

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1957

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

7

СОДЕРЖАНИЕ

А. М. Саркисян — Основные задачи электрификации сельского хозяйства	1
С. В. Страхов — Метод составления уравнений переходных электро механических процессов в электрических цепях	5
А. А. Бальчитис — Закон индукции для емкостной машины	11
К. И. Кожевников — Выбор передаточного числа редуктора приводов вспомогательных механизмов прокатных станов	14
Д. П. Морозов и Ю. А. Борцов — Обобщенная методика исследования переходных процессов в схемах электропривода	19
М. А. Розенблат — К расчету магнитомодуляционных датчиков напряженности магнитного поля	24
В. Д. Кравченко, В. И. Левитов и В. И. Попков — Об измерении потерь мощности на корону на действующих линиях	31
О. Б. Брон и В. А. Образцов — Гашение поля синхронных машин	34
Л. В. Цукерник и Н. А. Качанова — Анализ статической устойчивости сложных энергосистем при помощи электронных счетных машин	39
Ю. А. Гланц — Применение графиков распределения нагрузок для расчета городских сетей	45
Г. Г. Гимоян — Инженерная методика расчета реле с выпрямителями	50
И. И. Морозов — Танталовые электролитические конденсаторы	54
Г. С. Кучинский и Е. Л. Литвинова — Тепловые режимы изоляции конденсаторов	57
В. В. Скипетров и Ю. Н. Альбицкая — Электрическая изоляция в условиях влажных тропиков	62
В. В. Каплан и В. М. Нашатырь — Исследования отключающей способности и надежности внутренней изоляции выключателя МГ-110	68
К. Г. Кучма — Об использовании линий электро тяговой сети в качестве высокочастотных каналов	71
Г. И. Бабат — Об основных закономерностях индукционного нагрева	73
Л. М. Лопшиц — Номограмма для определения зон защиты стержневых молниеотводов	76
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
М. И. Радовский — Памяти Владимира Константиновича Лебединского (1863—1937)	78
ДИСКУССИИ	
Вопросы электрификации железных дорог — П. К. Денисов . О перспективах дуговых вентилях и о механических выпрямителях — Ю. Г. Толстов, А. Л. Саркисов . К статье О. Г. Вегнера "Вопросы современной теории коммутации тока в коллекторных машинах" — Н. А. Панфилов, О. П. Сидоров	81
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
О методе "приведения к установившемуся режиму". Электро механический отсчетчик времени	87
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Мощные полупроводниковые выпрямители. Кабельная линия 220 кВ постоянного тока через Ла-манш	89
ХРОНИКА	
К развитию связей журналов "Электричество" и "Deutsche Elektrotechnik". В Техническом управлении МЭС. В Техническом совете Тяжпромэлектропроекта. Советское национальное объединение историков естествознания и техники	91
БИБЛИОГРАФИЯ	
М. Г. Резин, Г. П. Кропачев, Л. В. Бурде, С. В. Сергеев, Г. Ф. Семенов, И. Г. Осыховский, Я. И. Дробинин, Э. К. Кочнев, Р. Н. Милайкина, Е. И. Парамонова, [М. Н. Ликачев] — Книга А. С. Касаткина и М. А. Перекалина "Электротехника"	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	95

CONTENTS

Basic Problems in the Electrification of Agriculture in the U. S. S. R. — A. M. Sarkisjan	1
A Method of Deriving Equations for Electro-Mechanical Transients in Electric Circuits — S. V. Strakhov	5
Induction Law for a Capacitance Machine — A. A. Balchitis	11
Auxiliary Mechanism Drive — K. I. Kozhevnikov	14
A Generalized Method for Investigating Transients in Motor Drive Systems — D. P. Morozov, U. A. Bor-tsov	19
On Calculating Magnetic-Modulation Transducers for the Magnetic Field Intensity — M. A. Rosenblat	24
Measuring Corona Losses on Lines in Service — V. D. Kravchenko, V. I. Levitov, V. I. Popkov	31
Damping the Field in Synchronous Machines — O. B. Bron, V. A. Obratsov	34
Analyzing the Steady State Stability of Complex Power Systems Using Electronic Computers — L. V. Zuckernick, N. A. Kachanova	39
Using Load Distribution Diagrams for Calculating Urban Networks — U. A. Glantz	45
A Practical Method of Calculating Relays with Rectifiers — G. G. Gimojan	50
Tantalum Electrolytic Capacitors — I. I. Morozov	54
Heat Duty for Capacitor Insulation — G. S. Kuchinski, E. L. Litvinova	57
Electrical Insulation in the Humid Tropics — V. V. Skipterov, O. N. Albitskaja	62
Investigating the Interrupting Capacity and Internal Insulation Reliability of Circuit Breaker МГ-110 — V. V. Kaplan, V. M. Nashatir	68
On Using Lines in Trolley Networks as Carrier Channels — K. G. Kuchma	71
On the Fundamental Laws of Induction Heating — G. I. Babat	73
A Diagram for Determining the Protective Zones of Rod Gaps — L. M. Lopshitz	76
FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING	78
DISCUSSION	81
NOTES AND LETTERS	87
IN OTHER ENGINEERING JOURNALS	89
CHRONICLE	91
BIBLIOGRAPHY	94

Основные задачи электрификации сельского хозяйства

Инж. А. М. САРКИСЯН

Главсельэлектро Министерства сельского
хозяйства СССР

За последние годы в области электрификации сельского хозяйства проделана значительная работа. В настоящее время мощность сельских электроустановок достигает 3 Гвт, а потребление электроэнергии сельским хозяйством, включая райцентры, 5 млрд. квт·ч. Электроэнергией пользуются почти все машинно-тракторные станции и совхозы и более 32% колхозов.

В республиках и областях, где местные советские, партийные и сельскохозяйственные органы проявляли инициативу и уделяли делу сельской электрификации должное внимание, электрификация колхозов развивалась более высокими темпами. Так, в Московской области электрифицировано более 80% колхозов, Свердловской 85%, Челябинской 65%, Армянской ССР — около 80%, Грузинской ССР — около 40% и т. д.

Источниками электроснабжения сельского хозяйства являются сельские гидро- и теплоэлектростанции, районные энергосистемы, промышленные и коммунальные электростанции. Из общей мощности, получаемой сельским хозяйством, 15% приходится на сельские гидроэлектростанции, 33% на районные энергосистемы и электростанции несельскохозяйственного назначения и 52% на мелкие тепловые электростанции.

Электрификация сельского хозяйства до последнего времени развивалась вне связи с развитием крупной энергетики и не входила в общий план электрификации страны.

Имевшее место до 1953 г. запрещение электрифицировать колхозы за счет присоединения к электростанциям несельскохозяйственного назначения явилось одной из причин, сдерживавших развитие электрификации сельского хозяйства.

Следует отметить, что по уровню электроснабжения сельского хозяйства Советский Союз еще значительно отстает от ряда стран Западной Европы, Японии и США. В Чехословакии, Германской Демократической Республике, Австрии, Франции, Японии, США и других странах почти все сельскохозяйственные потребители пользуются электрической энергией.

За рубежом электроснабжение сельских потребителей, как правило, осуществляется за счет присоединения к крупным энергетическим системам. Например, в США 85% ферм пользуются электроэнергией от сетей крупных электростанций и энергосистем и только 15% от сельских электростанций укрупненной мощности.

В нашей стране имеется немало колхозов и совхозов, успешно применяющих электроэнергию в сельскохозяйственном производстве. Колхоз им. Хрущева Броварского района Киевской области использует 77 электродвигателей на общую мощность 327 квт. За 1955 г. только на производственные цели колхоз израсходовал около 200 тыс. квт·ч электроэнергии, в результате чего сэкономил свыше 60 тыс. чел-дней, 20 тыс. конедней и 30 т жидкого топлива. В энергетическом балансе колхозов зоны Баженовской МТС Белоярского района Свердловской области удельный вес электроэнергии составляет 32,3% по мощности и 31,8% по расходу энергии.

Опыт многих электрифицированных колхозов показывает, что применение электрической энергии, в особенности на животноводческих фермах, высвобождает значительное количество рабочих рук, тягловой силы, облегчает труд колхозников и снижает себестоимость продукции. По данным Научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства применение электроэнергии в основных трудоемких стационарных процессах производства на животноводческой ферме снижает трудовые затраты на 35...45% и себестоимость продукции животноводства — на 15...20%.

Однако в целом по Советскому Союзу электроэнергия еще слабо внедряется в сельскохозяйственное производство. В настоящее время на один электрифицированный колхоз в среднем приходится только семь электродвигателей. Между тем практика передовых электрифицированных колхозов показывает, что для обеспечения электроэнергией основных стационарных производственных процессов в каждом колхозе должно работать 30...40 и более электродвигателей. Существующий уровень и темпы электрификации сель-

ского хозяйства не соответствуют возросшим потребностям в электроэнергии нашего сельского хозяйства.

Директивы XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. раскрывают величественную программу дальнейшего мощного подъема экономики нашей страны. Намечено осуществить крутой подъем земледелия и животноводства. За пятилетие ежегодные валовые сборы зерна должны увеличиться до 180 млн. т, производство мяса — в 2 раза, яиц и овощей — более чем в 2 раза, молока, картофеля и шерсти — почти в 2 раза, сахарной свеклы, хлопка — более чем в 1,5 раза.

Для решения этих задач наряду с широким использованием достижений агрономической науки и передового опыта необходимо значительно расширить работы по комплексной механизации и автоматизации процессов сельскохозяйственного производства. Важную роль в осуществлении комплексной механизации и автоматизации и дальнейшем повышении технического уровня сельскохозяйственного производства должна сыграть электрификация.

В шестом пятилетии должно быть обеспечено широкое применение электроэнергии в сельскохозяйственном производстве, для чего наряду с присоединением колхозов и совхозов к сетям государственных электростанций будет организовано строительство межрайонных и районных тепловых и гидроэлектростанций с долевым участием колхозов и совхозов. Число электрифицированных колхозов, получающих электроэнергию от постоянных источников, будет удвоено и завершена электрификация совхозов и МТС.

В соответствии с Директивами XX съезда КПСС за пятилетие намечается электрифицировать вновь 23 тыс. колхозов, в том числе около 19 тыс. колхозов за счет присоединения к электростанциям несельскохозяйственного назначения, реконструировать электроэнергетическую базу совхозов и МТС путем замены мало-мощных и устаревших агрегатов на современные и более мощные или путем присоединения их к сетям несельских и крупных сельских электростанций, расширить и реконструировать электроэнергетическую базу более чем половины колхозов, которые в настоящее время получают недостаточное количество электроэнергии низкого качества.

Мощность сельских электростанций, а также трансформаторных подстанций, через которые сельские потребители питаются электроэнергией от несельских электростанций, достигнет к концу шестой пятилетки 6 Гвт, а потребление электроэнергии сельским хозяйством 12... 15 млрд. кВт·ч.

В целях более правильного решения вопросов электрификации, Министерство сельского хозяйства СССР разработало принципиальную схему электроснабжения сельского хозяйства Советского Союза в течение 10... 15 лет. Согласно этой схеме, в которой учтены замечания Совета технико-экономической экспертизы Госплана СССР, для электрификации колхозов, МТС и совхозов

(без учета электрификации мобильных процессов), а также районных центров и местной промышленности потребуется около 13 Гвт мощности и 55 млрд. кВт·ч электроэнергии в год.

Около 1 Гвт указанной мощности намечено получить от существующих сельских электростанций и подстанций, 2,2 Гвт — от сельских тепло- и гидроэлектростанций, которые должны быть построены, и 9,8 Гвт — от электростанций несельскохозяйственного назначения. Таким образом, 80% необходимой мощности должно быть обеспечено за счет присоединения сельских потребителей к сетям энергосистем и промышленных электростанций, а 20% — от сельских гидро- и теплоэлектростанций, которые необходимо построить.

Несмотря на то, что большую часть сельскохозяйственных потребителей намечено присоединить к электростанциям несельскохозяйственного назначения, электроэнергия, которая будет потребляться сельским хозяйством, составит не более 6... 8% электроэнергии, вырабатываемой в стране. В настоящее время доля потребляемой сельским хозяйством электроэнергии не превышает 2... 3%.

Для осуществления указанной схемы необходимо построить около 1400 сельских гидроэлектростанций общей мощностью 1,6 Гвт, несколько тысяч тепловых электростанций и линий электропередачи напряжением 110 кв 8 тыс. км, 35 кв — более 130 тыс. км, 10 кв — 950 тыс. км и низкого напряжения — более 1 млн. км.

В тех областях, краях и республиках, где имеются энергетические системы или крупные промышленные электростанции, основной базой электроснабжения сельского хозяйства должны явиться эти системы и станции, а опорными пунктами — районные подстанции 110/35/10 кв. Одни потребители будут питаться от шин 10 кв районных подстанций, а для питания других, более удаленных, придется сооружать линии 35 кв и подстанции сельскохозяйственного назначения 35/10 кв. Для электрификации сельского хозяйства намечено широко использовать тяговые подстанции электрифицированных железных дорог и подстанции нефтепроводов. В ряде областей, краев и республик опорными пунктами явятся подстанции предприятий черной и цветной металлургии, угольной промышленности, нефтяной промышленности и других отраслей.

В некоторых районах, несмотря на наличие там крупных энергосистем, предусматривается строительство сельских гидроэлектростанций в тех случаях, когда снабжение электроэнергией сельскохозяйственных потребителей от них экономически выгоднее, чем от энергосистемы.

В районах, не имеющих крупных энергосистем и промышленных электростанций, электрификация сельского хозяйства должна целиком базироваться на использовании местных энергетических ресурсов, в первую очередь гидроэнергетических. Предусматривается сооружение сельских гидроэлектростанций мощностью от 0,5 до 15 Мвт с использованием малых и средних рек и ирригационных каналов. Средняя стоимость установленного на гидроэлектростанциях киловатта по дан-

ным схемы составит 5,5 тыс. руб. Строительство сельских тепловых электростанций намечается только в тех районах, где отсутствуют другие, более экономичные возможности снабжения электроэнергией сельского хозяйства. Ветроэлектростанции предусматриваются лишь в комбинации с тепловыми и в тех местах, где среднегодовая скорость ветра выше 4 м/сек. В балансе мощностей они не учитываются.

Распределение электрической энергии будет осуществляться, как правило, по радиальным линиям напряжением 35 и 10 кВ. При применении трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой радиус зоны электрификации от сетей 35 и 10 кВ находится в пределах 70 ... 90 км, а от сетей 10 кВ — 15 ... 18 км в зависимости от плотности нагрузок зоны. Мощность подстанций 35/10 кВ сельскохозяйственного назначения находится в пределах 320 ... 3 200 кВА также в зависимости от плотности нагрузок в зоне.

Сооружение подстанций 110/35/10 кВ сельскохозяйственного назначения предусматривается только в тех случаях, когда сельскохозяйственные потребители значительно удалены от опорных пунктов энергосистем и промышленных станций. Мощность подстанции 110/35/10 кВ сельскохозяйственного назначения определяется в 10 ... 20 МВА.

Согласно схеме придется вновь построить 85 подстанций сельскохозяйственного назначения 110/35/10 кВ на общую мощность 1,17 ГВА и 3 624 подстанции 35/10 кВ на общую мощность 8,15 ГВА.

В лесных районах опоры линий электропередачи намечено выполнять из пропитанной древесины, в безлесных — из железобетона или из древесины, но на железобетонных приставках. Для линий 110 кВ приняты опоры П-образной конструкции, а для линий 35 кВ — одностоечные со штыревыми изоляторами.

Капиталовложения, которые потребуются при осуществлении намеченных в принципиальной схеме работ, исчислены в сумме 50,8 млрд. руб. в ценах на 1 июля 1950 г., из них 10,3 млрд. руб. на сельские гидро- и теплоэлектростанции, 16,7 млрд. руб. на линии электропередачи и подстанции и 23,8 млрд. руб. на электрооборудование колхозов, включая потребительские подстанции и сети низкого напряжения.

В схеме не были учтены затраты на расширение существующих и создание новых крупных энергосистем или тяговых подстанций для обеспечения присоединяемых к ним сельскохозяйственных нагрузок. Эти затраты, по предварительным данным, составят около 20 млрд. руб.

Потребность в основных материалах и оборудовании, необходимых при осуществлении намеченных в схеме работ, определена в следующих размерах: проводов алюминиевых и сталеалюминиевых 700 тыс. т, проводов стальных 550 тыс. т, силовых трансформаторов 26 ГВА, столбового леса 22 млн. м³, электродвигателей 8,4 млн. шт., изоляторов высоковольтных и низковольтных 320 млн. шт.

За последние годы технический уровень сельской электрификации несколько повысился, одна-

ко надо сделать еще очень многое для внедрения современных достижений науки и передового опыта, для разработки и использования новых видов оборудования, аппаратуры и материалов, позволяющих решить задачи сельской электрификации на более высоком техническом уровне, с меньшими затратами денежных и материальных средств.

В настоящее время в основном решена задача автоматизации сельских гидроэлектростанций. Гидротурбины поставляются промышленностью комплектно с автоматическими регуляторами скорости вращения. Серийно изготавливаются комплектные щиты управления, защиты и автоматики. Разработаны и согласованы с промышленностью новые унифицированные схемы компоновки и комплектации сельских гидроэлектростанций оборудованием и аппаратурой с учетом полной их автоматизации. Однако завершение работ по автоматизации сельских гидроэлектростанций тормозится отсутствием достаточного количества реле и датчиков, а также низким качеством автоматических регуляторов скорости вращения, поставляемых промышленностью.

Задача автоматизации сельских тепловых электростанций, которые строятся в довольно большом количестве, еще не решена. Научно-исследовательские и проектные институты совместно с промышленностью должны решить ее в самое ближайшее время.

В настоящее время ведутся работы по внедрению в сельские электрические сети автоматического регулирования напряжения под нагрузкой, отсутствие которого приводит к перерасходу проводникового металла, уменьшению радиуса действия сетей и росту отклонений напряжения у потребителей. Электропромышленность должна ускорить выпуск достаточного количества силовых трансформаторов 35/10 кВ мощностью 560 ... 1 800 кВА с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой, вольтодобавочных трансформаторов для автоматического регулирования напряжения в сетях высокого и низкого напряжения, а также конденсаторов для продольной компенсации.

В отношении индустриализации строительно-монтажных работ сделаны только первые шаги. По заказу Министерства сельского хозяйства СССР промышленность приступила к изготовлению комплектных сборных подстанций 35/10 кВ мощностью до 1 800 кВА и комплектных потребительских подстанций 10/0,4 кВ мощностью до 100 кВА.

Применение этих подстанций значительно сокращает сроки строительства и снижает их стоимость. Однако Запорожский трансформаторный и Ереванский электромашиностроительный заводы не выпускают их в необходимом количестве.

Как видно из приведенных выше данных, более 60% капиталовложений, необходимых для электрификации сельского хозяйства, приходится на распределение электроэнергии. Если бы удалось снизить затраты на строительство 1 км ли-

нии электропередачи хотя на 10%, то народное хозяйство получило бы экономию в размере более 3 млрд. руб.

Основными путями снижения первоначальных капитальных затрат на распределение электроэнергии являются: дальнейшее внедрение таких экономичных систем, как трехфазная система с использованием земли в качестве одного из проводов (ДПЗ) и трехфазно-однофазная система; увеличение пролетов, особенно в сетях низкого напряжения; применение проводов большой механической прочности (сталеалюминиевых сечением 10, 16 и 25 мм², алдреевых и др.); применение глубоких вводов 35 кВ и разукрупнение подстанций 35/10 кВ; введение в стандарт и внедрение в сельские распределительные сети напряжения 20 кВ; освоение напряжения 35 кВ в качестве распределительного; применение комплектных подстанций; создание и применение облегченных подземных кабелей упрощенной конструкции, особенно в безлесных районах, где сети, выполненные такими кабелями, в технико-экономическом отношении могут конкурировать с воздушными сетями.

Особое значение имеет внедрение в сельские сети долговечных опор. За последние годы у нас все больше применяются железобетонные приставки и деревянные приставки, антисептированные в горяче-холодных ваннах в заводских или полув заводских условиях, а в некоторых районах внедряются железобетонные опоры. Задача состоит в том, чтобы уже с текущего года не допускать ввода в эксплуатацию линий без применения для опор антисептированного дерева или железобетона. Необходимые условия для решения этой задачи созданы.

Во многих строительно-монтажных и эксплуатационных организациях Сельэлектро созданы небольшие мастерские по изготовлению железобетонных приставок и пропитке древесины в горяче-холодных ваннах. По предварительным данным в 1956 г. в мастерских только эксплуатационных организаций Сельэлектро изготовлено более 25 тыс. железобетонных и около 15 тыс. пропитанных в горяче-холодных ваннах приставок.

В узловых точках и на ответвлениях сильно разветвленных сельских сетей 10 кВ обычно устанавливаются секционирующие линейные разъединители. Это несколько облегчает условия эксплуатации, но не решает задачи резкого улучшения надежности и бесперебойности электроснабжения сельских потребителей. Наилучшим способом решения этой задачи была бы замена секционирующих разъединителей облегченными маломасляными столбовыми выключателями на номинальный ток 50 ... 100 а и мощность отключения 50 Мва с встроенными токовыми реле прямого действия и автоматическим повторным включением. Образцы таких выключателей завод «Уралэлектроаппарат» начал разрабатывать еще в 1955 г., но до настоящего времени не наладил их производство.

Для наиболее рационального использования местных энергетических ресурсов, снижения себестоимости электроэнергии и повышения надежности электроснабжения потребителей следует

шире использовать опыт создания местных энергетических систем, а также включения сельских гидро- и теплоэлектростанций в крупные энергосистемы.

Важную роль в обеспечении бесперебойной работы сельских электроустановок играет надежная и дешевая связь. Некоторая работа в этом направлении уже проведена. Калининский радио-электромеханический завод Министерства сельского хозяйства РСФСР выпускает высокочастотные посты связи, которые успешно применяются в некоторых сельских энергосистемах. Однако предстоит проделать еще большую работу по улучшению и удешевлению этих постов, а также по налаживанию связи персонала, обслуживающего линии, с диспетчерскими пунктами и сетевыми районами.

В настоящее время для сельских электросетей приходится использовать в основном то же оборудование и аппаратуру, что и для промышленных и городских сетей. Однако необходимость облегчения и удешевления сельских сетей, отличающихся малой плотностью нагрузок и большой протяженностью, требует, чтобы промышленность разработала и выпустила для них некоторые новые типы оборудования и аппаратуры, например грозозащитную аппаратуру с меньшими пределами токов отключения, предохранители-разъединители в двухфазном исполнении, предохранители повторного действия 10 кВ для наружной и внутренней установки, облегченные линейные выключатели 10 кВ, облегченные провода и кабели, сталеалюминиевые провода сечениями 10, 16 и 25 мм², биметаллические провода и провода из сплавов алюминия большой механической прочности и т. д.

Важнейшей задачей является широкое внедрение электричества в сельскохозяйственное производство. Электрическая энергия в первую очередь должна быть использована для механизации трудоемких работ в животноводстве, на подсобных предприятиях, для освещения, радиофикации, кинофикации, бытового водоснабжения и бытовых электрических приборов. Необходимо постепенно переходить от электрификации отдельных производственных процессов к комплексной электрификации. Разработка системы электрифицированных аппаратов и машин для стационарных процессов сельскохозяйственного производства с учетом зональных особенностей, с широким применением автоматики — первейшая задача научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций. Промышленность должна быстрее освоить производство этих аппаратов и машин и в необходимом количестве снабжать ими колхозы, совхозы и МТС.

Одной из серьезных задач является упорядочение эксплуатации сельских электростанций, линий электропередач и потребительских электроустановок. Основные мероприятия в этой области сводятся к следующему: обеспечение полной загрузки сельских электростанций и подстанций; максимальное использование электрической энергии на производственные цели; улучшение техни-

Метод составления уравнений переходных электромеханических процессов в электрических цепях

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ

Московский энергетический институт

Существует два основных метода исследования переходных электромеханических процессов в электрических цепях:

- 1) физическое моделирование;
- 2) математическое моделирование, которое включает два раздела: а) раздел, использующий физические аналоги; б) раздел, использующий счетно-решающие устройства (интеграторы) непрерывного и дискретного действия.

Метод физического моделирования, получивший большое развитие в работах В. А. Веникова [Л. 1 ... 3], М. П. Костенко [Л. 4 ... 6] и других, заключается в замене мощных вращающихся электрических машин и гидротурбин такими же агрегатами небольших мощностей с соблюдением законов теории подобия. Линии передачи, трансформаторы, дроссели насыщения и статические нагрузки заменяются набором емкостей и индуктивностей, причем для линий передачи используются цепочечные схемы. Иными словами, в данном случае физическая природа модели и оригинала одинакова.

К числу достоинств метода физического моделирования в отношении вращающихся машин следует отнести возможность учета вихревых токов, насыщения, гистерезиса, действительного распределения в пространстве обмоток статора и ротора и других факторов. Недостатком его является трудность изменения параметров отдельных машин, что обычно приводит к необходимости иметь для них ряд сменных роторов. Поэтому в тех случаях, когда параметры машин необходимо менять, целесообразнее пользоваться методом математического моделирования, который позволяет это изменение осуществить гораздо проще. Однако физическое моделирование все же оказывается предпочтительнее в тех случаях, когда система дифференциальных уравнений, описывающих процесс, очень сложна.

Говоря о первом разделе метода математического моделирования [Л. 1, 7 и 8], отметим, что вращающиеся машины заменяются эквивалентными устройствами (электронными схемами, электродинамическими приборами) — физическими аналогами на основе одинаковой структуры их диф-

ференциальных уравнений. При этом модель имеет иную физическую природу, чем оригинал. Если в системе имеются статические элементы, например линии передачи, то они осуществляются так же, как и в предыдущем методе, т. е. для них применяется физическое моделирование. Достоинством этого метода является большая простота изменения отдельных параметров вращающихся машин, поскольку оно сводится к изменению сравнительно легко регулируемых параметров электронных схем или физических аналогов. С другой стороны, поскольку статические элементы цепи представляются набором катушек и конденсаторов, для них не приходится составлять дифференциальных уравнений. Это является большим достоинством первого раздела метода математического моделирования по сравнению со вторым.

Второй раздел метода математического моделирования, состоящий в применении вычислительных машин (интеграторов) для исследования переходных электромеханических процессов в электрических цепях, находит в настоящее время широкое применение. Значение его еще более возрастает с увеличением выпуска недорогих вычислительных машин, позволяющих интегрировать системы нелинейных дифференциальных уравнений с суммарным порядком, равным 20 ... 30.

Этот метод позволяет чрезвычайно легко и в любых пределах менять параметры системы, что достигается несложным регулированием блоков, набирающих коэффициенты отдельных уравнений.

Метод пригоден не только для решения задач электротехники, но и для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений физики, механики, гидродинамики, теплотехники и т. д.; в этом смысле он универсален.

Недостатком его является необходимость использования целого ряда блоков интегратора для учета дифференциальных уравнений статических элементов цепи и, в частности, длинных линий, так как на статические элементы цепи приходится часто большая половина величины суммарного порядка системы дифференциальных уравнений цепи. Однако интеграторы могут быть

ческого обслуживания электрохозяйства; снижение потерь электроэнергии и ее себестоимости; бесперебойное снабжение потребителей энергией необходимого качества; автоматизация и телемеханизация сельских электростанций, сетей и электроустановок.

Необходимо широко развернуть работу по подготовке и повышению квалификации специалистов сельской электрификации, используя для

этого существующую сеть учебных и научных институтов.

Работа научно-исследовательских организаций и вузов должна быть поставлена таким образом, чтобы она способствовала быстрейшему решению задач в области сельской электрификации и обеспечивала широкое внедрение в производство новейших достижений науки и техники и передового опыта.

19.12. 1956



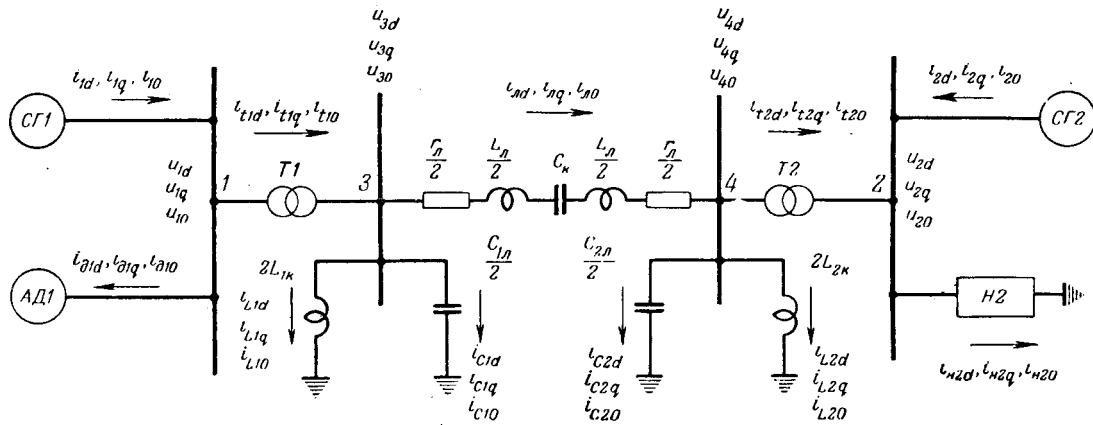


Рис. 1.

