляющие валы), техническую механику (магнитные опоры, подшипники, муфты), медицину и др. В ряде случаев применение ПКММ сдерживается недостаточными магнитными свойствами этих материалов в изотропном состоянии. Однако в процессе изготовления изделий из ПКММ (путем использования специальных технологических приемов) может быть создана анизотропная ориентационная структура (текстура) осей легкого намагничивания частиц магнитного наполнителя. Благодаря этому можно достичь существенного увеличения магнитных свойств [1].

В настоящее время известны два принципиально отличных способа ориентации частиц наполнителя: магнитным полем заданной топографии (магнитная ориентация) и деформированием ПКММ, частицы наполнителя в которых имеют анизометричную форму (механическая ориентация). Не останавливаясь подробнее на возможностях технической реализации упомянутых выше способов формирования анизотропных текстур в ПКММ, отметим следующее. Для достижения максимальных магнитных параметров изделий необходимо уметь находить оптимальную магнитную текстуру. Желательно располагать возможностями проведения оптимизации расчетным путем, а не прибегать к трудоемким методам макетирования, зачастую не обеспечивающим определение наилучшей конструкции магнита и его текстуры. Для этого необходимо знать аналитические выражения, описывающие связь магнитных параметров кривой размагничивания ПКММ с содержанием магнитного наполнителя в полимерной матрице и ориентационной структурой осей легкого намагничивания частиц наполнителя.

В [1] рассматривается модель магнитотвердого эластомера, в которой частицы (элементарные магниты) распределены по объему материала равномерно и упорядоченно (в вершинах кубической решетки). При этом ПКММ представляется в виде набора последовательно расположенных (в цепь с числом частиц N) элементарных магнитов, разделенных равными по длине промежутками, которые заполнены полимерным связующим, причем число цепей в поперечном сечении модели равно N_n . Модель позволяет рассчитать остаточную магнитную индукцию ПКММ через объемное наполнение c_v и остаточную индукцию материала наполнителя B_{r0} , являющуюся в дан-

ном случае эмпирической константой:

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_r}{B_{r0}} &= c_v - \frac{(1-c_v)}{\mu F Q}; \\ F &= r(1-c_v)/c_v + 1; \\ Q &= 1 + \frac{\operatorname{sh}(3c_v)}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{r(1-c_v)}\right)^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где B_r — остаточная магнитная индукция ПКММ; r — соотношение размеров частиц наполнителя ($r = l/d$, l — длина частицы, d — диаметр частицы); F и Q — коэффициенты, учитывающие изменение магнитных проводимостей зазоров между частицами, находящимися в одной и в разных цепях соответственно, при увеличении расстояния между частицами.

Данная модель ПКММ не свободна от ряда недостатков:

модель описывает свойства ПКММ с абсолютно ориентированной структурой осей легкого намагничивания частиц наполнителя и в направлении ориентации;

коэффициент F , учитывающий изменение проводимости зазора между частицами одной цепи, стремится к бесконечности при $c_v \rightarrow 0$, что приводит к противоречиям, так как при этом проводимость зазора остается конечной величиной;

принятая в модели «поперечно-слоистая» структура лишает физического смысла коэффициент Q , так как такая структура предполагает наличие только одной цепи;

модель неудовлетворительно работает при $r < 1$;

и наконец, для выполнения расчетов требуется заранее на основании экспериментальных данных определить величину B_{r0} .

Для устранения этих недостатков при описании магнитных свойств ПКММ с магнитотвердым наполнителем рассмотрим модель, в которой каждая частица наполнителя представляется элементарным магнитом, изготовленным из материала с остаточной индукцией B_{r0} и коэрцитивной силой H_{cb} . Элементарные магниты имеют форму призмы высотой l_m и длиной ребра квадратного основания d_m . Их магнитные моменты ориентированы перпендикулярно основанию призмы. Вводим предположение о том, что весь объем ПКММ разбит на области («домены»), которые обладают абсолютной ориентационной структурой осей легкого намагничивания частиц (магнитные моменты частиц параллельны), распределенных по объему «домена» равномерно и упорядоченно. Причем толщина полимерной прослойки между соседними магнитами l_3 одинакова как между магнитами, находящимися в одной цепи, так и между магнитами разных цепей [2] и равна

$$l_3 = 2(1 - c_v) / S, \quad (2)$$

где S — суммарная поверхность всех частиц наполнителя в единице объема ПКММ с объемной концентрацией c_v .

В случае призматических частиц с $r = l_m/d_m$

$$l_3 = \frac{l_m}{2r+1}(1/c_v - 1). \quad (3)$$

Заметим, что при $r \rightarrow 0$ выражение (3) переходит в следующее:

$$l_3 = l_m(1/c_v - 1), \quad (4)$$

совпадающее с выражением для l_3 , полученным в [1] для «поперечно-слоистой» модели.

Рассмотрим свойства одной цепи последовательно расположенных элементарных магнитов в единице объема «домена». Схема магнитной цепи приведена на рис. 1. Источниками магнитодвижущей силы (м. д. с.) модели являются N элементарных магнитов с м. д. с. $H_{cb}l_m$. Магнитный поток в нейтральном сечении элементарного магнита Φ_{nc} создает потери намагничивающей силы на внутреннем сопротивлении источника м. д. с. R_m . Далее магнитный поток разветвляется на поток рассеивания Φ_p вокруг элементарного магнита и поток Φ_3 , проходящий через зазор между магнитами цепи и равный полезному потоку цепи $\Phi_n = \Phi_3$.

Согласно закону Ома для этой магнитной цепи [1] можно записать

$$NH_{cb}l_m - NH_m l_m - (N+1) \frac{\Phi_3}{G_3} = \frac{B_r^2 S}{G_u N_n}, \quad (5)$$

где $H_{cb}l_m$ — намагничивающая сила элементарного магнита; $H_m l_m$ — потери намагничивающей силы в материале элементарного магнита; Φ_3/G_3 — потери намагничивающей силы в зазоре между элементарными магнитами; $B_r^2 S/G_u$ — результирующее значение намагничивающей силы модели «домена».

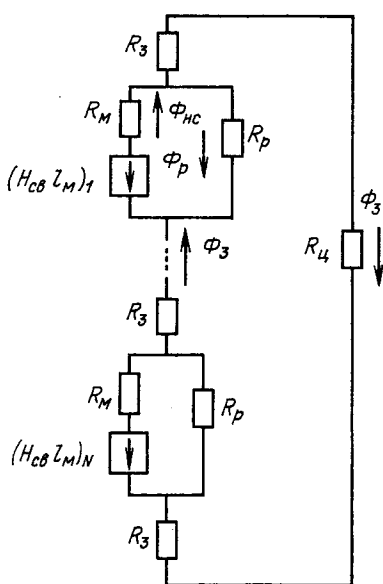


Рис. 1. Схема магнитной цепи

Аналогично [1] принимаем $H_m = 0$. Согласно [3], проводимость зазора между магнитами

$$G_3 = \mu_0 \frac{S_m}{l_3}, \quad (6)$$

где $S_m = d_m^2$ — площадь поперечного сечения магнита.

Суммарную проводимость цепи принимаем равной

$$G_u = \mu_0 \frac{S_u}{(N+1)l_3 + Nl_m} \approx \mu_0 \frac{S_u}{N(l_3 + l_m)}, \quad (7)$$

где S_u — площадь поперечного сечения цепи; $S_u = (d_m + l_3)^2$.

Соотношение между потоками Φ_p и Φ_3 принимаем равным

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_3} = \frac{R_3 + \frac{R_u}{N}}{R_p}. \quad (8)$$

Подставляя в (7) выражения для магнитных сопротивлений, получаем

$$\Phi_3 = \mu_0 \Phi_p R_p \frac{1}{\frac{l_3}{S_m} + \frac{l_m + l_3}{S_u}}. \quad (9)$$

Принимая $\Phi_p = H_{cb}l_m/R_p$, $\mu = 1$ и подставляя (6), (7), (9) в (5), получаем

$$B_r^2 = \frac{\mu_0 H_{cb} l_m}{l_3 + l_m} \left(1 - \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{l_m}{l_3}\right) \frac{S_m}{S_u}} \right). \quad (10)$$

Полагаем величину $\mu_0 H_{cb}$ равной величине остаточной индукции монокристаллического образца B_{r0} . Теперь можно записать

$$\frac{B_r^2}{B_{r0}^2} = \frac{1}{k+1} \left(1 - \frac{1}{1 + (1+k) \frac{S_m}{S_u}} \right), \quad (11)$$

$$\frac{S_m}{S_u} = \left(\frac{1}{1+rk} \right),$$

$$k = l_3/l_m.$$

Теперь, по аналогии с [4], можно определить остаточную индукцию «многодоменного» ПКММ как

$$B_r = \frac{\sum_{i=1}^n B_{ri}^2 \cos \alpha_i \delta V_i}{\sum_{i=1}^n \delta V_i}, \quad (12)$$

где B_{ri}^2 — остаточная индукция i -го домена; δV_i — объем i -го домена; α_i — угол между вектором B_{ri} и направлением, в котором рассчитывается B_r .

Если принять $\delta V_i = \text{const}$, а ориентационная структура «доменов» описывается функцией ориентации $w(\theta, \varphi)$ (θ и φ — углы сферической лабораторной системы координат), определяющей вероятность того, что координатные углы оси легкого намагничивания «домена» попадают в интер-

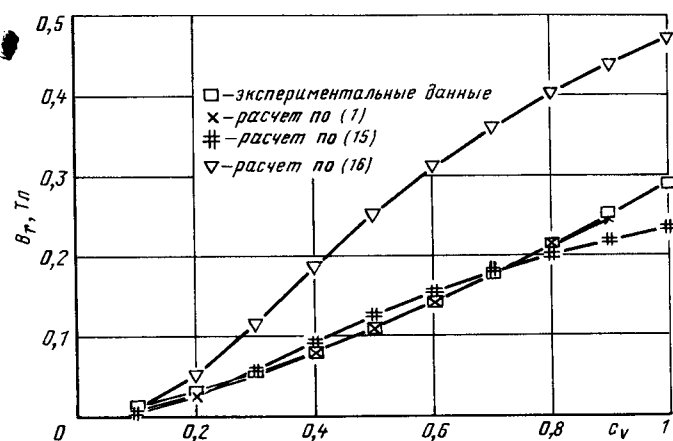


Рис. 2. Зависимость остаточной индукции ПКММ от содержания феррита бария при $r=1,1$

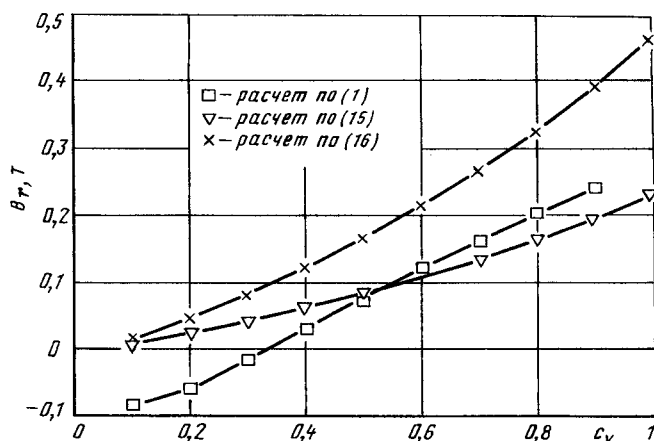


Рис. 3. Зависимость остаточной индукции ПКММ от содержания феррита бария при $r=0,1$

валы $\theta + d\theta$ и $\varphi + d\varphi$, то

$$B_r = 2B_r^A(c_v) \int_0^\pi \int_0^\pi |e_1| \omega(\theta, \varphi) d\varphi d\theta, \quad (13)$$

где e_1 — проекция единичного вектора на ось, направление которой совпадает с направлением расчета B_r ;

$$e_1 = \cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta (\cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi), \quad (14)$$

где θ_0 и φ_0 — углы, определяющие ориентацию в пространстве направления расчета B_r .

В частности для ПКММ, обладающего изотропной ориентационной структурой, из (13) можно получить

$$B_r = B_r^A/2, \quad (15)$$

а для абсолютно ориентированной структуры в направлении ориентации

$$B_r = B_r^A. \quad (16)$$

Ни рис. 2 представлены зависимости остаточной индукции ПКММ от содержания наполнителя, рассчитанные по (1), (15) и (16), а также экспериментальные данные, полученные при испытаниях ПКММ на основе каучука СКИ-3 и феррита бария [1], аппроксимированные выражением

$$B_r = 0,29c_v^{1,4}. \quad (17)$$

Расчеты проводились в предположении $r=1,1$ и $B_{r0}=0,29$ Тл для (1) и $B_{r0}=0,47$ Тл (остаточная индукция монокристалла феррита бария [5]) для (15) и (16). Как хорошо видно из рис. 2 кривые, рассчитанные по (1) и (15), приблизительно совпадают.

На рис. 3 приведены зависимости B_r от c_v для $r=0,1$. К сожалению, мы не располагаем экспериментальными данными по магнитным свой-

ствам ПКММ с частицами такой формы, однако на основании выполненных расчетов можно сделать вывод о возможных границах применимости различных моделей для описания свойств магнитных эластомеров с различной формой частиц наполнителя. Как видно, модель (1) предсказывает отрицательные значения остаточной индукции при малых концентрациях наполнителя, а предлагаемая модель работает удовлетворительно.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модель достаточно точно описывает свойства магнитотвердых эластомеров, частицы наполнителя в которых имеют любую форму. Это в свою очередь позволяет:

целенаправленно выбирать магнитотвердые наполнители с частицами различной формы, разрабатывать рецептуры ПКММ с заданными свойствами;

прогнозировать магнитные свойства изделий из магнитотвердых ПКММ с произвольной ориентационной структурой и рассчитывать структурные характеристики магнитоанизотропных изделий, позволяющие обеспечить заданный уровень магнитных свойств.

оптимизировать конструкции формирующего инструмента и технологические режимы переработки при формовании изделий с необходимой текстурой, обеспечивающей максимальные магнитные параметры магнитов из ПКММ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. Г., Корнев А. Е. Магнитные эластомеры. — М.: Химия, 1987. — 240 с.
2. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. — М.: Физматгиз, 1960. — 528 с.
3. Постоянные магниты. (Справочное пособие) / Под ред. Ю. М. Пятин. — М.: Энергия, 1971. — 376 с.
4. Василевский Ю. А. Носители магнитной записи. — М.: Искусство, 1989. — 288 с.
5. Летюк Л. М., Журавлев Г. И. Химия и технология ферритов. — Л.: Химия, 1983, 256 с.

[21.11.90]

Об условиях ресинхронизации генераторов

МАВРЫЧЕВ Ю. С.

Иваново

Принято считать, что критическое значение среднего скольжения в установившемся асинхронном режиме пропорционально частоте собственных колебаний ротора синхронного генератора [1—3]. Имеются, однако, различные мнения относительно числового значения коэффициента пропорциональности, связывающего указанные величины. Цель настоящей статьи — показать, что многочисленные попытки обосновать использование любого конкретного значения этого коэффициента, исследуя свойства решений уравнения маятника, лишены смысла: в действительности значение искомого коэффициента полностью определяется именно теми факторами, которыми авторы, пытавшиеся его вычислить (в [4—6] и в огромном множестве других опубликованных работ), пренебрегали.

Случай постоянной амплитуды синхронного момента. Выражая угол и время в радианах, постоянную инерции — в секундах, а мощность — в относительных единицах, уравнение движения ротора можно представить в виде

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + M_S \sin \delta = 0. \quad (1)$$

При выводе критерия ресинхронизации коэффициенты этого уравнения принято считать постоянными. Из (1) следует, что

$$W = \frac{1}{2} T_J \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + (1 - \cos \delta) M_S \quad (2)$$

— константа. В силу формулы (2) скольжение $s = \frac{d\delta}{dt}$ представляет собой следующую функцию угла δ :

$$S = \frac{2}{h} \sqrt{1 - h^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}} \Omega_0. \quad (3)$$

Здесь

$$h = \sqrt{2M_S/W}, \quad \Omega_0 = \sqrt{M_S/T_J}.$$

Согласно (3) максимальное и минимальное (за период колебаний) значения скольжения выражаются формулами:

$$s_{\max} = \frac{2}{h} \Omega_0, \quad s_{\min} = \frac{2}{h} \sqrt{1 - h^2} \Omega_0. \quad (4)$$

Из них вытекает, что

$$s_{\max}^2 - s_{\min}^2 = 4\Omega_0^2. \quad (5)$$

Каждая из попыток определить критическое значение среднего скольжения путем рассмотрения свойств решений уравнения (1) основана на двух допущениях, вводимых явно или неявно. Одно из этих допущений (общее для всех работ такого типа) состоит в том, что считается равным нулю критическое значение минимального скольжения [4—6]:

$$s_{\min} = 0, \quad (6)$$

а второе — в том, что среднее скольжение s_0 отождествляется с некоторой величиной:

в [4]

$$s_0 = \frac{1}{2}(s_{\max} + s_{\min}); \quad (7)$$

в [5]

$$s_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi s d\delta; \quad (8)$$

в [6]

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{2}(s_{\max}^2 + s_{\min}^2)}. \quad (9)$$

Отмеченные допущения принимаются в большинстве работ об условиях ресинхронизации. Имеются, однако, исключения [7], заслуживающие отдельного рассмотрения.

Используя формулы (3) — (5), находим, что согласно допущениям (6) — (9) критическое значение среднего скольжения определяется формулой

$$s_0 = k_0 \Omega_0. \quad (10)$$

При этом допущениям (6) и (7) соответствует коэффициент $k_0 = 1$, допущениям (6) и (8) — коэффициент $k_0 = 4/\pi$, допущениям (6) и (9) — коэффициент $k_0 = \sqrt{2}$.

Вводить допущения, выражаемые формулами (7) — (9), нет необходимости, поскольку известно, что среднее скольжение точно равно частоте колебаний:

$$s_0 = 2\pi/T \quad (11)$$

и что период колебаний T определяется формулой

$$T = \int_0^{2\pi} d\delta/s. \quad (12)$$

Из равенств (3), (11) и (12) вытекает:

$$s = k_0 \Omega_0. \quad (13)$$

Здесь

$$k_0 = \pi/hF(h, \pi/2); \quad (14)$$

$F(h, \pi/2)$ — полный эллиптический интеграл первого рода.

По аналогии с коэффициентом k_0 , определяемым соотношением (13), можно ввести коэффициент $k_{\min}$:

$$s_{\min} = k_{\min} \Omega_0. \quad (15)$$

В силу формул (4) и (15)

$$k_{\min} = \frac{2}{h} \sqrt{1 - h^2}. \quad (16)$$

Равенства (14) и (16) определяют зависимость $k_{\min}(k_0)$, представленную на рис. 1.

При $k_{\min} \rightarrow 0$ согласно рис. 1 значение $k_0 \rightarrow 0$. Поэтому с уменьшением минимального скольжения среднее скольжение может стать сколь угодно малой величиной, и критическое значение коэффициента k_0 , математически корректно определенное из уравнения (1), отнюдь не лежит в указанных пределах $1 \leq k_0 \leq \sqrt{2}$. Оно оказывается точно равным нулю. Таким образом, для того чтобы получить значения коэффициента k_0 , лежащие в указанных пределах, необходимо учесть факторы, в уравнении (1) игнорируемые.

Из рис. 1 видно, что в тех случаях, когда коэффициент k_0 принимает значения 1, $4/\pi$ и $\sqrt{2}$, минимальное скольжение нулю не равно. Оно составляет

соответственно 0,35, 0,65 и 0,82 резонансной частоты (0,35, 0,51 и 0,58 среднего скольжения).

Условие (6) с экспериментальными данными никогда не согласуется: на осциллограммах процесса ресинхронизации минимальное скольжение в последнем цикле асинхронного хода всегда равно не нулю, а в среднем приблизительно половине среднего скольжения. Это неизбежно, поскольку какой бы вид не имело уравнение движения ротора, период колебаний определяется формулой (12), согласно которой всегда, когда минимальное скольжение стремится к нулю, период колебаний стремится к бесконечности.

В [8] отмечено, что в силу известных положений теории дифференциальных уравнений минимальное значение среднего скольжения в установившемся асинхронном режиме принципиально невозможно определить не только из уравнения (1), но и из уравнения более общего вида

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + K_D \frac{d\delta}{dt} + M_S \sin \delta = M_T, \quad (17)$$

где K_D — в секундах, если T_J , K_D , M_S и M_T — постоянные.

На фазовом цилиндре предельный цикл уравнения (17), соответствующий установившемуся режиму, может проходить через точки, сколь угодно близкие к «седлу», соответствующему состоянию неустойчивого равновесия. В критическом случае предельный цикл сливается с сепаратрисой и проходит через «седло». Поскольку угловая скорость и угловое ускорение в этой точке обращаются в нуль, а в ее окрестности — бесконечно малы, период автоколебаний может быть сколь угодно большим.

Случай переменной амплитуды синхронного момента. Если амплитуда синхронного момента постоянной величиной не является, критическое значение среднего скольжения нулю не равно и зависит от разности значений этой амплитуды в конечный и начальный моменты времени. Показать это нетрудно.

Пусть в момент времени t_k коэффициент M_S возрастает на величину $\Delta M_S(t_k) = \Delta M_{Sk}$, тогда при $t < t_k$ движение ротора подчиняется уравнению (1) и, следовательно, константой является энергия, определяемая формулой (2); при $t > t_k$ движение ротора подчиняется уравнению

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + (M_S + \Delta M_{Sk}) \sin \delta = 0,$$

а константой является энергия, определяемая формулой

$$W = \frac{1}{2} T_J \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + (1 - \cos \delta) (M_S + \Delta M_{Sk}).$$

Учитывая это и принимая $t_i < t_k < t_n$, получаем:

$$\frac{1}{2} T_J (s_k^2 - s_i^2) = (\cos \delta_k - \cos \delta_i) M_S; \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} T_J (s_n^2 - s_k^2) = (\cos \delta_n - \cos \delta_k) (M_S + \Delta M_{Sk}). \quad (19)$$

Здесь δ_i , δ_k , δ_n и s_i , s_k , s_n — значения угла δ и скольжения s в моменты времени t_i , t_k , t_n . Из соотношений (18) и (19) вытекает, что

$$\frac{1}{2} T_J (s_n^2 - s_i^2) = (\cos \delta_n - \cos \delta_i) M_S + (\cos \delta_n - \cos \delta_k) \Delta M_{Sk}. \quad (20)$$

Согласно формуле (20) при $\delta_i = \delta_n = \pi$

$$\frac{1}{2} T_J (s_i^2 - s_n^2) = M_{\Delta}; \quad (21)$$

$$M_{\Delta} = (1 + \cos \delta_k) \Delta M_{Sk}. \quad (22)$$

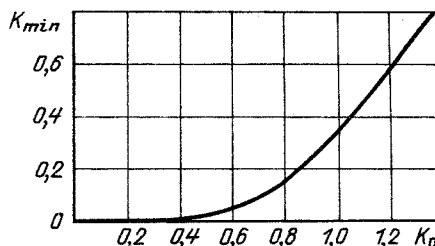


Рис. 1. Зависимость между коэффициентами, определяющими среднее и минимальное значения скольжения

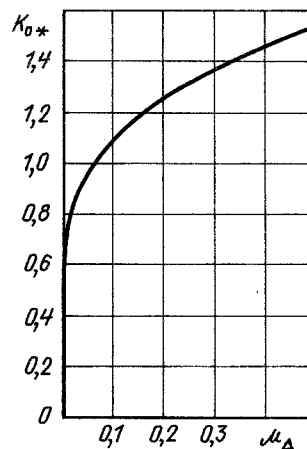


Рис. 2. Зависимость коэффициента, определяющего критическое значение среднего скольжения, от величины, характеризующей уровень возмущений

Если $\frac{1}{2} T_J s_i^2 < M_{\Delta}$, то равенство (21) выполняться не

может, и генератор втягивается в синхронизм. Следовательно, критическое значение скольжения s_i (т. е. минимального скольжения в режиме, предшествующем увеличению коэффициента M_S) определяется формулой

$$s_{\min} = \sqrt{2M_{\Delta}/T_J}. \quad (23)$$

Если в моменты времени от t_i до t_n коэффициент M_S возрастает несколько раз, то при $t_{i+\mu} < t < t_{i+\mu+1}$ движение ротора описывается уравнением

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + (M_S + \sum_{k=1}^{i+\mu} \Delta M_{Sk}) \sin \delta = 0,$$

константой является энергия, определяемая формулой

$$W = \frac{1}{2} T_J \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + (1 - \cos \delta) (M_S + \sum_{k=i}^{i+\mu} \Delta M_{Sk}),$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} T_J (s_{i+\mu+1}^2 - s_{i+\mu}^2) &= (\cos \delta_{i+\mu+1} - \cos \delta_{i+\mu}) \times \\ &\times (M_S + \sum_{k=i}^{i+\mu} \Delta M_{Sk}). \end{aligned} \quad (24)$$

При ν -кратном возрастании коэффициента M_S можно записать $\nu+1$ формулу вида (24) для значений μ от 0 до ν . Путем почленного сложения всех этих формул

находим:

$$\frac{1}{2} T_J (s_n^2 - s_i^2) = (\cos \delta_n - \cos \delta_i) M_S + \sum_{k=i+1}^{i+v} (\cos \delta_n - \cos \delta_k) \Delta M_{Sk}. \quad (25)$$

Согласно формуле (25) при v -кратном возрастании коэффициента M_S равенства (21) и (23) справедливы, если используется следующее обобщение формулы (22):

$$M_{\Delta} = \sum_{k=i+1}^{i+v} (1 - \cos \delta_k) \Delta M_{Sk}.$$

Следовательно, для того чтобы эти равенства имели такой же смысл и при непрерывном изменении коэффициента M_S необходимо принять

$$M_S = \int_{M_S(t_i)}^{M_S(t_n)} [1 + \cos \delta(t)] dM_S(t).$$

При форсировке возбуждения коэффициент M_S мгновенно измениться на конечную величину не может. Скорость его увеличения определяется постоянной времени обмотки возбуждения. Как правило, эта постоянная значительно больше периода колебаний, который при асинхронном ходе возбужденных генераторов обычно не превышает 1 с. Поэтому в тех случаях, когда колебания угла можно приближенно считать синусоидальными,

$$M_{\Delta}(t) = M_S(t) - M_S(t_1).$$

Согласно формулам (15) и (23) отношение $\mu_{\Delta} = M_{\Delta}/M_S$ связано с коэффициентом $k_{\min}$ равенством

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{2} k_{\min}^2. \quad (26)$$

Совместно с зависимостью $k_{\min}(k_0)$, представленной на рис. 1, равенство (26) определяет представленную на рис. 2 зависимость $k_0 \cdot (\mu_{\Delta})$.

В любом режиме работы электрической системы (и особенно в асинхронном) ее параметры непрерывно изменяются. Изменяются, в частности, величины, от которых зависит значение коэффициента M_S . Из рис. 2 видно, что увеличение этого коэффициента всего лишь на 0,5 % приводит к втягиванию генератора в синхронизм при начальном значении среднего скольжения, составляющем 60 % резонансной частоты. Следовательно, возрастание амплитуды синхронного момента, доста-

точное для ресинхронизации, может иметь место не только в результате форсировки возбуждения, осуществляемой персоналом или автоматическими устройствами, но и в результате неизбежных случайных изменений режима работы системы. При этом уровень таких возмущений, очевидно, никогда не бывает настолько низким, чтобы установившийся асинхронный ход оказался возможным при значениях среднего скольжения, существенно меньших резонансной частоты.

Каким-то уровням возмущений в системе оказываются эквивалентными и любые допущения, которые вводят в тех случаях, когда ищут приближенное решение задачи. Допущениям, принятым в [4–6], соответствуют следующие значения μ_{Δ} : 0,06 — допущениям, принятым в [4], 0,21 — допущениям, принятым в [5], 0,34 — допущениям, принятым в [6].

Выводы. 1. Коэффициент пропорциональности, связывающий критическое значение среднего скольжения с частотой собственных колебаний ротора, определяется факторами, которые в уравнении движения ротора с постоянными коэффициентами не учитываются.

2. К ресинхронизации приводит даже весьма небольшое возрастание амплитуды синхронного момента, которое может быть следствием неизбежного наличия случайных возмущений в системе. Получаемый таким образом критерий ресинхронизации довольно близок к используемому ныне критерию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабинович Р. С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Совалов С. А., Семенов В. А. Противоаварийное управление в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Гоник Я. Е., Иглицкий Е. С. Автоматика ликвидации асинхронного режима. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Управление переходными режимами электроэнергетических систем / Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1982.
5. Степунин С. Е. Устройство, выявляющее несинхронный режим в энергосистеме. Труды / ВНИИЭ, 1963, вып. 15.
6. Чеснов М. П. Исследование условий асинхронного хода и ресинхронизации генератора при нарушении динамической устойчивости. — Электричество, 1960, № 6.
7. Shoults D. R., Crary S. B., Lauder A. H. Pull-in characteristics of synchronous motors. — Electrical Engineering, 1935, vol. 54, N 12.
8. Маврычев Ю. С. Об исследовании условий втягивания синхронной машины в синхронизм методом гармонической линеаризации. — Изв. вузов. Электромеханика, 1983, № 10.

[25.02.91]

УДК (621.313+621.314.572).001.24

Расчет характеристик вентильного двигателя

ЭПШТЕЙН И. И.

НИИ ПО «ХЭМЗ»

Вентильный двигатель, состоящий из синхронного двигателя и ведомого двигателем инвертора тока, широко используется на практике. Расчет статического режима, особенно при использовании серийного синхронного двигателя, представляет актуальную инженерную задачу. При мощности двигателя свыше 5 МВт целесообразно выполнить обмотку статора в виде двух

самостоятельных обмоток, сдвинутых в пространстве на 30° и питающихся от отдельных инверторов. Статические режимы двухобмоточного двигателя недостаточно исследованы. Представляет интерес сопоставление характеристик одно- и двухобмоточных вентильных двигателей.

В настоящей статье рассматриваются перечисленные вопросы.

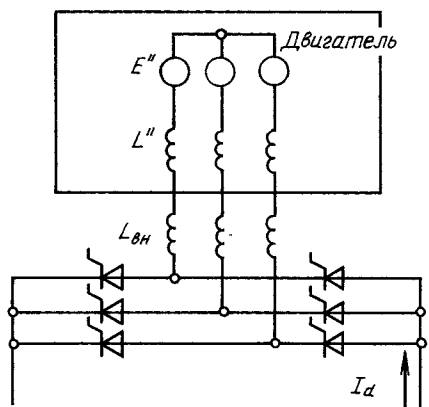


Рис. 1. Расчетная схема вентильного двигателя с одной обмоткой

Расчет статических характеристик однообмоточно-го вентильного двигателя. Рассматривается неявно-полюсный двигатель с полной демпферной обмоткой. Выходной ток инвертора несинусоидален, он представляет собой ступенчатую аппроксимацию синусоиды. В случае трехфазного мостового инвертора в выходном токе, кроме основной гармоники, содержатся высшие гармоники частоты $(6n \pm 1)\omega$, где n — натуральный ряд чисел; ω — частота основной гармоники. Для высших гармоник тока двигателя мощностью свыше 100 кВт могут быть представлены в виде индуктивности, которая равна сверхпереходной индуктивности L'' . С учетом данного обстоятельства приходим к схеме замещения двигателя, показанной на рис. 1. Схема удобна для исследования процессов при питании двигателя от инвертора, в котором коммутация тока осуществляется под действием э. д. с. E'' , представляющей собой напряжение за сверхпереходной реактивностью. Ток возбуждения регулируется в функции тока статора так, чтобы амплитуда E'' не зависела от тока. Величина E'' при $\omega/\omega_n > 0,01 \div 0,05$ практически синусоидальна и определяется основной гармоникой тока двигателя согласно векторной диаграмме, показанной на рис. 2. Как правило, и это вполне естественно, значение E'' для $\omega = \omega_n$ принимается равным номинальному

$$E'' = U_n \sqrt{1 + \left(\frac{I_{1n} \omega_n L''}{U_n} \right)^2 + 2 \frac{I_{1n} \omega_n L''}{U_n} \sin \varphi_n},$$

где $x'' = \frac{I_{1n} \omega_n L''}{U_n}$ — сверхпереходное реактивное сопротивление двигателя в относительных единицах.