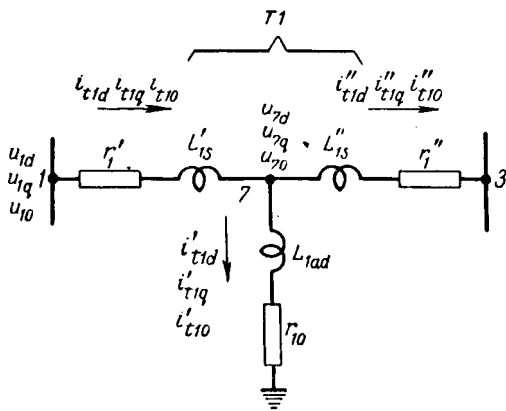


Рис. 2.

построены таким образом, что позволят отображать дифференциальные уравнения только части всей цепи, а остальная часть осуществляется в натуре или в виде физических моделей. Последнее обстоятельство расширяет возможности применения интеграторов указанного вида при исследовании переходных процессов в сложных системах.

Метод составления системы дифференциальных уравнений. Для того чтобы воспользоваться интегратором, необходимо сначала наиболее просто и рационально составить систему дифференциальных уравнений цепи. В дальнейшем будем считать известными дифференциальные уравнения синхронного генератора, отнесенные к координатным осям, жестко связанным с его ротором, уравнения асинхронного двигателя и всех статических элементов цепи (нагрузки, трансформаторы, поперечные емкости, компенсирующие катушки и линии с продольной компенсирующей емкостью), отнесенные к системе координат, вращающейся с произвольной скоростью.

Все нижеприведенные уравнения соответствуют положительным направлениям токов, указанным на рис. 1 и 2.

При составлении дифференциальных уравнений для каждой конкретной системы прежде всего следует наиболее рационально выбрать вращающуюся систему координат, к которой необходимо относить уравнения всех статических элементов цепи. Для симметричных схем уравнения

статических элементов цепи можно относить к осям, жестко связанным с ротором любого из генераторов [Л. 9], что следует из симметрии самой схемы.

Метод составления системы уравнений проиллюстрируем на примере схемы рис. 1, которая практически симметрична.

Отнесем уравнения всех элементов цепи рис. 1 (кроме СГ2) и уравнения, составленные по первому закону Кирхгофа, к координатным осям, жестко связанным с ротором синхронного генератора СГ1.

Уравнения для СГ1 [Л. 10 и 11]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1d} &= -r_{c1} i_{1d} + \frac{d}{dt} (-L_{d1} i_{1d} + M_{f1} i_{1f} + M_{g1} i_{1g}) - \\ &\quad - (-L_{q1} i_{1q} + M_{h1} i_{1h}) \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{1q} &= -r_{c1} i_{1q} + \frac{d}{dt} (-L_{q1} i_{1q} + M_{h1} i_{1h}) + \\ &\quad + (-L_{d1} i_{1d} + M_{f1} i_{1f} + M_{g1} i_{1g}) \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{10} &= -r_{c1} i_{10} - L_{o1} \frac{di_{10}}{dt}; \\ u_{1f} &= r_{f1} i_{1f} + \\ &\quad + \frac{d}{dt} \left(-\frac{3}{2} M_{f1} i_{1d} + L_{f1} i_{1f} + M_{fg1} i_{1g} \right); \\ 0 &= r_{g1} i_{1g} + \\ &\quad + \frac{d}{dt} \left(-\frac{3}{2} M_{f1} i_{1d} + L_{g1} i_{1g} + M_{fg1} i_{1f} \right); \\ 0 &= r_{h1} i_{1h} + \frac{d}{dt} \left(-\frac{3}{2} M_{h1} i_{1q} + L_{h1} i_{1h} \right); \\ T_{o1} - \frac{3}{2} [(L_{d1} - L_{q1}) i_{1d} i_{1q} - M_{f1} i_{1f} i_{1g} - \\ &\quad - M_{g1} i_{1g} i_{1q} + M_{h1} i_{1h} i_{1d}] = J_1 \frac{d^2 \theta_1}{dt^2}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Аналогично путем замены индекса 1 на индекс 2 запишутся уравнения для СГ2, так как уравнения его относим к осям, жестко связанным с его ротором.

Уравнения для АД1 [Л. 10 и 12]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1d} &= r_{\partial 1} i_{\partial 1d} + L_{C11} \frac{di_{\partial 1d}}{dt} + L_{ad1} \frac{di_{1pd}}{dt} - \\ &\quad - (L_{C11} i_{\partial 1q} + L_{ad1} i_{1pq}) \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{1q} &= r_{\partial 1} i_{\partial 1q} + L_{C11} \frac{di_{\partial 1q}}{dt} + L_{ad1} \frac{di_{1pq}}{dt} + \\ &\quad + (L_{C11} i_{\partial 1d} + L_{ad1} i_{1pd}) \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{10} &= r_{\partial 1} i_{\partial 10} + L_{C01} \frac{di_{\partial 10}}{dt}; \\ 0 &= r_{p1} i_{1pd} + L_{p11} \frac{di_{1pd}}{dt} + L_{ad1} \frac{di_{\partial 1d}}{dt} - \\ &\quad - (L_{ad1} i_{\partial 1q} + L_{p11} i_{1pq}) \left(\frac{d\theta_1}{dt} - \omega_{\partial 1} \right); \\ 0 &= r_{p1} i_{1pq} + L_{p11} \frac{di_{1pq}}{dt} + L_{ad1} \frac{di_{\partial 1q}}{dt} + \\ &\quad + (L_{ad1} i_{\partial 1d} + L_{p11} i_{1pd}) \left(\frac{d\theta_1}{dt} - \omega_{\partial 1} \right); \\ 0 &= r_{p1} i_{1p0} + L_{p01} \frac{di_{1p0}}{dt}; \\ \frac{3}{2} L_{ad1} (i_{1pd} i_{\partial 1q} - i_{1pq} i_{\partial 1d}) - T_{C1} &= J_{\partial 1} \frac{d\omega_{\partial 1}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнения первого закона Кирхгофа для точки 1:

$$\left. \begin{aligned} i_{1d} - i_{\partial 1d} - i_{11d} &= 0; \\ i_{1q} - i_{\partial 1q} - i_{11q} &= 0; \\ i_{10} - i_{\partial 10} - i_{110} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнения для статической нагрузки Н2 [Л. 9 и 10]:

$$\left. \begin{aligned} u_{2d} \cos(\theta_2 - \theta_1) - u_{2q} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ - r_{\kappa 2} i_{\kappa 2d} - L_{\kappa 2} \frac{di_{\kappa 2d}}{dt} + L_{\kappa 21} i_{\kappa 2q} \frac{d\theta_1}{dt} &= 0; \\ u_{2d} \sin(\theta_2 - \theta_1) + u_{2q} \cos(\theta_2 - \theta_1) - \\ - r_{\kappa 2} i_{\kappa 2q} - L_{\kappa 21} \frac{di_{\kappa 2q}}{dt} - L_{\kappa 21} i_{\kappa 2d} \frac{d\theta_1}{dt} &= 0; \\ u_{20} - r_{\kappa 2} i_{\kappa 20} - L_{\kappa 20} \frac{di_{\kappa 20}}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Появление множителей $\cos(\theta_2 - \theta_1)$ и $\sin(\theta_2 - \theta_1)$ объясняется тем, что напряжение на зажимах СГ2 отнесено к осям, жестко связанным с его ротором.

Уравнения первого закона Кирхгофа для точки 2 [Л. 9] с учетом принятых в схеме рис. 1 положительных направлений токов будут:

$$\left. \begin{aligned} i_{12d} + i_{2d} \cos(\theta_2 - \theta_1) - i_{2q} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ - i_{\kappa 2d} &= 0; \\ i_{12q} + i_{2d} \sin(\theta_2 - \theta_1) + i_{2q} \cos(\theta_2 - \theta_1) - \\ - i_{\kappa 2q} &= 0; \\ i_{120} + i_{20} - i_{\kappa 20} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следует отметить, что если уравнения статической нагрузки Н2 отнести к осям, жестко связанным с ротором СГ2, то насколько упростятся уравнения (4), настолько же усложнятся уравнения (5).

Действительно, относя уравнения статической нагрузки Н2 к осям, жестко связанным с ротором СГ2, получим [Л. 9 и 10]:

$$\left. \begin{aligned} u_{2d} - r_{\kappa 2} i_{\kappa 2d} - L_{\kappa 21} \frac{di_{\kappa 2d}}{dt} + \\ + L_{\kappa 21} i_{\kappa 2q} \frac{d\theta_2}{dt} &= 0; \\ u_{2q} - r_{\kappa 2} i_{\kappa 2q} - L_{\kappa 21} \frac{di_{\kappa 2q}}{dt} - \\ - L_{\kappa 21} i_{\kappa 2d} \frac{d\theta_2}{dt} &= 0; \\ u_{20} - r_{\kappa 2} i_{\kappa 20} - L_{\kappa 20} \frac{di_{\kappa 20}}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4a)$$

При тех же условиях уравнения первого закона Кирхгофа для точки 2 запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} i_{12d} + i_{2d} \cos(\theta_2 - \theta_1) - i_{2q} \sin(\theta_2 - \theta_1) - \\ - i_{\kappa 2d} \cos(\theta_2 - \theta_1) + i_{\kappa 2q} \sin(\theta_2 - \theta_1) &= 0; \\ i_{12q} + i_{2d} \sin(\theta_2 - \theta_1) + i_{2q} \cos(\theta_2 - \theta_1) - \\ - i_{\kappa 2d} \sin(\theta_2 - \theta_1) - i_{\kappa 2q} \cos(\theta_2 - \theta_1) &= 0; \\ i_{120} + i_{20} - i_{\kappa 20} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

Далее учтем в схеме замещения трансформатора Т1 ветвь тока холостого хода (рис. 2). Для ветви 1-7 первичной обмотки имеем [Л. 9 и 10]:

$$\left. \begin{aligned} u_{7d} &= u_{1d} - r_1' i_{11d} - L_{1s1}' \frac{di_{11d}}{dt} + \\ &\quad + L_{1s1}' i_{11q} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{7q} &= u_{1q} - r_1' i_{11q} - L_{1s1}' \frac{di_{11q}}{dt} - \\ &\quad - L_{1s1}' i_{11d} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{70} &= u_{10} - r_1' i_{110} - L_{1s0}' \frac{di_{110}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Аналогично для ветви 7-3 вторичной обмотки получим:

$$\left. \begin{aligned} u_{3d} &= u_{7d} - r_1'' i_{11d}'' - L_{1s1}'' \frac{di_{11d}''}{dt} + \\ &\quad + L_{1s1}'' i_{11q}'' \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{3q} &= u_{7q} - r_1'' i_{11q}'' - L_{1s1}'' \frac{di_{11q}''}{dt} - \\ &\quad - L_{1s1}'' i_{11d}'' \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{30} &= u_{70} - r_1'' i_{110}'' - L_{1s0}'' \frac{di_{110}''}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для ветви холостого хода

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{7d} - r_{10} i'_{11d} - L_{1ad1} \frac{di'_{11d}}{dt} + \\ &\quad + L_{1ad1} i'_{11q} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{7q} - r_{10} i'_{11q} - L_{1ad1} \frac{di'_{11q}}{dt} - \\ &\quad - L_{1ad1} i'_{11d} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{70} - r_{10} i'_{110} - L_{1ad0} \frac{di'_{110}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Уравнения первого закона Кирхгофа для точки 7:

$$\left. \begin{aligned} i_{11d} - i'_{11d} - i''_{11d} &= 0; \\ i_{11q} - i'_{11q} - i''_{11q} &= 0; \\ i_{110} - i'_{110} - i''_{110} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Уравнения для компенсирующей катушки $2L_{1\kappa}$:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{3d} - 2r_{1\kappa} i_{L1d} - 2L_{1\kappa1} \frac{di_{L1d}}{dt} + \\ &\quad + 2L_{1\kappa1} i_{L1q} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{3q} - 2r_{1\kappa} i_{L1q} - 2L_{1\kappa1} \frac{di_{L1q}}{dt} - \\ &\quad - 2L_{1\kappa1} i_{L1d} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{30} - 2r_{1\kappa} i_{L10} - 2L_{1\kappa0} \frac{di_{L10}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выше были рассмотрены ветви первичной и вторичной обмоток трансформатора TI , ветвь его холостого хода и ветвь компенсирующей катушки как цепи, состоящие из r и L . Если взаимную индукцию между фазами этих ветвей можно не учитывать, то выражения параметров упростятся [Л. 10]. Так, например, для компенсирующей катушки $2L_{1\kappa}$ получим:

$$L_{1\kappa} = L_{1\kappa1} = L_{1\kappa0}. \quad (11)$$

Уравнения для емкости $\frac{C_{1a}}{2}$ линии можно получить из равенств (3, 5)...(3, 7), приведенных в [Л. 10], если в них приравнять:

$$C_3 = \frac{C_{1a}}{2}, \quad i_{C3d} = i_{C1d}, \quad i_{C3q} = i_{C1q}, \quad i_{C30} = i_{C10}$$

и $\theta_3 = \theta_1$, так как в точке 3 (рис. 1) синхронный генератор не подключен, и напряжение u_3 непосредственно отнесено к осям, жестко связанным с ротором $СГЛ$:

$$\left. \begin{aligned} u_{3d} &= \frac{2}{C_{1a}} \int i_{C1d} dt + \int u_{3q} \frac{d\theta_1}{dt} dt; \\ u_{3q} &= \frac{2}{C_{1a}} \int i_{C1q} dt - \int u_{3d} \frac{d\theta_1}{dt} dt; \\ u_{30} &= \frac{2}{C_{1a}} \int i_{C10} dt. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнения первого закона Кирхгофа для точки 3:

$$\left. \begin{aligned} i''_{11d} - i_{L1d} - i_{C1d} - i_{\lambda d} &= 0; \\ i''_{11q} - i_{L1q} - i_{C1q} - i_{\lambda q} &= 0; \\ i''_{110} - i_{\lambda 10} - i_{C10} - i_{\lambda 0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Уравнения для линии (r_{λ} , L_{λ}) с включенной компенсирующей емкостью C_{κ} получим, например, из равенств (7) и (12):

$$\left. \begin{aligned} u_{4d} &= u_{3d} - r_{\lambda} i_{\lambda d} - L_{\lambda 1} \frac{di_{\lambda d}}{dt} + \\ &\quad + L_{\lambda 1} i_{\lambda q} \frac{d\theta_1}{dt} - \frac{1}{C_{\kappa}} \int i_{\lambda d} dt + \\ &\quad + \int \left(u_{4q} - u_{3q} + r_{\lambda} i_{\lambda q} + L_{\lambda 1} \frac{di_{\lambda q}}{dt} + \right. \\ &\quad \left. + L_{\lambda 1} i_{\lambda d} \frac{d\theta_1}{dt} \right) \frac{d\theta_1}{dt} dt; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{4q} &= u_{3q} - r_{\lambda} i_{\lambda q} - L_{\lambda 1} \frac{di_{\lambda q}}{dt} - \\ &\quad - L_{\lambda 1} i_{\lambda d} \frac{d\theta_1}{dt} - \frac{1}{C_{\kappa}} \int i_{\lambda q} dt - \\ &\quad - \int \left(u_{4d} - u_{3d} + r_{\lambda} i_{\lambda d} + L_{\lambda 1} \frac{di_{\lambda d}}{dt} - \right. \\ &\quad \left. - L_{\lambda 1} i_{\lambda q} \frac{d\theta_1}{dt} \right) \frac{d\theta_1}{dt} dt; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$u_{40} = u_{30} - r_{\lambda} i_{\lambda 0} - L_{\lambda 0} \frac{di_{\lambda 0}}{dt} - \frac{1}{C_{\kappa}} \int i_{\lambda 0} dt. \quad (16)$$

Уравнения для емкости $\frac{C_{2a}}{2}$ линии будут аналогичны (12):

$$\left. \begin{aligned} u_{4d} &= \frac{2}{C_{2a}} \int i_{C2d} dt + \int u_{4q} \frac{d\theta_1}{dt} dt; \\ u_{4q} &= \frac{2}{C_{2a}} \int i_{C2q} dt - \int u_{4d} \frac{d\theta_1}{dt} dt; \\ u_{40} &= \frac{2}{C_{2a}} \int i_{C20} dt. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Уравнения для компенсирующей катушки $2L_{2\kappa}$ будут аналогичны (10):

$$\left. \begin{aligned} 0 &= u_{4d} - 2r_{2\kappa} i_{L2d} - 2L_{2\kappa1} \frac{di_{L2d}}{dt} + \\ &\quad + 2L_{2\kappa1} i_{L2q} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{4q} - 2r_{2\kappa} i_{L2q} - 2L_{2\kappa1} \frac{di_{L2q}}{dt} - \\ &\quad - 2L_{2\kappa1} i_{L2d} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ 0 &= u_{40} - 2r_{2\kappa} i_{L20} - 2L_{2\kappa0} \frac{di_{L20}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Уравнения первого закона Кирхгофа для точки 4:

$$\left. \begin{aligned} i_{4d} - i_{C2d} - i_{L2d} - i_{I2d} &= 0; \\ i_{4q} - i_{C2q} - i_{L2q} - i_{I2q} &= 0; \\ i_{40} - i_{C20} - i_{L20} - i_{I20} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Поскольку метод учета ветви тока холостого хода в схеме замещения показан для трансформатора $T1$, запишем уравнения для трансформатора $T2$ без учета этого фактора. Эти уравнения можно получить из равенств (1,17)...(1,19), приведенных в [Л. 10], если учесть, что напряжение в точке 4 отнесено непосредственно к координатным осям, жестко связанным с ротором $СГ1$; поэтому нужно принять $\theta_3 = \theta_1$. Кроме того, приводя в соответствие обозначения фиг. 1,1, приведенной в [Л. 10] и рис. 1 настоящей статьи, получим:

$$\left. \begin{aligned} u_{3d} &= u_{4d}; \quad u_{3q} = u_{4q}; \quad u_{30} = u_{40}; \\ r_{12} &= r_{I2}; \quad L_{12p} = L_{I21}; \quad L_{120} = L_{I20}; \\ i_{12d} &= i_{I2d}; \quad i_{12q} = i_{I2q}; \quad i_{120} = i_{I20}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Тогда для ветви трансформатора $T2$ имеем:

$$\left. \begin{aligned} u_{2d} \cos(\theta_1 - \theta_2) + u_{2q} \sin(\theta_1 - \theta_2) &= \\ = u_{4d} - r_{I2} i_{I2d} - L_{I21} \frac{di_{I2d}}{dt} + L_{I21} i_{I2q} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ - u_{2d} \sin(\theta_1 - \theta_2) + u_{2q} \cos(\theta_1 - \theta_2) &= \\ = u_{4q} - r_{I2} i_{I2q} - L_{I21} \frac{di_{I2q}}{dt} - L_{I21} i_{I2d} \frac{d\theta_1}{dt}; \\ u_{20} &= u_{40} - r_{I2} i_{I20} - L_{I20} \frac{di_{I20}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Так как уравнения отдельных элементов цепи мы считаем известными, то вся система уравнений составляется из отдельных их блоков, записываемых сразу для каждого элемента цепи.

Если в каком-нибудь синхронном генераторе или компенсирующей катушке необходимо учесть зависимость индуктивности от насыщения стали, то этот элемент цепи следует выделить и, аппроксимировав кривую намагничивания, составить заново его дифференциальные уравнения.

Отметим, что уравнения для всех нулевых составляющих представляют отдельную систему и решаются независимо от других уравнений. Их число для схемы рис. 1 равно 18.

Определение суммарного порядка системы нелинейных дифференциальных уравнений по структуре схемы. На основании изложенного выше можно, не составляя дифференциальных уравнений, определить по структуре схемы их суммарный порядок. При этом следует иметь в виду следующее:

1. Для синхронной машины (генератор, компенсатор или двигатель) с продольной и поперечно успокоительными обмотками суммарный порядок уравнений равен 7*, если кроме нее в цепи

имеется хотя бы еще одна синхронная машина, т. е. машина, обладающая магнитной или электрической несимметрией [уравнения системы (1), кроме третьего].

Порядок уравнения движения ротора каждой из синхронных машин равен 2.

Если в цепи имеется только одна синхронная машина, то суммарный порядок уравнений для нее будет равен 6, потому что в этом случае дифференциальное уравнение движения ротора будет первого порядка, так как угол θ ни в одно из уравнений не входит (заменой переменных $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$ и $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ порядок уменьшается на единицу).

2. Неучет каждой из успокоительных обмоток синхронной машины уменьшает общий порядок ее дифференциальных уравнений на единицу.

3. Суммарный порядок дифференциальных уравнений асинхронной машины равен 5. Таким образом, включение в цепь каждой новой асинхронной машины увеличивает суммарный порядок системы дифференциальных уравнений на 5.

4. Уравнения первого закона Кирхгофа для точек разветвления не являются дифференциальными и суммарного порядка уравнений системы не повышают.

5. Цепи статоров машин (неподвижные цепи) следует разбивать на простейшие независимые контуры и для них составлять дифференциальные уравнения как для продольных, так и поперечных составляющих. В результате порядок дифференциального уравнения для каждого из контуров удваивается.

6. Если линия, сеть или статическая нагрузка представляются катушкой, имеющей сопротивление и индуктивность, то последовательное включение ее со статором какой-либо из машин не увеличивает суммарного порядка дифференциальных уравнений системы.

7. Если в цепь включен трансформатор, то при неучете его тока холостого хода он представляется в виде катушки. Если же ток холостого хода учитывается, то в схеме замещения появляется ветвь холостого хода (дополнительный контур), что в связи с необходимостью рассматривать уравнения для продольных и поперечных составляющих увеличивает суммарный порядок дифференциальных уравнений цепи на 2.

8. Если в цепи отсутствуют синхронные машины (например, когда один или несколько асинхронных двигателей или статических нагрузок и т. д. питаются от шин бесконечной мощности), то нет необходимости составлять уравнения в отдельности для продольных и поперечных составляющих. Если ввести комплексы мгновенных значений токов и напряжений, статическая нагрузка или линия передачи (каждая в отдельности) будут представлены дифференциальными уравнениями первого порядка, а асинхронный двигатель — дифференциальным уравнением третьего

* При этом дифференциальные уравнения для нулевых составляющих в расчет не принимаются.

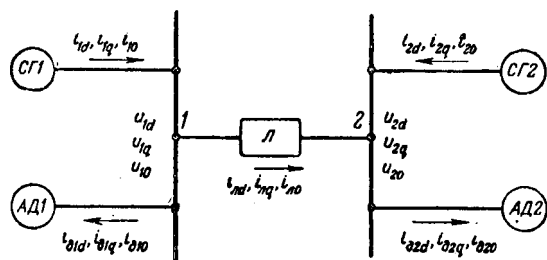


Рис. 3.

порядка. В этом случае включение в цепь каждой новой асинхронной машины увеличивает суммарный порядок системы дифференциальных уравнений на 3.

Определим суммарный порядок системы дифференциальных уравнений для схемы рис. 3.

В схеме рис. 3 неподвижная часть цепи разбивается на три контура: а) статор *СГ1*—статор *АД1*; б) статор *АД1*—линия—статор *АД2*; в) статор *СГ2*—статор *АД2*, для каждого из которых при необходимости учета продольных и поперечных составляющих дифференциальное уравнение будет второго порядка, что составит общий порядок, равный 6. Каждая из синхронных машин дает общий порядок остальных уравнений, равный 5, а каждая из асинхронных — общий порядок, равный 3. Таким образом, суммарный порядок дифференциальных уравнений для всей цепи будет равен 22.

В схеме рис. 1 при учете токов холостого хода трансформаторов *Т1* и *Т2* неподвижная часть цепи разбивается на 9 простейших контуров, например, следующим образом:

а) статор *СГ1*—статор *АД1* (при необходимости учета продольных и поперечных составляющих порядок уравнений будет равен 2); б) статор *АД1*—ветвь холостого хода схемы замещения трансформатора *Т1* (рис. 2) (порядок уравнений — 2); в) ветвь холостого хода схемы замещения трансформатора *Т1* — компенсирующая катушка $2L_{1\kappa}$ (порядок уравнений — 2); г) компенсирующая катушка $2L_{1\kappa}$ — емкость линии $\frac{C_{1\lambda}}{2}$

(порядок уравнений — 4); д) емкость линии $\frac{C_{1\lambda}}{2}$ — линия — емкость линии $\frac{C_{2\lambda}}{2}$ (порядок уравнений — 4); е) емкость линии $\frac{C_{2\lambda}}{2}$ — компенсирующая катушка $2L_{2\kappa}$ (порядок уравнений — 4); ж) компенсирующая катушка $2L_{2\kappa}$ — ветвь холостого хода схемы замещения трансформатора *Т2* (порядок уравнений — 2); з) ветвь холостого хода схемы замещения трансформатора *Т2* — статическая нагрузка *Н2* (порядок уравнений — 2); и) статор *СГ2* — статическая нагрузка *Н2* (порядок уравнений — 2), что составит в сумме порядок, равный 24. Из этой цифры на долю трансформаторов *Т1* и *Т2*, линии и нагрузки *Н2*, т. е. статических элементов цепи, приходится общий порядок,

равный 18. Для двух синхронных генераторов общий порядок остальных уравнений равен 10; для асинхронного двигателя — 3.

Таким образом, суммарный порядок дифференциальных уравнений для всей цепи будет равен 37.

При замене линии не одним звеном, а несколькими Т- или П-образными звеньями, доля элементов линии (последовательно включенных индуктивностей и параллельно включенных емкостей) в суммарном порядке системы дифференциальных уравнений цепи возрастет еще больше. Это обстоятельство имеет большое значение при выборе метода решения полученной системы дифференциальных уравнений.

При неучете продольных и поперечных успокоительных обмоток у обоих синхронных генераторов суммарный порядок уравнений уменьшается на 4 и будет равен 33. Если к тому же пренебречь ветвями холостого хода в схемах замещения обоих трансформаторов, то суммарный порядок уравнений уменьшится еще на 4 и будет равен 29. В случае пренебрежения обоими компенсирующими катушками $2L_{1\kappa}$ и $2L_{2\kappa}$ суммарный порядок уравнений уменьшится еще на 4 и будет равен 25.

Характерно, что даже в последнем случае обе синхронные и одна асинхронная машины вместе обусловят суммарный порядок дифференциальных уравнений, равный 13; оставшаяся величина (12) придется по-прежнему на линию передачи.

Литература

1. В. А. Веников. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.
2. В. А. Веников и А. В. Иванов-Смоленский. Синхронный генератор для динамического моделирования электрических систем. Электричество, № 8, 1951.
3. В. А. Веников и др. Краткое описание динамических моделей электрических систем. МЭИ, 1955.
4. М. П. Костенко и Е. Д. Трейвиш. Моделирование электрических машин и трансформаторов при экспериментальном исследовании устойчивости параллельной работы электрических станций. Труды ЛПИ, № 1, 1946.
5. М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 9, 1951.
6. М. П. Костенко. Моделирование электромашиного оборудования при изучении устойчивости параллельной работы энергосистем, связанных с дальними линиями передачи. Известия Академии наук СССР (Отделение технических наук), № 12, 1953.
7. В. Л. Лоссиевский. Применение теории подобия и динамических аналогов к задачам моделирования объектов и процессов регулирования. Госэнергоиздат, 1951.
8. В. А. Трапезников. Математическое моделирование динамических систем. Электричество, № 8, 1955.
9. С. В. Страхов. О выборе системы координат при расчете переходных процессов в цепях с синхронными машинами. Электричество, № 6, 1954.
10. С. В. Страхов. Уравнения переходных процессов в статических и вращающихся элементах электрических цепей. Отчет по научно-исследовательской работе. МЭИ, 1956.
11. R. E. Vowels. Transient Analysis of Synchronous Machines. Proc. Inst. El. Eng., т. 99. ч. IV, № 3, 1952.
12. А. А. Янко-Триницкий. Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения. Электричество, № 3, 1951.

[5.10. 1956]



Закон индукции для емкостной машины

Инж. А. А. БАЛЬЧИТИС

г. Воркута

Введение. Основные уравнения классической электродинамики, первое и второе уравнения Максвелла, указывают два возможных способа преобразования механической энергии в электрическую. Так, согласно первому уравнению Максвелла¹

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

такое преобразование возможно при изменении электрического поля во времени, т. е. путем механического воздействия на электрическое поле возможно получение связанного с ним в пространстве магнитного поля.

Согласно второму уравнению

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

возможно получение электрического поля изменением связанного с ним магнитного поля.

Второе уравнение Максвелла явилось обобщением опытного закона электромагнитной индукции Фарадея

$$E = B \cdot l \cdot v, \quad (3)$$

открытого в 1831 г. и лежащего в основе создания большого количества разнообразных электрических машин, известных под общим названием электромагнитных машин.

Машины, работающие на принципе механического изменения электрического поля (первое уравнение Максвелла), значительно менее известны и получили название емкостных. Применяются эти машины для получения высоких и сверхвысоких напряжений в исследовательских целях.

Длительное время существовало мнение о бесперспективности емкостных машин. Успехи в развитии электромагнитных машин отодвигали на задний план емкостные машины. Препятствием для развития емкостных машин служило также отсутствие удовлетворительной теории. Теория этих машин строилась на основе электростатики. Емкостная машина является преобразователем одного вида энергии в другой, и применять выводы электростатики в этом случае нельзя, так как электростатическое поле именно характерно тем, что в нем невозможно преобразование энергии.

Емкостная машина обладает рядом ценных особенностей. Так, электромагнитную машину постоянного тока весьма трудно осуществить на напряжение выше 15 кВ. Емкостная же машина, конструктивно более простая, чем электромагнитная машина, может быть построена на напряжение порядка от 5 до 5000 кВ и выше, причем мощность такой машины может достигать нескольких сот мегаватт при весьма высоком к. п. д.

Значительное место в исследованиях емкостных машин занимают теоретические и экспериментальные работы советских ученых. А. Ф. Иоффе и В. М. Гохберг разработали наглядную теорию емкостных генераторов, предложили и построили ряд интересных емкостных машин, нашедших практическое применение [Л. 1].