Следовательно,

$$E''/U_n = \sqrt{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n}. \quad (1)$$

Номинальный $\cos \varphi_E$, где φ_E — угол между векторами

$$\vec{E}'' \text{ и } \vec{I}_1 \text{ равен } \cos \varphi_{E1} = \cos \varphi_n \frac{E''}{U_n}.$$

Кроме сверхпереходного индуктивного сопротивления x'' , вводится понятие коммутационного индуктивного сопротивления $x_k = x'' + x_{вн}$, где $x_{вн}$ — индуктивное сопротивление внешней схемы (также в относительных единицах).

1) Общеизвестное уравнение коммутации трехфазного мостового инвертора в угловых единицах текущей частоты имеет следующий вид:

$$\cos \delta - \cos \beta = \frac{2I_d \omega L_k}{\sqrt{6} E} = \frac{\sigma}{3} \frac{1}{k_\gamma} \frac{I_1 \omega L_k}{E} =$$

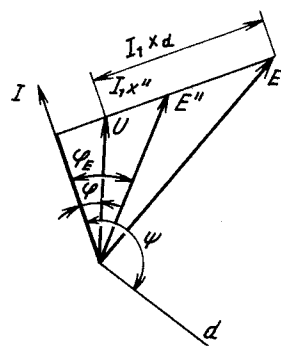


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронного неявнополюсного двигателя

$$= \frac{\sigma}{3} \frac{1}{k_\gamma} \frac{I_1 E_n}{E} \frac{U_n}{E_n} \frac{\omega}{\omega_n} \frac{\omega_n L_k I_{1n}}{U_n}.$$

Используя следующие обозначения

$$\omega/\omega_n = \alpha; \quad \frac{\omega_n L_k I_{1n}}{U_n} = x_k; \quad E''/E_n = e,$$

получаем

$$\cos \delta - \cos \beta = \frac{\sigma}{3} \frac{1}{k_\gamma} \frac{I_1}{I_{1n}} \frac{\alpha}{e} \frac{U_n}{E_n} x_k. \quad (2)$$

Здесь k_γ — коэффициент, учитывающий влияние угла коммутации на амплитуду основной гармоники тока.

$$2) \cos \varphi_E = \frac{\cos \delta + \cos \beta}{2k_\gamma}. \quad (3)$$

3) Момент двигателя в отношении к номинальному будет равен

$$\frac{M}{M_n} = \frac{I_1}{I_{1n}} \frac{E''}{E_n} \frac{1}{\alpha} \frac{\cos \varphi_E}{\cos \varphi_{E1}}.$$

С учетом (2) и (3) получаем

$$\frac{2\sigma}{3} \left(\frac{\alpha}{e} \right)^2 \frac{M}{M_n} \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n} = \cos^2 \delta - \cos^2 \beta. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить для конкретного двигателя значение момента, который развивает двигатель при заданном законе управления амплитудой э. д. с. $(\alpha/e)^2$, заданных параметрах двигателя и инвертора. Как правило, α/e принимается равным 1. В этом случае формула (4) упрощается

$$2,09 \frac{M}{M_n} \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n} = \cos^2 \delta - \cos^2 \beta. \quad (5)$$

Обозначаем $2,09 \frac{M}{M_n} \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n}$ через f_m . Отно-

сительно значений β и δ указываем следующее: угол δ принимается из условия обеспечения надежного восстановления тиристором управляющих свойств при заданной частоте, обозначаем его δ_n . Угол β должен быть больше δ_n . Но для трехфазного мостового инвертора существует ограничение по предельному углу коммутации $\gamma_{пр} + \delta_n \leq \alpha/3$. В результате получаем, что

$$\delta = \delta_n \text{ при } \beta < \sigma/3 \text{ и } \delta = \beta - \sigma/3 + \delta_n \text{ при } \beta > \sigma/3. \quad (6)$$

Анализ правой части формулы (4) показывает, что она с учетом ограничений (6) принимает макси-

мальное значение при $\beta = 5\sigma/12 - \delta_n/2$, которое равно $\sin(\sigma/3 - \delta_n)$.

Согласно формулам (4), (5) можно определить для заданных M и δ_n угол β .

Пример:

$M = M_n$; $e/\alpha = 1$; $x'' = 0,15$; $x_k = 0,17$; $\cos \varphi_n = 0,9$; $\delta_n = 15^\circ$; $\cos \varphi_{En} = 0,837$; $\cos^2 \beta = \cos^2 \delta_n - 2,09 \times$

$$\times \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n}; \beta = 36^\circ.$$

Поскольку реально существует разброс углов β на максимальную величину $\Delta\beta$, то для гарантированного обеспечения коммутации устанавливаемый угол опережения инвертора принимается равным

$$\beta_y = \beta + \Delta\beta. \quad (7)$$

Уточнив согласно (4) и (7) значение δ , определяем эквивалентную длительность коммутационного процесса $\gamma_{эkv}$ и значение $\cos \varphi_E$.

Длительность эквивалентной линейной коммутации равна (полагая, что в контуре коммутации действует неизменная коммутационная э. д. с., равная $\sqrt{6}E'' \sin \varphi_E$)

$$\gamma_{эkv} = \frac{2I_d \omega L_k}{\sqrt{6} E'' \sin \varphi_E} = \frac{\cos \delta - \cos \beta_y}{\sin \varphi_E}. \quad (8)$$

Для определения $\sin \varphi_E$ воспользуемся выражением (3) для $\cos \varphi_E$, полагая $k_y = 1$, тогда

$$\gamma_{эkv} = 2 \frac{\cos \delta - \cos \beta_y}{\sqrt{4 - (\cos \delta + \cos \beta_y)^2}} \quad (9)$$

и

$$k_y = \frac{\sin \frac{\gamma_{эkv}}{2}}{\frac{\gamma_{эkv}}{2}}. \quad (10)$$

С учетом k_y амплитуды высших гармоник тока двигателя в отношении к основной будут равны

$$I_k/I_1 = \frac{1}{k^2} \frac{\sin \frac{k\gamma_{эkv}}{2}}{\frac{\gamma_{эkv}}{2}}. \quad (11)$$

Продолжение примера:

$\Delta\beta = 3^\circ$; $\beta_y = 39^\circ$; $\cos^2 \delta = \cos^2 \beta_y + 2,09 \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (x'')^2 + 2x'' \sin \varphi_n}$; $\cos \delta = 0,94$; $\delta = 20^\circ$; $\gamma_{эkv} = 0,318$; $k_y = 0,995$; $\cos \varphi_E = 0,863$.

В результате расчета получили значение $\cos \varphi_E$, несколько большее $\cos \varphi_{En}$, что является необходимым условием длительной работы синхронного двигателя в

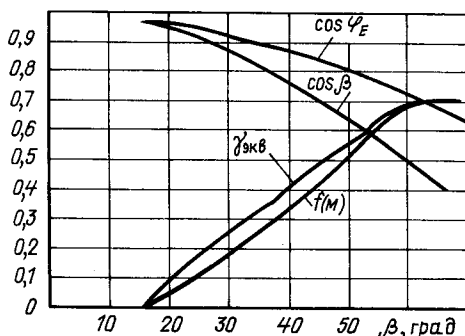


Рис. 3. Коммутационные характеристики вентильного двигателя с одной обмоткой, $\delta_n = 15^\circ$

системе вентильного двигателя с номинальным моментом. Окончательное суждение может быть установлено после оценки влияния высших гармоник на нагрев статора и индуктора двигателя.

Таким образом, полученные соотношения (4), (7), (9), (10), (3), (11) позволяют выполнить расчет режима работы вентильного двигателя. На рис. 3 показаны коммутационные характеристики вентильного двигателя.

Схема замещения вентильного двигателя с двумя обмотками статора. Для приводов большой мощности двигатель выполняется с двумя обмотками статора, сдвинутыми на 30° , каждая из которых питается от отдельного инвертора. Целесообразность такого технического решения, несмотря на некоторое усложнение двигателя, определяется снижением дополнительных потерь в индукторе, вызываемых высшими временными гармониками м. д. с. статора.

Удобная схема замещения для анализа электромагнитных процессов в вентильном двигателе с двумя обмотками статора показана на рис. 4. Введенный в схему идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации для каждой вторичной обмотки 1:1 позволяет представить фазовый сдвиг э. д. с. E на зажимах переменного тока каждого моста и форму м. д. с. статора, соответствующую первичному току трансформатора, питающего 12-пульсный преобразователь. Сверхпереходная индуктивность двигателя $L'' = L'_1 + L'_2$, коммутационная индуктивность $L_k = L'' + L_{вн}$. Кроме указанных параметров, вводится еще один, а именно, коэффициент связи обмоток $k_{св} = L'_1/L_k$. Значение э. д. с. для номинального режима работы двигателя определяется соотношением

$$E_n/U_n = \sqrt{1 + (2x'_1 + x'_2)^2 + 2(2x'_1 + x'_2) \sin \varphi_n}. \quad (12)$$

В формуле относительные значения x'_1 , x'_2 и ниже x_k определены в базе номинальных данных одной обмотки статора.

Коммутационные характеристики двухобмоточного вентильного двигателя. Наличие магнитной связи между обмотками ($k_{св} > 0$) приводит к тому, что во время коммутации тока в одном инверторе происходит искажение отрицательного напряжения на вышедшем из работы тиристоре второго инвертора. Причем

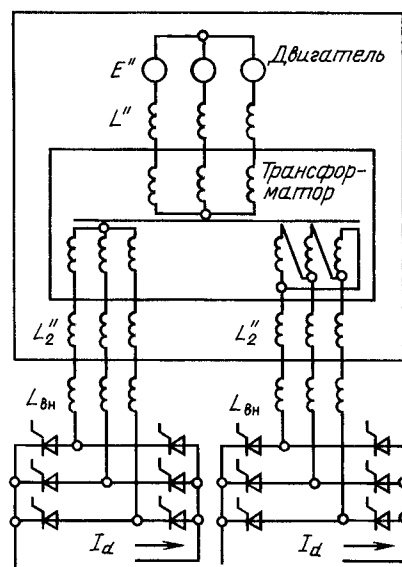


Рис. 4. Расчетная схема замещения вентильного двигателя с двумя обмотками

указанное напряжение становится положительным в области угла Δ , отсчитываемого влево от нулевого значения отрицательного напряжения в отсутствие магнитной связи между обмотками. Угол Δ определяется соотношением

$$\Delta = \arctg \frac{\sqrt{3k_{cb}}}{4-3k_{cb}}. \quad (13)$$

При расчете коммутационной способности инвертора в функции угла β при заданном значении угла δ_n выделяем следующие зоны изменения углов β и δ :

1. $\delta_n < \beta < \sigma/6$; $\delta = \delta_n$; $\gamma = \beta - \delta_n$;
2. $\sigma/6 < \beta < \sigma/6 + \Delta$; $\delta = \beta + \delta_n - \sigma/6$; $\gamma = \sigma/6 - \delta_n$;
3. $\sigma/6 + \Delta < \beta < \sigma/6 + \Delta + \delta_n$; $\delta = \Delta + \delta_n$; $\gamma = \beta - \Delta - \delta_n$.

При дальнейшем увеличении угла β и сохранении угла δ на предельном уровне $\delta_n + \Delta$ имеет место наложение коммутации в обоих инверторах. В данном режиме, как показано в [1], при реальных значениях $k_{cb} \approx 0,5$ не происходит увеличения перегрузочной способности по моменту.

Основная формула, устанавливающая связь между моментом двигателя и режимом работы инвертора, аналогична (4):

$$\left. \begin{aligned} f_m &= \cos^2 \delta - \cos^2 \beta; \\ f_m &= 2,09 \frac{M}{M_n} (e/\alpha)^2 \frac{x_k \cos \varphi_n}{1 + (2x'_1 + x'_2)^2 + 2(2x'_1 + x'_2) \sin \varphi_n} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Но выбор β и δ не может быть произвольным, а определяется тремя указанными выше зонами. Для каждой зоны предельные значения f_m определяются выражениями:

1. $0 \div \cos^2 \delta_n - 0,75$;
2. $\cos^2 \delta_n - 0,75 \div \cos^2 (\delta_n + \Delta) - \cos^2 (\sigma/6 + \Delta)$;
3. $\cos^2 (\delta_n + \Delta) - \cos^2 (\sigma/6 + \Delta) \div \cos^2 (\delta_n + \Delta) - \cos^2 \times$
 $\times (\delta_n + \Delta + \sigma/6).$ (15)

Максимальное значение f_m равно

$$\cos^2 (\delta_n + \Delta) - \cos^2 (\delta_n + \Delta + \sigma/6) = 0,5 \sin (\sigma/6 + 2\delta_n + 2\Delta).$$

Порядок расчета режима двухобмоточного вентильного двигателя для заданного f_m такой же как однообмоточного. Для заданного f_m и известных δ_n и Δ определяется зона углов β согласно (15). Для первой и третьей зоны известно значение δ , а β рассчитывается согласно (14). Для второй зоны известно значение $\gamma = \sigma/6 - \delta_n$, и выражение $\cos^2 \delta - \cos^2 \beta$ преобразуется к следующему: $\sin (\sigma/6 - \delta_n) \sin (2\beta - \sigma/6 + \delta_n)$, являющемуся функцией одного неизвестного β .

На рис. 5 показаны коммутационные характеристики двухобмоточного вентильного двигателя.

Сопоставление однообмоточного и двухобмоточного вентильных двигателей. На рис. 6 совмещены коммутационные характеристики однообмоточного и двухобмоточного вентильных двигателей, которые в совокупности с характеристиками на рис. 3 и 5 позволяют сделать следующие выводы.

1. При одинаковых значениях f_m и при $f_m < \cos^2 \delta_n - 0,75$ характеристики обоих двигателей совпадают, но для $f_m > \cos^2 \delta_n - 0,75$ $\cos \varphi_E$ двухобмоточного двигателя ниже, следовательно, все характеристики хуже.

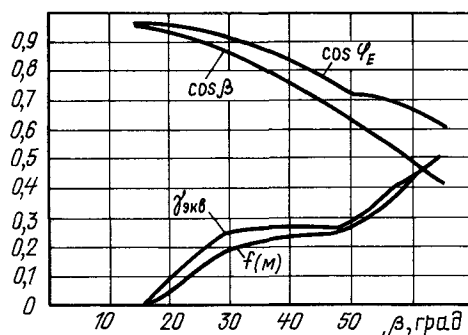


Рис. 5. Коммутационные характеристики вентильного двигателя с двумя обмотками, $\delta_n = 15^\circ$, $k_{cb} = 0,5$

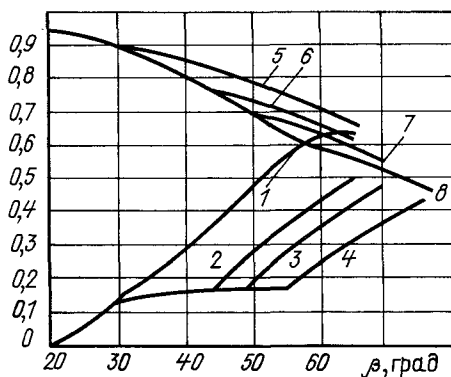


Рис. 6. Зависимость момента и φ_E вентильного двигателя от угла β для $\delta_n = 20^\circ$: 1 — $f(M)$ для двигателя с одной обмоткой; 2, 3, 4 — $f(M)$ для двигателя с двумя обмотками при $k_{cb} = 0,4$; 0,5; 0,6; 5 — $\cos \varphi_E$ для двигателя с одной обмоткой 6, 7, 8 — $\cos \varphi_E$ для двигателя с двумя обмотками при $k_{cb} = 0,4$; 0,5; 0,6

2. Будут ли значения f_m одинаковыми для обоих типов двигателей, зависит главным образом от значения x'' для полной единой обмотки двигателя и одной из обмоток двухобмоточного двигателя в базе номинальных данных этой обмотки. В последнем случае значение x'' теоретически должно быть меньше. Но для окончательного вывода необходимо располагать точными значениями параметров двигателя и данными режима его работы. Изложенная методика позволяет выполнить сопоставительный расчет вариантов.

3. Решение в пользу двухобмоточного двигателя тем более вероятно, чем меньше δ_n . Значение δ_n определяется временем восстановления управляющих свойств тиристоры и выходной частотой инвертора. Оно тем больше, чем выше частота и скорость двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невелев Л. И., Эпштейн И. И. Анализ коммутационных процессов в инверторе преобразователя частоты по схеме вентильного двигателя. — Электротехника, 1982, № 4.
2. Овчинников И. Е. Теория вентильных электрических двигателей. — Л.: Наука, 1985.

[19.03.91]

Соотношения параметров и некоторые закономерности в электродинамике

ПАНАСЕНКОВ М. А., канд. техн. наук

Ниже речь пойдет о соотношении электрических и магнитных проницаемостей, соответствующих им удельных проводимостей, об энергетических и других закономерностях в электродинамике. Целью данной статьи является популяризация симметричной системы уравнений электромагнитного поля (ЭМП), разработанной в 1913 г. выдающимся русским ученым В. К. Аркадьевым [1, с. 19]. В случае синусоидальных процессов в однородных и изотропных средах эти уравнения на современном этапе могут быть записаны так:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H}_t = \varepsilon_1 \Omega \mathbf{E}_t + \varepsilon_2 \frac{\partial \mathbf{E}_t}{\partial t}; \quad (1)$$

$$-\operatorname{rot} \mathbf{E}_t = \mu_1 \Omega \mathbf{H}_t + \mu_2 \frac{\partial \mathbf{H}_t}{\partial t} \quad (2)$$

или в комплексном представлении после сокращения на $e^{-i\Omega t}$:

$$\operatorname{rot} \mathbf{\dot{H}} = \varepsilon_1 \Omega \mathbf{\dot{E}} - i\varepsilon_2 \Omega \mathbf{\dot{E}} = \tilde{\gamma}_3 \mathbf{\dot{E}}; \quad (3)$$

$$-\operatorname{rot} \mathbf{\dot{E}} = \mu_1 \Omega \mathbf{\dot{H}} - i\mu_2 \Omega \mathbf{\dot{H}} = \tilde{\eta}_3 \mathbf{\dot{H}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{\dot{E}}$ и $\mathbf{\dot{H}}$ — комплексные векторы напряженностей электрического и магнитного полей (вихря ЭМП); Ω — угловая скорость их вращения. Поскольку ЭМП распространяется в пространстве со скоростью света в вакууме c , то согласно гипотезе Максвелла о молекулярных вихрях под Ω надо понимать световую угловую скорость $\Omega = c/a$, где a — радиус вихря ЭМП.

Так как взаимно перпендикулярные векторы $\mathbf{\dot{E}}$ и $\mathbf{\dot{H}}$ колеблются в одной фазе [2, с. 297], то из равенства энергий $\tilde{\varepsilon}_3 \mathbf{\dot{E}}^2 = \tilde{\mu}_3 \mathbf{\dot{H}}^2$ и волнового сопротивления $z_v = \mathbf{E}/\mathbf{H} = (\tilde{\mu}_3/\tilde{\varepsilon}_3)^{1/2}$ следует, что должны быть равны и аргументы комплексных эквивалентных проницаемостей $\tilde{\varepsilon}_3 = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ и $\tilde{\mu}_3 = \mu_1 - i\mu_2$, т. е. $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta$. Согласно опытам $\vartheta = 29^\circ 40' \approx 30^\circ$ [3, с. 105]. При этом проницаемости и соответствующие им комплексы удельных эквивалентных проводимостей запишутся так:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_3 &= \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = \varepsilon_3 e^{-i\vartheta} = \varepsilon \varepsilon_0 e^{-i\vartheta}; \\ \tilde{\mu}_3 &= \mu_1 - i\mu_2 = \mu_3 e^{-i\vartheta} = \mu \mu_0 e^{-i\vartheta}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\gamma}_3 &= \Omega \tilde{\varepsilon}_3 = \Omega \varepsilon_3 e^{-i\vartheta} = \gamma_3 e^{-i\vartheta} = \varepsilon \gamma_0 e^{-i\vartheta}; \\ \tilde{\eta}_3 &= \Omega \tilde{\mu}_3 = \Omega \mu_3 e^{-i\vartheta} = \eta_3 e^{-i\vartheta} = \mu \eta_0 e^{-i\vartheta}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где ε и μ — относительные электрическая и магнитная проницаемости среды; ε_0 и μ_0 — электрическая и магнитная проницаемости вакуума; $\gamma_0 = \varepsilon_0 \Omega$ и $\eta_0 = \mu_0 \Omega$ — электрическая и магнитная удельные проводимости вакуума. Из равенств (5) и (6) находим следующие соотношения параметров:

$$\varepsilon_2/\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \Omega/\gamma_{31} = \mu_2/\mu_1 = \mu_2 \Omega/\eta_{31} = \operatorname{tg} \vartheta = \operatorname{const}. \quad (7)$$

Проводимости $\gamma_{31} = \varepsilon_1 \Omega$ и $\eta_{31} = \mu_1 \Omega$ известны из опытов. Отсюда при известной угловой скорости Ω получаем проницаемости ε_1 и μ_1 , определяющие активную мощность, а по (7) при $\vartheta = 30^\circ$ (см. ниже) находим проницаемости ε_2 и μ_2 , определяющие реактивную мощность.

Полнота симметричных уравнений (3) и (4) раскрывается теоремой Пойнтинга — Хевисайда, которая согласно векторному анализу [4, с. 609] при сопряженном комплексе в (3) и сопряженном векторе $\mathbf{H}$ выражается так:

$$-\operatorname{div}(\mathbf{\dot{E}} \times \mathbf{H}^*) = \mathbf{\dot{E}} \operatorname{rot} \mathbf{H}^* - \mathbf{H}^* \operatorname{rot} \mathbf{\dot{E}} = E^2 \gamma_3 e^{i\vartheta} + H^2 \eta_3 e^{-i\vartheta} = p_a + ip_r, \quad (8)$$

где p_a и p_r — объемные плотности активной и реактивной мощностей;

$$p_a = (E^2 \gamma_3 + H^2 \eta_3) \cos \vartheta; \quad (9)$$

$$p_r = (E^2 \gamma_3 - H^2 \eta_3) \sin \vartheta. \quad (10)$$

Только при $\vartheta = 30^\circ$ из (10) следует известное равенство электрической и магнитной энергий [4, с. 476]:

$$w_3 = \varepsilon_3 E^2/2 = \mu_3 H^2/2 = w_m. \quad (11)$$

Однако реактивная мощность $p_r = 0$ при любом значении угла ϑ . Это значит, что для реактивной мощности и, следовательно, для реактивной энергии ЭМП любая среда является прозрачной, что объясняется симметрией уравнений ЭМП. Правильность формулы (9) для потерь мощности, как и аргумента $\vartheta = 30^\circ$, проверена многочисленными экспериментами [3, с. 86, 61].

Равенства (9) и (10) позволяют выявить ряд физических закономерностей и связанных с ними параметров. Например, из (10) при $p_r = 0$ следует известное выражение для волнового сопротивления:

$$z_v = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\eta_3}{\gamma_3}} = \frac{1}{\gamma_3 \Delta} = \eta_3 \Delta, \quad (12)$$

где Δ — эквивалентная глубина (ЭГ) проникновения ЭМП в проводящую среду;

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\gamma_3 \eta_3}} = \frac{1}{\Omega \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\Omega n_a} = \frac{a}{n_a}; \quad (13)$$

n_a — оптический показатель преломления среды на границе проводник — вакуум. В вакууме $n_a = 1$, при этом ЭГ $\Delta = a$. Из (13) следует, что Δ и n_a изменяются с Ω , но их произведение постоянно: $\Omega \Delta n_a = \Omega_k \Delta_k n_k = c$. Поэтому согласно (12) равенство (9) можно представить в следующем виде:

$$p = \frac{p_a}{\cos \vartheta} = E^2 \gamma_3 \left(1 + \frac{H^2 \eta_3}{E^2 \gamma_3} \right) = p_{\text{эл}} (1 + \gamma_3 \eta_3 \Delta^2), \quad (14)$$

откуда при $\gamma_3 \eta_3 \Delta^2 = \Omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 n_k^2 \Delta_k^2$ находим зависимость удельной электрической мощности и удельной электрической энергии от циклической световой частоты $\Omega = 2\pi\nu_c$:

$$p_{эл} = \frac{p}{1 + \gamma_3 \eta_3 \Delta^2} = \frac{L\Omega^2}{1 + \Omega^2/\Omega_k^2}; \quad (15)$$

$$\omega_{эл} = \frac{L\Omega}{1 + \gamma_3 \eta_3 \Delta^2} = \frac{\omega_{эм} \Omega/\Omega_k}{1 + \Omega^2/\Omega_k^2}, \quad (16)$$

где $L = p/\Omega^2 = \text{const}$ — момент импульса ЭМП; $\omega_{эм} = L\Omega_k$ — полная энергия ЭМП, состоящая из электрической и равной ей магнитной энергий; критическая угловая скорость, при которой $\omega_{эл} = \omega_{эм}/2$,

$$\Omega_k = \frac{1}{\Delta_k \sqrt{\varepsilon_3 \mu_3}} = \frac{c}{n_k \Delta_k} = \frac{c}{r_k}, \quad (17)$$

где $r_k = n_k \Delta_k$ — критический радиус (критическая ЭГ), при котором электрическая энергия равна магнитной энергии.

Из (15) видно, что при $\Omega \ll \Omega_k$ электрическая мощность изменяется пропорционально частоте в квадрате, что находится в полном согласии с известными экспериментами [1, с. 78].

Дальнейшие поиски физических закономерностей связаны с дисперсией света, при которой фазовая скорость света v в среде зависит от его частоты ν_c . Так как $v = c/n_n$, то показатель преломления среды n_n , зависящий от частоты, условимся называть переменным показателем преломления, характеризующим собой, как будет видно, нормальную и аномальную дисперсию света [2, с. 339]. При этом из (16) следует энергетическая закономерность, связывающая собой электрическую энергию с кинетической или гравитационной энергией:

$$\omega_{эл} = \frac{\omega_{эм}}{\Omega/\Omega_k + \Omega_k/\Omega} = \frac{\omega_{эм}}{2n_n^2} = \frac{\omega_{эм} c^2}{c^2 2n_n^2} = \frac{m_{эм} v^2}{2}, \quad (18)$$

где $m_{эм}$ и v — соответственно электромагнитная масса и фазовая скорость света (ЭМП) в среде [2, с. 339];

$$m_{эм} = \frac{\omega_{эм}}{c^2} = \frac{L\Omega_k}{c^2} = \frac{L}{cr_k}, \quad (19)$$

$$v = \frac{c}{n_n} = \frac{c}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\Omega}{\Omega_k} + \frac{\Omega_k}{\Omega} \right)}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{r_k}{a} + \frac{a}{r_k} \right)}} = \frac{c}{\sqrt{1 + \kappa^2}}. \quad (20)$$

Безразмерный параметр κ определяется так:

$$\kappa = \frac{\Omega_k}{\Omega} = \frac{\nu_k}{\nu_c} = \frac{\lambda_c}{\lambda_k} = \frac{T_c}{T_k} = \frac{a}{r_k}, \quad (21)$$

где $\lambda_c = c/\nu_c$ и $T_c = 1/\nu_c$ — световая длина волны и соответствующий период обращения.

Из (20) следует, что при $\Omega \gg \Omega_k$ составляющей Ω_k/Ω можно пренебречь. При этом показатель n_n с ростом Ω увеличивается, что соответствует нормальной дисперсии света. При $\Omega \ll \Omega_k$ составляющей Ω/Ω_k также можно пренебречь. В этом случае показатель n_n с ростом Ω уменьшается. Это соответствует аномальной дисперсии света (ЭМП).

В отличие от световой угловой скорости $\Omega = c/a$ ЭМП фазовой скорости (20) соответствует механическая угловая скорость $\omega = v/a$ — скорость гравитационного поля (ГП) или движущегося объекта:

$$\omega = \frac{v}{a} = \frac{\Omega}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\Omega}{\Omega_k} + \frac{\Omega_k}{\Omega} \right)}} =$$

$$= \frac{\Omega_k}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{a}{r_k} + \frac{r_k}{a} \right)}} = \frac{\Omega_k}{\sqrt{\frac{1}{2} (\kappa + \kappa^3)}}, \quad (22)$$

откуда находим период обращения $T = 2\pi/\omega = 1/\nu$ ГП:

$$T^2 = \frac{T_k^2}{2} \left(\frac{a}{r_k} + \frac{r_k}{a} \right) = \frac{T_k^2}{2} (\kappa + \kappa^3). \quad (23)$$

Скоростная закономерность (20) позволяет определить ряд других физических закономерностей. Однако здесь ограничимся лишь еще одной массовой закономерностью. Из фундаментального закона, связывающего массу со скоростью света (19), следует другой фундаментальный закон — сохранения момента импульса:

$$L = m_{эм} cr_k = mva = \text{const}, \quad (24)$$

откуда согласно (20) следует закон изменения массы с изменением ν_c или a :

$$m = \frac{L}{va} = \frac{L}{cr_k} \sqrt{\frac{1 + \kappa^2}{2\kappa^3}} = m_k \sqrt{\frac{1 + \kappa^2}{2\kappa^3}}, \quad (25)$$

где $m_k = L/cr_k$ — критическая масса, соответствующая критическому радиусу $r_k = c/\Omega_k$. Для атомных систем момент импульса L равен постоянной Планка $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. При этом масса $m_k = m_n = 274m_e$, где $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона; $m_n = 2,49 \cdot 10^{-28}$ кг — масса пиона. Скоростные и массовая закономерности в относительных единицах представлены на рисунке, где критическая область представляет собой область неизведанного, область больших масс и высоких энергий. Эта область ни в микро-, ни в макром мире не исследована. Далее необходимо определить критический радиус r_k и его физический смысл.

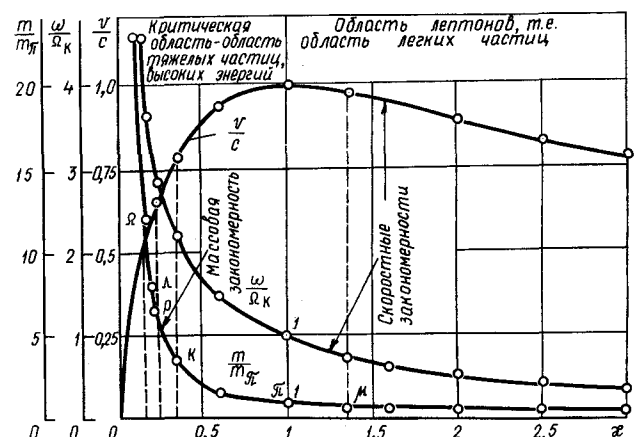
Из скоростной закономерности (20) следует планетарная закономерность:

$$av^2 = C_n \frac{\kappa^2}{1 + \kappa^2}, \quad (26)$$

откуда при $\kappa \gg 1$ находим планетарную постоянную:

$$C_n = 2r_k c^2 = av^2 = 1,327 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2, \quad (27)$$

где радиус орбиты Земли $a = 1,496 \cdot 10^{11}$ м; $v = 2,978 \times 10^4$ м/с — ее орбитальная скорость [5, с. 514 и 82]. Заметим, что произведение av^2 для всех планет одинаково. Согласно (27) радиус $r_k = C_n/2c^2 = 738$ м. Критерием его справедливости при массе Солнца $m_n = 1,99 \times 10^{30}$ кг служит гравитационная постоянная $G = C_n/m_n = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$, справедливая лишь для макроскопических систем. Из предыдущего соот-



Релятивистские закономерности: v/c , ω/Ω_k — скоростные и m/m_k — массовая ($\omega_k = 2,13 \cdot 10^{23}$ рад/с; $\kappa = a/r_k$, $r_k = 1,41 \times 10^{-15}$ м)

ношения следует константа $C_{\text{макр}} = 2c^2/G = 2,7 \times 10^{27}$ кг/м, справедливая для всех макроскопических планетарных систем (ПС). При этом критический радиус

$$r_k = m_u / C_{\text{макр}} = m_u / 2,7 \cdot 10^{27}. \quad (28)$$

Здесь m_u — центральная масса любой макроскопической ПС. Таков физический смысл критического радиуса, при котором скорость (20) максимальна.

Таким же образом определяется r_k и для атомных систем. В атоме водорода при первом боровском радиусе и соответствующей ему скорости планетарная постоянная $C_n = av^2 = 5,29 \cdot 10^{-11} (2,188 \cdot 10^6)^2 = 253,5 \text{ м}^3/\text{с}^2$. При этом для атома водорода при массе протона $m_u = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг находим гравитационную постоянную $G = C_n / m_u = 1,515 \cdot 10^{29} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$, микроконстанту $C_{\text{микро}} = 2 c^2 / G = 1,186 \cdot 10^{-12} \text{ кг/м}$ и критический радиус $r_k = m_u / C_{\text{микро}} = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, что совпадает с радиусом действия ядерных сил [6, с. 397].