А. Е. Каплянский в 1938 г. разработал общую аналитическую теорию электромагнитных и емкостных машин, предложенную Олендорфом.

В своей работе [Л. 2] А. Е. Каплянский при построении общей теории электрических машин исходил из уравнений Лагранжа и доказал, что превращение механической энергии в электрическую и обратно возможно только при переменных индуктивностях или емкостях.

Цель настоящей работы на основе анализа работы существующего типа емкостной машины получить основное соотношение — закон индукции для этой машины.

Обобщением этого закона, очевидно, должно служить первое уравнение Максвелла.

Принцип работы и рабочий цикл емкостной машины. Почти все современные емкостные машины работают по схеме, предложенной Теплером [Л. 3]. Рассмотрим работу простейшей емкостной машины с независимым возбуждением (рис. 1).

Емкостная машина работает на принципе изменения (при вращении ротора) емкостей, поэтому основным конструктивным элементом ее являются обкладки 1 и 2 статора и ротора, образующие переменную емкость машины. Конструктивно возможно выполнение обкладок ротора и статора — активных поверхностей машины в виде цилиндрических или дисковых элементов или в виде стержней [Л. 4].

На одном валу с ротором находятся коллекторы 3 и 4 с прилегающими к ним щетками 5 и 6.

Для возбуждения машины к ротору подводится напряжение — U_1 .

А. Ф. Иоффе предложил рабочий цикл для емкостной машины в координатах C, U или Q, U . Такой рабочий цикл аналогичен циклу идеальной четырехтактной паровой машины.

В координатах C, U (рис. 2) можно наглядно представить процесс изменения потенциала системы проводников, образующих емкостную машину, при изменении ее емкости.

В координатах Q, U (рис. 3) можно показать процесс изменения величины удерживаемого системой заряда в зависимости от ее емкости.

В показанном на рис. 1 положении ротора машины емкость системы статор—ротор максимальна и равна C_1 . Потенциал ротора равен $-U_1$, а потенциал статора U_0 . В результате электростатической индукции на обкладке статора появляется заряд q_1 , по величине равный заряду обкладки ротора, но противоположного знака. Этому состоянию машины соответствуют точки A и A' рабочего цикла, выражаемого в координатах C, U

¹ Все соотношения даются в абсолютной практической рационализованной системе единиц.

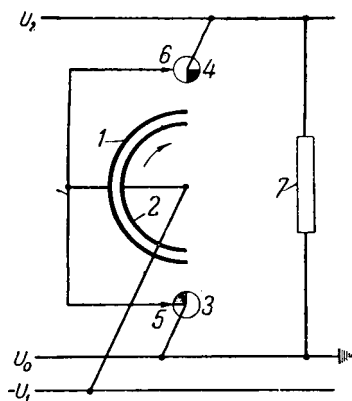
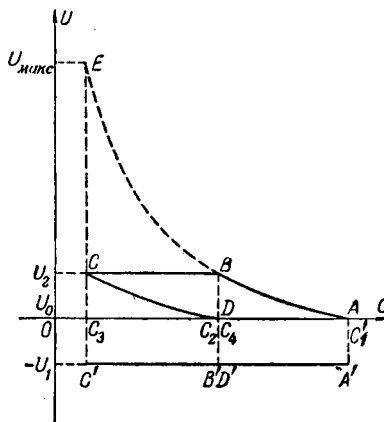
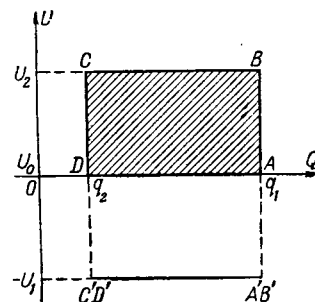


Рис. 1. Схема емкостной машины независимого возбуждения.

1 и 2—обкладки статора и ротора; 3 и 4—коллекторы; 5 и 6—щетки; 7—нагрузка.

Рис. 2. Рабочий цикл емкостной машины в координатах C, U .Рис. 3. Рабочий цикл емкостной машины в координатах Q, U .

и Q, U (рис. 2 и 3). При этом точка A определяет соответствующие значения величин для обкладки статора, а точка A' — величин для обкладки ротора.

Поворот ротора по часовой стрелке приведет к изменению емкости системы. Так как щетки 5 и 6 окажутся изолированными, то при уменьшении емкости машины потенциал статора будет повышаться. Во время этого процесса заряд как статора, так и ротора остается неизменным и равным C, U , чему соответствует участок AB цикла в координатах Q, U , поэтому изменение напряжения и емкости будет происходить по равнопосторонней гиперболы.

При повороте ротора на 90° емкость системы уменьшится до величины

$$C_2 = \frac{C_1}{2},$$

а потенциал системы возрастет до величины

$$U_2 = \frac{q_1}{C_2} = \frac{2q_1}{C_1} = 2U_1,$$

чему соответствует точка B рабочих циклов машины.

При дальнейшем вращении ротора обкладка статора, потенциал которой равен U_2 , посредством щетки 6 и коллектора 4 соединяется с высоковольтным электродом. С уменьшением емкости до минимальной величины C_3 заряд уменьшается на величину

$$q_1 - q_2 = (C_2 - C_3)U_2$$

(точка C).

Далее статор отключается от высоковольтного электрода. Емкость системы при неизменном заряде q_2 увеличивается до значения C_4 , что сопровождается понижением потенциала до величины U_0 (точка D).

На последнем участке рабочего цикла машины (отрезок DA) при увеличении ее емкости от C_4 до C_1 от низковольтного источника переходит заряд, равный $q_1 - q_2$.

Следовательно, за полный рабочий цикл от источника зарядов с потенциалом U_0 к высоко-

вольтному электроду с потенциалом U_2 переносится заряд, равный $q_1 - q_2$.

Механическая работа, затрачиваемая на перенос зарядов с эквипотенциальной поверхности U_0 на поверхность U_2 , определяется условием

$$W = (q_1 - q_2)(U_2 - U_0).$$

Емкостная машина обратима, и весь рабочий цикл можно провести в обратном направлении. В таком случае высоковольтный источник будет отдавать свой заряд, а низковольтный — получать. Разность между величинами энергии высоковольтного и низковольтного источников перейдет в механическую работу.

Нами рассмотрен рабочий цикл для идеальной емкостной машины. В реальной машине необходимо учесть потери, определяемые трением, омическими и диэлектрическими потерями в проводниках и изоляторах и др.

Величина максимального напряжения U_{\max} , развиваемого генератором (точка E , рис. 2), определяется наименьшей возможной емкостью C_3 при отключении системы от высоковольтного электрода из условия

$$C_1 U_1 = C_3 U_{\max} = \text{const.}$$

Ток при максимальном напряжении U_{\max} равен нулю, так как при этом $C_2 = C_3$, откуда следует:

$$q_1 - q = (C_2 - C_3)U_2 = 0.$$

Таким образом, U_{\max} является напряжением холостого хода машины.

Согласно общей теории электрических машин уравнения, определяющие электрическое состояние машины, являются уравнениями напряжения для машины, работающей с использованием принципа электромагнитной индукции, и тока — для емкостной машины. Следовательно, в емкостном генераторе, если пренебречь внутренними потерями в машине, индуцируется ток. Напряжение на зажимах генератора будет зависеть от его нагрузки.

Действительно, если за один цикл емкостного генератора на высоковольтный электрод передает-

ся заряд q , то за n оборотов в 1 сек будет передан заряд, равный nq . Ток нагрузки определится равенством

$$i = nq = (C_2 - C_3) \cdot n \cdot U_2. \quad (4)$$

При неизменном U_2 и постоянной скорости вращения генератор будет отдавать средний ток неизменного значения.

Соотношение (4) можно привести к более простому виду, если принять $C_3 = 0$, что имеет место в идеальной машине:

$$i = C_2 \cdot n \cdot U_2. \quad (5)$$

Закон индукции для емкостной машины. Соотношения (4) и (5) дают среднее значение тока, индуцируемого емкостной машиной. Чтобы получить мгновенное значение тока, необходимо выделить из рабочего цикла машины участок BC (рис. 2), так как только в этот момент во внешней цепи машины (нагрузка) протекает ток. На этом участке рабочего цикла машины величина мгновенного значения тока определится уравнением

$$i = U_2 \frac{dC}{dt},$$

или в общем случае

$$i = U \frac{dC}{dt}, \quad (6)$$

которое и должно послужить исходным при выводе закона индукции для емкостной машины.

Рабочая емкость машины определяется ее геометрическими размерами и величиной диэлектрической проницаемости $\epsilon\epsilon_0$ изолятора, заполняющего рабочий зазор машины δ :

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 s}{\delta} = \epsilon\epsilon_0 \frac{a \cdot \Delta b}{\delta},$$

где $s = a \cdot \Delta b$ — площадь перекрытия обкладок статора ротором;

a — линейный размер обкладок в направлении, перпендикулярном направлению вращения ротора;

Δb — приращение линейного размера обкладок в направлении вращения ротора.

Подставив значение C в (6), получим:

$$i = U \frac{dC}{dt} = \frac{\epsilon\epsilon_0 U}{\delta} a \frac{d(\Delta b)}{dt}$$

или

$$i = \frac{\epsilon\epsilon_0 U}{\delta} a \frac{db}{dt}. \quad (7)$$

Уравнение (7) можно значительно упростить и привести к виду, математически аналогичному закону электромагнитной индукции:

$$i = D \cdot a \cdot v, \quad (8)$$

где $D = \epsilon\epsilon_0 E = \frac{\epsilon\epsilon_0 U}{\delta}$ — электрическое смещение поля (индукция) в рабочем зазоре машины;

$v = \frac{db}{dt}$ — линейная скорость перемещения обкладки ротора.

Полученная формула (8) является выражением закона индукции для емкостной машины.

Аналогия формул (3) и (8) законов электромагнитной индукции и закона индукции для емкостной машины не случайна, так как подобно первому и второму уравнениям Максвелла они выражают единый физический электромагнитный процесс поля, в котором проявляются силы электрической и магнитной природы.

При изменении площади перекрытия обкладки статора ротором на величину

$$ds = a \cdot db$$

происходит изменение потока вектора электрического смещения N на величину

$$dN = D \cdot ds = D \cdot a \cdot db.$$

В единицу времени произойдет изменение потока вектора электрического смещения на величину

$$\frac{dN}{dt} = D \cdot a \frac{db}{dt} = D \cdot a \cdot v. \quad (9)$$

Сопоставлением равенств (8) и (9) получаем новое выражение закона индукции для емкостной машины:

$$i = \frac{dN}{dt}, \quad (10)$$

т.е. ток, индуцируемый емкостной машиной, равен скорости изменения потока вектора электрического смещения в рабочем зазоре машины.

Равенство (10) нетрудно свести к формулировке (1) первого уравнения Максвелла. Следовательно, общим выражением закона индукции (индукции тока) для емкостной машины служит первое уравнение Максвелла.

В общем случае, когда обкладка-проводник имеет произвольную форму и движется в неоднородном электрическом поле, можно написать выражение для бесконечно малого тока di , индуцируемого на участке обкладки (проводника) da .

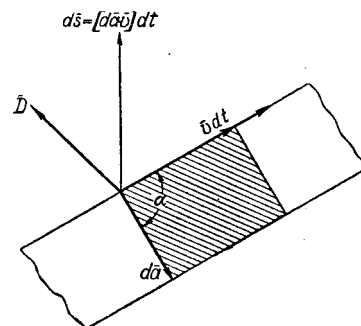


Рис. 4.

Пусть da — вектор, направленный перпендикулярно оси проводника в сторону, условно принимаемую положительной, и по величине равный ширине рассматриваемого участка. Если вектор скорости v составляет угол α с вектором da

(рис. 4), тогда поверхность, которую описывает отрезок da проводника за время dt , получается равной:

$$ds = v \cdot dt \cdot da \cdot \sin \alpha.$$

Изображая эту поверхность вектором $d\vec{s}$, направленным нормально к ней, можно написать:

$$d\vec{s} = [\vec{da} \cdot \vec{v} \cdot dt] = [\vec{da} \cdot \vec{v}] dt,$$

где $[\vec{da} \cdot \vec{v}]$ — векторное произведение \vec{da} и \vec{v} .

Поток электрического смещения

$$dN = \vec{D} \cdot d\vec{s} = \vec{D} [\vec{da} \cdot \vec{v}] dt,$$

замыкающийся на эту площадку, при перемещении проводника за время dt индуцирует на участке da ток

$$di = \frac{dN}{dt} = \vec{D} [\vec{da} \cdot \vec{v}]. \quad (11)$$

При положительном направлении вектора электрической индукции к поверхности проводника направление индуцируемого тока в проводнике совпадает с направлением перемещения электрического поля относительно проводника.

Ток во внешней цепи рассматриваемой машины возникает в результате «вытеснения» зарядов статора при уменьшении емкости системы статор—ротор, поэтому определение какого-либо направления тока в самой обкладке статора такой машины теряет смысл.

Заключение. Рассмотренная емкостная машина с рабочим циклом «паровой машины» является

наглядной иллюстрацией уровня развития теории этих машин на сегодняшний день. Лишь небольшой участок рабочего цикла машины используется для генерирования электрического тока. Все остальное время тратится на подготовительные операции.

Дальнейшее развитие теории емкостных машин должно послужить основой для создания новых, более совершенных образцов этих машин, способных занять свое место не только в исследовательской лаборатории физика, но и в промышленности и, в частности, при решении проблем сверхдальних передач электроэнергии постоянным током.

Условные обозначения

\vec{B} — вектор магнитной индукции;
 \vec{D} — вектор электрической индукции;
 \vec{E} — вектор напряженности электрического поля;
 \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля;
 W — энергия;
 \vec{v} — вектор скорости;
 γ — удельная проводимость.

Литература

1. А. А. Воробьев. Сверхвысокие электрические напряжения. Госэнергоиздат, 1955.
2. А. Е. Каплянский. Введение в общую теорию электрических машин. Госэнергоиздат, 1941.
3. Karel Malek. Емкостные генераторы и их применение в качестве источников высокого напряжения для ускорителей ионов. *Elektrotechnický obzor*, № 3, 1956.
4. Zdeněk Záp. Конструктивные типы современных электростатических машин. *Elektrotechnický obzor*, № 7, 1956.

[19.12. 1956]



Выбор передаточного числа редуктора приводов вспомогательных механизмов прокатных станов

Доцент К. И. КОЖЕВНИКОВ

Новочеркасский политехнический институт

В настоящей статье рассматриваются приводы напряженно работающих вспомогательных механизмов прокатных станов с высокой точностью управления: нажимные устройства, манипуляторы блюмингов, слябингов, среднелистовых и толстолистовых станков. Привод данных механизмов осуществляется двигателями постоянного тока параллельного возбуждения с непрерывной системой управления.

Для обеспечения технологического процесса прокатки двигателя должны перемещать рабочий орган механизмов по определенной программе из одного фиксированного положения в другое. Производительность механизмов обратно пропорциональна времени цикла прокатки.

Двигатели рассматриваемых механизмов работают в повторно-кратковременном режиме; поэтому их производительность зависит от характера переходных процессов, которые в свою оче-

редь зависят от формы диаграммы тока якоря двигателя и передаточного числа редуктора, соединяющего вал двигателя с валом механизма.

Основным технико-экономическим показателем работы механизма является его производительность. Следовательно, выбор формы диаграммы тока якоря двигателя и передаточного числа редуктора должен быть подчинен условию получения максимальной производительности. Используя это положение, в ранее опубликованной статье автора [Л. 1] был рассмотрен вопрос о выборе формы диаграммы тока якоря двигателя; в данной работе сформулированы принципы выбора передаточного числа редуктора.

Для решения поставленной задачи используется следующая методика.

В связи с напряженным режимом работы механизмов наиболее существенным фактором, ограничивающим их производительность, являет-

ся нагрев двигателя. Производительность механизма, при которой установленный двигатель полностью используется по нагреву, в дальнейшем сокращенно именуется предельной производительностью.

Реализация предельной производительности может встретить ограничения из-за перегрузки двигателя пиковыми токами, а также из-за того, что скорость двигателя превышает допустимое значение.

Для выбора передаточного числа редуктора из условия получения максимальной производительности механизма найдены и исследованы зависимости между предельной производительностью, максимальным током и максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора. Эти зависимости выведены в предположении, что заданы: габарит двигателя, программа перемещений рабочего органа механизма и форма диаграммы тока якоря двигателя. Такие исходные условия соответствуют заданию на выбор передаточного числа редуктора и проверочный расчет предварительно выбранного серийного двигателя.

Выбору передаточного числа редуктора рассматриваемых здесь приводов посвящены работы А. И. Целикова и Н. П. Куницкого [Л. 2], а также Б. М. Яковлева и О. А. Сеницына [Л. 3]. В этих работах передаточное число рассчитывается из условия получения минимального времени работы, необходимого для того, чтобы механизм отработал заданное перемещение. При этом считается, что двигатель работает с прямоугольной диаграммой тока якоря, у которой заданы токи в периоды ускорения и замедления.

Новое в предлагаемом методе выбора передаточного числа редуктора из условия максимальной производительности заключается в следующем: рассматриваются приводы с диаграммой тока якоря двигателя произвольной формы; выводятся аналитические зависимости, на основании которых проводится анализ влияния передаточного числа редуктора на работу двигателя: его нагрев, максимальный ток и максимальную скорость.

Зависимость между предельной производительностью механизма и передаточным числом редуктора. Формула для потери энергии в обмотке якоря двигателя за цикл включения может быть представлена в виде (см. приложение):

$$F_n \frac{a_p^2}{\tau_p^3} + i_c^2 \tau_p.$$

Средняя потеря мощности за цикл прокатки будет:

$$\Delta p = \frac{1}{\tau_{np}} \left[\sum F_n \frac{a_p^2}{\tau_p^3} + \sum i_c^2 \tau_p \right],$$

а предельное время цикла прокатки определится следующим образом:

$$\tau_{np} = \sum F_n \frac{a_p^2}{\tau_p^3} + \sum i_c^2 \tau_p. \quad (1)$$

Здесь суммирование распространяется на все включения, входящие в цикл прокатки.

Переходя от относительных единиц к абсолютным, получим:

$$t_{np} = \frac{60^2 B_n^2 \sum F_n \frac{A_p^2}{t_p^3}}{n_n^2} + \frac{\sum M_c^2 t_p}{M_n^2}.$$

Подставляя в последнее выражение

$$\left. \begin{aligned} B_n &= \frac{(GD_\partial^2 + \frac{GD_m^2}{u^2}) n_n}{375 M_n}; & A_p &= u A_{pm}; \\ M_c &= \frac{M_{cm}}{u \eta}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

после преобразования найдем:

$$t_{np} = \frac{(GD_\partial^2)^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}}{39 M_n^2} \left\{ u^2 + 2 \frac{GD_m^2}{GD_\partial^2} + \frac{1}{u} \left[\left(\frac{GD_m^2}{GD_\partial^2} \right)^2 + \frac{39 \sum M_{cm}^2 t_p}{(GD_\partial^2)^2 \eta^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}} \right] \right\}, \quad (3)$$

где u — передаточное число редуктора;

η — к. п. д. редуктора;

GD_∂^2 — суммарный маховой момент деталей привода, непосредственно связанных с валом двигателя;

GD_m^2 — суммарный маховой момент деталей привода, связанных с валом двигателя через редуктор;

M_{cm} — статический момент на ведущем (в данном случае тихоходном) валу редуктора;

A_{pm} — угол, который должен отработать ведущий вал редуктора.

Предельная производительность привода будет:

$$P \equiv \frac{1}{t_{np}}.$$

Подставляя сюда (3), получим искомую зависимость между предельной производительностью и передаточным числом редуктора.

Испытание (3) на экстремум показывает, что максимальная предельная производительность достигается при передаточном числе

$$u_n = \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{GD_m^2}{GD_\partial^2} \right)^2 + \frac{39 \sum M_{cm}^2 t_p}{(GD_\partial^2)^2 \eta^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}}}{\left(\frac{GD_m^2}{GD_\partial^2} \right)^2 + \frac{39 \sum M_{cm}^2 t_p}{(GD_\partial^2)^2 \eta^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}}}}. \quad (4)$$

Для исследования рассматриваемой здесь зависимости найдем снижение предельной производительности, вызванное применением передаточного числа редуктора u вместо наиболее выгодного передаточного числа u_n :

$$\Delta_n(P) = \left(1 - \frac{P}{P_n} \right) 100 = \left(1 - \frac{t_{npn}}{t_{np}} \right) 100, \quad (5)$$

где Π и Π_n — предельная производительность соответственно при передаточных числах u и u_n ;

t_{np} и t_{npn} — предельное время цикла прокатки соответственно при передаточных числах u и u_n .

Воспользовавшись (4), преобразуем (3) к виду:

$$t_{np} = \frac{(GD_\partial^2)^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}}{39 M_n^2} u_n^2 \left[\left(\frac{u}{u_n} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \frac{GD_m^2}{GD_\partial^2 u_n^2} + \left(\frac{u_n}{u} \right)^2 \right], \quad (6)$$

отсюда

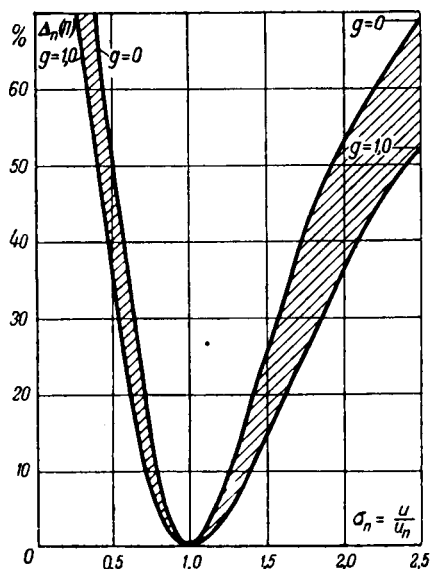
$$t_{npn} = \frac{2 (GD_\partial^2)^2 \sum F_n \frac{A_{pm}^2}{t_p^3}}{39 M_n^2} u_n^2 \left(1 + \frac{GD_m^2}{GD_\partial^2 u_n^2} \right). \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (5), получим формулу для снижения предельной производительности:

$$\Delta_n(\Pi) = \frac{\sigma_n^2 + \frac{1}{\sigma_n^2} - 2}{\sigma_n^2 + \frac{1}{\sigma_n^2} + 2g} 100, \quad (8)$$

где $\sigma_n = \frac{u}{u_n}$ — отношение между рассматриваемым передаточным числом редуктора и передаточным числом, при котором предельная производительность достигает максимума;

$g = \frac{GD_m^2}{GD_\partial^2 u_n^2}$ — отношение между маховыми моментами GD_m^2 и GD_∂^2 , приведенными к одной скорости.



На рис. 1 представлены графики зависимости между снижением предельной производительности и передаточным числом редуктора, рассчитанные по формуле (8). Графики построены для двух предельных значений g , а именно, $g=1$ и $g=0$.

Зависимость между максимальным током двигателя и передаточным числом редуктора. Формула для максимального тока двигателя может быть представлена в виде (см. приложение):

$$i_m = F_\tau \frac{\alpha_p}{\tau_p^2} \pm i_c \quad (9)$$

или

$$I_m = \frac{60 B_n F_\tau A_{pm} I_n}{n_n t_p^2} \pm \frac{M_c I_n}{M_n}.$$

Подставляя сюда (2), найдем:

$$I_m = \frac{I_n}{M_n} \left[F_\tau A_{pm} \left(GD_\partial^2 u + \frac{GD_m^2}{u} \right) \pm \frac{M_{cm}}{\eta u} \right]. \quad (10)$$

Испытание (10) на экстремум показывает, что максимальный ток двигателя имеет минимальное значение при передаточном числе

$$u_\tau = \sqrt{\frac{GD_m^2}{GD_\partial^2} \pm \frac{6,25 M_{cm} t_p^2}{GD_\partial^2 \eta F_\tau A_{pm}}}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), получим минимальное значение максимального тока двигателя:

$$I_{m\tau} = \frac{2 I_n F_\tau A_{pm} GD_\partial^2 u_\tau}{6,25 M_n t_p^2}. \quad (12)$$

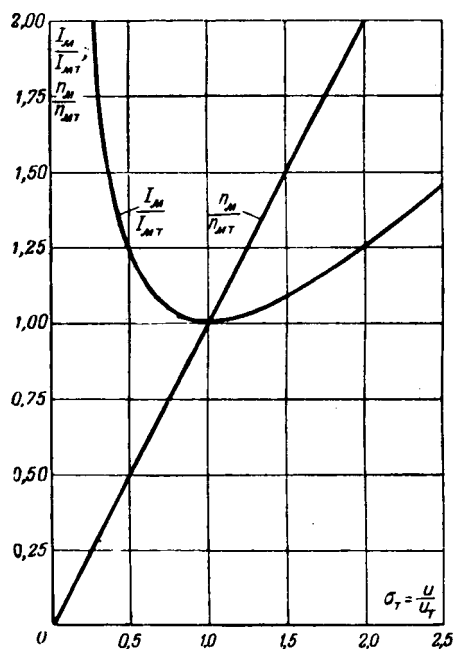


Рис. 2. Графики зависимости между максимальным током, максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора.

Рис. 1. Графики зависимости между снижением предельной производительности и передаточным числом редуктора.

При помощи (10) и (12) находим зависимость между максимальным током двигателя и передаточным числом редуктора

$$\frac{I_m}{I_{мт}} = \frac{\sigma_t + \frac{1}{\sigma_t}}{2}, \quad (13)$$

где $\sigma_t = \frac{u}{u_t}$ — отношение между рассматриваемым передаточным числом редуктора и передаточным числом редуктора, при котором максимальный ток двигателя имеет минимальное значение.

На рис. 2 представлен график зависимости между максимальным током двигателя и передаточным числом редуктора, построенный по формуле (13).

Зависимость между максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора. Формула для максимальной скорости двигателя может быть представлена в виде (см. приложение):

$$v_m = F_c \frac{a_p}{\tau_p} \quad (14)$$

или в абсолютных единицах

$$n_m = \frac{60 F_c A_{pm}}{t_p} u. \quad (15)$$

Отсюда видно, что максимальная скорость двигателя прямо пропорциональна передаточному числу редуктора.

Зависимость между максимальной скоростью двигателя и передаточным числом (15) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_t = \frac{n_m}{n_{мт}}, \quad (16)$$

где $n_{мт}$ — максимальная скорость двигателя при передаточном числе u_t .

На рис. 2 представлен график зависимости между максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора, построенный по (16).

Пример. Произведем выбор передаточного числа редуктора привода нажимного устройства листового стана горячей прокатки, имеющего двигатель типа МП-62.

При помощи выведенных формул на рис. 3 построены графики зависимости между нагрузкой (по нагреву), максимальным током и максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора для заданной производительности механизма.

Из графиков видно, что по условию допустимого нагрева установленного двигателя передаточное число может изменяться в диапазоне 9,6...15. При этом нагрузка по нагреву изменяется в пределах 89...100%, достигая минимума при $u_n = 12$; максимальный ток изменяется всего на 6%, достигая минимума при $u_t = 11$, а максимальная скорость возрастает монотонно на 57% (установленный двигатель допускает увеличение скорости до двукратной номинальной скорости путем повышения напряжения на якоре). В связи с изложенным очевидна целесообразность выбора передаточного числа редуктора, равного 12. При этом передаточном числе обеспечиваются заданная производительность

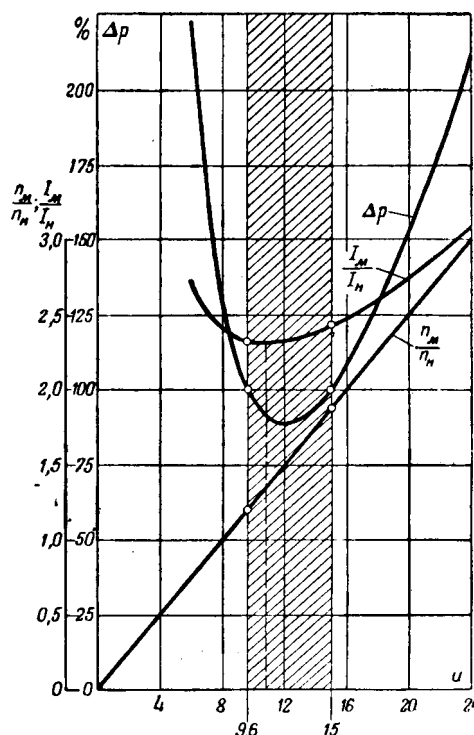


Рис. 3. Графики зависимости между нагрузкой (по нагреву), максимальным током, максимальной скоростью двигателя и передаточным числом редуктора.

и некоторый рост ее в дальнейшем, а также необходимая точность установки верхнего вала клетки.

Отклонение от этого передаточного числа больше чем на $\pm 15\%$ вызывает существенное ухудшение работы привода.

Выводы. Принципы выбора передаточного числа редуктора из условия максимальной производительности механизма состоят в следующем:

1. Предельная производительность достигает максимума при передаточном числе u_n [формула (4)]. Зависимость предельной производительности от передаточного числа имеет сильно выраженный максимум. Отклонение выбранного передаточного числа от передаточного числа, при котором предельная производительность достигает максимума только на $\pm 15 \dots 25\%$, вызывает существенное понижение предельной производительности (на 10...15%).

2. Максимальный ток якоря двигателя достигает минимума при передаточном числе u_t [формула (11)].

Зависимость максимального тока от передаточного числа имеет слабо выраженный минимум. Отклонение выбранного передаточного числа от передаточного числа, при котором максимальный ток двигателя достигает минимума, даже в 2 раза вызывает сравнительно небольшое повышение максимального тока двигателя (на 25%).

3. Максимальная скорость двигателя прямо пропорциональна передаточному числу.

4. Для оценки эффективности выбранного передаточного числа следует определить для него при помощи формул (8) и (13) либо по графикам

рис. 1 и 2 снижение предельной производительности и повышение максимального тока против экстремальных значений.

5. Выбор передаточного числа редуктора и проверочный расчет предварительно выбранного двигателя следует выполнять параллельно. В отдельных случаях результаты расчета по (4) и (11) приходится корректировать в связи с необходимостью понизить максимальную скорость двигателя за счет повышения продолжительности установившегося движения привода. Такая корректировка вызывает изменение коэффициентов F_n , F_T , F_c . Однако выбранное передаточное число при этом остается обычно без изменения.

Приложение. Формулы для максимальной скорости, максимального тока и потери энергии в обмотке якоря двигателя при диаграмме тока произвольной формы.

Рассмотрим диаграмму тока произвольной формы, представленную на рис. 4.

Для анализа воспользуемся относительными единицами [Л. 1]:

$$i = \frac{I}{I_n} \text{ — ток якоря двигателя;}$$

$$j = i - i_c \text{ — динамический ток якоря двигателя;}$$

$$\nu = \frac{n}{n_n} \text{ — угловая скорость двигателя;}$$

$$\tau = \frac{t}{B_n} \text{ — время } \left(B_n = \frac{GD^2 n_n}{375 M_n} \text{ — электромеханическая постоянная времени привода, сек} \right);$$

$$\alpha = \frac{A}{A_n} \text{ — угол, отработанный валом двигателя } \left(A_n = \frac{B_n n_n}{60} \text{ — угловая постоянная привода, оборот} \right).$$

Максимальная скорость двигателя (ν_m). Углы, отработанные валом двигателя за время ускорения, установившегося движения и замедления, определяются следующим образом:

$$\alpha_y = \int_0^{\tau_y} \nu d\tau = \nu_m \tau_y - \int_0^{\tau_y} \tau d\nu = \nu_m (\tau_y - T_y);$$

$$\alpha_c = \nu_m \tau_c; \quad \alpha_z = \int_0^{\tau_z} \nu d\tau = - \int_0^{\tau_z} \tau d\nu = \nu_m (\tau_z - T_z).$$

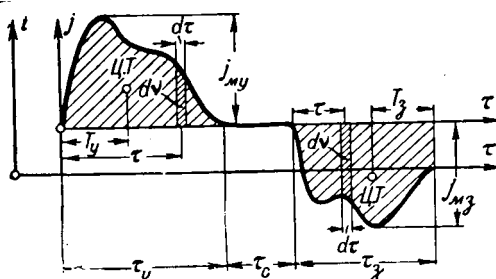


Рис. 4. Диаграмма тока произвольной формы.

Ц. Т. — центр тяжести

Поэтому угол, отработанный валом двигателя за время работы, будет:

$$\alpha_p = \alpha_y + \alpha_c + \alpha_z = \nu_m \tau_p \left(1 - \frac{T_y + T_z}{\tau_p} \right) = \nu_m \tau_p \left[1 - \frac{1-y}{1+x} \left(\frac{T_y}{\tau_y} + x \frac{T_z}{\tau_z} \right) \right],$$

отсюда получим:

$$\nu_m = F_c \frac{\alpha_p}{\tau_p} \text{ и } F_c = \frac{1}{1 - \frac{1-y}{1+x} \left(\frac{T_y}{\tau_y} + x \frac{T_z}{\tau_z} \right)}, \quad (I,1)$$

где F_c — коэффициент, который зависит только от формы диаграммы тока;

T_y — абсцисса центра тяжести фигуры, образованной диаграммой динамического тока в период ускорения, осью абсцисс и ординатами в начале и конце периода ускорения;

T_z — то же, но для периода замедления;

$$x = \frac{\tau_z}{\tau_y} \text{ и } y = \frac{\tau_c}{\tau_p} \text{ — параметры диаграммы.}$$

Максимальный ток двигателя (i_m). Максимальная скорость двигателя определяется как

$$\nu_m = \int_0^{\tau_y} j d\tau = j_{my} \tau_y \xi_y \text{ и } \nu_m = \int_0^{\tau_z} j d\tau = j_{mz} \tau_z \xi_z.$$

Воспользовавшись (I,1), получим:

$$j_{my} = F_{Ty} \frac{\alpha_p}{\tau_p^2}; \quad F_{Ty} = F_c \frac{1+x}{\xi_y(1-y)};$$

$$j_{mz} = F_{Tz} \frac{\alpha_p}{\tau_p^2}; \quad F_{Tz} = F_c \frac{1+x}{\xi_z x(1-y)},$$

где F_{Ty} , F_{Tz} — коэффициенты, которые зависят только от формы диаграммы тока;

ξ_y , ξ_z — коэффициенты заполнения диаграммы динамического тока соответственно в период ускорения и в период замедления (коэффициент заполнения диаграммы динамического тока представляет отношение среднего динамического тока к максимальному динамическому току).

Максимальный ток двигателя будет:

$$i_m = F_T \frac{\alpha_p}{\tau_p^2} \pm i_c. \quad (I,2)$$

Если максимальный ток возникает в период ускорения, то перед i_c ставится знак плюс и $F_T = F_{Ty}$; если он возникает в период замедления, то перед i_c ставится знак минус и $F_T = F_{Tz}$.

Потеря энергии в обмотке якоря двигателя за цикл включения. Потеря энергии от динамического и статического тока

$$\int_0^{\tau_y} j^2 d\tau = \frac{\nu_m^2}{\tau_y} \gamma_y^2; \quad \int_0^{\tau_z} j^2 d\tau = \frac{\nu_m^2}{\tau_z} \gamma_z^2; \quad \int_0^{\tau_p} i_c^2 d\tau = i_c^2 \tau_p.$$

Согласно [Л. 1]

$$\int_0^{\tau_p} i^2 d\tau = \frac{\nu_m^2}{\tau_y} \left(\gamma_y^2 + \frac{\gamma_z^2}{x} \right) + i_c^2 \tau_p.$$

Диаграмма тока	F_c	F_T	F_n
Оптимальная	1,5 3	6 12	12 48
Оптимальная с ограниченной скоростью	$\frac{2+y_1}{1,5}$	$\frac{(1-y_1)(2+y_1)}{4,5}$	$\frac{(1-y_1)(2+y_1)^2}{13,5}$
Лучшая прямоугольная	1,5	4,5	13,5
Лучшая прямоугольная без установившегося движения	2,0	4,0	16

Воспользовавшись (I,1), получим следующую формулу для потери энергии в обмотке якоря двигателя:

$$\int_0^{\tau_p} i^2 d\tau = F_n \frac{\alpha_p^2}{\tau_p^3} + i_c^2 \tau_p$$

$$F_n = F_c^2 \frac{1+x}{1-y} \left(\gamma_y^2 + \frac{\gamma_s^2}{x} \right), \quad (I,3)$$

где F_n — коэффициент, который зависит только от формы диаграммы тока;

γ_y и γ_s — коэффициенты формы диаграммы динамического тока в период ускорения и период замедления (коэффициент формы диаграммы динамического тока представляет отношение эквивалентного динамического тока к среднему динамическому току).

Формулы (I,1), (I,2), (I,3) устанавливают зависимость между максимальной скоростью, максимальным током, потерей энергии в обмотке якоря двигателя и програм-

мой работы двигателя для диаграммы тока произвольной формы.

Численные значения коэффициентов F_c , F_T , F_n для некоторых диаграмм [Л. 1] приведены в таблице.

Литература

1. К. И. Кожевников. Диаграмма тока двигателя вспомогательных механизмов прокатных станов. Электричество, № 6, 1956.
2. А. И. Целиков и Н. П. Куницкий. Выбор передаточного числа для электроприводов вспомогательных механизмов прокатных станов. ВЭП, № 9, 1947.
3. Б. М. Яковлев и О. А. Синицын. Наивыгоднейшее передаточное число при трапецеидальном графике и заданном пути. Технический сборник Московского проектно-конструкторского управления Главэлектромонтажа, № 6, 1946.
4. Ф. А. Горайко и Л. В. Карнющин. Вопросы выбора передаточного числа редуктора для электроприводов подъемно-транспортных механизмов и экскаваторов. Труды научно-технической сессии по электроприводу подъемно-транспортных механизмов, 1955.

[25.2 1957]



Обобщенная методика исследования переходных процессов в схемах электропривода¹

Доктор техн. наук, проф. Д. П. МОРОЗОВ
и инж. Ю. А. БОРЦОВ

Московский энергетический институт

Исследование переходных процессов в разнообразных и сложных системах электропривода позволяет обоснованно выбрать наиболее оптимальные режимы работы механизмов в отношении производительности и экономичности. Составление дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы, для схем с жесткими и гибкими обратными связями является сложной, но часто встречающейся на практике задачей. Особые трудности возникают при составлении общего дифференциального уравнения переходного процесса электропривода при различных начальных условиях. Например, пуск, реверс и торможение двигателя с установившейся скорости происходят при так называемых «естественных» начальных условиях. В этом случае нулю могут быть не равны только начальные значения переменной и одной или двух ее высших производных. Однако при изменении величины возмущающего воздействия или величины какого-либо параметра схе-

мы в тот момент, когда система еще находилась в переходном режиме, все начальные условия оказываются ненулевыми. При таких условиях осуществляется, например, торможение с неустановившейся скорости, вступление в действие «отсечек» и т. д.

В настоящей работе ставится задача на конкретных примерах показать методику составления уравнений для типовых замкнутых систем электропривода с несколькими обратными связями, в том числе с «отсечками», для различных ненулевых начальных условий.

Предварительно сделаем несколько замечаний:

1. Коэффициент связи между обмотками управления, расположенными на одном керне электрической машины, как показывает эксперимент, составляет значительную величину, близкую к 0,85 ... 0,9. При этом изменение результирующего потока происходит с постоянной времени, примерно равной сумме постоянных времени всех обмоток управления.

¹ Статья печатается в порядке обсуждения.

2. Для электромашинного усилителя постоянная времени первого каскада может оказаться соизмеримой с постоянной времени его короткозамкнутой цепи. Поэтому составление дифференциального уравнения необходимо в этом случае проводить с учетом параметров обоих каскадов усилителя.

3. При составлении исходных уравнений нет необходимости использовать коэффициент взаимной индуктивности между обмотками. Вывод получается проще и нагляднее, если при составлении этих уравнений оперировать с результирующим магнитным потоком [Л. 1 и 2].

4. При составлении общего дифференциального уравнения системы для любых режимов работы целесообразно воспользоваться методом, при котором:

а) все переменные записываются в виде алгебраической суммы начального значения данной величины, имевшего место в конце предшествующего режима, и приращения этой переменной величины на новом этапе переходного процесса. Например, скорость и ток двигателя записываются следующим образом: $n = n_0 + n'$; $i_a = I_{a0} + i'_a$, где n_0 и I_{a0} — соответственно скорость и ток якоря двигателя, имевшие место, например, в момент наступления «отсечки», а n' и i'_a — приращения после этого момента;

б) из уравнений, составленных подобным образом, вычитают уравнения предшествующего режима. В итоге получают систему дифференциальных уравнений в отклонениях, которую можно решить относительно искомой переменной (ток, э. д. с., скорость двигателя и т. д.).

Составление дифференциальных уравнений начнем с режимов работы электропривода, характеризующихся естественными начальными условиями, т. е. условиями «покоя». В общем случае они могут быть и ненулевыми, например для режимов торможения и реверса с установившихся значений. Этот случай является наиболее простым.

Схема, изображенная на рис. 1, применяется для ряда механизмов металлургической и машиностроительной промышленности. Задающее напряжение U подается с потенциометра; все обмотки управления сцеплены с общим результирующим потоком Φ_y .

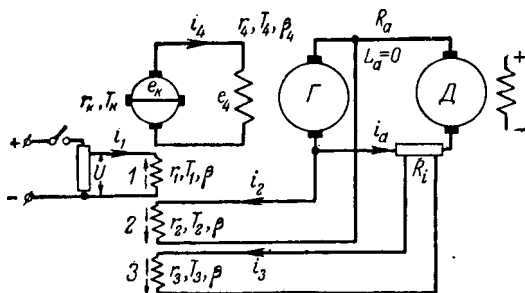


Рис. 1. Система генератор—двигатель с отрицательными жесткими обратными связями по напряжению генератора и току двигателя.

Параметры задающей обмотки: r_1 — активное сопротивление; b_1 — проводимость; w_1 — число витков; L_1 — индуктивность; T_1 — постоянная времени; β — коэффициент пропорциональности между н. с. обмотки управления и э. д. с. короткозамкнутого контура e_k ; $k_1 = w_1\beta$ — коэффициент пропорциональности между током управления и э. д. с. короткозамкнутого контура e_k ; $m_1 = \frac{w_1\beta}{r_1}$ — коэффициент усиления по напряжению.

Параметры второй и всех остальных обмоток обозначены аналогично. Другие обозначения: R_a — суммарное активное сопротивление якорной цепи генератор — двигателя; $\theta = \frac{GD^2 R_a}{375 c_e c_m}$ — электромеханическая постоянная времени.

Составим систему уравнений при нулевых начальных условиях, характеризующих пуск двигателя холостую ($M_c = 0$). При этом:

а) пренебрегаем рассеянием всех намагничивающих обмоток;

б) спрямляем характеристики намагничивания всех машин;

в) пренебрегаем электромагнитной постоянной времени главной цепи;

г) не принимаем во внимание активного сопротивления генератора при составлении исходных уравнений для контуров обратных связей.

Получаем:

$$U = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi_y}{dt}; \quad (1)$$

$$e_k = i_2 r_2 - w_2 \frac{d\Phi_y}{dt}; \quad (2)$$

.....

$$i_a = \frac{GD^2}{375 c_m} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (3)$$

На основании составленной системы уравнений выведем общее дифференциальное уравнение относительно тока и скорости двигателя. Учтыва-

вая, что $\frac{d\Phi_y}{dt} = \frac{1}{k_y} \frac{de_k}{dt}$, уравнение (1) для первой задающей обмотки можно записать в следующем виде:

$$U = i_1 r_1 + \frac{w_1}{k_y} \frac{de_k}{dt}. \quad (4)$$

Разделив все члены уравнения (4) на r_1 и умножив на $w_1\beta$, а также учитывая, что $\frac{w_1^2\beta}{k_y r_1} = \frac{L_1}{r_1} = T_1$, получим:

$$m_1 U = i_1 w_1 \beta + T_1 \frac{de_k}{dt}. \quad (5)$$

Для контура обмотки 2 имеет место аналогичное уравнение:

$$m_2 e_k = i_2 w_2 \beta - T_2 \frac{de_k}{dt}. \quad (6)$$

Заметим, что знак минус перед вторым членом уравнений (6) и (2) означает, что э. д. с., наве-

денная в обмотке 2, от результирующего потока Φ_y создает ток, препятствующий нарастанию потока. Следовательно, э. д. с. в обмотке 2 совпадает по направлению с e_2 (в случае жесткой отрицательной связи). То же самое имеет место и для контура отрицательной обратной связи по току.

Дальнейшее составление общего уравнения удобно вести в операторной форме [Л. 3]:

для первой обмотки управления

$$m_1 \bar{U} = \bar{i}_1 \omega_1 \beta + T_1 p \bar{e}_\kappa; \quad (7)$$

для второй обмотки управления

$$m_2 \bar{e}_2 = \bar{i}_2 \omega_2 \beta - T_2 p \bar{e}_\kappa; \quad (8)$$

для третьей обмотки управления

$$m_3 \bar{i}_a R_i = \bar{i}_3 \omega_3 \beta - T_3 p \bar{e}_\kappa. \quad (9)$$

Из уравнения (7) вычтем почленно уравнения (8) и (9) и, учитывая, что $(\bar{i}_1 \omega_1 - \bar{i}_2 \omega_2 - \bar{i}_3 \omega_3) \beta = \bar{e}_\kappa$, получим:

$$\bar{e}_\kappa = \frac{m_1 \bar{U} - m_2 \bar{e}_2 - m_3 \bar{i}_a R_i}{1 + (T_1 + T_2 + T_3) p}. \quad (10)$$

Далее, используя уравнения (1)...(3), находим последовательно e_4 , e_2 и, наконец, i_a :

$$\bar{i}_a = \frac{m_1 m_\kappa m_4 \theta b_a p \bar{U}}{(1 + T_y p)(1 + T_\kappa p)(1 + T_4 p)(1 + \theta p) + m_2 m_\kappa m_4 (1 + \theta p) + R_i b_a \theta m_3 m_\kappa m_4 p}. \quad (11)$$

Скорость двигателя находим из уравнения (3):

$$\bar{n} = \frac{\bar{i}_a}{\theta b_a c_e p} = \frac{m_1 m_\kappa m_4 \bar{U} / c_e}{(1 + T_y p)(1 + T_\kappa p)(1 + T_4 p)(1 + \theta p) + m_2 m_\kappa m_4 (1 + \theta p) + R_i b_a \theta m_3 m_\kappa m_4 p}. \quad (12)$$

Покажем, что уравнения (11) и (12) могут быть использованы также при рассмотрении переходного процесса торможения двигателя с некоторой установившейся скорости n_0 . Составим систему уравнений для этой же схемы привода, но с учетом начальных условий, в качестве которых примем постоянные значения потоков (или токов) и э. д. с., которые имели место в схеме при работе двигателя с установившейся скоростью.

Получаем:

$$0 = (I_{10} + i'_1) r_1 + \omega_1 \frac{d(\Phi_{y0} + \Phi'_y)}{dt}; \quad (13)$$

$$E_{20} + e'_2 = (I_{20} + i'_2) r_2 - \omega_2 \frac{d(\Phi_{y0} + \Phi'_y)}{dt}; \quad (14)$$

.....

$$I_{a0} + i'_a = \frac{GD^2}{375 c_\mu} \frac{d(n_0 + n')}{dt}. \quad (15)$$

Вычтем уравнения статики, характеризующие предшествующий процессу торможения двигательный режим ($E_{20} = I_{20} r_2$ и т. д.) из соответствующих уравнений системы (13)...(15). Учитывая, что все производные постоянных значений $\frac{d\Phi_{y0}}{dt}$, $\frac{dI_{k0}}{dt}$, ..., $\frac{dn_0}{dt}$ равны нулю, получим следующую систему уравнений для отклонений переменных величин:

$$0 = (I_{10} + i'_1) r_1 + \omega_1 \frac{d\Phi'_y}{dt}; \quad (16)$$

$$e_2 = i_2 r_2 - \omega_2 \frac{d\Phi'_y}{dt}; \quad (17)$$

$$\dots \dots \dots i'_a = \frac{GD^2}{375 c_\mu}. \quad (18)$$

Обозначим $I_{10} r_1 = U_0$; тогда уравнение (16) запишется в следующем виде:

$$-U_0 = i'_1 r_1 + \omega_1 \frac{d\Phi'_y}{dt}.$$

В результате решения системы уравнений (16)...(18) относительно i'_a имеем

$$\bar{i}'_a = \frac{-m_1 m_\kappa m_4 \theta b_a p \bar{U}_0}{(1 + T_y p)(1 + T_\kappa p)(1 + T_4 p)(1 + \theta p) + m_2 m_\kappa m_4 (1 + \theta p) + R_i b_a \theta m_3 m_\kappa m_4 p}. \quad (19)$$

При подстановке в (19) числовых значений параметров следует иметь в виду, что:

а) в знаменателе постоянная времени изменения продольного потока $T_y = T_1 + T_2 + T_3$ получит новое значение, так как с увеличением сопротивления r_1 постоянная T_1 уменьшится;

б) в числителе изменение сопротивления r_1 при торможении по-разному влияет на U_0 и m_1 . При увеличении r_1 скачок задающего воздействия U_0 увеличивается. При этом во столько же раз уменьшается другой множитель — коэффициент усиления по напряжению m_1 . В итоге величина числителя в этом случае не изменяется. Изменится только знак перед ним, указывая на то, что ток в якоре главных машин при торможении изменил свое направление по сравнению с током при пуске.

Указанный прием может быть использован и при исследовании таких процессов, как реверс двигателя с любой установившейся на заданную скорость и в других аналогичных случаях, если они характеризуются «естественными» начальными условиями.

Сложнее обстоит дело, если исследуются процессы при всех ненулевых начальных условиях. Рассмотрим один из таких примеров.

Одним из часто встречающихся режимов работы двигателей для ряда механизмов (рабочий

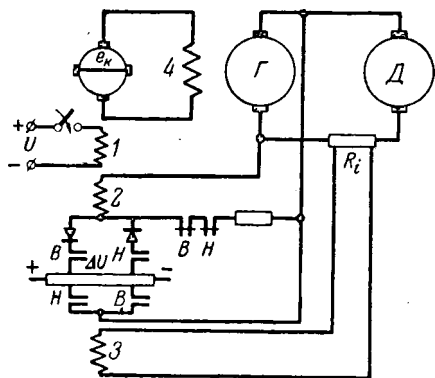


Рис. 2. Система генератор — двигатель с отрицательной обратной связью по току и «отсечкой» по напряжению.

рольганг реверсивного стана, механизм перемещения стола продольно-строгального станка и т. д.) является торможение с неустановившейся скорости, которое имеет место, если отключение задающего напряжения или перемена его полярности происходит в момент, когда процесс разбега двигателя еще не закончился.

Для того чтобы составить общее дифференциальное уравнение для тока и скорости двигателя, работающего в системе генератор—двигатель с обратными связями (рис. 1), воспользуемся системой уравнений (13) ... (15). В ней каждая переменная была записана как сумма начальной величины и ее отклонения. Однако теперь необходимо иметь в виду, что во всех цепях, содержащих индуктивности, приложенные напряжения (э. д. с.) уравновешиваются не только активным падением напряжения, но и э. д. с. самоиндукции.

Совместное решение уравнений (13) ... (15) относительно i'_a приводит к следующему выражению:

$$\begin{aligned} \bar{i}'_a = & \frac{\theta b_a p [m_4 (\bar{E}_{40} - \bar{I}_{40} r_4) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_y p) +}{(1 + T_y p) (1 + T_{\kappa} p) \times} \rightarrow \\ \rightarrow & \frac{+ m_{\kappa} m_4 (\bar{E}_{\kappa 0} - \bar{I}_{\kappa 0} r_{\kappa}) (1 + T_y p) - m_{\kappa} m_4 \bar{E}_{\kappa 0} - m_2 m_{\kappa} m_4 \bar{E}_{20} - m_3 m_{\kappa} m_4 \bar{I}_{a0} R_i -}{\times (1 + T_4 p) (1 + \theta p) + m_2 m_{\kappa} m_4 (1 + \theta p) +} \rightarrow \\ \rightarrow & \frac{- \bar{I}_{a0} [(1 + T_y p) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_4 p) + m_2 m_{\kappa} m_4]}{+ R_i b_a \theta m_3 m_{\kappa} m_4 p} \quad (20) \end{aligned}$$

Отсюда, используя уравнение (15), приведенное к виду: $\bar{I}_{a0} + \bar{i}'_a = \theta b_a c_e p \bar{n}'$, можно получить выражение для \bar{n}' :

$$\bar{n}' = \frac{\bar{I}_{a0} + \bar{i}'_a}{\theta b_a c_e p} = \frac{\bar{i}'_a}{\theta b_a c_e p} + \frac{\bar{I}_{a0}}{\theta b_a c_e p} \quad (21)$$

Следует отметить, что уравнения (20) и (21), выведенные для частного случая — торможения с неустановившейся скорости, можно использовать как общие дифференциальные уравнения типовой схемы управления электромашинной автоматики с обратными связями по току и напряжению². Из них без вывода могут быть полу-

² Для этого в числитель уравнения (20) необходимо лишь добавить слагаемое $m_1 m_{\kappa} m_4 \theta b_a p \bar{U}$, которое отражает наличие задающей величины \bar{U} на входе системы регулирования.

чены уравнения, описывающие любые переходные процессы пуска, торможения, реверса и т. д. в схемах:

а) с отрицательными или положительными обратными связями по току и напряжению (или только с одной из них);

б) с «отсечкой» по напряжению и обратной связью по току (рис. 2);

в) с раздельными «отсечками» по току и напряжению;

г) с «отсечкой» по току и обратной связью по напряжению;

д) с электромашинным усилителем, работающим в качестве генератора в системе генератор—двигатель;

е) с возбудителем генератора в виде обычной машины постоянного тока.

Из общего дифференциального уравнения легко могут быть получены и уравнения для режимов с нулевыми начальными условиями, которые были ранее составлены для пуска и торможения с установившейся скорости [(11), (12) и (19)]. Составление уравнения переходных процессов в схемах с «отсечками» должно проводиться по этапам в зависимости от включения или выключения какого-либо из элементов схемы. Начальные условия определяются для каждого этапа в отдельности.

Пуск двигателя в системе генератор—двигатель с отрицательной обратной связью по току и «отсечкой» по напряжению. Составим дифференциальное уравнение и построим переходные процессы $n(t)$ и $i_a(t)$ при пуске двигателя в схеме привода, изображенной на рис. 2. В данном случае весь период пуска необходимо разбить на два этапа.

Первый этап, т. е. до включения обратной связи по напряжению, когда встречное напряжение потенциометра ΔU больше нарастающего напряжения генератора e_g ;

начальные условия — нулевые: $E_{20} = E_{40} = E_{a0} = 0$, $I_{a0} = I_{40} = I_{\kappa 0} = 0$; обратная связь по напряжению не действует ($m_2 = 0$); постоянная времени первого контура усилителя $T_y = T_1 + T_3$; задающее напряжение равно U .

При этих условиях из уравнений (20) и (21) получаем:

$$\bar{i}'_a = \frac{m_1 m_{\kappa} m_4 \theta b_a p \bar{U}}{(1 + T_y p) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_4 p) (1 + \theta p) + R_i b_a \theta m_3 m_{\kappa} m_4 p} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \bar{n} = & \frac{\bar{i}'_a}{\theta b_a c_e p} = \frac{m_{\partial} \bar{i}'_a}{\theta b_a p} = \\ = & \frac{m_{\partial} m_1 m_{\kappa} m_4 \bar{U}}{(1 + T_y p) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_4 p) (1 + \theta p) + R_i b_a \theta m_3 m_{\kappa} m_4 p} \quad (23) \end{aligned}$$

Второй этап, т. е. после начала действия «отсечки», когда e_g окажется больше ΔU , а их

разность ($e_z - \Delta U$) станет создавать размагничивающие ампервитки обратной связи по напряжению (обмотка 2). Начальные условия ($E_{20}, E_{40}, \dots, I_{\kappa 0}$) будут ненулевыми. В момент начала действия «отсечки» $E_{20} - \Delta U = 0$, поэтому член $\bar{E}_{20} m_2 m_{\kappa} m_4$ в уравнении (20) равен нулю; постоянная времени $T_y = T_1 + T_2 + T_3$; задающее напряжение U остается прежним.

При таких условиях из уравнений (20) и (21) получим:

$$\begin{aligned} \bar{i}'_a &= \frac{\theta b_a p [m_4 (\bar{E}_{40} - \bar{I}_{40} r_4) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_y p) + \\ &\rightarrow \frac{+ m_{\kappa} m_4 (\bar{E}_{\kappa 0} - \bar{I}_{\kappa 0} r_{\kappa}) (1 + T_y p) + m_1 m_{\kappa} m_4 \bar{U} -}{\times (1 + T_4 p) (1 + \theta p) +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{- m_{\kappa} m_4 \bar{E}_{\kappa 0} - m_3 m_{\kappa} m_4 \bar{I}_{a0} R_1 -}{+ m_2 m_{\kappa} m_4 (1 + \theta p) +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{- \bar{I}_{a0} [(1 + T_y p) (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_4 p) + m_2 m_{\kappa} m_4]}{+ R_1 \theta m_3 m_{\kappa} m_4}; \quad (24) \end{aligned}$$

$$\bar{n}' = \frac{\bar{I}_{a0} + \bar{i}'_a}{c_e \theta b_a p} = \frac{m_{\theta} \bar{i}'_a}{\theta b_a p} + \frac{\bar{I}_{a0}}{\theta b_a c_e p}. \quad (25)$$

Определение начальных условий. Для определения начальных условий необходимо знать значения соответствующих переменных при $t = t_0$ — времени «отсечки». Это связано с вычислением функций $e_z(t)$, $e_4(t)$ и $e_{\kappa}(t)$. Воспользуемся системой уравнений (1) ... (3):

$$\bar{e}'_z = \frac{\bar{i}'_a (1 + \theta p)}{\theta b_a p} = \frac{m_1 m_{\kappa} m_4 \bar{U} (1 + \theta p)}{\theta_1(p)}; \quad (26)$$

$$\bar{e}'_4 = \frac{\bar{i}'_4}{b_4} (1 + T_4 p) =$$

$$= \frac{\bar{e}'_z}{m_4} (1 + T_4 p) = \frac{m_1 m_{\kappa} \bar{U} (1 + T_4 p) (1 + \theta p)}{\theta_1(p)}; \quad (27)$$

$$\bar{e}'_{\kappa} = \frac{\bar{i}'_{\kappa}}{b_{\kappa}} (1 + T_{\kappa} p) = \frac{m_1 \bar{U} (1 + T_{\kappa} p) (1 + T_4 p) (1 + \theta p)}{\theta_1(p)}, \quad (28)$$

где $\theta_1(p)$ — характеристическое уравнение системы на первом этапе пуска.

Изменение различных переменных величин в замкнутой системе автоматического управления происходит по одному и тому же характеристическому уравнению. Это обстоятельство имеет место и в данном случае, упрощая вычисление корней при определении начальных условий.