Рассмотрим примеры, подтверждающие достоверность полученных здесь закономерностей. Астрономическими наблюдениями установлено, что все звезды вместе с Солнцем вращаются вокруг центра Галактики. «Это вращение имеет следующие особенности» [5, с. 456]:

1. «Линейная скорость вращения сначала возрастает по мере удаления от центра. Затем примерно на расстоянии Солнца она достигает наибольшего значения..., после чего очень медленно убывает». Этот экспериментальный факт полностью согласуется с зависимостью v от a , приведенной на рисунке.

2. «Угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра. Однако это убывание несколько медленнее, чем если бы вращение звезд вокруг центра Галактики происходило по законам Кеплера». Из (22) и (23) видно, что если в этих формулах пренебречь значением κ по сравнению с κ^3 , то ω и T изменятся точно в соответствии с третьим законом Кеплера. Однако при $\kappa^3 \ll \kappa$, величины ω и T изменяются медленнее, чем по закону Кеплера. Это следует также из планетарной закономерности (26), которую можно представить так:

$$a^3/T^2 = C_n / (4\pi^2) \frac{\kappa^2}{1+\kappa^2}, \quad (29)$$

откуда видно, что при малых значениях κ , когда в знаменателе нельзя пренебречь единицей, эта закономерность изменяется с изменением κ . Но при $\kappa \gg 1$ из (29) следует третий закон Кеплера: $a_1^3/T_1^2 = a_2^3/T_2^2 = a_n^3/T_n^2$.

Другим доказательством достоверности скоростной закономерности может быть сравнение скорости v , рассчитанной по (20) при $r_k = 738 \text{ м}$, со скоростью $v_{\text{оп}}$,

Орбитальные скорости планет, рассчитанные по теоретической скоростной закономерности (20) при $r_k = 738 \text{ м}$ и по экспериментальной формуле при периоде T

Планета	$a \cdot 10^9 \text{ м}$	$v_{\text{опыт}} \times 10^3 \text{ м/с}$	$v_{\text{теор}} \times 10^3 \text{ м/с}$	$T \cdot 10^6 \text{ с}$
Меркурий	57,910	47,8	48,0	7,6
Венера	108,21	34,9	35,0	19,4
Земля	149,60	29,73	29,78	31,6
Марс	227,94	24,1	24,1	49,4
Юпитер	778,34	13,05	13,1	374
Сатурн	1427,2	9,65	9,65	930
Уран	2869,3	6,80	6,82	2660
Нептун	4498,5	5,43	5,43	5200
Плутон	5900,0	4,73	4,74	7830

Примечания: $v_{\text{теор}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{r_k}{a} + \frac{a}{r_k} \right)}}$; $v_{\text{опыт}} = 2\pi a / T$.

рассчитанной по сидерическому периоду обращения планет и радиусу орбиты, равному большой полуоси эллипса [5, с. 514]. В таблице проведено такое сравнение, из которого видно, что теоретическое и опытное значение скоростей практически совпадают.

Ради полноты рассматриваемой здесь задачи следует отметить, что полученные закономерности описывают и микромир. Например, из (25) при $\kappa = 1$ находим массу, равную массе пиона $m_k = m_\pi = 274 m_e$, а при первом боровском радиусе $a = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ($\kappa = 37500$) получаем массу, равную массе электрона. Таким образом, массовая закономерность (25) позволяет определить полный спектр известных и предсказываемых этой закономерностью масс микрочастиц со всеми их параметрами (радиусом, скоростью, энергией, частотой и периодом вращения). Под действием световой частоты ν_c частица трансформируется в другую частицу, с другими взаимосогласованными параметрами, создавая предпосылку к теории образования микрочастиц.

В заключение важно рассмотреть равенство, следующее из (13) и (22):

$$a = c / \Omega = v / \omega = 1 / \sqrt{\gamma_0 \eta_0}. \quad (30)$$

Его значимость состоит в том, что на одном и том же расстоянии от центра ПС происходят два взаимосвязанных между собой процесса. С одной стороны, происходит вращение с угловой скоростью Ω ЭМП вокруг центра ПС; с другой стороны, происходит вращение с угловой скоростью ω ГП в том же направлении. Так как $\Omega > \omega$, то планеты, находящиеся в ГП, движутся (катятся) за ЭМП подобно ротору в асинхронных двигателях с катящимся ротором, что находит отражение в энергетической (18) и в скоростных (20) и (22) закономерностях. При этом зависимость электромагнитной энергии от частоты можно рассматривать как зависимость вращающего момента от частоты в асинхронных двигателях, для которых скольжение s определяется так:

$$s = (\Omega - \omega) / \Omega = 1 - \omega / \Omega. \quad (31)$$

В этой аналогии Ω — угловая скорость ЭМП, создаваемого обмоткой статора, ω — угловая скорость ротора (планеты). Эта аналогия особенно характерна для микромира, где электрон, вырванный из атомной оболочки электромагнитным полем ядра, ускоряется этим полем согласно (22) до $\omega = \omega_k = \Omega_k$ и массы, равной согласно (25) массе пиона, при которой согласно гипотезе Х. Юкавы происходит ядерное взаимодействие.

Выводы. Решение симметричной системы уравнений ЭМП привело к выявлению ряда физических закономерностей, применимых как к микро-, так и к макросистемам, в том числе к электротехнике и электрическим машинам переменного тока. Дано объяснение физическим параметрам; показано, что гравитационная постоянная в атомах в $2,27 \cdot 10^{39}$ раза больше ньютоновской гравитационной постоянной, справедливой лишь только для макромира. Таким образом, гравитационные взаимодействия не самые слабые; в атомах они равны электромагнитным и сильным взаимодействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. — М.: Л.: ОНТИ, 1936.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1985.
3. Панасенков М. А. Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами (монография). — М.: Энергия, 1971.
4. Тамм Е. И. Основы теории электричества. — М.: Л.: ГИТЛ, 1949.
5. Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1970.
6. Вихман Э. Квантовая физика. — М.: Наука, 1974.

[24.02.86]

Соотношения параметров и некоторые закономерности в электродинамике

(статья М. А. Панасенкова, «Электричество», 1991, № 8)

АБРАМКИН Ю. В., канд. техн. наук

В рецензируемой статье преследуется цель популяризации предложенной в 1913 г. В. К. Аркадьевым симметричной системы уравнений электромагнитного поля (ЭМП), к которой при определенных допущениях (см. приложение) сводится общеизвестная система уравнений ЭМП Максвелла.

Судя по содержанию статьи, ее автор не сумел добиться поставленной цели. Такой вывод подтверждается тем, что в основу последующих выводов автор рецензируемой статьи положил свою явно ошибочную систему уравнений ЭМП (1) и (2), необоснованно полагая ее адекватной симметричной системе уравнений ЭМП В. К. Аркадьева (см. приложение). Еще один существенный недостаток рецензируемой работы связан с отсутствием в ней конкретных зависимостей (хотя бы с точностью до постоянных интегрирования) для векторных функций напряженностей электрического и магнитного полей: $\vec{E}(x, y, z, t)$ и $\vec{H}(x, y, z, t)$. Вместе с тем автор приводит в статье ряд соотношений, например для волнового сопротивления (12); дивергенции вектора Пойнтинга (8) и др., происхождение которых нельзя признать физически обоснованным без указания упомянутых выше зависимостей для напряженностей $\vec{E}(x, y, z, t)$ и $\vec{H}(x, y, z, t)$.

Наконец, в процессе анализа ошибочной системы уравнений (1) и (2) [а также вытекающей из нее системы уравнений (3) и (4)] и установления на его основе отдельных закономерностей в электродинамике, специфических соотношений в макро- и микромирах автор опирается на другие ошибочные закономерности и соотношения, приведенные в его ранее опубликованных работах и подвергнутые детальному критическому анализу в сообщении А. В. Иванова-Смоленского (см. «Изв. вузов. Электромеханика», 1973, № 4, с. 457—458).

Приложение. Автор рецензируемой статьи предлагает следующую систему дифференциальных уравнений (с учетом принятых в статье символических обозначений):

$$\text{rot } \vec{H}_t = \varepsilon_1 \Omega \vec{E}_t + \varepsilon_2 \frac{\partial \vec{E}_t}{\partial t}; \quad (1)$$

$$-\text{rot } \vec{E}_t = \mu_1 \Omega \vec{H}_t + \mu_2 \frac{\partial \vec{H}_t}{\partial t}, \quad (2)$$

или в комплексной форме:

$$\text{rot } \vec{H} = \varepsilon_1 \Omega \vec{E} - i\varepsilon_2 \Omega \vec{E} = \tilde{\varepsilon}_3 \vec{E}; \quad (3)$$

$$-\text{rot } \vec{E} = \mu_1 \Omega \vec{H} - i\mu_2 \Omega \vec{H} = \tilde{\mu}_3 \vec{H}, \quad (4)$$

где $\Omega = c/a$, c — скорость света в вакууме; a — введенный автором рецензируемой статьи так называемый радиус вихря ЭМП (в теории ЭМП со времен Максвелла и до настоящего времени это понятие не встречалось); $\varepsilon_1 = \text{Re } \varepsilon_3$; $\varepsilon_2 = -\text{Im } \varepsilon_3$; $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$; $\mu_1 = \text{Re } \mu_3$; $\mu_2 = -\text{Im } \mu_3$; $\mu_3 = \mu_1 - i\mu_2$.

Нетрудно убедиться в том, что уравнения (1) и (2) не адекватны соответствующим уравнениям ЭМП В. К. Аркадьева, которые в зависимости от применяемой системы единиц могут представлены в следующем виде:

1) при применении гауссовой системы единиц

$$\text{rot } \vec{H} = (4\pi/c)\sigma \vec{E} + (\varepsilon/c) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad (a)$$

$$-\text{rot } \vec{E} = (4\pi/c)\rho \vec{H} + (\mu/c) \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad (б)$$

2) при применении международной системы единиц (СИ)

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad (A)$$

$$-\text{rot } \vec{E} = \rho \vec{H} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (Б)$$

(и были впервые предложены В. К. Аркадьевым при описании электромагнитных процессов в однородной и изотропной среде, диэлектрические и магнитные свойства которой характеризуются следующими четырьмя постоянными, не зависящими от самого ЭМП параметрами: σ , ε , μ , ρ).

Здесь и далее обозначения сохранены такими, какие были приняты В. К. Аркадьевым в опубликованных им работах [1—2]. При этом физическое содержание величин σ , ε , μ , ρ либо очевидно, либо может быть установлено путем анализа простых, приводимых ниже определений: ε — диэлектрическая проницаемость при отсутствии запаздывания электрической индукции от напряженности электрического поля; σ — удельная электрическая проводимость; ρ — введенная В. К. Аркадьевым специфическая удельная магнитная проводимость для так называемого магнитного тока смещения (см. далее), связанная с так называемой консумптивной магнитной проницаемостью ρ' и круговой частотой $\omega = 2\pi f = 2\pi(1/T)$ простым соотношением $\rho = \rho'\omega$, обоснование которого будет приведено далее; μ — консервативная магнитная проницаемость; μ_m — амплитудная магнитная проницаемость; β — угол, определяющий отставание вектора магнитной индукции от вектора напряженности магнитного поля вследствие магнитной вязкости [от этого параметра во многом зависит и форма эллипсоидальной кривой намагничивания $B(H)$]; $\tilde{\mu}$ — комплексная магнитная проницаемость, связанная с указанными выше параметрами μ , ρ' , μ_m , β очевидным соотношением

$$\tilde{\mu} = \mu - i\rho' = \mu_m e^{-i\beta} = \mu_m \cos \beta - i\mu_m \sin \beta.$$

Рассмотрим теперь сам процесс преобразования исходной системы уравнений ЭМП Максвелла (A) и (Б) к симметричной системе уравнений В. К. Аркадьева при условии

$$\varepsilon = \text{const} \neq f(\vec{E}); \quad \varepsilon \neq f_3(x, y, z);$$

$$\tilde{\mu} = \mu - i\rho' = \text{const} \neq f_2(\vec{H}); \quad \tilde{\mu} \neq f_4(x, y, z)$$

и заданной зависимости изменения во времени векторной функции напряженности магнитного поля

$$\vec{H}(t) = \vec{H}_m \cos(\omega t + \varphi_n) = \text{Re} \{ \vec{H}_m e^{i\omega t} \},$$

где φ — начальная фаза; $\dot{\vec{H}}_m = \vec{H}_m e^{i\varphi_n}$.

С учетом запаздывания магнитной индукции (из-за гистерезиса) от напряженности общее выражение для векторной функции магнитной индукции в зависимости от времени может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \vec{B}(t) &= \vec{B}_m \cos(\omega t + \varphi_n - \beta) = \mu_m \vec{H}_m \cos(\omega t + \varphi_n - \beta) = \\ &= \text{Re} \{ \mu_m \dot{\vec{H}}_m e^{i(\omega t - \beta)} \} = \text{Re} \{ (\mu_m e^{-i\beta}) \dot{\vec{H}}_m e^{i\omega t} \} = \text{Re} \{ \tilde{\mu} \dot{\vec{H}}_m e^{i\omega t} \} = \\ &= (\mu_m \cos \beta) \vec{H}_m \cos(\omega t + \varphi_n) + (\mu_m \sin \beta) \vec{H}_m \sin(\omega t + \varphi_n) = \\ &= \mu \vec{H}_m \cos(\omega t + \varphi_n) + \rho' \vec{H}_m \sin(\omega t + \varphi_n), \end{aligned}$$

откуда следует искомое общее выражение для так называемой объемной плотности тока магнитного смещения

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (по аналогии с объемной плотностью тока электрического смещения $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$):

$$\vec{J}_m = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \rho' \omega \vec{H} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \rho \vec{H}.$$

Анализ последнего уравнения позволяет выявить физический смысл введенного В. К. Аркадьевым коэффициента $\rho = \rho' \omega$, получившего название удельной магнитной проводимости (по аналогии с удельной электрической проводимостью σ): этот коэффициент учитывает обусловленное гистерезисом так называемое магнитное последствие, проявляющееся в том, что скорость изменения магнитной индукции $\partial \vec{B} / \partial t$ или, по В. К. Аркадьеву, объемная плотность тока магнитного смещения ($\vec{J}_m$) оказывается отличной от нуля в тот момент времени, когда напряженность магнитного поля достигает своего максимального значения (экстремального), а производная $\partial \vec{H} / \partial t$ обращается в нуль. В тот же момент времени вихрь

$$-\text{rot } \vec{E} = \rho \vec{H} \neq 0.$$

Таким образом, действительно, второе уравнение Максвелла при принятых выше ограничениях на исследуемое ЭМП, преобразуется к виду

$$-\text{rot } \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \rho \vec{H},$$

вполне симметричному (с точностью до знака) первому уравнению Максвелла. При этом, однако, следует иметь в виду, что за внешней симметрией уравнений Аркадьева вскрывается глубоко своеобразное физическое содержание коэффициентов σ и ρ .

При эллипсоидальной кривой поляризации диэлектрика $\vec{P}(\vec{E})$ под коэффициентом σ в уравнении Максвелла (А) следует понимать сумму «истинной удельной электрической проводимости» σ' и так называемой удельной электрической проводимости поляризации σ'' , т. е. $\sigma = \sigma' + \sigma''$. При этом $\sigma'' = g\omega$, где $g = -I_m \epsilon$ — так называемая консумптивная диэлектрическая проницаемость; $\epsilon = \epsilon - ig$ — комплексная диэлектрическая проницаемость; ϵ — консервативная диэлектрическая проницаемость.

В то же время «истинной удельной магнитной проводимости» (аналога удельной электрической проводимости σ') в природе не существует и введенная В. К. Аркадьевым удельная магнитная проводимость ρ есть не что иное как магнитная проводимость поляризации и возникает только в ферромагнитных телах, в которых кривая намагничивания $B(H)$ либо имеет форму эллипса, либо может быть условно заменена эллипсоидальной кривой намагничивания. При отсутствии гистерезиса коэффициент ρ , разумеется, следует принять равным нулю.

Естественно, что симметричная система уравнений Максвелла, записанная для мгновенных значений физических величин $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{D}$, $\vec{B}$ (с учетом упомянутых выше ограничений, наложенных на ЭМП) может быть представлена также и в комплексной форме:

$$i\omega \epsilon \vec{E} + \sigma \vec{E} = \text{rot } \vec{H}; \quad (\text{А})$$

$$i\omega \mu \vec{H} + \rho \vec{H} = -\text{rot } \vec{E} \quad (\text{Б})$$

или, учитывая приведенные выше соотношения ($\rho = \rho' \omega$; $\mu = \mu - i\rho'$)

$$i\omega \epsilon \vec{E} + \sigma \vec{E} = \text{rot } \vec{H};$$

$$i\omega \mu \vec{H} = -\text{rot } \vec{E},$$

где первое уравнение в том случае, если диэлектрические свойства среды характеризуются диэлектрической комплексной проницаемостью

$$\epsilon = \epsilon - i\epsilon',$$

может быть последовательно преобразовано следующим образом:

$$(i\omega \epsilon + \sigma) \vec{E} = \text{rot } \vec{H},$$

или

$$i\omega \left(\epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = \text{rot } \vec{H},$$

или

$$i\omega \tilde{\epsilon} \vec{E} = \text{rot } \vec{H},$$

где $\tilde{\epsilon} = \epsilon - i(\sigma/\omega + \epsilon')$.

В итоге получаем симметричную систему уравнений Максвелла в комплексной форме:

$$\text{rot } \vec{H} = i\omega \tilde{\epsilon} \vec{E}; \quad (\text{A1})$$

$$-\text{rot } \vec{E} = i\omega \mu \vec{H}, \quad (\text{B1})$$

которая сводится к любому из двух, приводимых ниже, волновых однородных уравнений (называемых уравнениями Гельмгольца) относительно векторных функций напряженностей электрического ($\vec{E}$) и магнитного ($\vec{H}$) полей:

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0; \quad (\text{C})$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (\text{D})$$

где $k^2 = \omega^2 \tilde{\epsilon} \mu$ — так называемое волновое число.

Однородные волновые уравнения Гельмгольца (С) и (D) подробно исследованы во многих руководствах по теории ЭМП и, в частности, в учебном пособии [3].

Сопоставление системы уравнений В. К. Аркадьева (А) и (Б) [или (а) и (б)] с предложенными в рецензируемой статье системами (1) и (2) и их комплексных аналогов позволяет сделать вполне однозначный вывод о том, что рекомендуемая автором обсуждаемой статьи система уравнений (1) и (2) явно противоречит системе уравнений В. К. Аркадьева (А) и (Б) и адекватным им (в комплексной форме) уравнениям (A1) и (B1). В частности, описываемые последними электромагнитные процессы определяются физически очевидным параметром: круговой частотой $\omega = 2\pi f$, в то время как в уравнениях (1) и (2) этот параметр оказывается необоснованно замененным не имеющим физического смысла параметром Ω .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. Электромагнитное поле. — М.—Л.: ОНТИ НКТП, 1936. — 304 с.

2. Arkadiew W. Berechnung der Permeabilität und der Verluste in Ferromagnetischen Blechen bei beliebiger Frequenz. — Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, 1933, Bd 3, H. 1.

3. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. — М.: Госэнергиздат, 1961. — 372 с.

В этой статье автор — М. А. Панасенков дает свое толкование некоторых электродинамических соотношений. Имеющиеся в работе неточности и ошибки заставляют выступить с критическими замечаниями.

1. *Симметричная форма записи уравнений Максвелла.* Известная монография В. К. Аркадьева [1] была первой книгой, в которой вводилось понятие комплексной магнитной проницаемости μ . Поэтому В. К. Аркадьев уделит особое внимание доказательству того, что именно мнимая (консумптивная) составляющая ρ' ($\mu = \mu - j\rho'$) определяет магнитные потери в веществе. Одним из способов такого доказательства является запись уравнений Максвелла в таком виде, что ρ' занимает в одном уравнении то же место, что электрическая проводимость σ в другом. Повторим вывод В. К. Аркадьева, пользуясь современной методикой и обозначениями (замечу, что в [1] вводятся понятия комплексных проницаемостей $\underline{\epsilon} = \epsilon_1 - j\epsilon_2$, $\underline{\mu} = \mu_1 - j\mu_2$, но не применяются комплексные представления синусоидально изменяющихся компонент векторов электромагнитного поля). Запишем уравнения Максвелла в комплексной форме для комплексных векторов поля. Комплексный вектор изображает пространственный вектор, каждая составляющая которого изменяется во времени по синусоидальному закону со своей амплитудой и фазой и угловой частотой ω :

$$\text{rot } \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}} + j\omega \dot{\mathbf{D}}; \quad (1)$$

$$\text{rot } \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{B}}. \quad (2)$$

Уравнения связи между векторами для линейной изотропной среды:

$$\dot{\mathbf{J}} = \sigma \dot{\mathbf{E}}, \quad \dot{\mathbf{D}} = \epsilon_0 \underline{\epsilon} \dot{\mathbf{E}}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \mu_0 \underline{\mu} \dot{\mathbf{H}}. \quad (3)$$

Подставляя их в (1) и (2) получаем:

$$\text{rot } \dot{\mathbf{H}} = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_2) \dot{\mathbf{E}} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_1 \dot{\mathbf{E}}; \quad (4)$$

$$-\text{rot } \dot{\mathbf{E}} = \omega \mu_0 \mu_2 \dot{\mathbf{H}} + j\omega \mu_0 \mu_1 \dot{\mathbf{H}}. \quad (5)$$

Возвращаясь к уравнениям для мгновенных значений, получаем:

$$\text{rot } \mathbf{H} = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_2) \mathbf{E} + \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}; \quad (6)$$

$$-\text{rot } \mathbf{E} = \omega \mu_0 \mu_2 \mathbf{H} + \mu_0 \mu_1 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (7)$$

В. К. Аркадьев записывает эти уравнения так:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\epsilon}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}; \quad (8)$$

$$-\text{rot } \mathbf{E} = \rho \mathbf{H} + \frac{\mu}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (9)$$

т. е. по Аркадьеву: $\epsilon_0 = \mu_0 = 1/4\pi$, $\epsilon_2 = 0$, $\rho = \mu_2/2T$, где T — период колебаний.

Замечу, что запись уравнений в статье М. А. Панасенкова отличается от (6) и (7), во-первых, отсутствием σ , во-вторых, неправильными индексами у компонент $\underline{\epsilon}$ и $\underline{\mu}$ и, в-третьих, непонятным термином: « Ω — угловая скорость их (векторов поля. — Я. К.) вращения. ... $\Omega = c/a$, где a — радиус вихря ЭМП.»?!

2. *Теорема Пойнтинга и движение энергии.* Из (4) и (5) обычным путем [2] получим выражение для дивергенции вектора Пойнтинга:

$$\text{div } \mathbf{P} = -\text{div } (\dot{\mathbf{E}} \times \dot{\mathbf{H}}) = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_2) E^2 + \omega \mu_0 \mu_2 H^2 + j\omega (\mu_0 \mu_1 H^2 - \epsilon_0 \epsilon_1 E^2). \quad (10)$$

В (10) первые два слагаемых в правой части равенства определяют потери, а третье — изменение энер-

гии электромагнитного поля. Таким образом тепловые потери в среде определяются σ , ϵ_2 и μ_2 .

Из (4) и (5) получим уравнение распространения для $\dot{\mathbf{H}}$:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{H}} = \gamma^2 \dot{\mathbf{H}}, \quad (11)$$

где $\gamma = \alpha + j\beta$ — постоянная распространения;

$$\gamma^2 = -\frac{\omega^2}{c^2} [\mu_1 \epsilon_1 - \mu_2 (\epsilon_2 + \sigma/\omega \epsilon_0) + j(\mu_2 \epsilon_1 + \mu_1 \{\epsilon_2 + \sigma/\omega \epsilon_0\})]. \quad (12)$$

Подставив выражение для γ в (12) и решив комплексное уравнение, найдем следующие выражения для α и β :

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{|\mu| \cdot |\epsilon|}}{c} \sin \frac{\delta_\mu + \delta_\epsilon}{2}; \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\omega \sqrt{|\mu| \cdot |\epsilon|}}{c} \cos \frac{\delta_\mu + \delta_\epsilon}{2}, \quad (14)$$

где $\epsilon_3 = \epsilon_1 - j(\epsilon_2 + \sigma/\omega \epsilon_0)$ — эквивалентная комплексная диэлектрическая проницаемость; $|\mu|$ и $|\epsilon_3|$ — модули комплексных проницаемостей; δ_μ , δ_ϵ — их аргументы; $\text{tg } \delta_\mu = \mu_2/\mu_1$, $\text{tg } \delta_\epsilon = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_2)/\omega \epsilon_0 \epsilon_1$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Одно из решений (11) для плоской поперечной волны:

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{y}^0 H_0 e^{-\gamma z};$$

тогда

$$\dot{\mathbf{E}} = \frac{1}{\sigma_3} \text{rot } \dot{\mathbf{H}} = \mathbf{x}^0 \frac{\gamma}{\sigma_3} H_0 e^{-\gamma z},$$

где $\sigma_3 = \sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_2 + j\omega \epsilon_0 \epsilon_1$.

Таким образом для плоской поперечной электромагнитной волны имеем:

$$\dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{H}}_y = H_0 e^{-\gamma z}; \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{E}} = \dot{\mathbf{E}}_x = Z_c H_0 e^{-\gamma z}, \quad (16)$$

где $Z_c = \gamma/\sigma_3 = Z_c \sqrt{|\mu|/|\epsilon_3|} = z_c < \theta$; Z_c — комплексное характеристическое сопротивление среды; $Z_{c0} = 120 \pi$ Ом — характеристическое (волновое) сопротивление вакуума; $z_c = Z_c \sqrt{|\mu|/|\epsilon_3|}$, $\theta = (\delta_\mu - \delta_\epsilon)/2$ — модуль и аргумент характеристического сопротивления среды.

Мгновенные значения векторов электромагнитного поля:

$$H_y = H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z); \quad (17)$$

$$E_x = z_c H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t + \theta - \beta z). \quad (18)$$

При неравенстве углов δ_μ и δ_ϵ векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ сдвинуты по фазе (во времени) на угол θ .

Плотности объемных энергий магнитного и электрического полей:

$$W_m = \mu_0 \mu_1 H_0^2 e^{-2\alpha z} \sin^2(\omega t - \beta z); \quad (19)$$

$$W_e = \epsilon_0 \epsilon_1 z_c^2 H_0^2 e^{-2\alpha z} \sin^2(\omega t + \theta - \beta z). \quad (20)$$

Отношение максимальных значений этих плотностей:

$$\omega_{3 \max}/\omega_{m \max} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 z_c^2 E_{xm}^2}{\mu_0 \mu_1 H_{ym}^2} = \cos \delta_\epsilon / \cos \delta_\mu. \quad (21)$$

Максимальные значения плотностей энергий электрического и магнитного полей равны либо в среде без потерь ($\delta_\mu = \delta_\epsilon = 0$), либо при равенстве углов потерь δ_μ и δ_ϵ , но последнее практически не встречается. У диэлектриков $\mu = 1$, $\delta_\mu = 0$, а $\epsilon_1 \approx 2-4$, $\delta_\epsilon \approx (2-4) \cdot 10^{-4}$ при $f = 1$ МГц [3]. Единственный мате-

риал, у которого значения μ и ε одновременно отличны от единицы, а значение δ мало — феррит. При исследовании никель-цинкового феррита на частоте около $3 \cdot 10^9$ Гц получено [4]:

$$\mu = 0,95 - j 1,4 = 1,69 \angle -55,8^\circ; \varepsilon = 5,8 - j 0,17 = 5,8 \angle -1,7^\circ, \text{ следовательно } Z_c = 203 \angle -27^\circ \text{ Ом};$$

$\gamma = \alpha + j\beta = 0,92 + j 1,68 \text{ см}^{-1}$.
Утверждение М. А. Панасенкова о равенстве углов потерь $\delta_\mu = \delta_\varepsilon \approx 30^\circ$ — очевидно недоразумение.

Мгновенное значение вектора Пойнтинга:

$$\Pi_z = E_x H_y = z_c H_0^2 e^{-2\alpha z} \sin(\omega t + \theta - \beta z) \sin(\omega t - \beta z) = \\ = \frac{z_c H_0^2}{2} e^{-2\alpha z} [\cos \theta - \cos(2\omega t + \theta - 2\beta z)]. \quad (22)$$

В общем случае при $\theta \neq 0$ мгновенное значение Π_z меняет знак, т. е. часть мощности «не успевает» рассеяться в элементарном объеме пространства с координатой z и «возвращается назад». Из-за экспоненциального множителя ($\exp(-2\alpha z)$) происходит уменьшение переносимой волной мощности, поэтому такую среду нельзя назвать прозрачной.

Дивергенция вектора Пойнтинга

$$\operatorname{div} \Pi = \frac{\partial \Pi_z}{\partial z} = -z_c H_0^2 e^{-2\alpha z} [\alpha \cos \theta + |\gamma| \cos(2\omega t + \theta - 2\beta z - \arctg \beta/\alpha)]. \quad (23)$$

Из этого выражения видно, что в среде с потерями отрицательная часть $\operatorname{div} \Pi$ больше положительной, т. е. в каждом элементарном объеме происходит накопление энергии поля и превращение части этой энергии в тепло. Поэтому вытекающая из элементарного объема энергия меньше притекающей.

Видно, что изложенное отличается от представленного в соответствующей части статьи М. А. Панасенкова.

3. *Глубина проникновения.* Обычно этой величиной интересуются при исследовании поля в проводящей среде, при пренебрежении токами смещения. Однако можно рассмотреть и общий случай. Глубиной проникновения называют такую величину z_0 , при которой амплитуда напряженности поля уменьшается в e раз, т. е.:

$$\alpha z_0 = 1, \quad z_0 = 1/\alpha,$$

где α определяется по (13).

Отсюда

$$z_0 = \frac{c}{\omega \sqrt{|\mu| \cdot |\varepsilon_3|} \sin \frac{\delta_\mu + \delta_{\varepsilon_3}}{2}},$$

что отличается от (13) в статье М. А. Панасенкова. Замечу, что в статье М. А. Панасенкова в (13) входят комплексные μ и ε и, следовательно, глубина проникновения тоже комплексная величина?!

На этом следует остановиться и сделать вывод, что в статье М. А. Панасенкова неверно трактуются известные соотношения электродинамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2.— М.—Л.: ГНТИ, 1936.
2. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники в трех частях. Часть третья. Теория электромагнитного поля.— М.: Энергия, 1969.
3. Конструкционные и электротехнические материалы: Учебник для учащихся электротехнических специальных техникумов / В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, С. Я. Попов и др.; Под ред. В. А. Филипова.— М.: Высшая школа, 1990.
4. Колли Я. Н., Поливанов К. М. Ферритовая шайба в коаксиальной линии.— Изв. АН СССР, сер. физич., 1954, т. 18, № 3.

ПИЩИКОВ В. И., доктор техн. наук

Некоторые авторы, как и автор обсуждаемой статьи, предлагая свою интерпретацию симметрирования известных уравнений Максвелла, часто ссылаются на работы Аркадьева В. К., которые были опубликованы в начале века. Как известно, сложность вопроса вытекает из того факта, что в природе не обнаружены магнитные заряды, поэтому все попытки введения симметрирующего члена в одно из уравнений Максвелла, основываются на предположениях, что этот член может иметь физический («вязкость») или математический расчетный характер.

Остановимся более подробно на сути предложения Аркадьева В. К., наиболее полно изложенные им в книге «Электромагнитные процессы в металлах». 4.1 и 2,— М.—Л.: ОНТИ НКГП, 1936.

Уравнения Максвелла можно представить в следующем виде, используя международную систему единиц (СИ):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \\ -\operatorname{rot} \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}.$$

В. К. Аркадьев предлагает второе уравнение рассматривать в следующей форме:

$$-\operatorname{rot} \vec{E} = \varphi \vec{H} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$

вводя член $\varphi \vec{H}$, характеризующий «магнитную вязкость», потери на гистерезис и существующий только при наличии ферромагнитной среды.

Учет двух членов в уравнениях Максвелла, пропорциональных $\vec{E}$ и $\vec{H}$, является причиной появления комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей в ферромагнитной среде с учетом потерь в среде и токов проводимостей.