Из (26) ... (28) при $t = 0$ находим начальные условия:

$$E_{20} = [e'_z]_{t=t_0}; \quad E_{40} = [e'_4]_{t=t_0}; \quad E_{\kappa 0} = [e'_{\kappa}]_{t=t_0}; \quad (29)$$

$$I_{40} = \frac{E_{20}}{k_4} = \frac{E_{20}}{m_4 r_4}; \quad I_{\kappa 0} = \frac{E_{40}}{k_{\kappa}} = \frac{E_{40}}{m_{\kappa} r_{\kappa}}. \quad (30)$$

Пример. Требуется построить переходные процессы скорости и тока при пуске двигателя рабочего рольганга в системе генератор—двигатель с отрицательной обратной связью по току и «отсечкой» по напряжению (рис. 2).

Данные электрических машин: два последовательно соединенных двигателя независимого возбуждения типа МП-82, $P_{\kappa} = 100$ квт, $U_{\kappa} = 220$ в, $n_{\kappa} = 475$ об/мин, $I_{\kappa} = 500$ а; генератор мощностью $P_g = 320$ квт, $U_g = 460$ в, $n_g = 485$ об/мин, $I_g = 700$ а; электромашинный усилитель мощностью $P_u = 4,5$ квт, $U_u = 230$ в, $n_u = 2935$ об/мин, $I_u = 19,6$ а, $I_{\kappa} = 5,9$ а, $r_{\kappa} = 0,85$ ом.

Исходные данные статического расчета приведены, в таблице.

Будем считать, что статический момент, обусловленный лишь потерями на трение, равен нулю, что является характерным для привода рабочего рольганга, и дает возможность использовать уравнения (22) ... (25) без изменения.

Первый этап. $T_y = T_1 + T_3 = 0,0214 + 0,0143 = 0,0357$ сек; $m_2 = 0$.

Подставляя значение параметров в уравнение (23) получим:

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \frac{1010}{p(0,00092p^4 + 0,0417p^3 + 0,51p^2 + 3,37p + 1)} = \\ &= \frac{A(p)}{pB(p)}. \end{aligned}$$

Корни характеристического уравнения: $p_1 = -0,305$; $p_2 = -30,5$; $p_{3,4} = -7,25 \pm j8,04$.

Пользуясь известной теоремой разложения, находим оригинал:

$$\begin{aligned} n(t) &= \frac{A(0)}{B(0)} + \sum_{i=1}^4 \frac{A(p_i) e^{p_i t}}{[B'(p)]_{p=p_i}} = \\ &= 1010 - 1055e^{-0,305t} + 2,18e^{-30,5t} + \\ &+ 45,1e^{-7,25t} \cos 8,04t + 12,85e^{-7,25t} \sin 8,04t. \end{aligned}$$

Учитывая, что $i_a = \frac{GD^2}{375c_{\kappa}} \frac{dn}{dt}$, находим выражение для тока на первом этапе пуска:

$$\begin{aligned} i(t) &= 885e^{-0,305t} - 260e^{-30,5t} - 533e^{-7,25t} \cos 8,04t - \\ &- 1280e^{-7,25t} \sin 8,04t. \end{aligned}$$

Полученные зависимости $n(t)$ и $i(t)$ изображены на рис. 3.

Определение начальных условий. Будем считать, что «отсечка» вступает в действие при скорости двигателя $n = 0,8n_{\kappa} = 380$ об/мин, что соответствует времени $t = t_0 = 1,78$ сек, току $I_{a0} = 520$ а и э. д. с. генератора $E_{20} = I_{a0} R_a + c_e n_0 = 365$ в. Для того чтобы решить урав-

Постоянные времени	$T_1=0,0214$ сек	$T_2=0,012$ сек	$T_3=0,0143$ сек	$T_{\kappa}=0,2$ сек	$T_4=1,5$ сек	$\theta=0,086$ сек
Коэффициенты усиления	$m_1=0,0455$	$m_2=0,0272$	$m_3=0,24$	$m_{\kappa}=48$	$m_4=3,83$	$m_q=1,1$
Остальные величины	$R_a=0,0396$ ом	$b_a=25,2$	$R_1=0,016$ ом	$U=110$ в	—	—

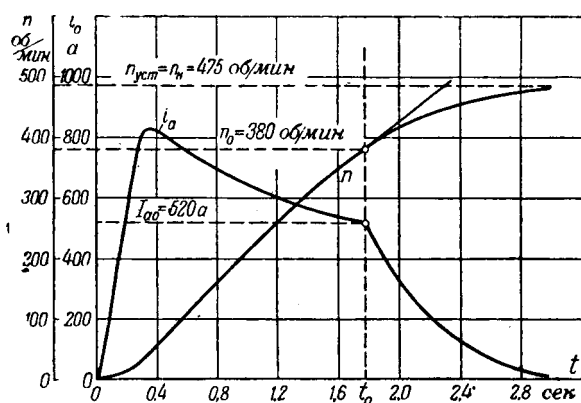


Рис. 3. Кривые переходного процесса при пуске двигателя в системе генератор — двигатель с обратной связью по току и «отсечкой» по напряжению.

нение пуска на втором этапе, необходимо еще знать начальные значения E_{40} и E_{K0} . Их определение производим, находя оригиналы выражений (27) и (28). При $t = t_0 = 1,78$ сек, $E_{40} = 161$ в, $E_{K0} = 3,6$ в.

Из (30) получаем:

$$I_{40} = \frac{E_{20}}{m_4 r_4} = \frac{365}{3,83 \cdot 6} = 16 \text{ а},$$

$$I_{K0} = \frac{E_{40}}{m_K r_K} = 3,95 \text{ а}.$$

Второй этап. Воспользовавшись уравнением (24), подставим в него числовые значения параметров. При этом учтем, что $T_y = T_1 + T_2 + T_3 = 0,0477$ сек.

Решение этого уравнения даст выражение для тока двигателя на втором этапе пуска:

$$i_a(t) = I_{a0} + i'_a(t) = 489e^{-2,3t} + 30,8e^{-31,3t} - 10,7e^{-5,85t} \cos 7,54t + 6,2e^{-5,85t} \sin 7,54t.$$

Построение $i(t)$ возможно также произвести графическим интегрированием кривой $i_a(t)$ (рис. 3).

Построение кривых тока и скорости двигателя в переходном процессе позволяет сделать некоторые выводы относительно спроектированной схемы и уточнить ее параметры. Так, например, время протекания переходных процессов является чрезмерно большим. С целью устранения этого недостатка необходимо значительно увеличить форсировку и соответствующим образом изменить коэффициенты усиления по напряжению и другие параметры схемы управления. Целесообразно перейти к схеме с отдельными «отсечками» по току и напряжению.

Рассмотренная выше методика подвергалась неоднократной экспериментальной проверке. Сопоставление результатов расчета с экспериментом выявило их расхождение в пределах 10 ... 20 %.

Закключение. 1. Изложена методика составления дифференциальных уравнений в сложных схемах электрического привода для режимов с различными начальными условиями.

2. Выводится дифференциальное уравнение, общее для ряда типовых схем электропривода с жесткими обратными связями и «отсечками» по току и напряжению. В уравнении может быть учтена постоянная нагрузка на валу двигателя.

3. Дальнейшее развитие работы предполагается в направлении составления уравнений для схем с гибкими обратными связями.

Литература

1. А. Г. Иосифьян, В. М. Каган и Н. П. Шереметьевский. Теория амплитудно-селективной синхронно-следящей системы. Электричество, № 3, 1946.
2. Д. П. Морозов. Возбуждение электрических машин в схемах электромашиной автоматики. Электричество, № 9, 1948.
3. Д. П. Морозов. К методике составления дифференциальных уравнений в сложных схемах электрического привода механизмов. Труды МЭИ, вып. XXII. Госэнергоиздат, 1956.

[28.11. 1956]



К расчету магнитомодуляционных датчиков напряженности магнитного поля

Доктор техн. наук, проф: М. А. РОЗЕНБЛАТ
Всесоюзный научно-исследовательский институт
звукозаписи

Введение. Магнитомодуляционные датчики напряженности магнитного поля, называемые также магнитными зондами, феррозондами, магнитными воспринимающими элементами и т. п., находят широкое применение в различных приборах, предназначенных для измерения величины, направления, градиента или изменения во времени напряженности магнитного поля. Действие таких датчиков основано на том, что магнитный поток в сердечнике датчика, обусловленный измеряемым (внешним) магнитным полем, модулируется вспомогательным переменным полем возбуждения сердечника.

Из всех известных типов магнитомодуляционных датчиков наиболее низким порогом чувствительности обладают датчики с удвоением частоты, т. е. такие датчики, у которых частота выходного напряжения вдвое превышает частоту переменного поля возбуждения. Указанные датчики широко применяются в магнитометрах, дистанционных компасах, металлоискателях, магнитных дефектоскопах, аппаратах магнитной записи и воспроизведения низких частот и импульсов и во многих других приборах. Магнитомодуляционные датчики обычно отличаются небольшими размерами. Во многих компасах и магнитометрах их

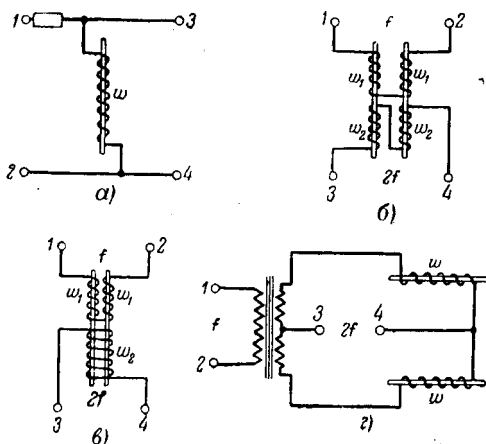


Рис. 1.

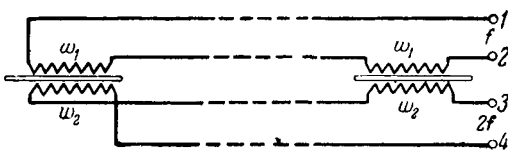


Рис. 2.

длина не превышает 20 ... 50 мм, а в некоторых случаях составляет лишь 2 ... 3 мм. Вместе с тем магнитомодуляционные датчики позволяют создать весьма чувствительные и точные приборы, способные обнаружить и измерить ничтожные изменения напряженности магнитного поля, составляющие лишь $10^{-6} \dots 10^{-5}$ а/см.

На рис. 1 приведены типичные схемы магнитомодуляционных датчиков, действующих по принципу удвоения частоты. Переменное напряжение, свободное от четных гармоник, подается на зажимы 1-2, а напряжение удвоенной частоты, появляющееся при наличии внешнего (измеряемого) магнитного поля, снимается с зажимов 3-4. В простейшей схеме (рис. 1,а) имеется лишь одна обмотка на сердечнике и выделение второй гармоники напряжения, появляющегося на зажимах этой обмотки при наличии внешнего поля, производится при помощи соответствующего фильтра. В других схемах применяются два сердечника, что позволяет уменьшить величину нечетных гармоник напряжения на выходе датчика. В схеме рис. 1,б на каждом сердечнике предусмотрена отдельная выходная обмотка w_2 , а на рис. 1,в — одна общая выходная обмотка. Применение дифференциальной схемы рис. 1,г позволяет ограничиться лишь одной обмоткой на каждом сердечнике датчика.

Если выходные обмотки двух одинаковых и параллельно расположенных датчиков включить встречно (рис. 2), то выходное напряжение удвоенной частоты будет прямо пропорционально разности продольных составляющих внешнего магнитного поля в местах расположения сердечников.

Для магнитомодуляционных датчиков напряженности поля иногда используются сердечники сложной конфигурации. Однако в настоящей ра-

боте мы ограничимся рассмотрением датчиков с разомкнутыми прямыми сердечниками, получившими преимущественное применение.

Намагничивание ферромагнитных стержней в разомкнутой магнитной цепи. Для расчета датчиков с разомкнутыми сердечниками необходимо знать зависимость магнитной индукции в разомкнутом сердечнике от напряженности внешнего магнитного поля H . Эта зависимость существенно отличается от кривой намагничивания вещества сердечника и определяется не только магнитными свойствами вещества, но и формой и размерами сердечников [Л.1]. Напряженность магнитного поля h внутри сердечника связана с напряженностью внешнего поля H известным соотношением:

$$h = H - NJ,$$

где N — коэффициент размагничивания;

J — намагниченность сердечника.

Так как в системе единиц МКСа

$$J = \frac{B}{\mu_0} - h = h(\mu - 1),$$

где μ_0 — магнитная проницаемость пустоты;

$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{h}$ — относительная магнитная проницаемость вещества, то

$$h = \frac{H}{1 + N(\mu - 1)}. \quad (1)$$

Обозначая магнитную (относительную) проницаемость тела через

$$\mu_* = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (2)$$

и принимая во внимание, что $\mu \gg 1$, нетрудно получить:

$$\frac{1}{\mu_*} = \frac{1}{\mu} + N = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{m}, \quad (3)$$

где m — магнитная (относительная) проницаемость формы:

$$m = \frac{1}{N}.$$

Если известны кривая намагничивания вещества сердечника $B = f(h)$ и его коэффициент размагничивания, то по формулам (1)—(3) можно построить его кривую намагничивания $B = \varphi(H)$.

Точное теоретическое вычисление коэффициента размагничивания может быть выполнено только для сердечников, имеющих форму эллипсоида, который приобретает однородную намагниченность в равномерном поле. Для сердечников других форм величина магнитной индукции, а следовательно, и коэффициент размагничивания изменяются вдоль длины сердечника. Поэтому принято характеризовать такие сердечники некоторым средним для данного участка сердечника значением коэффициента размагничивания [Л. 1 и 2].

Для сердечников, отличающихся по форме от эллипсоида, коэффициент размагничивания

Таблица 1

Значения коэффициентов k и c в формуле (5)

Форма сердечника	k	c
Цилиндр	2,4	0,8...0,85
Стержень прямоугольного сечения	$4-0,732 \left(1-e^{-5,5 \frac{a}{b}}\right)$	0,75
Эллипсоид		0

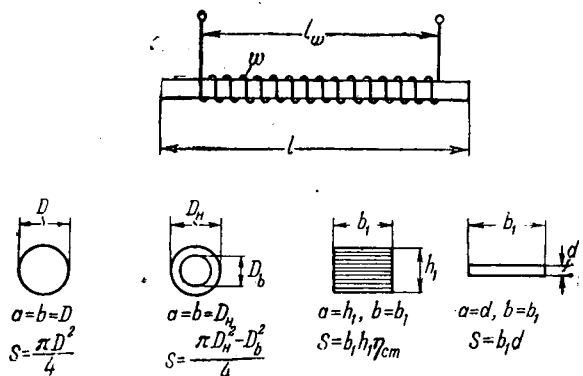


Рис. 3.

зависит также от величины магнитной проницаемости вещества, так как последняя влияет на характер изменения величины магнитной индукции вдоль сердечника [Л. 1]. Коэффициент размагничивания растет по мере увеличения проницаемости вещества и при $\mu \gg m$ достигает некоторого предельного значения N_∞ .

Проницаемость формы m разомкнутых сердечников магнитомодуляционных датчиков, как правило, значительно меньше начальной и максимальной проницаемости вещества сердечников, которые обычно выполняются из высокопроницаемых железоникелевых сплавов. Поэтому, начиная со значений индукции $B=0$ и до значений индукций, близких к индукции насыщения B_s , обычно можно принять в соответствии с формулой (3):

$$\mu_* = m = \frac{1}{N_\infty}. \quad (4)$$

В [Л. 2] автором показано, что при $\mu \gg m$ коэффициент размагничивания сплошных и полых цилиндров, сплошных и наборных стержней прямоугольного сечения и эллипсоидов на участке, занимаемом обмоткой, может быть вычислен по формуле (в системе единиц МКСА):

$$N_\infty = \frac{4S}{\pi \left(l^2 - \frac{c}{3} l_w^2 \right)} \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right), \quad (5)$$

где l — длина сердечника;

l_w — длина обмотки, расположенной симметрично относительно концов сердечника;

S — площадь поперечного сечения активного материала сердечника (для эллипсоидов — в экваторном сечении);

a и b — поперечные размеры сердечника (рис. 3).

Значения коэффициентов k и c , зависящие от формы сердечников, приведены в табл. 1.

Коэффициент k для сердечников с прямоугольным поперечным сечением изменяется в небольших пределах, а так как он входит в формулу (5) под знаком логарифма, то не требуется определять его с большой точностью. Для

инженерных расчетов можно принять $k=3,62 = \text{const}$, тогда получаемые по формуле (5) значения N_∞ будут отличаться от значений N_∞ , вычисленных с учетом зависимости k от a/b , не более чем на 4,0% при $l/a+b=10$, не более чем на 2,1% при $l/a+b=100$ и не более чем на 1,4% при $l/a+b=1000$ для любых значений отношения a/b .

Формула (5) справедлива при намагничивании сердечника в равномерном поле и может быть использована при условии, что длина намагничивающей обмотки переменного тока примерно совпадает с длиной сердечника, что, как правило, и соблюдается. Длина измерительной или выходной обмотки часто значительно меньше l . Формула (5) определяет величину N_∞ в продольном направлении. При $l^2 \gg ab$ в поперечном направлении $N \approx 1/2$ и $\mu_* \approx 2$.

Чувствительность датчика с одним сердечником. Рассмотрим сначала датчик с одним сердечником или датчик с двумя сердечниками, которые удалены друг от друга на расстояние, достаточное, чтобы исключить взаимное влияние их магнитных полей.

Для расчета датчика можно использовать ту или иную математическую аппроксимацию кривой намагничивания сердечника. Однако для датчиков с прямыми сердечниками желательно иметь расчетные формулы, выражающие зависимость основных электромагнитных характеристик датчиков от их геометрических размеров. Такие формулы легко могут быть получены, если действительную кривую намагничивания сердечника датчика (кривая 1 на рис. 4) заме-

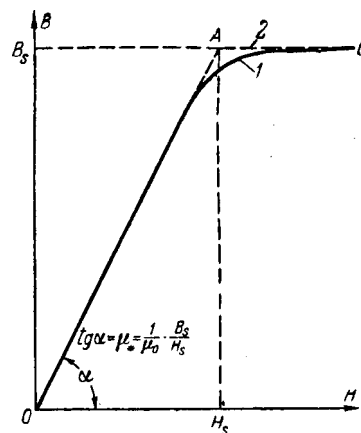


Рис. 4.

нить идеализированной ломаной линией 2, образуемой двумя прямыми: OA , соответствующей $B = \mu_0 \mu_* H = \frac{\mu_0 H}{N_\infty}$, и AC , соответствующей $B = B_s = \text{const}$, где B_s — индукция насыщения. Возможность такой замены обусловлена тем, что для всех известных датчиков с разомкнутыми сердечниками, как правило, $\mu \gg m$ при широком диапазоне изменения индукции.

Так как напряженность поля возбуждения обычно изменяется по закону, близкому к синусоидальному (вследствие наличия фильтра в цепи возбуждения и относительно небольшого индуктивного сопротивления обмоток возбуждения малогабаритных датчиков), то можно представить напряженность внешнего поля таким образом:

$$H = H_0 + H_m \cos \omega t, \quad (6)$$

где H_0 — напряженность измеряемого поля;

H_m — амплитудное значение напряженности поля возбуждения.

При кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания сердечника (рис. 5, а) и изменении напряженности поля согласно формуле (6) сплошная кривая на рис. 5, б изображает изменение во времени индукции сердечника. Сплошная кривая на рис. 5, в показывает форму кривой э. д. с., индуцируемой в обмотке датчика при изменении индукции согласно рис. 5, б.

Используя обозначения, указанные на рис. 5, находим для амплитудного значения второй гармоники э. д. с. [Л. 3]:

$$E_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e \sin 2\omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E_m \sin \omega t \cdot \sin 2\omega t d\omega t =$$

$$= \frac{4E_m}{3\pi} \left\{ \left[1 - \left(\frac{H_s + H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{3/2} - \left[1 - \left(\frac{H_s - H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{3/2} \right\}, \quad (7)$$

где

$$E_m = \omega S H_m \mu_0 \mu_*; \quad H_s = \frac{B_s}{\mu_0 \mu_*} = \frac{N_\infty B_s}{\mu_0};$$

$$\alpha_1 = \arccos \frac{H_s - H_0}{H_m} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \arccos \frac{H_s + H_0}{H_m}.$$

Найдем чувствительность датчика:

$$G_u = \frac{dE_2}{dH_0} = \frac{4\omega S \mu_0 \mu_*}{\pi} \left[\frac{H_s + H_0}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s + H_0}{H_m} \right)^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{H_s - H_0}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s - H_0}{H_m} \right)^2} \right]. \quad (8)$$

В области малых значений напряженности измеряемого поля, когда $H_0 \ll H_s$ и $H_0 \ll H_m$, имеем:

$$G_u = \frac{8\omega S \mu_0 \mu_*}{\pi} \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m} \right)^2}. \quad (9)$$

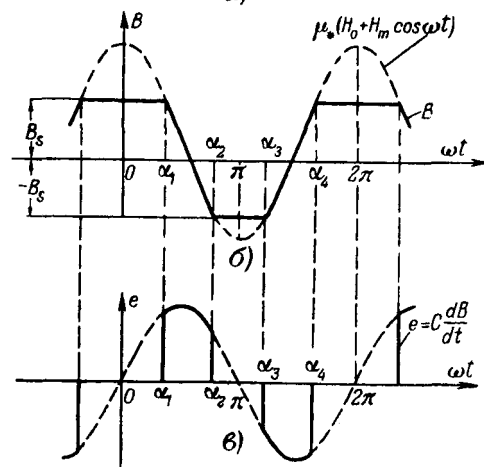
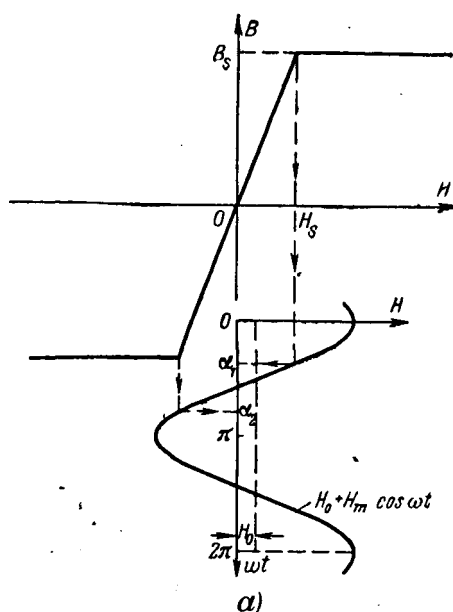


Рис. 5.

Наибольшая чувствительность датчика, равная

$$G_{u \max} = \frac{4\omega S \mu_0 \mu_*}{\pi}, \quad (10)$$

достигается при

$$H_m = \sqrt{2} H_s. \quad (11)$$

Так как при $\mu \gg \frac{1}{N_\infty}$ имеем, что $\mu_* = \frac{1}{N_\infty}$, то, учитывая уравнение (5), получаем:

$$G_{u \max} = \frac{\omega \mu_0 \left(l^2 - \frac{c}{3} l_w^2 \right)}{\ln \frac{kl}{a+b} - 1}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены результаты измерения и расчета значений наибольшей чувствительности для различных датчиков, выполненных по схеме рис. 1, а, но с двумя обмотками. Сердечник каждого датчика состоял из одной пла-

стинки прямоугольного поперечного сечения из сплава 79НМ или 80НХС. Длина намагничивающей обмотки переменного тока во всех случаях совпадала с длиной сердечника, а длина измерительной (выходной) обмотки, содержащей 3300 витков, составляла 20 мм. Все измерения проводились при частоте $f = 500$ гц.

Таблица 2

Сравнение расчетных и измеренных значений чувствительности для датчиков с сердечниками прямоугольного сечения

Материал сердечника	Длина сердечника, мм	Толщина сердечника, мм	Ширина сердечника, мм	G_u макс. в·см/а	
				Расчет по формуле (12)	Измерение
80НХС	150	0,2	3	6,99	5,96
79НМ	120	0,2	3	4,67	3,78
80НХС	100	0,2	3	3,42	3,38
80НХС	70	0,2	3	1,82	1,77
79НМ	70	0,1	3	1,81	1,88
80НХС	70	0,05	3	1,78	1,60

В табл. 3 даны расчетные и измеренные значения наибольшей чувствительности датчиков, выполненных по схеме рис. 1,а с цилиндрическими сердечниками из сплава 79 НМ. Диаметр всех сердечников составлял 0,8 мм, а их обмотки распределялись по всей длине сердечника. Измерения проводились при частоте 50 гц.

Таблица 3

Сравнение расчетных и измеренных значений чувствительности для датчиков с цилиндрическими сердечниками

Длина сердечника, мм	Число витков обмотки	G_u макс. в·см/а	
		Расчет по формуле (12)	Измерение
160	10 000	1,65	1,48
120	10 000	0,99	0,95
100	8 000	0,58	0,57
80	5 600	0,272	0,292
60	6 300	0,187	0,177
40	4 200	0,062	0,066

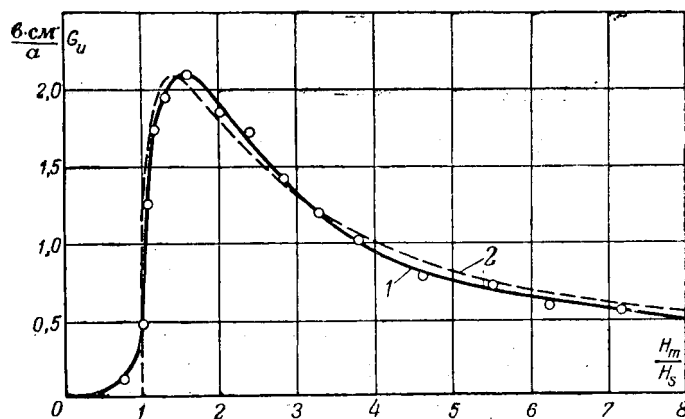


Рис. 6.

Наибольшее расхождение между расчетными и измеренными значениями чувствительности датчика наблюдается для датчиков большой длины (120 ... 160 мм), при этом расчетные значения выше измеренных. Такое расхождение, по-видимому, вызвано тем, что для указанных датчиков величина проницаемости формы m достигает относительно больших значений. Для определения чувствительности с большой точностью величину μ_* , входящую в формулу (10), следует вычислять по формуле (3).

На рис. 6 приведены результаты измерения и вычисления по формуле (9) зависимости чувствительности G_u от отношения H_m/H_s для датчика с полым цилиндрическим сердечником из молибденового пермаллоя. Для датчиков, параметры которых приведены в табл. 2 и 3, оптимальные значения H_m , соответствующие наибольшей чувствительности, отличались от расчетного значения этой величины, определяемого по формуле (11), не более чем на 10 ... 20%.

Чувствительность датчиков с двумя сердечниками. Выше рассматривались датчики с одним сердечником. Применение двух сердечников, близко расположенных друг к другу, по-разному изменяет условия их намагничивания для переменного поля возбуждения и для внешнего поля. Чем ближе расстояние между параллельно расположенными сердечниками в схеме рис. 2,б, тем меньшая мощность расходуется на возбуждение датчика. Иногда для уменьшения мощности возбуждения устанавливают перемычки между рядом расположенными сердечниками (рис. 7,а), что нередко позволяет в 10 ... 30 раз снизить мощность возбуждения.

Максимальная чувствительность датчика, выполненного по схеме рис. 7,б, при наличии двух близко расположенных сердечников также может определяться по формуле (12) при $m \ll \mu$. Применение двух сердечников приводит лишь к увеличению величины a в этой формуле. Если при этом $b_2 < b_1$, то применение двух сердечников не дает существенного повышения чувствительности. Характерно, что введение перемычек, изображенных на рис. 7,а, практически не влияет на чувствительность датчика. При относительно боль-

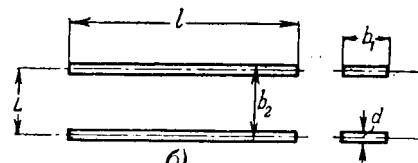
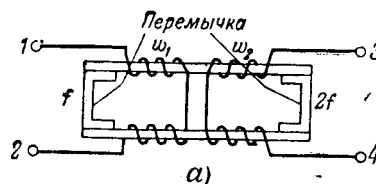


Рис. 7.

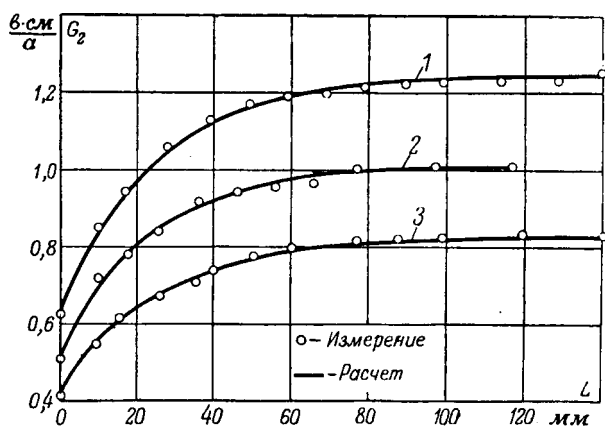


Рис. 8.

ших расстояниях между сердечниками формула (12) становится несправедливой.

Пусть G_1 — чувствительность датчика с одним сердечником, которая может быть вычислена рассмотренным выше методом, например по формуле (12) при соблюдении условия (11). Тогда оказывается возможным вычислить чувствительность датчика с двумя сердечниками по формуле

$$G_2 = G_1 \left(2 - e^{-\frac{L}{c_1}} \right), \quad (13)$$

где L — расстояние между средними плоскостями сердечников,

c_1 — постоянный коэффициент для данного сердечника.

Согласно формуле (13) при совмещении сердечников ($L=0$) чувствительность G_2 совпадает с чувствительностью датчика с одним сердечником, а при $L=\infty$ чувствительность удваивается, что и наблюдается на практике.

На рис. 8 приведены результаты измерений и расчетов по формуле (13) для трех различных датчиков с сердечниками следующих размеров (в мм) $200 \times 3 \times 0,2$ (кривая 1); $150 \times 3 \times 0,13$ (кривая 2) и $100 \times 3 \times 0,2$ (кривая 3). Значения c_1 вычислялись по эмпирической формуле

$$c_1 = 2b \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right), \quad (14)$$

где k определяется из табл. 1.

Отметим, что справедливость формулы (14) требует дальнейшей проверки для сердечников различной формы и размеров.

Геометрические размеры сердечников. При проектировании датчиков обычно бывает задана максимально допустимая длина сердечников. Одной из основных задач проектирования датчика является разумный выбор площади поперечного сечения сердечников S . Ввиду малого расхода материала на сердечники вопросы веса и стоимости сердечников обычно имеют второстепенное значение. Более существенными, как правило, являются чувствительность, область линейности, потребляемая мощность, постоянство нуля и стабильность характеристик датчика. В связи

с тем, что согласно формуле (13) чувствительность датчика с двумя сердечниками выражается через чувствительность датчика с одним сердечником, ограничимся рассмотрением последнего.

Рассмотрим сначала зависимость чувствительности от геометрических размеров сердечника. При изменении размеров будем предполагать, что отношение индуктивного сопротивления выходной обмотки датчика

$$x = \frac{2\omega\omega^2 S \mu_0 \mu_s}{l}$$

к сопротивлению нагрузки остается без изменения. Это позволяет сравнивать различные датчики при одинаковых условиях нагрузки.

При заданном значении сопротивления нагрузки (т. е. при $x = \text{const}$) имеем:

$$\omega \cdot \sqrt{\frac{\omega S \mu_0 \mu_s}{l}} = A = \text{const}. \quad (15)$$

Из уравнений (10) и (15) при соблюдении условия (11) находим чувствительность датчика:

$$G_u = \frac{4}{\pi} A \sqrt{\omega S l \mu_0 \mu_s}. \quad (16)$$

Допустим, что $\mu \gg m$ и примем для определенности, что $l_w = l$. Тогда, выражая в уравнении (16) μ_s через N_∞ и учитывая равенства (4) и (5), находим:

$$G_u = 2A \sqrt{\frac{3-c}{3\pi}} \mu_0 \cdot \frac{\omega^{1/2} l^{3/2}}{\sqrt{\ln \frac{kl}{a+b} - 1}}. \quad (17)$$

Формула (17) показывает, что при $\mu \gg m$ увеличение активного сечения сердечника S за счет увеличения его ширины, а тем более за счет увеличения его толщины не может дать сколь угодно существенного повышения чувствительности датчика. Это подтверждается данными для сердечников длиной в 70 мм, приведенными в табл. 2. Увеличение диаметра цилиндрических сердечников, т. е. величин a и b в формуле (17), также не дает пропорционального повышения чувствительности.

Увеличение активного сечения S сердечника датчика приводит в случае применения одного сердечника к повышению мощности, необходимой для его возбуждения. Действительно, для первой гармоники э. д. с., индуцируемой в обмотке датчика (рис. 5), имеем:

$$E_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e \sin \omega t d\omega t = \frac{E_m}{2\pi} [2(\alpha_2 - \alpha_1) + \sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2].$$

При малых значениях H_0 и соблюдении условия максимальной чувствительности (11) находим:

$$E_1 = 1,16 \omega \omega S \mu_0 \mu_s H_s.$$

Ток возбуждения равен:

$$I_1 = \frac{H_m l}{\omega} = \frac{\sqrt{2} B_s l}{\omega \mu_0 \mu_*}.$$

Поэтому, учитывая равенства (4) и (5), получим, что реактивная мощность, расходуемая на возбуждение датчика, равна:

$$Q = \frac{E_1 I_1}{2} = \frac{1,04 \cdot \omega B_s^2 S^2 \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right)}{l \left(1 - \frac{c}{3} \right) \mu_0}.$$

Таким образом, мощность, потребляемая датчиком, растет приблизительно пропорционально квадрату активного сечения сердечника. Увеличение длины сердечника приводит и к повышению чувствительности пропорционально $l^{3/2}$ (а выходной мощности пропорционально l^3) и к уменьшению потребляемой мощности обратно пропорционально l .

Несмотря на то, что увеличение сечения сердечника не дает существенного повышения чувствительности и вызывает увеличение потребляемой мощности, часто с целью повышения стабильности и расширения области линейности характеристики датчика целесообразно выбирать активное сечение сердечников так, чтобы проницаемость формы m была значительно меньше проницаемости вещества μ .

Из формул (12) и (17) видно, что при $\mu \gg m$ чувствительность датчика практически не зависит от магнитных характеристик вещества сердечников. Определим значения проницаемости формы m сердечника, обеспечивающие заданную стабильность чувствительности $\frac{\Delta G}{G}$ 100% датчика при относительном изменении магнитной проницаемости вещества $\frac{\Delta \mu}{\mu}$ 100%. Для простоты предполагаем, что проницаемость вещества для весьма большого диапазона индукции не зависит от индукции и равна μ . Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда сопротивление нагрузки намного больше индуктивного сопротивления обмотки датчика. При этом из формул (3) и (10) находим, что заданная стабильность G обеспечивается при

$$m \leq \frac{\mu}{\frac{\Delta \mu}{\mu} \cdot \frac{G}{\Delta G} - 1}.$$

Если, например, изменение проницаемости вещества составляет 20%, то для того, чтобы изменение чувствительности датчика не превышало 1%, необходимо выбрать такое сечение сердечника, при котором $m \leq \mu/19$.

С уменьшением m также расширяется область, в пределах которой напряжение на выходе датчика является линейной функцией напряженности внешнего (измеряемого) поля. При оптимальном режиме возбуждения (11) и при небольших значениях H_0 , принимая что $\mu \gg m$

и $\mu_* = m$, можно представить формулу (8) в следующем виде:

$$G_u = \frac{4\omega S \mu_c \mu_*}{\pi} \left(1 - \frac{H_0^2}{H_s^2} \right) = \frac{4\omega S \mu_0 \mu_*}{\pi} \left(1 - \frac{\mu_0^2 m^2 H_0^2}{B_s^2} \right).$$

Таким образом, область линейной зависимости напряжения на выходе датчика от H_0 растет обратно пропорционально m . Если требуется, чтобы при $H_0 = H_{0 \text{ макс}}$ величина G_u уменьшалась не более чем на $k\%$, то необходимо, очевидно, соблюсти следующее условие:

$$\frac{\mu_0^2 m^2 H_{0 \text{ макс}}^2}{B_s^2} \leq \frac{k}{100} \quad \text{или} \quad m \leq \frac{0,1 \sqrt{k} B_s}{\mu_0 H_{0 \text{ макс}}}.$$

Иногда изменение G_u не представляет непосредственного интереса, а требуется, чтобы при $H_{0 \text{ макс}}$ отношение E_2/H_0 уменьшилось не более чем на $k_1\%$ по сравнению с начальным значением этого отношения (при $H_0 \rightarrow 0$). В этом случае находим:

$$m \leq \frac{0,1 \sqrt{3k_1} B_s}{\mu_c H_{0 \text{ макс}}}.$$

Отметим, что расширение области линейности характеристики датчика также может быть достигнуто путем повышения H_m . Область линейности растет пропорционально примерно первой степени H_m . Однако при этом снижаются чувствительность и выходная мощность и повышается содержание высших гармоник в выходном напряжении. При расширении области линейности путем уменьшения m чувствительность и выходная мощность, напротив, даже несколько увеличиваются.

После выбора значения m сечение сердечника при заданной длине l может быть найдено из формулы (5), учитывая, что $m = \frac{1}{N_\infty}$. Для подавляющего большинства датчиков величина $kl/a+b$, входящая под знаком логарифма в этой формуле, лежит в пределах от 50 до 500, что соответствует значениям логарифма, лежащим в пределах от 3,9 до 6,2. Принимая в качестве среднего значения 5, получаем следующую упрощенную формулу для определения значения проницаемости формы m , позволяющую в первом приближении определить активное сечение сердечника по известным значениям m , l и l_w :

$$m \approx \frac{\pi \left(l^2 - \frac{c}{3} l_w^2 \right)}{16S}.$$

Так как обычно $l_w \approx l$, а в среднем $c \approx 0,8$, то

$$S \approx \frac{0,14 \cdot l^2}{m}.$$

Толщину сердечников датчика следует выбирать из условия получения безгистерезисной зависимости $E_2 = f(H_0)$, что достигается, когда

Об измерении потерь мощности на корону на действующих линиях

Инж. В. Д. КРАВЧЕНКО, кандидат техн. наук В. И. ЛЕВИТОВ,
член-корр. Академии наук СССР
В. И. ПОПКОВ

Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского
Академии наук СССР

Потери мощности на корону на проводах действующих (нагруженных) линий электропередачи значительно меньше передаваемой по этим линиям мощности и соизмеримы с омическими потерями в проводах, а в ряде случаев в несколько раз меньше последних. Поэтому получить величину потерь мощности на корону путем выделения из суммарного тока линии, измеренного обычными способами, составляющей, соответствующей указанным потерям, практически невозможно.

Потери мощности на корону, как известно, связаны только с поперечными токами линии — токами между проводами и проводами и землей. Если бы удалось найти способ измерения величин, пропорциональных этим токам или соответствующим им зарядам, то это было бы наилучшим решением задачи измерения потерь на корону на действующих линиях.

На рис. 1 приведена схема расположения провода 1 однофазной линии и антенны 2, которая точно в середине своей длины заземлена через измерительный элемент Z .

Потенциал, наведенный на изолированной от земли антенне за счет ее электромагнитной связи с линией, распределяется по длине антенны таким образом, что его величина в средней точке антенны равна нулю [Л. 1]. Поэтому при заземлении этой точки через измерительный элемент Z не будет протекать ток, обусловленный магнитным полем линии. Ток через этот элемент будет обусловлен только электростатической связью антенны с проводом.

Характерные для линий электропередачи минимальные величины высот подвеса проводов над землей равны 7 ... 8 м. При таких высотах объемный заряд, обусловленный короной, распределен

в области G (рис. 1) практически симметрично относительно оси провода, т. е. плотность объемного заряда зависит только от расстояния рассматриваемого элемента объема от оси провода. Следовательно, суммарное электростатическое действие объемного заряда на антенну эквивалентно действию такого же по величине линейного заряда, расположенного на оси провода.

При достаточно малой величине сопротивления Z связь между зарядом антенны и суммарным зарядом провода определится соотношением

$$\alpha_{12}q_1 + \alpha_{22}q_2 = 0 \quad (1)$$

или

$$q_2 = -\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}} q_1, \quad (2)$$

где $\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'}{r}$ — взаимный потенциальный коэффициент антенны и провода;

$\alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{a_0}$ — собственный потенциальный коэффициент антенны (a_0 — радиус провода антенны);

$q_1 = q_{np} + q_{об}$ — суммарный заряд провода линии на единицу длины (q_{np} — заряд на поверхности провода; $q_{об}$ — суммарный объемный заряд);

q_2 — заряд антенны на единицу длины.

Таким образом, заряд антенны, заземленной в средней точке, пропорционален суммарному заряду области G , т. е. обусловлен как зарядом на поверхности провода, так и объемным зарядом

эквивалентная глубина проникновения переменного потока равна или более половины толщины сердечника. Как показал Л. Р. Нейман [Л. 3], для сильных полей, когда напряженность поля на поверхности пластинки превышает значение, при котором μ имеет максимум, можно пользоваться формулой

$$z = \frac{1}{2\pi \sqrt{2\mu\sigma f}},$$

где z — эквивалентная глубина проникновения магнитного потока;

μ — статическая магнитная проницаемость;

σ — удельная электрическая проводимость пластинки (в единицах CGS μ).

Для сплавов 79НМ и 80НХС получаем, что толщина сердечников должна удовлетворять следующему условию:

$$d \leq (2 \dots 4) \frac{1}{\sqrt{f}}.$$

Литература

1. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. I. ОНТИ, 1935.

2. М. А. Розенблат. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. Журнал технической физики, т. 24, стр. 637 — 661, № 4, 1954.

3. E. P. Felch, W. J. Means, T. Slonczewski, L. G. Parratt, L. H. Rumbaugh, A. J. Tickner. Air-Borne Magnetometers for Search and Survey. Tr. AIEE, т. 66, стр. 641, 1947.

4. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1949. [30. 7. 1956]



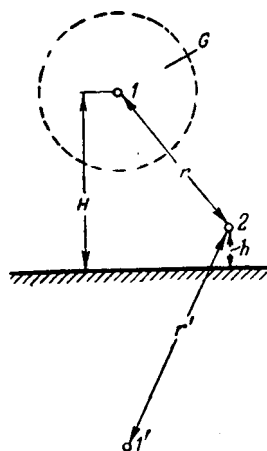


Рис. 1.

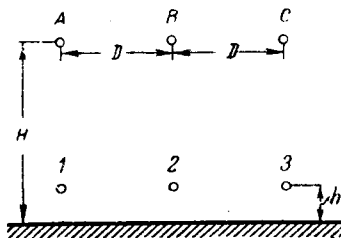


Рис. 2.

короны. При этом, что особенно важно, коэффициент пропорциональности $\frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}$ является постоянной величиной, которая определяется геометрическими размерами антенны и размерами, характеризующими взаимное расположение антенны и провода. Указанное обстоятельство позволяет при помощи антенн производить измерения потерь мощности на корону.

Для проведения измерений на трехфазных линиях необходима установка трех антенн. Один из возможных вариантов расположения антенн под проводами трехфазной линии показан на рис. 2. При этом варианте связь суммарных зарядов фазных проводов линии (q_A , q_B и q_C) с зарядами заземленных антенн (q_1 , q_2 и q_3) определяется следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -(\alpha_1 q_1 + \alpha_2 q_2 + \alpha_3 q_3) &= \sigma_1 q_A + \alpha_{11} q_B + \alpha_{13} q_C; \\ -(\alpha_2 q_1 + \alpha_1 q_2 + \alpha_2 q_3) &= \alpha_{11} q_A + \alpha_1 q_B + \alpha_{11} q_C; \\ -(\alpha_3 q_1 + \alpha_2 q_2 + \alpha_1 q_3) &= \alpha_{13} q_A + \alpha_{11} q_B + \alpha_1 q_C, \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\alpha_1 = \alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$; $\alpha_2 = \alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{23} = \alpha_{32}$; $\alpha_3 = \alpha_{13} = \alpha_{31}$; $\alpha_1 = \alpha_{1A} = \alpha_{2B} = \alpha_{3C}$; $\alpha_{11} = \alpha_{1B} = \alpha_{2C} = \alpha_{3B} = \alpha_{2A}$; $\sigma_{11} = \alpha_{1C} = \alpha_{3A}$ — собственные и взаимные потенциальные коэффициенты, определяемые по геометрическим размерам.

Решая систему уравнений (3) относительно зарядов проводов q_A , q_B и q_C , получим:

$$\left. \begin{aligned} q_A &= A'_1 q_1 + A'_2 q_2 + A'_3 q_3; \\ q_B &= B'_1 q_1 + B'_2 q_2 + B'_3 q_3; \\ q_C &= C'_1 q_1 + C'_2 q_2 + C'_3 q_3. \end{aligned} \right\} (4)$$

Коэффициенты A'_i , B'_i и C'_i составлены из потенциальных коэффициентов α_i , входящих в систему уравнений (3). Например,

$$A'_1 = \frac{A_1}{\Delta}; \quad A'_2 = \frac{A_2}{\Delta}; \quad A'_3 = \frac{A_3}{\Delta},$$

где $\Delta = \alpha_1(\alpha_1^2 - \alpha_{11}^2) - 2\alpha_{11}(\alpha_1 - \sigma_{11})$ — определитель

системы уравнений (3);

$$A_1 = -\alpha_1(\alpha_1^2 - \alpha_{11}^2) + \alpha_2(\alpha_1 \alpha_{11} - \alpha_{11} \alpha_{13}) - \alpha_3(\alpha_{11}^2 - \alpha_1 \alpha_{13});$$

$$A_2 = -\alpha_2(\alpha_1^2 - \alpha_{11}^2) + \alpha_1(\alpha_1 \alpha_{11} - \alpha_{11} \alpha_{13}) - \alpha_2(\alpha_{11}^2 - \alpha_1 \alpha_{13});$$

$$A_3 = -\alpha_3(\alpha_1^2 - \alpha_{11}^2) + \alpha_2(\alpha_1 \alpha_{11} - \alpha_{11} \alpha_{13}) - \alpha_1(\alpha_{11}^2 - \alpha_1 \alpha_{13}).$$

Как следует из уравнений (4), для определения суммарных зарядов фазных проводов линии q_A , q_B и q_C необходимо произвести сложение зарядов всех трех антенн q_1 , q_2 и q_3 , предварительно умноженных на коэффициенты A'_i , B'_i и C'_i .

Измерительными элементами могут служить емкости или активные сопротивления. В первом случае напряжения на измерительных элементах будут пропорциональны суммарным зарядам фазных проводов линии, а во втором производным по времени этих зарядов, т. е. поперечным токам линии. Для измерения мощности потерь на корону в качестве измерительных элементов целесообразно брать емкости, так как в этом случае из результатов измерений будут практически полностью исключены высокочастотные наводки, которые по каким-либо причинам могут восприниматься антеннами.

Напряжения на измерительных емкостях

$$U_i = \frac{q_i l}{C}, \quad (5)$$

где U_i — напряжения антенн;

q_i — удельные заряды на единицу длины антенн;

l — длина каждой антенны;

C — измерительные емкости.

Отсюда следует, что входные напряжения измерительной схемы зависят не только от коэффициентов α_i , определяемых взаимным расположением антенн и проводов, но и от длины антенн и величины измерительных емкостей. Выбор отношения $\frac{l}{C}$ определяется напряжением, которое необходимо иметь на входе измерительной схемы, т. е. чувствительностью измерительного устройства.

Длину антенны следует выбирать такой, чтобы высота провода над землей (из-за провеса) изменялась на этой длине незначительно¹. Для ориентировки укажем, что в случае линий 220 и 400 кВ с пролетами 450 м этому требованию удовлетворяет антенна длиной 50 м, установленная в середине пролета. При такой длине антенны, измерительных емкостях величиной порядка 0,1 мкФ и высоте подвеса антенны $h=0,5$ м вели-

¹ Вообще говоря, выполнение этого требования не обязательно, так как кривая провеса провода может быть учтена при расчете коэффициентов. Однако его лучше выполнять, так как это упрощает расчеты.

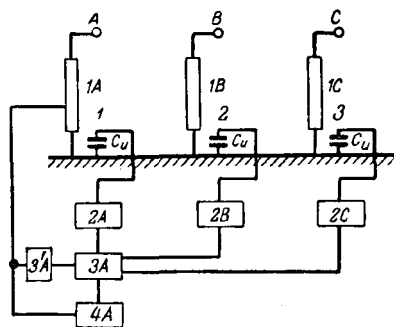


Рис. 3.

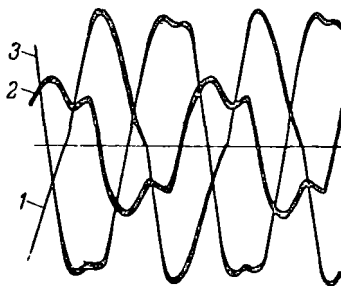


Рис. 4.

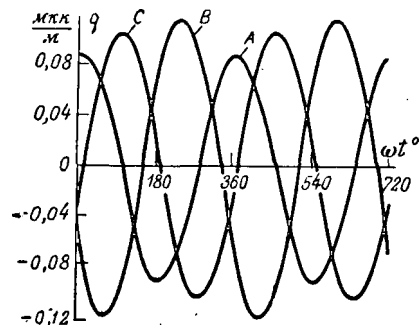


Рис. 5.

чина напряжения на антенне будет порядка 8 ... 15 в.

Все вышеизложенное позволяет наметить в общих чертах принципиальную схему (блок-схему) устройства для измерения потерь на корону на действующих линиях электропередачи. Блок-схема приведена на рис. 3, на котором приняты следующие обозначения: A, B и C — провода линии; $1, 2$ и 3 — антенны; C_u — измерительные емкости; $1A, 1B$ и $1C$ — трансформаторы напряжения или делители напряжения; $2A, 2B$ и $2C$ — элементы, осуществляющие умножение напряжений, соответствующих зарядам антенн q_1, q_2 и q_3 , на соответствующие коэффициенты A'_1, B'_1, C'_1 ; $3A$ — элемент, осуществляющий сложение умноженных на соответствующие коэффициенты напряжений, в результате которого на выходе получается напряжение (или ток), пропорциональное суммарному заряду фазы A ; $4A$ — ваттметр того или иного типа.

Для повышения точности измерений мощности потерь на корону, особенно при малых ее величинах, может оказаться необходимой компенсация реактивной составляющей заряда q_A . Для этого в схеме предусмотрен элемент $3'A$, через который осуществляется подача компенсирующего напряжения в суммирующее устройство $3A$.

Для простоты на блок-схеме приведены элементы только для одной фазы. Для двух других фаз цепочка элементов будет аналогичной.

Принятое выше допущение о симметричном расположении объемного заряда короны относительно оси провода было проверено экспериментально в лабораторных условиях. Была смонтирована лабораторная модель трехфазной линии длиной 14,5 м с высотой подвески проводов 2 м и расстоянием между фазными проводами 1,3 м. Стальные полированные провода линии имели диаметр 1 мм. Под каждой фазой линии на высоте 0,27 м были установлены антенны — медные провода, имеющие ту же длину, что и провода линии, и диаметр 0,83 мм. Антенны заземлялись через конденсаторы, напряжения которых, пропорциональные зарядам соответствующих антенн, подавались поочередно на пластины одного и того же осциллографа и фотографировались на один кадр. Применение при этом специального синхронизирующего устройства позволяло получать на

каждой осциллограмме три кривых. Образец таких осциллограмм для фазного напряжения $U_\phi = 64 \text{ кВ}_{\text{макс}}$ приведен на рис. 4.

Из осциллограммы следует, что кривые зарядов антенн имеют достаточно сложную форму и притом различную для всех фаз. Амплитуды зарядов крайних антенн приблизительно равны друг другу, а амплитуда заряда средней антенны примерно в 2 раза меньше амплитуд зарядов крайних фаз. Умножая ординаты кривых зарядов антенн на соответствующие коэффициенты A'_1, B'_1 и C'_1 и складывая полученные таким образом кривые в соответствии с уравнениями (4), получим кривые рис. 5.

Как следует из вышеизложенного, кривые рис. 5 должны совпадать с кривыми полных зарядов проводов опытной линии. Чтобы иметь возможность сопоставить заряды антенн с полными зарядами коронирующих проводов, осциллографировались также вольткулоновые характеристики проводов линии. Схема измерений для одной фазы приведена на рис. 6. На одну пару отклоняющих пластин осциллографа (ЭО) подавалось напряжение емкости C_q , пропорциональное полному заряду провода, а на другую — напряжение емкости C_1 (емкостного делителя напряжения), пропорциональное фазному напряжению высоковольтного трансформатора T_p .

При такой схеме на экране осциллографа луч описывает замкнутую кривую, которая и называется вольткулоновой характеристикой. Как известно [Л. 2], ее площадь пропорциональна потерям энергии на корону за один период изменения напряжения.

Вольткулоновые характеристики всех трех фаз опытной линии, полученные в результате непосредственных измерений при $U_\phi = 64 \text{ кВ}_{\text{макс}}$, приведены на рис. 7 (сплошные линии). На том же рисунке пунктиром нанесены вольткулоновые характеристики, полученные по данным измерений при помощи антенн при том же напряжении. Пунктирные характеристики получены по кривым зарядов рис. 5; при этом были использованы известные кривые фазных напряжений, которые осциллографировались одновременно с осциллографированием кривых зарядов антенн и синхронны с ними.

Вольткулоновые характеристики, полученные тем и другим способом, достаточно хорошо сов-

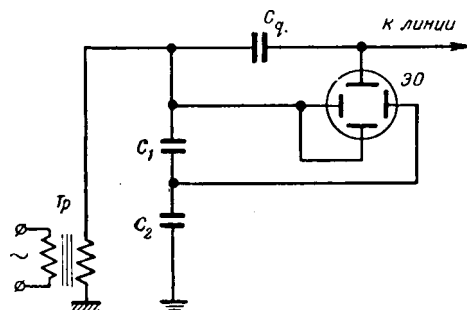


Рис. 6.

падают, особенно если учесть, что промежуточные расчеты и построения, сделанные для получения окончательных кривых по данным измерений при помощи антенн, внесли некоторые дополнительные погрешности. Те и другие характеристики хорошо совпадают по величине амплитуд зарядов, по форме и по площади, ограничиваемой ими. Последнее особенно важно с точки зрения осуществления измерений потерь мощности на корону при помощи антенн.

Построение кривых заряда, а по ним и вольткулоновых характеристик было произведено для ряда величин фазных напряжений, вплоть до величин, превышающих начальное напряжение короны более чем в 3 раза. Таким образом, были получены потери мощности на корону на проводах лабораторной линии для достаточно широкого диапазона напряжений. На рис. 8 эти данные (обозначены крестами) сопоставляются с характеристикой потерь мощности на корону, построенной по вольткулоновым характеристикам, полученным в результате непосредственных измерений. Из сопоставления следует, что потери мощности на корону, определенные тем и другим способами, практически совпадают.

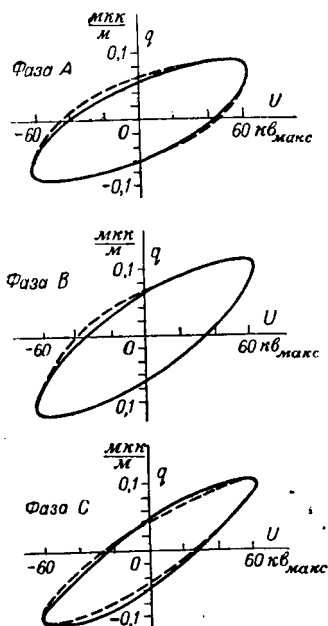


Рис. 7.

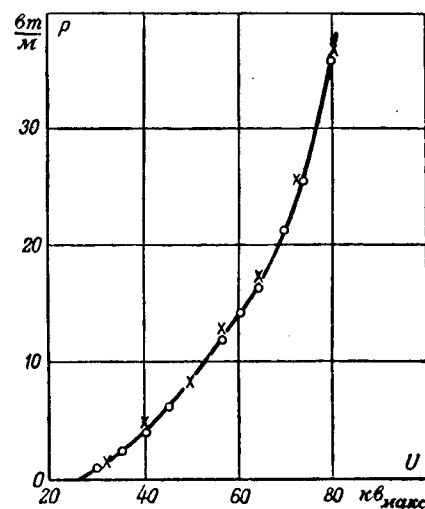


Рис. 8.

Таким образом, экспериментальное исследование полностью подтверждает возможность измерять потери мощности на корону на действующих линиях электропередач при помощи антенн, а также правомерность принятых выше допущений.

В заключение отметим, что предлагаемая методика измерений позволяет наряду с определением потерь мощности и энергии на корону на действующих линиях электропередач решить и некоторые другие задачи, например, о распределении потерь по длине пролета и линии, измерение зарядов и др.

Литература

1. М. И. Михайлов. Защита линий связи. Связь-издат, 1939.
2. Н. I. Ryan, Н. Н. Henline. The Hysteresis Character of Corona Formation. Tr. AIEE, т. 43, 1924. [7.2. 1957]



Гашение поля синхронных машин

Доктор техн. наук, проф. О. Б. БРОН

и инж. В. А. ОБРАЗЦОВ

Ленинград

Гашение магнитного поля является единственным способом, при помощи которого возможно ограничить размеры аварии, возникающей при повреждении изоляции статора синхронной машины, причем размеры аварии становятся тем меньшими, чем быстрее осуществляется гашение поля.

Необходимость быстрого гашения поля часто встречается и в условиях нормальной эксплуатации, однако этот вопрос приобретает особенное значение при аварийных режимах.

С ростом мощностей генераторов, а также

в результате применения метода форсирования возбуждения значительно возрастает энергия магнитного поля машины. Это осложняет процесс гашения поля, удлиняет его продолжительность и в конечном счете обуславливает собой ряд аварий на электростанциях. В связи с этим потребовалась разработка нового способа, характеризующегося малым временем гашения поля. В настоящей статье излагаются результаты проведенных на заводе «Электросила» работ, связанных с этой задачей.

Система гашения поля и ее особенности.

В отличие от широко известного способа гашения поля — замыканием обмотки возбуждения машины на активное сопротивление разработанная система основывается на использовании для этой цели дугогасительной решетки¹. Принципиальная схема системы представлена на рис. 1.

При гашении поля сначала размыкаются главные контакты автомата гашения поля, а через небольшой промежуток времени — его дугогасительные контакты. Дуга, возникающая на этих контактах под действием внешнего поперечного магнитного поля, возбуждаемого специальными магнитами, вгоняется в область, занятую дугогасительной решеткой.

Решетка расщепляет дугу на ряд последовательно включенных коротких дуг, которые горят до тех пор, пока ток в обмотке возбуждения не упадет до нуля.

Как показывает опыт [Л. 1, 2], напряжение U_∂ на дуге, находящейся в такой решетке, сохраняет постоянную величину в весьма широком диапазоне токов:

$$U_\partial = U_\kappa n = \text{const},$$

где U_κ — напряжение на короткой дуге, находящейся между соседними пластинами решетки ($U_\kappa = 25 \dots 30$ в для медных пластин);

n — число промежутков между пластинами.