Некоторые формальные преобразования позволяют прояснить смысл введения комплексных проницаемостей. Представим, что напряженности электрического и магнитного полей изменяются по гармоническому закону с угловой частотой, равной ω :

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon \vec{E}. \quad (1)$$

Тогда

$$-\operatorname{rot} \vec{E} = \varphi \vec{H} + j\omega \mu \vec{H},$$

где ε и μ — вещественные числа.

Введем вместо ε и μ их комплексные значения, которые определим так

$$\dot{\mu} = \dot{B}_m / \dot{H}_m = \mu e^{-i\varphi} = \mu' + j\mu'',$$

где угол ψ_μ определяет потери энергии, связанные с переманчиванием среды и магнитной вязкостью, и

$$\dot{\epsilon} = \dot{D}_m / \dot{E}_m = \epsilon e^{j\psi_\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon'',$$

где угол ψ_ϵ определяет потери энергии при изменении поляризации.

Тогда уравнения (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\vec{H}} &= j\omega \tilde{\epsilon} \vec{E}; \\ -\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} &= j\omega \tilde{\mu} \vec{H}. \end{aligned}$$

Значения $\tilde{\epsilon}$ и $\tilde{\mu}$ можно получить следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi + j\omega \dot{\mu} &= \varphi + j\omega(\mu' - j\mu'') = \varphi + j\omega\mu' + \omega\mu'' = j\omega[\mu' - \\ &\quad - j(\varphi/\omega + \mu'')] = j\omega\mu; \\ \sigma + j\omega \dot{\epsilon} &= \sigma + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') = \sigma + j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'' = j\omega[\epsilon' - \\ &\quad - j(\sigma/\omega + \epsilon'')] = j\omega\epsilon. \end{aligned}$$

В итоге приходим к известной системе уравнений в комплексной форме, где вещественные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей заменены на комплексные. Можно показать, что все операции над этими уравнениями с комплексными проводимостями идентичны операциям с проводимостями, являющимися вещественными числами.

Необходимо учитывать, что в уравнениях Гельмгольца относительно векторных функций напряженностей электрического и магнитного полей

$$\begin{aligned} \nabla^2 \dot{\vec{H}} + \tilde{k}^2 \dot{\vec{H}} &= 0; \\ \nabla^2 \dot{\vec{E}} + k^2 \dot{\vec{E}} &= 0. \end{aligned}$$

Коэффициент $\tilde{k} = k' - jk''$ является комплексным числом, элементарный анализ системы уравнений позволяет установить расчетные выражения для фазовой скорости и длины волны:

$$v = \omega/k'; \quad \lambda = 2\pi/k' = v/f.$$

Можно показать, что выражение для дивергенции вектора Пойнтинга будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} -\operatorname{div} [\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}] &= \dot{\vec{E}} \operatorname{rot} \dot{\vec{H}} - \dot{\vec{H}} \operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = \dot{\vec{E}} (-j\omega \tilde{\epsilon} \vec{E}) - \\ &\quad - \dot{\vec{H}} (-j\omega \tilde{\mu} \vec{H}) = (\sigma + \epsilon''\omega) E^2 + (\varphi + \mu''\omega) H^2 + \\ &\quad + j\omega(-\epsilon' E^2 + \mu' H^2). \end{aligned}$$

При вещественных значениях ϵ и μ в правой части уравнений исключаются φ и члены с ϵ'' и μ'' , так как они равны нулю, т. е. исключаются потери, вызванные поляризацией, магнитной вязкостью и переманчиванием.

Обращаясь к статье М. А. Панасенкова, хотелось бы отметить, что представление уравнений в форме

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \epsilon_1 \Omega \vec{E} + \epsilon_2 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t};$$

$$-\operatorname{rot} \vec{E} = \mu_1 \Omega \vec{H} + \mu_2 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

вызывает множество вопросов, на которые в статье нет четких ответов. Так, автор вводит новое значение частоты Ω , а не использует принятое значение угловой частоты, связанное известным соотношением с периодом гармонической функции $\omega = 2\pi/T$.

Автор использует понятие комплексных переменных ϵ и μ , но ошибочно делает выводы о равенстве соотношений мнимых и действительных их частей, связывая это с «синхронностью» изменения как векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$, так и векторов $\vec{D}$ и $\vec{B}$. На самом деле, как уже указывалось ранее, углы ψ_μ и ψ_ϵ определяются из соотношений $\frac{\dot{B}}{H} e^{-j\psi_\mu}$ и $\frac{\dot{D}}{E} e^{-j\psi_\epsilon}$ как $\arctg \frac{\mu''}{\mu'} = \psi_\mu$ и $\arctg \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \psi_\epsilon$ и

указывают на наличие потерь столь разнородных по своей физической сущности, что предположение автора об их равенстве является слишком смелым. Именно это предположение позволяет автору получить соотношения (9) и (10) и доказать, что реактивная мощность равна нулю в любой среде.

Записывая уравнения Максвелла по ферромагнитной среде с учетом потерь от токов проводимости в довольно своеобразной форме, автор переносит действие этих уравнений в вакуум, где загадочный радиус вихря a приобретает смысл радиуса орбит галактических тел. Вне космических пространств объяснить физическую суть радиуса световой угловой скорости Ω , как и само понятие световой угловой скорости, затруднительно. Попытка автора связать две угловые скорости Ω и ω на примере асинхронного двигателя не является доказательной и убедительной.

В самой статье очевидно показано, что рассмотрение планетарных вопросов никакого отношения к уравнениям Максвелла не имеет: предположение, что $\kappa \gg 1$ полностью исключает эту связь.

УДК 621.316.945:621.315.145.016.34.001.24

Защита от перегрузки по току проводов воздушных линий электропередачи

(статья Т. Е. Петровой и Е. П. Фигурнова, «Электричество», 1991, № 8)

НИКИТИНА Л. Г.

В процессе эксплуатации воздушных линий электропередачи нередко возникает необходимость повышать передаваемую мощность по сравнению с принятой при проектировании. Авторы обсуждаемой статьи связывают допустимую перегрузку проводов ВЛ с их термической прочностью, а для предупреждения возможности недопустимого перегрева рекомендуют оборудовать ВЛ соответствующей релейной защитой. Команду на

отключение или разгрузку предлагается формировать при достижении определенной температуры провода с учетом термической статистической прочности металла проводов. Поскольку использование датчиков температуры, расположенных непосредственно на проводе, сопряжено с определенными трудностями, авторы предлагают в отдельных точках ВЛ располагать датчики температуры воздуха и скорости ветра, фиксировать

параметры, оказывающие наибольшее влияние на температуру провода, передавать их на вычислительный комплекс и по предложенной методике формировать команду на отключение или разгрузку линии.

Основное внимание уделяется рассмотрению математической модели процесса нагрева и термической статистической прочности металла по литературным источникам. Акцент делается на сохранение механической прочности провода. Однако, как показывает опыт практической работы по определению допустимой токовой нагрузки по условию нагрева проводов для действующих линий электропередачи, определяющим является сохранение допустимых вертикальных расстояний между проводом и землей, о чем в статье лишь упоминается. Авторы полагают, что на ВЛ 6—35 кВ при перегрузках значения стрелы провеса не выходят за пределы нормированных вертикальных расстояний между проводом и землей. С этим согласиться нельзя. В соответствии с ПУЭ вертикальные расстояния между проводом и землей выбираются исходя из сопоставления стрел провеса при гололеде без ветра и при наибольшей температуре воздуха. Как правило, определяющей является стрела провеса при высшей температуре воздуха, для большинства районов страны принимаемой равной $+40^\circ\text{C}$.

Следовательно, на линиях, выполненных с нормированными вертикальными расстояниями между проводом и землей, при повышении температуры провода до нормированной ПУЭ по условию механической прочности, равной $+70^\circ\text{C}$, будет увеличена стрела провеса провода на ВЛ 6—10 кВ в пролетах длиной 80—100 м на 0,5 м. На линиях более высокого класса напряжения в пролетах длиной 300 м и более стрела

провеса увеличится более чем на 1 м. С такими нарушениями габаритов нельзя не считаться.

Неубедительно утверждение авторов о том, что для полного штиля при расчетах теплоотдачи конвекцией можно использовать формулу (4), полагая $v=0,2\text{—}0,25$ м/с, поскольку авторы не дают сравнительной оценки с результатами расчетов по формуле, применимой для полного штиля.

В статье упоминается об экспериментальной проверке теории на специальном аэродинамическом стенде, однако не приведены данные экспериментов, что существенно снижает убедительность предлагаемого материала.

Следует также отметить, что практическая значимость предлагаемой защиты от перегрузки ВЛ вызывает большие сомнения по следующим причинам:

1. Возникают большие трудности с передачей сигнала от расположенных на ВЛ датчиков на вычислительный комплекс.

2. На ВЛ практически невозможно однозначно определить участок с максимальным нагревом провода, где необходимо располагать датчики температуры воздуха и скорости ветра. Местоположение этого участка зависит от направления трассы линии и направления ветра. Поскольку трасса линии имеет повороты, при одном направлении ветра точка с наибольшим нагревом провода будет в одном месте, а при другом она переместится.

На основании изложенного можно сделать вывод, что оборудовать ВЛ предлагаемой защитой от перегрузки линии нецелесообразно, так как возникают неопределенности при выборе контрольной точки на линии.

VIII Пленум Центрального правления ВНТОЭ имени академика Г. М. Кржижановского

(10 апреля 1991 г., Владимир)

Пленум рассмотрел вопросы:

1. «О проекте нового устава и об изменениях структуры ВНТОЭ» — докладчик председатель Центрального правления ВНТОЭ, чл.-корр. АН СССР Н. Н. Тиходеев.

2. «О ходе разработки Энергетической программы страны в Верховном Совете СССР» — докладчик заместитель председателя ЦП ВНТОЭ, доктор технических наук, председатель подкомиссии Верховного Совета СССР по энергетике В. В. Бушуев.

Участники Пленума при обсуждении проекта нового устава Общества отметили, что его основные положения в полной мере отражают роль и место научно-технической общественности в современных условиях развития страны и считают целесообразным преобразование Всесоюзного научно-технического общества энергетиков и электротехников имени академика Г. М. Кржижановского в Федерацию Научно-технических обществ энергетиков и электротехников (ФНТОЭ).

Выступавшие подчеркивали, что за последнее время образованы или создаются самостоятельные общества энергетиков и электротехников в Литве, Латвии, Эстонии, РСФСР, Грузии, на Украине. Аналогичная работа проводится и в других республиках. На Дальнем Востоке образовано научно-производственное общество «Энергия». Зарегистрировали в местных органах власти свои уставы Московское, Ленинградское, Новосибирское, Донецкое областные правления. В текущем году правления Общества перешли на договорные финансовые взаимоотношения с Центральным правлением ВНТОЭ.

Проводится работа по организации общества светотехников в составе ВНТОЭ. Разворачивают деятельность хозяйственные научно-технические центры, малые предприятия, производственные ассоциации. Активно идет формирование в составе Общества ассоциаций ученых, инженеров и специалистов: инженеров-электриков, инженеров-гидроэнергетиков, инженеров-теплоэнергетиков.

Члены Центрального правления ВНТОЭ считают, что устав Федерации НТОЭ предоставляет республиканским, краевым, областным и другим организациям, которые сочтут возможным войти в состав ФНТОЭ в качестве членов Федерации (субъектов Федерации), право самостоятельной работы на основе собственных уставов, реально перейти в рамках Федерации от административных к демократическим принципам дея-

тельности, а равноправные и взаимовыгодные отношения между всеми субъектами Федерации позволят сохранить единство научно-технической общественности страны, более эффективно воздействовать на развитие энергетики и электротехники.

С целью решения данных вопросов Пленум указал на необходимость принятия ряда мер:

республиканским, краевым и областным правлениям ВНТОЭ до 15 сентября 1991 г. обсудить проект устава ВНТОЭ;

республиканским, краевым и областным правлениям ВНТОЭ, изъявившим желание осуществлять свою деятельность в качестве членов Федерации НТОЭ (субъектов ФНТОЭ), до 15 октября 1991 г. провести учредительные конференции по организации самостоятельных научно-технических обществ энергетиков и электротехников.

Вновь образуемым Обществам предложено в соответствии с Законом СССР «Об общественных объединениях» регистрацию уставов в соответствующих органах власти провести до 1 января 1992 г.

Президиуму ЦП ВНТОЭ поручено до 10 октября 1991 г. обобщить предложения и замечания правлений ВНТОЭ к проекту устава Федерации НТОЭ и внести его на рассмотрение учредительной конференции ФНТОЭ.

Учредительную конференцию Федерации НТОЭ намечено провести в октябре 1991 г. в Ленинграде.

На Пленуме выступили: главный конструктор завода им. Владимира Ильича, доктор технических наук В. И. Радин; профессор ЛГТУ, доктор экономических наук В. Р. Окорочков; первый заместитель председателя Совета ветеранов войны и труда Минэнерго СССР, почетный член НТО Е. И. Борисов; первый секретарь Координационного Совета СНИО РСФСР И. М. Яшин и другие.

Участники Пленума обращаются ко всем членам ВНТОЭ принять активное участие в обсуждении будущего устройства, принципов и основ функционирования Федерации научно-технических обществ энергетиков и электротехников и направлять свои предложения в региональные правления ВНТОЭ или непосредственно в президиум Центрального правления ВНТОЭ.

Пленум, приняв к сведению информацию народного депутата СССР В. В. Бушуева о проводимой Верховным Советом СССР работе по разработке Энергетической программы страны, рекомендовал ему макси-

мально использовать возможности научно-технической общественности ВНТОЭ в дальнейшем совершенствовании Энергетической программы СССР.

Председатель Центрального правления ВНТОЭ Н. Н. Тиходеев проинформировал участников Пленума

об итогах и дипломантах конкурсов 1990 г.; имени акад. Б. Е. Веденеева в области гидроэнергетики, имени акад. С. С. Кутателадзе в области теплоэнергетики и имени чл.-корр. АН СССР М. А. Шателена в области электротехники.

ЛАНДЕР Л. А., вед. инструктор ЦП ВНТОЭ

Учредительная конференция Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников (РНТОЭ)

(апрель 1991 г., Владимир)

Представители научно-технической общественности России еще в 1989 г. стали осознавать целесообразность создания самостоятельной творческой, профессиональной организации. Подготовка Учредительной конференции проходила в несколько этапов. В 1989—1990 гг. проведены три заседания пленумов ЦП ВНТОЭ, на которых были определены цели и задачи создания республиканского правления общества, намечены пути совершенствования деятельности организаций и правлений ВНТОЭ в РСФСР. На следующем этапе было создано Организационное бюро для выработки предложений по учреждению Российской организации ВНТОЭ. В итоге большинство правлений областей и краев РСФСР однозначно решило вопрос о необходимости создания РНТОЭ.

Постановлением президиума ЦП ВНТОЭ был утвержден Исполнительный комитет для практической организации и проведению Учредительной конференции под председательством чл.-корр. АН СССР Ю. С. Васильева. Руководствуясь Законом СССР «Об общественных объединениях» и решениями Учредительной конференции СНИО РСФСР от 25 декабря 1990 г., Исполнительный комитет подготовил проекты Устава и других документов, вносимых на обсуждение Учредительной конференции Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников.

С докладом от имени Исполнительного комитета на Учредительной конференции РНТОЭ 9 апреля 1991 г. выступил чл.-корр. АН СССР Ю. С. Васильев.

Докладчик обосновал необходимость создания РНТОЭ как самостоятельной общественной организации энергетиков и электротехников России, определил ее главные цели. Организация должна стать гарантом консолидации сил и координации действий изъявивших желание войти в ее состав творческих, профессиональных, территориальных объединений научно-технической общественности энергетиков и электротехников в решении проблем технического перевооружения и модернизации всего энергетического комплекса России, повышения престижа и значимости труда ученых, инженерно-технических работников и специалистов отраслей.

В условиях создания новых экономических и управленческих механизмов, принятия важнейших законов Российской Федерации, демократизации общества многократно повысилась роль общественных объединений при решении государственных, экономических, экологических и других проблем, усилились требования эффективного решения научно-технических задач развития энергетики, электротехники, электрификации,

ресурсосбережения, разработки и обоснования важнейших технологий.