При гашении поля переходный процесс в цепи обмотки возбуждения характеризуется следующим уравнением:

$$L \frac{di}{dt} + ri + U_\partial = U_0, \quad (1)$$

где L и r — индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения;

U_0 — напряжение возбудителя.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i = \frac{U_0}{r} - \frac{U_\partial}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/r}} \right) = I_0 - I_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (2)$$

Переходный процесс протекает так, как если бы в цепь обмотки возбуждения была внезапно введена постоянная э. д. с. U_∂ , направленная против э. д. с. возбудителя. При этом ток должен был бы изменяться от величины I_0 до величины $I_0 - I_1$. Однако этот процесс протекает неполностью и прекращается в тот момент, когда ток становится равным нулю, т. е. когда гаснет дуга в решетке. На рис. 2 сплошной линией показано действительное изменение тока, а пунктиром — продолжение этой линии в соответствии с соотношением (2).

¹ Авторское свидетельство № 95094 от 5 февраля 1952 г., выданное на имя О. Б. Брона, А. В. Мозаевского, Я. Н. Штрафуна и В. А. Образцова; авторское свидетельство № 96296 от 15 января 1953 г., выданное на имя О. Б. Брона и В. А. Образцова.

Напряжение на обмотке возбуждения до момента отключения машины равно U_0 . Во время процесса гашения поля оно меняет свой знак и становится равным $U_m = U_0 - U_\partial$. Эта величина не должна превосходить напряжения, допустимого по условиям прочности изоляции ротора.

Обозначив кратность перенапряжения на обмотке возбуждения через $U_m/U_0 = k$ и приняв во внимание, что $U_\partial/U_0 = k + 1$, найдем длительность процесса гашения поля, подставив в уравнение (2) $i = 0$:

$$t_m = \tau \ln \left(1 + \frac{1}{k} \right). \quad (3)$$

Таким образом, длительность процесса отключения уменьшается с возрастанием напряжения на дугогасительной решетке, т. е. с возрастанием числа пластин этой решетки. Ограничивающим фактором является величина U_m — напряжение на обмотке возбуждения, допускаемую величину которого можно принять равной 80% от заводского испытательного напряжения.

Если падением напряжения в активном сопротивлении обмотки возбуждения можно пренебречь по сравнению с напряжением на дугогасительной решетке, что имеет место в крупных синхронных машинах, то, подставляя в уравнение (1) $r = 0$, получим линейную зависимость тока от времени:

$$i = I_0 \left(1 - \frac{k}{\tau} t \right), \quad (4)$$

а длительность процесса гашения поля оказывается равной:

$$t_m = \frac{\tau}{k}. \quad (5)$$

В насыщенных машинах, особенно при форсировании возбуждения, величина индуктивности обмотки возбуждения сильно зависит от

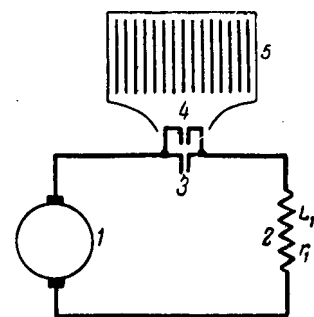


Рис. 1.

1 — возбудитель; 2 — обмотка возбуждения генератора; 3 — главные контакты автомата гашения поля; 4 — дугогасительные контакты; 5 — дугогасительная решетка.

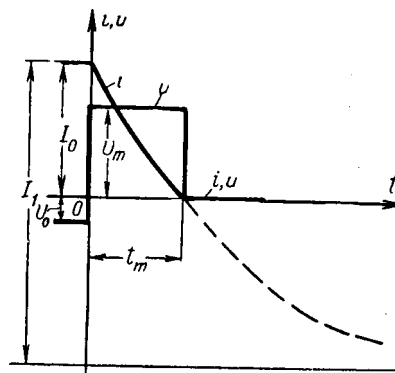


Рис. 2.

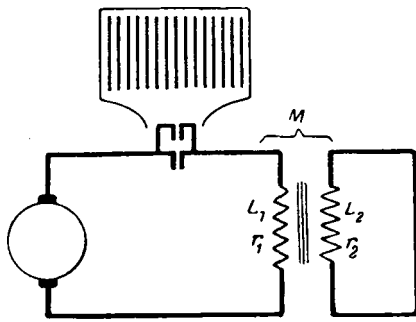


Рис. 3.

тока. Для таких машин уравнение переходного процесса в цепи обмотки возбуждения при $r=0$ записывается в следующем виде:

$$\frac{d\psi}{dt} + U_0 = U_0, \quad (6)$$

где $\psi = Li$ — полный магнитный поток возбуждения.

Интегрируя уравнение (6), получим:

$$\psi = \psi_0 - U_0 t. \quad (7)$$

Из этого соотношения следует, что в рассматриваемом случае по линейному закону изменяется магнитный поток — от своего начального значения ψ_0 до нуля. Следовательно, ток возбуждения насыщенной машины, связанный с магнитным потоком нелинейной зависимостью, изменяется в процессе гашения поля по нелинейному закону. Длительность процесса гашения поля найдем, положив $\psi = 0$:

$$t_m = \frac{\psi_0}{kU}. \quad (8)$$

Необходимо отметить следующую важную особенность: в рассматриваемых случаях осуществляются оптимальные условия гашения поля, т. е. при заданной кратности перенапряжения длительность процесса гашения поля является минимальной.

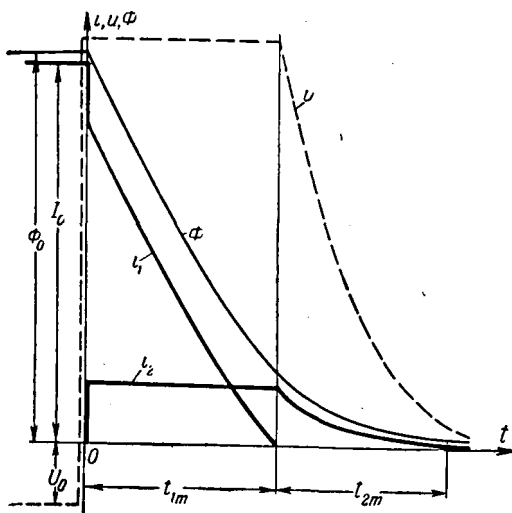


Рис. 4.

При гашении поля крупных синхронных машин приходится считаться с наличием в них успокоительных обмоток или демпфирующих контуров. Рассмотрим гашение магнитного поля автоматом с дугогасительной решеткой при наличии успокоительной обмотки (рис. 3).

Обозначим индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения через L_1 и r_1 , а параметры успокоительной обмотки — через L_2 и r_2 . Допустим, что коэффициент связи между обмотками близок или равен единице. В этом случае взаимная индуктивность $M = \sqrt{L_1 L_2}$ и уравнения переходного процесса можно записать так:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + \sqrt{L_1 L_2} \frac{di_2}{dt} + r_1 i_1 + U_0 - U_0 = 0; \quad (9)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_1 L_2} \frac{di_1}{dt} + r_2 i_2 = 0. \quad (10)$$

Интегрируя совместно уравнения (9) и (10), получим:

$$i_1 = -I_0 k + I_0 (k+1) \frac{\tau_1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (11)$$

$$i_2 = I_0 \tau (k+1) \frac{\tau_1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (12)$$

где I_0 — начальное значение тока возбуждения;
 k — кратность перенапряжения на обмотке возбуждения;

τ_1 — постоянная времени обмотки возбуждения;

τ — постоянная времени всей цепи, равная сумме постоянных времени обмотки возбуждения и успокоительной обмотки;

$$\tau = \frac{r_1}{r_2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}.$$

Уравнения (9) и (10) справедливы для промежутка времени, в течение которого в решетке горит дуга. Как только дуга погаснет, ток i_1 становится равным нулю, а ток i_2 начинает изменяться по новому закону:

$$i_2 = I_0 k \sigma e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (13)$$

где τ_2 — постоянная времени успокоительной обмотки.

Время горения дуги найдем из уравнения (11), приравняв в нем $i_1 = 0$:

$$t_{1m} = \tau \ln \left[\frac{k+1}{k} \cdot \frac{\tau_1}{\tau} \right]. \quad (14)$$

На рис. 4 приведены кривые, характеризующие описываемый процесс.

Так же как и в предыдущем случае, напряжение на обмотке возбуждения остается постоянным, пока горит дуга. После ее погасания напряжение начинает уменьшаться по экспоненциальной зависимости:

$$u = U_m e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (15)$$

Во время горения дуги в решетке магнитный поток изменяется следующим образом:

$$\Phi = \Phi_0 \left[-k + (k+1)e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (16)$$

а после погасания дуги изменяется по другому закону:

$$\Phi = \Phi_0 k \frac{\tau_2}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (17)$$

Процесс гашения поля можно считать закончившимся, когда э. д. с. статора, возбуждаемая током ротора, упадет ниже 200 в. При этом происходит естественное погасание дуги внутри машины. Указанное выше условие может быть осуществлено тогда, когда ток в успокоительной обмотке, изменяясь по уравнению (14), снизится до величины I_0/p , где p — некоторое число, определяемое по внешней характеристике машины. Например, для генераторов Куйбышевской ГЭС $p = 105$.

Длительность спадания тока в успокоительной обмотке можно получить из уравнения (14), положив в нем $i_2 = I_0/p$:

$$t_{2m} = \tau_2 \ln pk\tau. \quad (18)$$

И, наконец, длительность процесса гашения поля будет равна:

$$t_m = t_{1m} + t_{2m} = \tau \ln \left(\frac{k+1}{k} \frac{\tau_1}{\tau} \right) + \tau_2 \ln pk\tau. \quad (19)$$

Для получения минимального значения времени t_m продифференцируем соотношение (21) по k и приравняем производную нулю. В результате получим:

$$k = \frac{\tau_1}{\tau_2}. \quad (20)$$

Подставив это значение в уравнение (19), найдем, что $t_{1m} = 0$, а полное время гашения поля:

$$t_m = \tau_2 \ln \frac{\tau_1}{\tau} p\tau. \quad (21)$$

При определении числа пластин дугогасительной решетки необходимо учитывать два фактора. Во-первых, кратность перенапряжения k должна быть выбрана такой, чтобы напряжение на кольцах ротора не превышало допустимой величины. Во-вторых, величина k должна удовлетворять соотношению (20).

Для гидрогенераторов отношение τ_1/τ_2 велико и может составлять несколько десятков, а следовательно, и минимальное значение времени t_m не может быть достигнуто, так как при этом напряжение на кольцах ротора превысит допустимую величину. Для турбогенераторов, у которых демпфирующее действие самого ротора значительно, отношение τ_1/τ_2 невелико и поэтому кратность перенапряжения может быть выбрана по соотношению (20).

Приведенные выше соображения справедливы, если напряжение на зажимах дугогасительной решетки сохраняет постоянную величину при всех значениях тока. Опыт показывает, что это поло-

жение имеет место в широком диапазоне токов, однако оно может нарушиться при приближении тока к нулю [Л. 3]. При этом для предотвращения возникающих при этом опасных перенапряжений параллельно секциям дугогасительной решетки включаются шунтирующие сопротивления. Выбирая различные величины сопротивлений, подключенных к отдельным секциям решетки, можно добиться определенной очередности погасания дуг в этих секциях. Последними погаснут дуги в промежутках между теми пластинами, к которым шунтирующие сопротивления не присоединяются.

Величина шунтирующих сопротивлений подбирается такой, что через них протекает ток, составляющий всего несколько процентов от тока возбуждения. Поэтому габариты шунтирующих сопротивлений невелики, и эти сопротивления не оказывают заметного влияния на продолжительность процесса гашения поля.

Применение шунтирующих сопротивлений позволяет получить практически постоянное напряжение на решетке при всех изменениях тока в дуге; тем самым полностью исключается опасность перенапряжений.

Пластины дугогасительной решетки (рис. 5) представляют собой плоские медные диски толщиной 2 мм, насаженные на изолированный стальной цилиндр с промежутками между дисками, равными 1,5 мм. Снаружи диски охвачены изолированным стальным цилиндром, имеющим продольную щель для входа дуги. Через каждые 10—11 пластин между дисками помещаются катушки, имеющие по семь витков. По катушкам начинает протекать ток дуги в момент ее вхождения в решетку. Соседние катушки намотаны в противоположные стороны и, следовательно, их магнитные поля направлены навстречу друг другу. В результате этого в дугогасительной решетке возникает радиальное магнитное поле и дуга приходит во вращательное движение вокруг оси решетки. Дуга движется с большой скоростью, не плавит пластин решетки, и вся энергия, выделяющаяся в дуге, распределяется равномерно по поверхности пластин.

Размеры пластин выбираются такими, чтобы автомат, поглощающий всю энергию, выделяющуюся при гашении поля, не перегревался выше допускаемых температур. Автомат, установленный на Куйбышевской ГЭС, может произвести пять гашений поля подряд.

Следует отметить, что описанный автомат гашения поля должен работать только в аварийных режимах, когда требуется быстрое гашение поля. Обычно же при снятии возбуждения синхронной машины производится гашение поля возбуждателя. При этом цепь ротора не размыкается и напряжение снижается медленно.

Результаты испытаний. Измерения, произведенные на синхронном генераторе мощностью 4,5 Мва, показали, что при использовании обычного автомата, замыкающего обмотку возбуждения на активное сопротивление, время гашения поля оказывается равным 3,5 сек [Л. 2, 4]. Гашение поля той же машины при помощи автомата

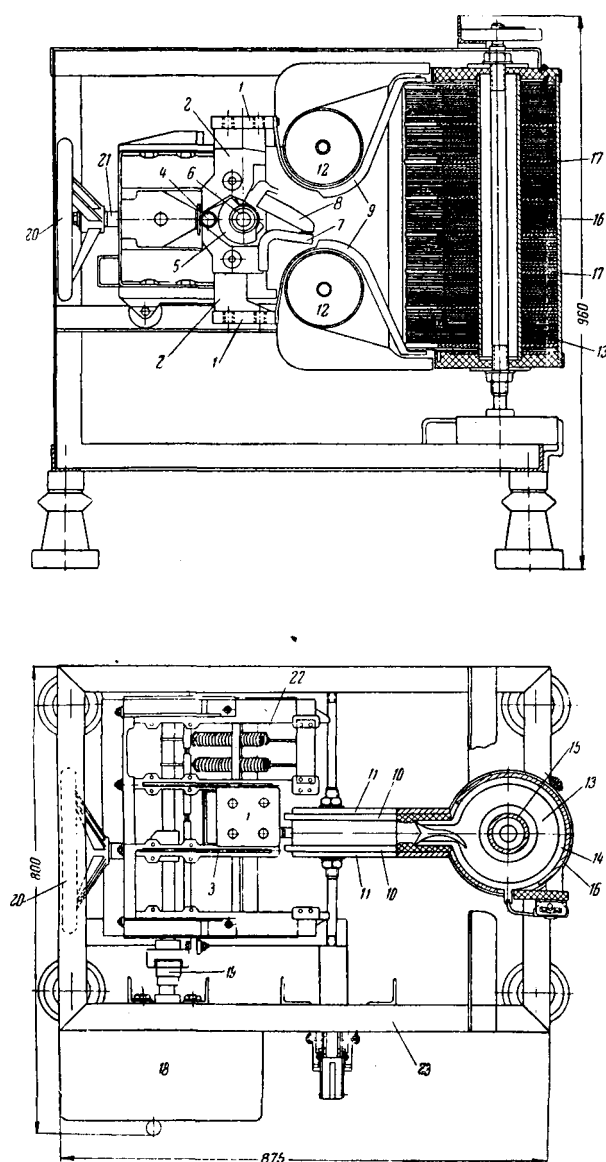


Рис. 5. Автомат гашения поля АГП-1.

1 — зажимы; 2 — неподвижные контакты; 3 — щетки; 4 — подвижной главный контакт; 5 — кулачок; 6 — вал; 7, 8 — дугогасительные контакты; 9 — рога; 10, 11 — щетки дугогасительной камеры; 12 — постоянные магниты; 13 — кольцевые медные пластины; 14 — фибровые прокладки; 15, 16 — стальные цилиндры; 17 — дугогасительные катушки; 18 — соленоидный привод; 19 — муфта; 20 — маховичный привод; 21 — вал; 22 — расцепитель; 23 — каркас.

с дугогасительной решеткой, число пластин которой было подобрано таким образом, чтобы в обоих случаях наибольшее значение напряжения на обмотке возбуждения было одинаковым, превосходит за 0,39 сек.

На рис. 6 приведены осциллограммы, полученные при гашении поля более мощных генераторов. После вхождения дуги в решетку (точка *a* на рис. 6, *a*) напряжение на автомате практически остается постоянным до того момента, пока ток не достигает нуля. Погасание дуги происходит тремя стадиями (точки *b*, *c* и *d*), что обусловливается наличием шунтирующих дугу сопротивлений. После того как ток достигает нуля и гаснет последняя дуга в решетке (точка *d*), напряжение спадает по экспоненте. Это явление вызвано дей-

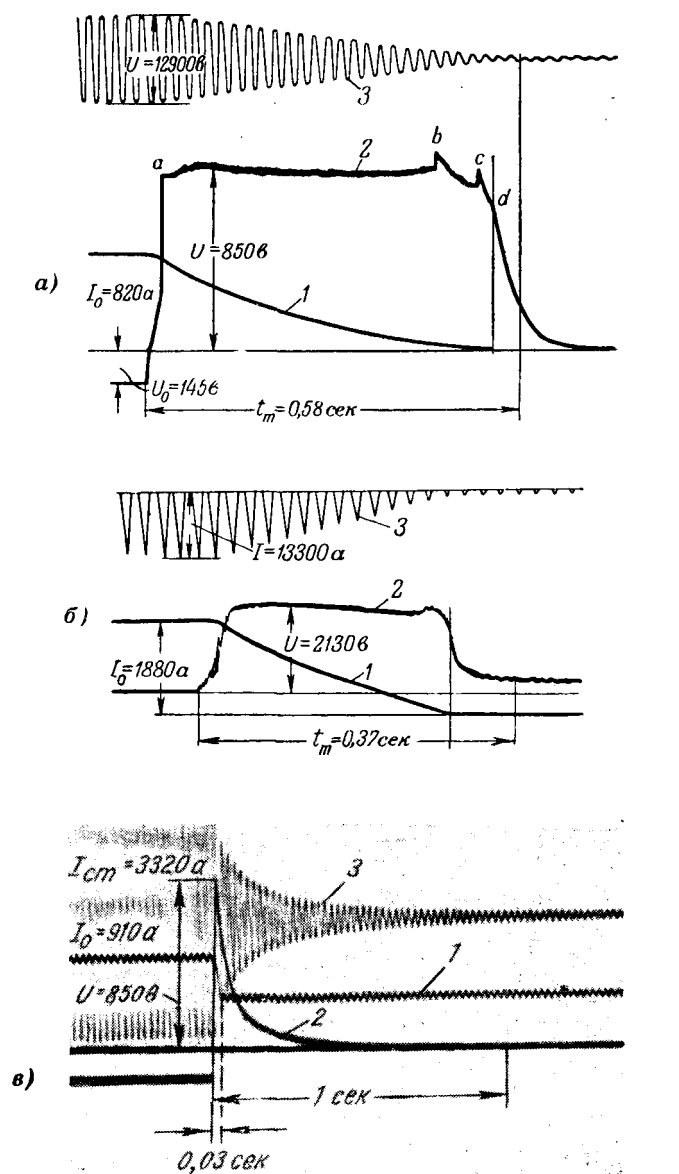


Рис. 6. Осциллограммы гашения поля.

a — при холостом ходе гидрогенератора 26,9 Мвт; *b* — при коротком замыкании гидрогенератора 105 Мвт (Куйбышевская ГЭС), работавшего с нормальным током возбуждения; *v* — при коротком замыкании турбогенератора 25 Мвт, работавшего с нормальным током возбуждения.

1 — ток возбуждения; 2 — напряжение на обмотке возбуждения; 3 — ток статора.

ствием успокоительной обмотки. Полная продолжительность процесса гашения поля в этом случае оказывается равной 0,59 сек.

При тех же условиях было произведено гашение поля генератора установленным на станции автоматом, замыкающим обмотку возбуждения на активное сопротивление. Полная продолжительность процесса оказалась равной 3,34 сек. При этом дуга на контактах автомата держалась в течение 1,4 сек и сильно оплавляла их, что нельзя считать допустимым.

Таким образом, в данном случае введение дугогасительной решетки ускорило процесс гашения поля в 6 раз. Кроме того, повысилась надежность гашения поля — новый автомат не имел оплавленных контактов и пластин.

Анализ статической устойчивости сложных энергосистем при помощи электронных счетных машин

Кандидат техн. наук, доц. Л. В. ЦУКЕРНИК
и кандидат техн. наук Н. А. КАЧАНОВА

При разработке устройств автоматического регулирования режимов энергосистем, в особенности в связи с их объединением и осуществлением дальних электропередач, анализ устойчивости должен производиться весьма обстоятельно, в частности, в отношении средств, надежно предотвращающих самораскачивание при различных режимах и схемах работы системы и при возможных отклонениях расчетных параметров. Для такого анализа весьма эффективно могут быть применены электронные счетные машины.

Разумеется, это не следует понимать как противопоставление электронных счетных машин моделирующим устройствам, при помощи которых также можно успешно решать подобные задачи.

Принципы программирования расчетов устойчивости. Задача анализа статической устойчивости сложной автоматически регулируемой энергосистемы может быть разделена на следующие основные этапы: 1) вычисление коэффициентов характеристического уравнения системы; 2) вычисление критериев устойчивости; 3) определение границ области устойчивости в пространстве заданных параметров.

Вычисление коэффициентов характеристического уравнения — подготовительная, но весьма ответственная и трудоемкая часть работы. Уравнения возмущенного движения энергосистемы целесообразно представить в матричной форме, после чего легко может быть получен алгоритм для составления программы. Элементы исходных матриц определяются непосредственно по данным обычного электрического расчета исходного режима энергосистемы и по параметрам машин и автоматических регуляторов.

Составление уравнений возмущенного движения энергосистемы, придание им матричной формы и получение алгоритма для программирования подробно описаны в специальных работах [Л. 1 и 2]. Здесь же отметим, что программа вычислений на электронной счетной машине сводится к разворачиванию характеристического определителя, порядок которого равен числу стан-

ций в расчетной схеме замещения и элементами которого являются операторные полиномы с вещественными коэффициентами.

Вычисление критериев устойчивости наиболее удобно производить по программе, соответствующей известному алгоритму Раута [Л. 3], так как при этом получается последовательность (рекуррентность) простых арифметических операций, одинаковых для характеристических уравнений любого порядка. В этом отношении критерии устойчивости в виде определителей Гурвица [Л. 3] менее удобны для программирования.

Но при анализе устойчивости автоматически регулируемых систем желательно не только проверить устойчивость при заданных условиях, но главным образом выяснить влияние различных факторов (параметров автоматических регуляторов, параметров основного оборудования и т. п.), для чего необходимо определить границы области устойчивости в пространстве интересующих нас при анализе параметров. Наиболее удобно при решении этой задачи пользоваться плоскостными диаграммами в функции двух выбранных параметров. Серии таких диаграмм, полученные путем изменения остальных параметров, влияние которых исследуется, позволяют составить «альбом областей устойчивости».

Определение границ области устойчивости в плоскости заданных параметров программируется на основе использования «логических» операций, обеспечиваемых электронной счетной машиной, с систематическим применением в качестве «подпрограммы» вычисления критерия Раута. Схема программы заключается в следующем.

В качестве исходных данных в машину вводятся коэффициенты характеристического уравнения, представленные в виде функции двух параметров, например коэффициентов регулирования возбуждения генераторов энергосистемы. В процессе автоматического машинного счета этим параметрам дается последовательный ряд численных значений с достаточно малым расчетным шагом. Для каждой пары значений непре-

Из рис. 6,б следует, что полная продолжительность процесса гашения поля гидрогенератора мощностью 105 Мвт оказалась равной всего 0,37 сек.

При коротком замыкании в цепи статора и при двойном токе возбуждения осциллограмма имеет аналогичный характер, а полная продолжительность процесса гашения поля составляет 0,7 сек.

При гашении поля турбогенератора мощностью 25 Мвт дуга в автомате гаснет весьма быстро — за 0,03 сек (рис. 6,в). Полная продолжительность процесса гашения поля, равная 1 сек, определяется затуханием поля, поддерживаемого

вихревыми токами в теле ротора, как это и следует из соотношений (17) и (21).

Литература

1. О. Б. Брон. Движение электрической дуги в магнитном поле. Госэнергоиздат, 1954.
2. О. Б. Брон. Продолжительность процессов гашения поля. Электросила, № 12, 1954.
3. О. Б. Брон и В. А. Образцов. Автоматы для гашения поля крупных синхронных машин. Электросила, № 14, 1956.
4. О. Б. Брон. Гашение магнитного поля. Труды Ленинградского института авиационного приборостроения, вып. VIII, 1954.

[22.19.1956]



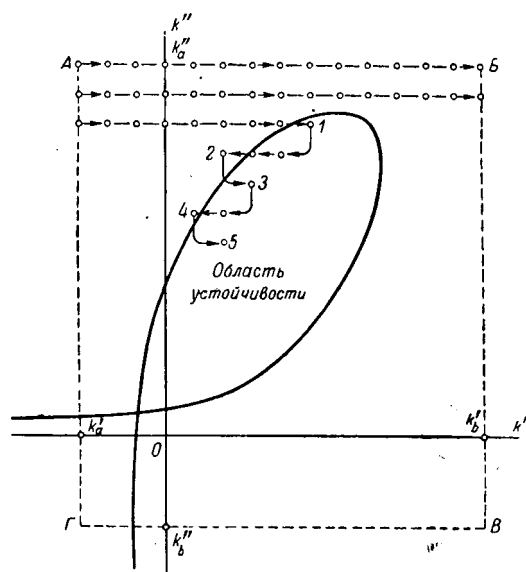


Рис. 1. Схема программы слежения за границей области устойчивости (печатаются только точки, отмеченные номерами в указанной последовательности).

рывно вычисляется критерий Раута. Одновременно осуществляется автоматическое слежение за переменной знака критерия Раута. В результате из машины попарно выводятся значения варьируемых параметров для начала и конца интервала, в котором происходит изменение знака критерия. Эти значения и являются предельными координатами, между которыми проходит искомая граница области устойчивости. Определение расположения областей устойчивости и неустойчивости относительно границы также производится из указанных выше расчетов критерия Раута.

Такой метод определения границы области устойчивости значительно удобнее для программирования, чем известный метод D -разбиения [Л. 3]. При нелинейной зависимости коэффициентов характеристического уравнения от параметров, в плоскости которых производится D -разбиение, применение метода D -разбиения в ряде случаев связано с весьма большими затруднениями.

Вычисление точек границы области устойчивости в плоскости двух параметров (k' и k'') для одного из осуществленных вариантов программы поясняется на рис. 1. Предварительно намечаются крайние значения параметров k' и k'' , определяющие стороны прямоугольника $ABBG$, внутри которого желательно найти границу области устойчивости. Обычно имеются хотя бы общие соображения о знаке, о порядке величины или о практически осуществимых значениях k'_a, k'_b и k''_a, k''_b (рис. 1), в противном случае они намечаются произвольно. Одновременно учитываются возможные ограничения значений k' и k'' , связанные с условием положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, и выбирается величина расчетного шага по осям k' и k'' .

Расчет может быть начат от произвольной точки, например от A . Для этой точки машина рассчитывает критерий Раута с оперативным запоминанием результата, без вывода его из машины (без печатания). Затем делается расчетный шаг по направлению k' , снова рассчитывается критерий Раута, и результат сравнивается с предыдущим. Если знак критерия не изменился, то делается новый расчетный шаг и т. д. Если знак критерия изменился, т. е. пересечена граница области устойчивости, то машина печатает координаты данной точки (k' и k''). Этим фиксируется точка 1 (рис. 1).

После этого машина начинает автоматически следить за границей. Для этого она дважды делает расчетный шаг в направлении, перпендикулярном предыдущему, и рассчитывает критерий Раута в направлении, обратном первоначальному, до тех пор, пока не изменится знак критерия. Тогда печатаются координаты точки 2, чем фиксируется первый интервал 1-2, в котором проходит искомая граница. Таким же образом расчет продолжается дальше.

Если при расчете крайние значения k' достигаются без перемены знака критерия Раута, то машина начинает снова считать в том же направлении k' , сдвинувшись на расчетный шаг по стороне AG прямоугольника (рис. 1). Если граница области в пределах прямоугольника $ABBG$ не найдена, то можно уменьшить расчетный шаг настолько, чтобы проверить, не находится ли область устойчивости в пределах прямоугольника со сторонами, равными первоначальному расчетному шагу (на рис. 1 для наглядности расчетный шаг показан очень большим).

Описанная схема программы «слежения» была усовершенствована Институтом математики Академии наук УССР [Л. 4] с целью обеспечить возможность непрерывного обхода границы области устойчивости замкнутой конфигурации.

Группируя попарно параметры, в плоскости которых строится граница области устойчивости, а также последовательно изменяя другие исходные данные, можно получить указанный выше «альбом областей устойчивости».

Расчеты статической устойчивости энергосистемы. В 1954—1956 гг. институты электротехники и математики Академии наук УССР совместно выполнили на электронной счетной машине ряд расчетов устойчивости и электромеханических переходных процессов электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва (в основном по заданию Технического управления МЭС). В настоящей статье дается краткая характеристика содержания расчетов статической устойчивости¹.