Инженеры и ученые РНТОЭ должны шире использовать средства массовой информации для формирования объективного, научно обоснованного мнения о значимости энергетики и электротехники, доказывать и объяснять необходимость формирования тех или иных научно обоснованных путей развития энергетики, позволяющих сберечь колоссальные материальные ресурсы для России. При этом РНТОЭ должно также содействовать и поднятию престижа энергетических и электротехнических профессий.

Высококвалифицированные специалисты РНТОЭ должны всячески способствовать повышению профессионального уровня, оказанию технической помощи всем категориям работников энергетики и электротехники России, для чего необходимо укреплять материально-техническую базу РНТОЭ. Положительные результаты в этом направлении может дать дальнейшее развитие хозяйственной деятельности организаций Российского общества. Одновременно повышаются возможности использования научно-технического потенциала различных регионов для принятия совместных решений по тем или иным проблемам предприятий, районов, областей и краев, а также научного и делового международного сотрудничества.

На рассмотрение и утверждение участникам конференции был предложен проект Устава и другие руководящие документы, по которым было принято постановление:

1. Создать Российское научно-техническое общество энергетиков и электротехников (РНТОЭ).
2. Устав Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников утвердить.
3. Конференция обязала Президиум Российского правления НТОЭ осуществить в течение II—III кв. 1991 г. практические организационные мероприятия по формированию структур Общества на добровольной и демократической основе сформировать до октября с. г. проект плана научно-технической и организационной деятельности на 1992 г.
4. Правлениям ВНТОЭ, находящимся на территории РСФСР, чьи представители приняли участие в Учредительной конференции, в течение апреля—мая 1991 г. рекомендовано провести пленарные заседания, на которых обсудить итоги Учредительной конференции, порядок взаимодействия с правлением Общества. Материалы, подтверждающие вступление в состав РНТОЭ, необходимо направить не позднее 1 июля в президиум правления Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников.

На Учредительной конференции и на I Пленуме правления РНТОЭ были избраны руководящие и исполнительные органы: правление в составе 75 чел., президиум — 16 чел. и ревизионная комиссия — 7 чел.

Президентом Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников избран Васильев Юрий Сергеевич, доктор техн. наук, проф. чл.-корр. АН СССР, ректор ЛГТУ.

Вице-президентами избраны:

Брызгалов Валентин Иванович, канд. техн. наук, директор Саяно-Шушенской ГЭС;

Ершевич Виктор Васильевич, доктор техн. наук, зам. главного инженера ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект»;

Казаров Семен Арменакович, доктор техн. наук, генеральный директор ПОЭИЗ «Ленэнерго».

Суворов Николай Иванович — канд. техн. наук, генеральный директор НПО «Электромаш»;

Исполнительным директором правления РНТОЭ избрана Красовицкая Лидия Матвеевна, заведующая организационно-международным отделом ЦП ВНТОЭ.

Председателем ревизионной комиссии РНТОЭ избрана Добринская Ольга Николаевна, зам. председателя Ленинградского правления ВНТОЭ.

В работе Учредительной конференции приняли участие представители 155 и 228 организаций ВНТОЭ, находящихся на территории РСФСР.

Создание Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников должно стать важным шагом в развитии энергетики и электротехники России.

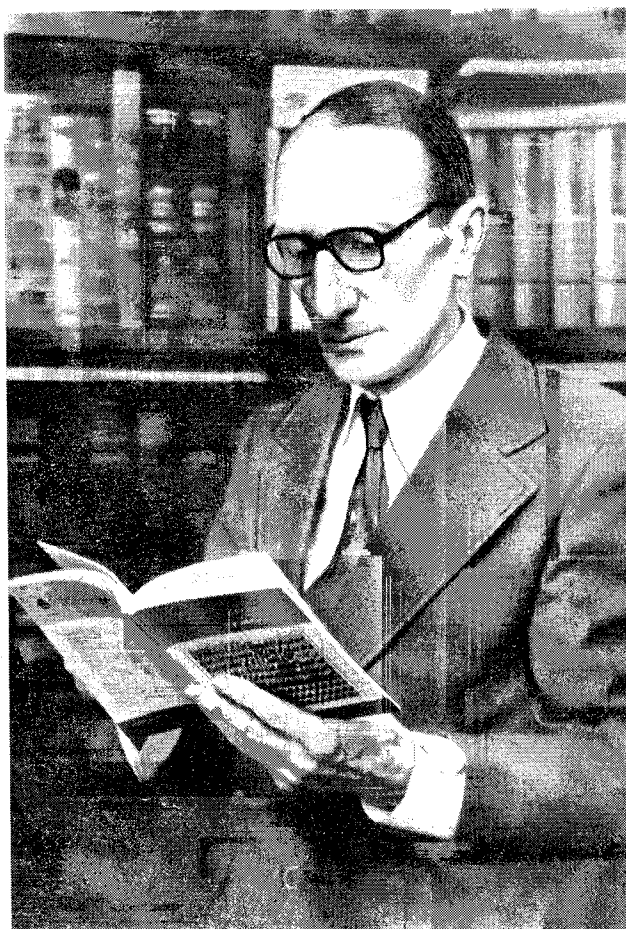
КРАСОВИЦКАЯ Л. М.

Профессор Борис Михайлович Тареев

(К 85-летию со дня рождения)

Член редколлегии журнала «Электричество», доктор технических наук, профессор Борис Михайлович Тареев, родился 31 августа 1906 г. в Загорске.

Важнейшие этапы научной, педагогической и производственной деятельности Б. М. Тареева: с 1929 (после окончания МВТУ им. Н. Э. Баумана) по 1934 г. — заведующий электрофизической лабораторией завода «Динамо»; с 1930 по 1941 и с 1945 по 1947 г. — доцент кафедры электротехнических материалов и кабелей Московского энергетического института (МЭИ), в последние годы — также заместитель заведующего кафедрой по научно-исследовательской работе; в годы Великой Отечественной войны — сначала преподаватель военного училища, затем, работая в промышленности, занимался разработкой заменителей дефицитных электротехнических материалов; с 1945 по 1947 г. — докторант Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР; с 1947 по 1973 г. — заведующий кафедрой электротехнических материалов Всесоюзного заочного энергетического института (ВЗЭИ), в 1966 г. реорганизованного в Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА); во ВЗЭИ был также деканом факультета



усовершенствования дипломированных инженеров, председателем редакционного совета и председателем первичной организации НТО института.

Основные направления научной работы Бориса Михайловича: установление связей электрических и тепловых свойств материалов с их составом и структурой; изучение влияния факторов окружающей среды на свойства материалов; разработка и исследования новых материалов, в частности, органических полимеров, слюдяных и асбестовых материалов, оксидной изоляции, стекломалей, стекловолоконистой изоляции; разработка новых конструкций электротехнических и радиоэлектронных компонентов — резисторов, конденсаторов, электронагревательных элементов, а также проводов и кабелей; разработка методов герметизации и тропикализации электрических устройств и радиоэлектронной аппаратуры.

На протяжении многих лет Б. М. Тареев ведет большую работу в области научно-технической информации. С 1930 г., являясь одним из научных редакторов журнала «Электричество», он вел в этом журнале отдел рефератов, а с 1955 г., с момента организации Отдела электротехники и энергетики Всесоюзного института научной и технической информации (ВИНИТИ), начал работать в этом отделе, оставаясь (по 1986 г.) профессором МИРЭА. С 1959 г. Борис Михайлович — главный редактор научно-информационных изданий ВИНИТИ по электротехнике и энергетике; в настоящее

время он — главный научный сотрудник ВИНИТИ. Его широкий кругозор, научная эрудиция, знание многих иностранных языков способствуют высокому качеству подготовляемых ВИНИТИ реферативных журналов, обзоров «Итоги науки и техники» и других изданий, в том числе и записываемых на машиночитаемых носителях информации, а также проведению большой научной работы.

Борис Михайлович — активный деятель научно-технической общности нашей страны и международных организаций. Он — заслуженный член НТО с 1950 г., и с 1971 г. — председатель секции электрической изоляции при Центральном правлении ВНТОЭ им. Г. М. Кржижановского. В разное время он работал членом Комиссии по диэлектрикам АН СССР, Комитета научно-технической терминологии АН СССР, Научно-методического совета полупроводниковой и изоляционной техники и Головного совета по физике твердого тела, рабочих групп № 1 («Терминология») и № 15 («Электроизоляционные материалы») Международной электротехнической комиссии. В 1964—1966 гг. и (в качестве эксперта ЮНЕСКО) в 1968—1969 гг. он преподавал в вузах Индии.

Б. М. Тареев автор и соавтор большого числа печатных трудов — это учебники и учебные пособия («Электроматериаловедение», «Электротехнические материалы», «Электрорадиоматериалы», «Теория диэлектриков», «Физика диэлектрических материалов», «Электроизолирующие материалы

и конструкции», «Испытания электроизоляционных материалов», «Производство силовых кабелей и обмоточных проводов»), монографии («Оксидная изоляция», «Стеклоанодная изоляция», «Заменители в электропромышленности», «Электроизоляционные материалы высокой нагревостойкости», «Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике»), справочники («Справочник по электрической изоляции», «Справочник по электротехническим материалам»), словари (в частности, «Французско-русский электротехнический словарь»), аннотированные библиографические указатели и пр.; многие из этих книг неоднократно переиздавались. Кроме русского, его книги печатались на английском, армянском, болгарском, венгерском, испанском, китайском, немецком, польском, румынском, словацком и чешском языках. Суммарный тираж этих книг составляет 1,5 млн. экз.

Борис Михайлович опубликовал сотни статей в советских и зарубежных журналах, в трудах институтов и конференций, он автор многочисленных рецензий на советские и зарубежные книги, имеет ряд авторских свидетельств на изобретения, был руководителем разработки нескольких государственных стандартов.

Б. М. Тареев награжден орденами и медалями СССР. В 1952 г. он удостоен Государственной премии СССР; в 1976 г. ему присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Редакция и редколлегия журнала «Электричество», группа товарищей и учеников

В центральном правлении ВНТОЭ им. акад. Г. М. Кржижановского

СПИСОК

действительных членов ассоциации инженеров-электриков,

принятых в период с 1 февраля по 1 апреля 1991 года

1. АЙЗЕНБЕРГ Ю. Б., профессор, ВНИСИ, Москва
2. АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., профессор ЛГТУ, Ленинград
3. АНТИПОВ В. Н., д. т. н., ВНИИЭлектромаш, Ленинград
4. БАШАРИН А. В., профессор ЛЭТИ, Ленинград
5. БРАСЛАВСКИЙ И. Я., профессор УрПИ, Свердловск
6. БУХМАН Г. Б., к. т. н., НПК «Свет» НПО «Укрэлектромонтаж», Киев
7. ВУГМАН С. М. к. т. н., с. н. с. ВНИИИС, Саранск
8. ДЕМИДОВ С. В., к. т. н., ОКБ станкостроения, Ленинград
9. ЗУБКОВ Ю. С., д. т. н., Информационный центр, Ленинград
10. КЛЮЕВ С. А., к. т. н., вед. инж. ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, Москва
11. КОКИНОВ А. М., к. т. н., директор ВНИИИС, Саранск
12. КОВЧИН С. А., профессор ЛГТУ, Ленинград
13. КОЗЯРУК А. Е., профессор ЛГИ, Ленинград
14. КУЛИКОВ С. Н., к. т. н., доцент ЛТИ ЦБП, Ленинград
15. ЛИСИЦЫН В. М., профессор, зав. кафедрой ТПИ, Томск
16. МИХЕЛЬКЕВИЧ В. Н., профессор, зав. кафедрой Средне-Волжского ПИ, Саранск
17. НАМИТОВ К. К., профессор, зав. кафедрой ХИИГХ, Харьков
18. САЖИН Ю. В., профессор, зав. отделением ВНИИИС, Саранск
19. РАССУДОВ Л. Н., профессор, ЛЭТИ, Ленинград
20. РУДАКОВ В. В., профессор, ЛГИ, Ленинград
21. ФЕДОРЕНКО А. С., д. т. н., зав. отделом ВНИИИС, Саранск
22. ФЕДОРОВ В. Ф. к. т. н., ст. н. с. ВНИИЭлектромаш, Ленинград
23. ФИРАГО Б. И., профессор, зав. кафедрой БПИ, Минск

Президиум ЦП ВНТОЭ

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., Михайлов О. П., Морозкин В. П., Нетушил А. В., Розанов Ю. К., Пишиков 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.

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

Редакторы по направлениям тематики:

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

Художественный редактор Т. А. Дворецкова Технический редактор Г. В. Преображенская Корректор З. Б. Драновская

Сдано в набор 07.06.91. Подписано в печать 12.07.91. Формат 60×88¹/₈. Бумага кн.-журн. офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,78. Усл. кр.-отт. 11,27. Уч.-изд. л. 11,18. Тираж 3507 экз. Заказ 5924. Цена 2 р.

Энергоатомиздат, 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» при Госкомпечати СССР, 142300 г. Чехов Московской области

СОДЕРЖАНИЕ

Шнейберг Я. А. Научный подвиг Майкла Фарадея (К 200-летию со дня рождения)	1
Надточий В. М. Экспертные системы диагностики электрооборудования	9
Иванов А. М., Герасимов А. Ф. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя	16
Лизунов С. Д. Проблемы трансформаторостроения на сессии СИГРЭ 1990 г.	20
Петрова Т. Е., Фигурнов Е. П. Защита от перегрузки по току проводов воздушных линий электропередачи	29
Фиорилло Ф., Новиков А. А. Цифровой осциллографический метод измерения потерь в магнитных материалах	34
Иерусалимов М. Е., Соколовский С. А., Радченко С. Г., Романенко Ю. В., Лапач С. Н. Многофакторная математическая модель термонапряженной электроизоляции	40
Бесхлебный С. И. Возникновение одноэлектродного разряда в области первой критической частоты	45
Ковалев А. П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов	50
Альтшулер Э. Б., Сажин А. И., Шевцов Ю. В. Электробезопасность на передвижных электроустановках районов Крайнего Севера	55

СООБЩЕНИЯ

Александров Г. Н., Герасимов Ю. А. Импульсная электрическая прочность изолирующих подвесок ВЛ высших классов напряжения	60
Катунян В. И., Левиуш А. И. Математическое моделирование параметрического резонанса на второй гармонике при коммутации в сети СВН	62
Еруков Н. В., Алексеев А. Г. Расчет магнитных свойств магнитотвердых эластомеров	65
Маврычев Ю. С. Об условиях ресинхронизации генераторов	68
Эпштейн И. И. Расчет характеристик вентильного двигателя	70

ДИСКУССИИ

ХРОНИКА

CONTENTS

Shneiberg J. A. — The Scientific Feats of Michael Faraday (in Commemoration of the 200-th Anniversary of His Birthday)	1
Nadtochy V. M. — Expert Systems for Diagnostics of Electrical Equipment	9
Ivanov A. M., Gerasimov A. F. — Molecular Stores of Electric Energy Based on the Double Electric Layer	16
Lizunov C. D. — Problems in the Manufacture of Transformers Discussed at the 1990 Session of CIGRE	20
Petrova T. E., Figurnov E. P. — Current Overload Protection of the Conductors of Overhead Transmission Lines	29
Fiorillo F., Novikov A. A. — A Method for Measuring Losses in Magnetic Materials With a Digital Oscilloscope	34
Yerusalimov M. E., Sokolovsky S. A., Radchenko S. G., Romanenko U. V., Lapach S. N. — A Multi-Factorial Mathematical Model for Thermally Stressed Electrical Insulation	40
Beskhlebny S. I. — Occurrence of Single-Electrode Discharge in the Region of the First Critical Frequency	45
Kovalev A. P. — Problems in Assessing the Safety of Electrical Installations	50
Altshuler E. B., Sazhin A. I., Shevtsov U. V. — Electrical Safety at Mobile Installations in Regions of the Far North	55
REPORTS	
Alexandrov G. N., Gerasimov U. A. — The Electrical Impulse Strength of Suspension Insulators on Transmission Lines of the Highest Voltage Classes	60
Katunian V. I., Leviush A. I. — Mathematical Simulation of Second Harmonic Parametrical Resonance for Switching in EHV Networks	62
Yerukov N. V., Alexeyev A. G. — Calculation of the Magnetic Properties of Magnetically Hard Elastomers	65
Mavrichiev U. S. — On Conditions for Resynchronization of Generators	68
Epstein I. I. — Calculation of the Characteristics of a Rectifier Motor	70
DISCUSSION	74
CHRONICLE	83