¹ Все расчеты выполнены в относительных единицах ($U_{баз}=400$ кв, $P_{баз}=1\,150$ Мвт, время в радианах). Машина считает с шестью и печатает результаты с пятью значащими цифрами. Следовательно, точность расчетов определяется точностью вводимых в машину данных. Все расчеты на машине дублировались, после записи программы рассчитывались контрольные варианты. Программирование типовых задач требовало 10...20 ч, вычисление одной кривой 15...45 мин.

Рассматривались три типа автоматического регулирования возбуждения генераторов Куйбышевской ГЭС (см. приложение): 1) по отклонениям напряжения и тока, а также по первой и второй производным тока; 2) по отклонениям напряжения и тока, а также по скольжению и ускорению относительно оси, вращающейся с синхронной скоростью исходного режима; 3) по отклонениям напряжения и тока — безынерционное компаундирование ($T_I = 0$) и запаздывающий электромагнитный корректор напряжения ($T_U = 3 \text{ сек}$), включенные на главный или вольтодобавочный возбудитель.

При рассмотрении первого типа регулирования в структурной схеме учитывалось запаздывание генератора ($T_{gn} = 5,5 \text{ сек}$), вольтодобавочного возбудителя ($T_a = 0,12 \text{ сек}$), регулятора ($T_p = 0,1 \text{ сек}$) и наличие жесткой отрицательной обратной связи от напряжения возбуждения. Этот тип автоматического регулирования возбуждения соответствует, в основном, регулятору сильного действия, предусмотренному для большей части генераторов Куйбышевской ГЭС.

Второй тип регулирования возбуждения аналогичен первому и отличается от разработанного ЦНИЭЛ МЭС регулятора «сильного действия» по углу и первой и второй производным угла тем, что в нем устраняется необходимость телепередачи угла. Скольжение и ускорение относительно оси, вращающейся с синхронной скоростью исходного режима, может измеряться при помощи своеобразного запоминающего устройства.

Автоматическое регулирование третьего типа осуществлено на первых генераторах Куйбышевской ГЭС в качестве основного, а на последующих — в качестве резервного.

Анализировалась возможность регулирования по индивидуальному току генераторов. Куйбышевская ГЭС при этом замещалась двумя эквивалентными регулируемым генераторами (рис. 2, схема 1). Для этой схемы характеристическое уравнение системы имеет 10-й порядок. Параметры регулирования по току (k) и по напряжению b или по первой и второй производным тока (k', k''), в плоскости которых определялась граница области устойчивости, входят в большинство коэффициентов характеристического уравнения нелинейно в виде квадратов и произведений. Для таких случаев D -разбиение обычным способом требует весьма трудоемких вычислений.

Расчеты на электронной счетной машине показали, что для первого типа автоматического регулирования возбуждения области устойчивости не имеется, что было подтверждено также аналитическим расчетом и совпадает с результатами испытаний на электродинамической модели МЭИ [Л. 5]. Следовательно, для этого типа требуется групповое регулирование, например по среднему току параллельно работающих генераторов. Области устойчивости для группового регулирования приводятся ниже на рис. 3, а и 4, а.

Для автоматического регулирования третьего типа область устойчивости имеется и приводится на рис. 2 (кривая 1). На том же рисунке приво-

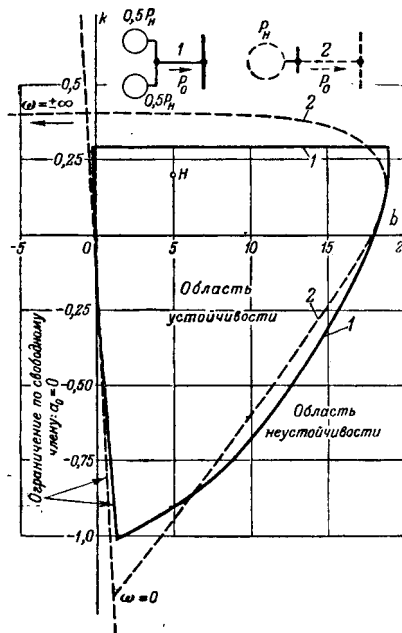


Рис. 2. Области устойчивости ($P_0 = 1,0$) при замещении Куйбышевской ГЭС двумя эквивалентными генераторами (1) и одним эквивалентным генератором (групповое регулирование) (2).

дится область устойчивости при групповом регулировании (схема 2, кривая 2). Точка H соответствует нормальной настройке регулятора. Из сопоставления видно, что групповое регулирование увеличивает запас устойчивости. В расчетах не

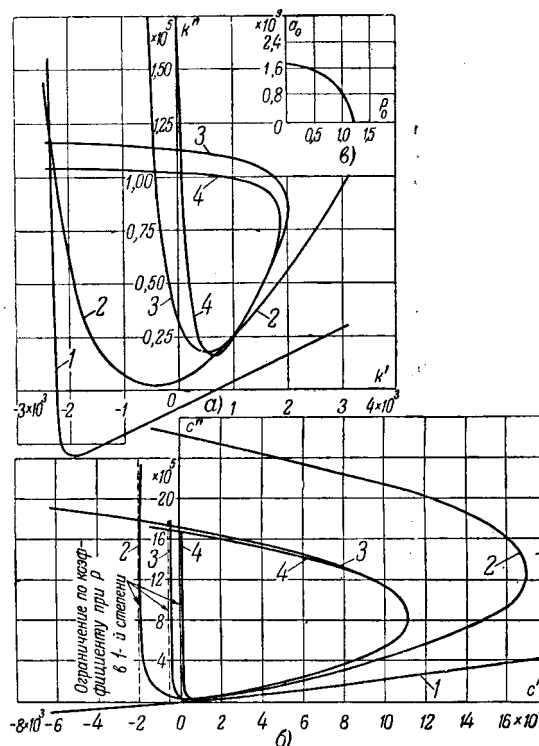


Рис. 3. Области устойчивости ($k = 0,2$, $b = 5,0$).

a — автоматическое регулирование возбуждения первого типа; b — автоматическое регулирование возбуждения второго типа; c — график изменения a_0 в зависимости от P_0 .
1 — $P_0 = 0$; 2 — $P_0 = 0,5$; 3 — $P_0 = 1,0$; 4 — $P_0 = 1,1$.

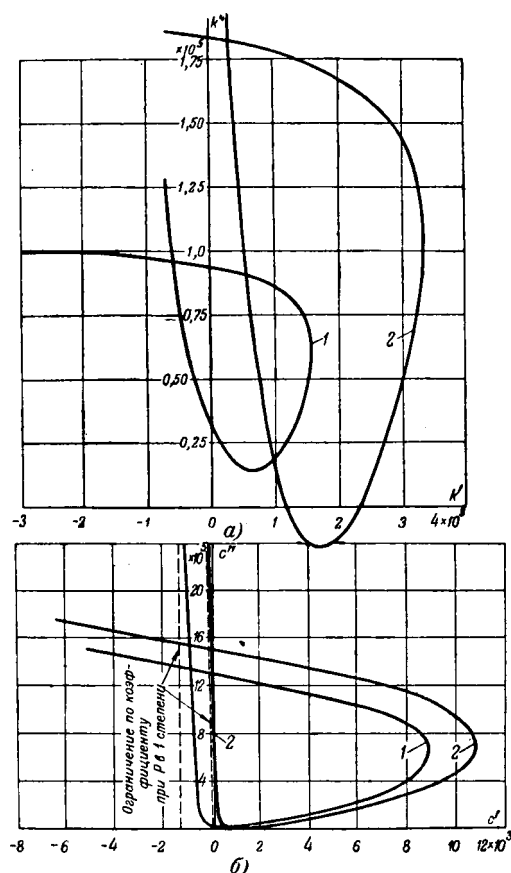


Рис. 4. Области устойчивости двухцепной передачи ($P_0 = 1,0$, $k = 0,2$, $b = 25,0$).

a — автоматическое регулирование первого типа; b — автоматическое регулирование второго типа.
1 — включены все участки обеих цепей линии и устройства последовательной и параллельной компенсации; 2 — отключены одна цепь головного участка линии и устройства продольной и поперечной компенсации.

учитывалось механическое демпфирование машин, следовательно, действительный запас устойчивости будет несколько больше.

Определялся запас устойчивости по передаваемой мощности и оценивалась возможность самораскачивания при различных нагрузках электропередачи². Для этого рассчитывались серии областей устойчивости при автоматическом регулировании возбуждения первого и второго типов (групповое регулирование по току) и изменений передаваемой мощности от 0 до 1,1 для случая, когда последовательная компенсация отсутствует и пропускная способность линии (идеальный предел мощности) равняется 1,15.

Для сопоставления на рис. 3 приведены результаты расчета областей устойчивости в плоскости коэффициентов регулирования по производным тока k' , k'' и по скольжению и ускоре-

нию c' , c'' . Из графика рис. 3 видно, что в обоих случаях передаваемую мощность можно довести до пропускной способности линии, если коэффициенты регулирования будут находиться в пределах совпадающей части областей устойчивости.

Можно полагать, что при одинаковых коэффициентах регулирования (в относительных единицах) конструктивные параметры регуляторов первого и второго типов должны быть примерно одинаковы. Различие будет лишь во входных звеньях: в случае регулятора первого типа требуются трансформаторы тока, а в случае регулятора второго типа — углоизмерительный элемент с запоминающим устройством. Поэтому можно заключить, что автоматическое регулирование второго типа по рабочим характеристикам, определяемым графиками рис. 3, имеет большие преимущества перед регулированием первого типа, так как при регулировании второго типа значительно увеличиваются области допустимых коэффициентов регулирования. Кроме того, при изменении нагрузки электропередачи совпадающая часть областей устойчивости при регулировании по скольжению и ускорению получается больше, чем при регулировании по производным тока. Например, из рис. 3 видно, что в первом случае при переходе от $P_0 = 1,0$ к $P_0 = 1,1$ совпадающая часть области устойчивости 4 составляет около 95% области 3, а во втором — лишь около 70%.

На основании положения начала координат относительно областей устойчивости (рис. 3) можно сделать вывод, что при $P_0 > 0,4$ и регулировании без производных от режимных параметров устойчивость не обеспечивается.

Была оценена возможность самораскачивания при изменениях схемы электропередачи. На рис. 4 представлены области устойчивости для двухцепной линии, рассчитанные при $P_0 = 1,0$ и тех же типах автоматического регулирования возбуждения, что и области на рис. 3. Кривые 1 от-

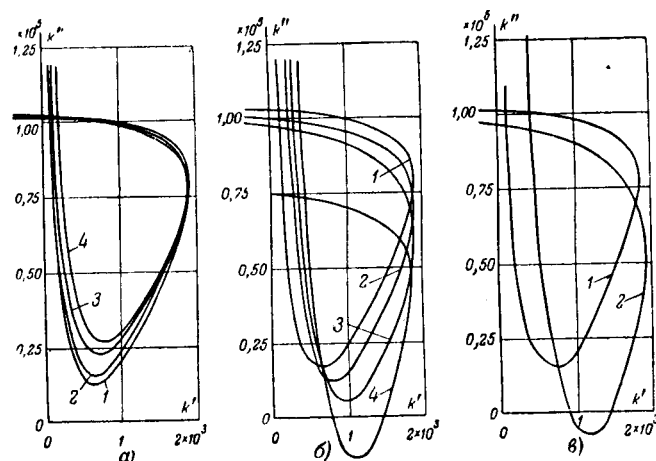


Рис. 5. Области устойчивости ($P_0 = 1,1$)

a — при изменении коэффициента регулирования по току ($b = 5$):
1 — $k = 0,1$; 2 — $k = 0,2$; 3 — $k = 0,6$; 4 — $k = 1,0$.

b — при изменении коэффициента регулирования по напряжению ($k = 0,2$):

1 — $b = 5$; 2 — $b = 10$; 3 — $b = 15$; 4 — $b = 25$.

c — при совместном изменении коэффициентов k и b :

1 — $k = 0,2$, $b = 5$; 2 — $k = 1,0$, $b = 2,5$.

² Расчеты для оценки мероприятий, обеспечивающих отсутствие самовозбуждения и самораскачивания при холостом ходе и малых нагрузках электропередачи, в настоящей работе не проводились, так как они не являются определяющими в отношении предельной передаваемой мощности и в большинстве случаев могут проводиться упрощенными методами.

носятся к случаю, когда включены все участки обеих цепей и устройства последовательной и параллельной компенсации, а кривые 2 — к случаю, когда отключены цепь головного участка передачи и компенсирующие устройства. На рис. 4 видно, что при регулировании второго типа совпадающая часть областей устойчивости значительно больше, чем при регулировании первого типа. Таким образом, при регулировании по скольжению и ускорению значительно легче без переустройства регулирования обеспечить устойчивую работу электропередачи в случае возможных изменений ее схемы. Это хорошо совпадает с результатами испытаний на динамической модели МЭИ [Л. 5].

Кривые рис. 4 показывают также, что области устойчивости компенсированной линии (кривые 1) при прочих равных условиях значительно меньше областей устойчивости некомпенсированной линии. Это указывает на то, что при наличии компенсации опасность возникновения самораскачивания больше. Это необходимо учитывать при проектировании и при эксплуатации.

Однако следует иметь в виду не только запас устойчивости в отношении самораскачивания, но и в отношении апериодического предела. Совершенно очевидно, что в рассматриваемом примере пропускная способность и апериодический предел устойчивости системы в случае компенсированной линии значительно выше, чем в случае некомпенсированной. Так, в первом случае пропускная способность линии, включая трансформаторы приемного конца, $P_{\max} = 1,87$, а во втором $P_{\max} = 1,08$. Следовательно, анализируя изменение областей устойчивости для различных вариантов, нужно одновременно анализировать характер изменения свободного члена a_0 характеристического уравнения системы (рис. 3,в) или хотя бы сопоставлять значения пропускной способности линии.

Анализ влияния коэффициентов регулирования по отклонениям напряжения и тока на устойчивость при регулировании сильного действия производился непосредственным сопоставлением серий расчетов, как показано, например, на рис. 5. Можно сделать вывод, что изменение в широких пределах коэффициента k слабо влияет на области устойчивости в плоскости k' и k'' (рис. 5,а), изменение же коэффициента b влияет несколько сильнее (рис. 5,б). Если иметь в виду, что после настройки регулятора возможна небольшая неустойчивость коэффициентов k и b , то нет оснований полагать, что эта неустойчивость может вызвать самораскачивание системы. Одновременное увеличение коэффициентов k и b (рис. 5,в) несколько уменьшает изменение области устойчивости, вызываемое увеличением только коэффициента b .

Увеличение коэффициентов k и b приводит к возрастанию свободного члена характеристического уравнения и, следовательно, повышению запаса по апериодическому пределу устойчивости.

Области устойчивости в плоскости коэффициентов регулирования по отклонениям напряже-

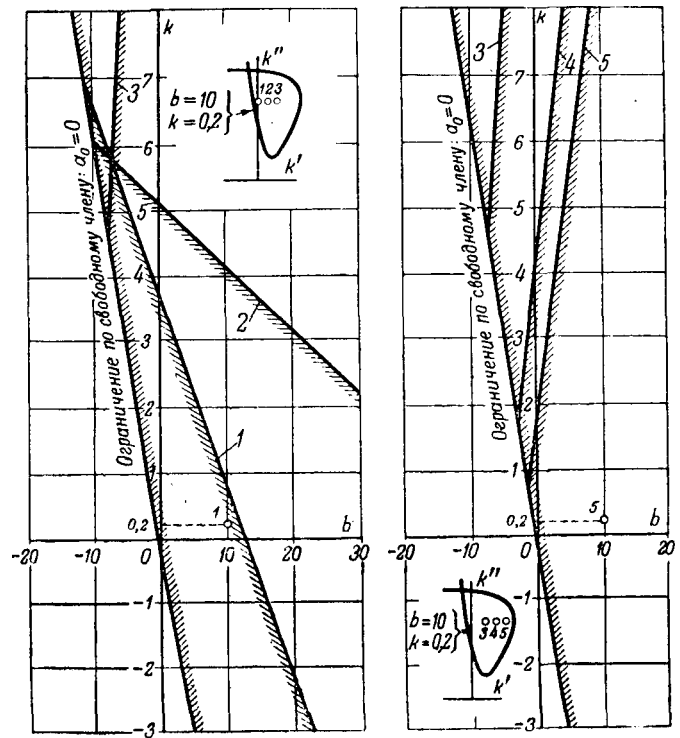


Рис. 6. Области устойчивости ($P_0 = 1,0$, $k'' = 0,75 \cdot 10^5$)
1 — $k' = 0$; 2 — $k' = 0,4 \cdot 10^3$; 3 — $k' = 0,75 \cdot 10^3$; 4 — $k' = 1,6 \cdot 10^3$;
5 — $k' = 1,8 \cdot 10^3$.

ния и тока, рассчитанные, например, при $k' = \text{var}$ и $k'' = \text{const}$, показаны на рис. 6. Каждой области соответствуют две прямые: прямая $a_0 = f(b, k) = 0$ и прямая, которая по мере увеличения k' поворачивается против часовой стрелки из положения 1 в положение 5, при этом точка пересечения с прямой $a_0 = 0$ смещается вниз.

Для наглядности на рис. 6 показана в уменьшенном виде область устойчивости в плоскости k' и k'' (для $b = 10$ и $k = 0,2$), на которой отмечено исследуемое сечение. Рассматривая, например, точку 5, находящуюся вблизи границы области устойчивости, построенной в плоскости параметров k' и k'' , можно установить, что на графике, построенном в плоскости параметров b и k , близость к границе области устойчивости не обнаруживается. Этого можно было ожидать и на том основании, что области устойчивости слабо изменяются при изменении параметров b и k в достаточно широких пределах (рис. 5).

Таким образом, можно сделать вывод, что основной анализ целесообразно проводить на основе построения областей устойчивости в плоскости параметров регулирования по производным, а не в плоскости параметров регулирования по отклонениям.

Были произведены расчеты устойчивости электропередачи с промежуточным синхронным компенсатором, при этом было принято, что синхронный компенсатор мощностью 375 Мва установлен на промежуточной подстанции электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва и что линия не имеет последовательной компенсации. При регулировании возбуждения синхронного компе-

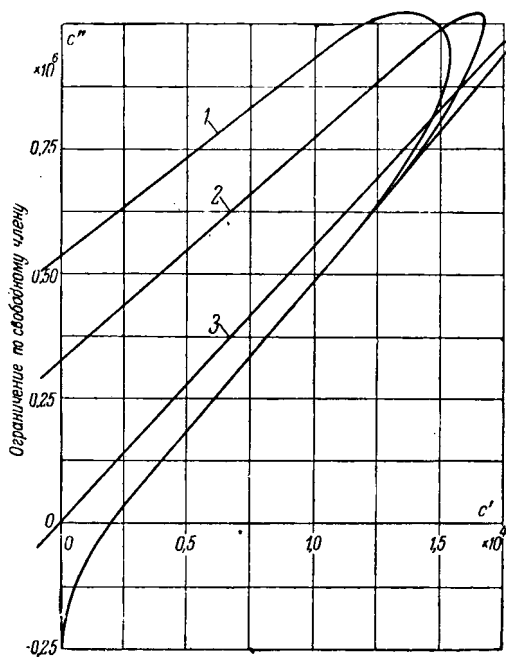


Рис. 7. Области устойчивости для электропередачи с промежуточным синхронным компенсатором

$(P_0 = 1,0, k = 0,12, b = 25,0)$

Демпферный момент компенсатора: 1 — $D = 2,0$; 2 — $D = 1,0$; 3 — $D = 0$.
Область устойчивости внутри каждой из кривых 1, 2 и 3.

сатора при помощи регулятора первого типа области устойчивости не получилось даже при значительном механическом демпферном моменте ($D=2$). При регулировании третьего типа, дополненном регулированием по скольжению и ускорению, области устойчивости были получены (рис. 7) для трех случаев: $D=0$; 1; 2. Из кривых рис. 7 можно сделать вывод о благоприятном влиянии на устойчивость механического демпферного момента, которым часто пренебрегают в расчетах.

На основе прямого сопоставления результатов расчета типичных вариантов можно судить о допустимости некоторых упрощений расчетов устойчивости.

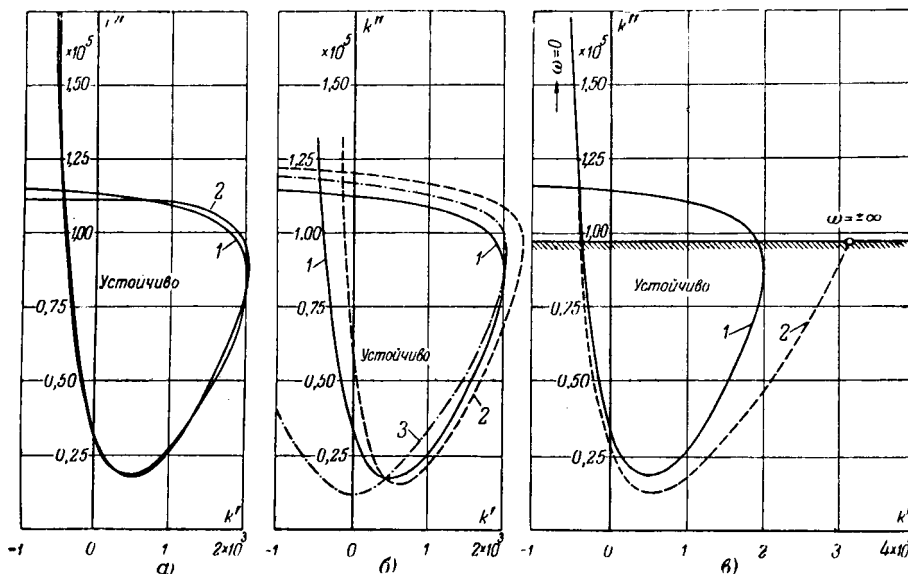
При групповом автоматическом регулировании возбуждения генераторов Куйбышевской ГЭС можно пренебречь явнополюсностью генераторов (рис. 8,а).

Замещение приемной системы шинами бесконечной мощности не сильно изменяет области устойчивости (в пределах положительных значений коэффициентов регулирования по производным) по сравнению с замещением ее эквивалентной станцией и нагрузкой (рис. 8,б).

Во всех случаях, для которых производились расчеты, области устойчивости находились внутри областей, полученных для системы с закрепленными координатами углов. Следовательно, при закреплении углов характеризуются необходимыми, но недостаточными условиями устойчивости [Л. 1 и 2]. Эти упрощенные расчеты могут быть иногда полезны для предварительного выяснения масштабов (прямоугольник $АВВГ$, рис. 1) и для устранения заведомо неудовлетворительных вариантов.

В сравнительных расчетах можно пренебрегать постоянной времени вольтодобавочного возбудителя при уменьшении ее отрицательной обратной связи от напряжения возбудителя (в расчетах предполагалось уменьшение в 5 раз). Но следует иметь в виду, что для режимов, находящихся вблизи границы области устойчивости, такое упрощение может вызвать значительную погрешность иногда в сторону преувеличения, а иногда в сторону преуменьшения области устойчивости (рис. 8,в).

Приложение. Обобщенная структурная схема сложной системы с учетом автоматического регулирования возбуждения синхронных машин (рис. 9). Передаточные функции: возбудителя \dot{F}_g , его обратной связи $\dot{F}_{o.c.}$, регулирования по отклонению угла \dot{F}_δ , регулирования по от-



клонению напряжения \dot{F}_v , регулирования по отклонению тока \dot{F}_I [Л. 3]:
при автоматическом регулировании возбуждения первого типа

$$\dot{F}_g = \frac{1}{1 + T_g p}; \quad \dot{F}_{o.c.} = -d; \quad \dot{F}_\delta = 0;$$

$$\dot{F}_v = \frac{-b}{1 + T_p p}; \quad \dot{F}_I = \frac{k + k'p + k''p^2}{1 + T_p p};$$

Рис. 8. Область устойчивости ($P_0 = 1,0$, автоматическое регулирование первого типа: $k = 0,2, b = 5$).

а) 1 — с учетом явнополюсности генераторов Куйбышевской ГЭС; 2 — без учета явнополюсности.

б) 1 — в конце линии шины бесконечной мощности; 2 — приемная система представлена нагрузкой и эквивалентной станцией, для которой $E' = \text{const}, M = \infty$; 3 — приемная система представлена нагрузкой и эквивалентной станцией, для которой $E' = \text{const}, M \neq \infty$.

в) 1 — $T_g = 0,12$ сек; 2 — $T_g = 0$.

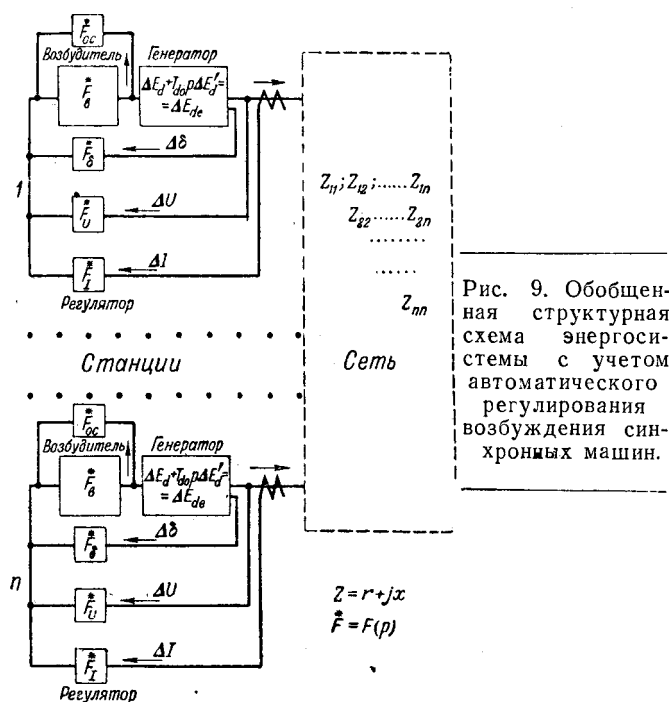


Рис. 9. Обобщенная структурная схема энергосистемы с учетом автоматического регулирования возбуждения синхронных машин.

при автоматическом регулировании возбуждения второго типа

$$\begin{aligned}\dot{\bar{F}}_s &= \frac{1}{1 + T_s p}; \quad \dot{\bar{F}}_{o.c} = -d; \quad \dot{\bar{F}}_\delta = \frac{c'p + c''p^2}{T_p p}; \\ \dot{\bar{F}}_U &= \frac{-b}{1 + T_p p}; \quad \dot{\bar{F}}_I = \frac{k}{1 + T_p p};\end{aligned}$$

при автоматическом регулировании возбуждения третьего типа

$$\begin{aligned}\dot{\bar{F}}_s &= \frac{1}{1 + T_s p}; \quad \dot{\bar{F}}_{o.c} = 0; \quad \dot{\bar{F}}_\delta = 0; \\ \dot{\bar{F}}_U &= \frac{-b}{1 + T_U p}; \quad \dot{\bar{F}}_I = k.\end{aligned}$$

Для синхронных машин, число которых в общем случае может равняться n , кроме уравнения электромагнитного переходного процесса в обмотке возбуждения, указанного на рис. 9, учитывалось также уравнение механического движения

$$(Mp^2 + Dp) \Delta\delta = -\Delta P.$$

Сеть, связывающая синхронные машины, представлена собственными и взаимными сопротивлениями.

Литература

1. Л. В. Цукерник. Дифференциальные уравнения возмущенного движения сложной энергосистемы для анализа ее статической устойчивости. Известия АН СССР, № 3, 1956.
2. Л. В. Цукерник. Обобщение уравнений динамики сложной энергосистемы и применение для анализа устойчивости электронной счетной машины. Автоматика и телемеханика, № 1, 1957.
3. А. А. Воронов. Элементы теории автоматического регулирования. Изд. 2-е, Воениз, 1954.
4. В. С. Корольков и Е. Л. Ющенко. Определение линии уровня функции двух переменных на быстродействующих электронных счетных машинах. Сборник "Вопросы техники быстродействующих счетных машин", вып. 2, изд. АН УССР, 1955.
5. В. А. Веников и И. В. Литкенс. О влиянии регулирования возбуждения на пропускную способность дальних электропередач. Электричество, № 11, 1955.

[7. 1. 1957]



Применение графиков распределения нагрузки для расчета городских сетей

Инж. Ю. А. ГЛАНЦ

Харьковское отделение Теплоэлектропроекта

Характер распределения нагрузок в сети оказывает большое влияние на выбор ее схемы и режимов работы. Особенно большое значение этот фактор приобретает при проектировании сетей низкого напряжения, в частности городских.

Выбор схемы сети для того или иного распределения нагрузок должен осуществляться на основе технико-экономических расчетов. Предлагаемый метод построения графиков распределения нагрузки облегчает выполнение таких расчетов и выявление наиболее экономичных решений при проектировании сети. Идея построения графиков заимствована нами у В. П. Хашинского [Л. 1].

Рассмотрим сначала радиальную линию, питающую нагрузки, распределенные по ее длине. График распределения нагрузки вдоль такой линии может быть изображен так, как это показано на рис. 1.

Площадь графика (рис. 1) может быть определена как сумма моментов нагрузки:

$$\sum P_i l_i = P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + P_4 l_4$$

или

$$\sum P_i l'_i = P_1 l'_1 + P_2 l'_2 + P_3 l'_3 + P_4 l'_4,$$

где P_1, P_2, P_3 и P_4 — мощности, передаваемые по участкам линии;

l_1, l_2, l_3 и l_4 — длины участков;

P_1, P_2, P_3 и P_4 — присоединенные к линии нагрузки;

l'_1, l'_2, l'_3 и l'_4 — расстояния присоединенных к линии нагрузок от источника питания.

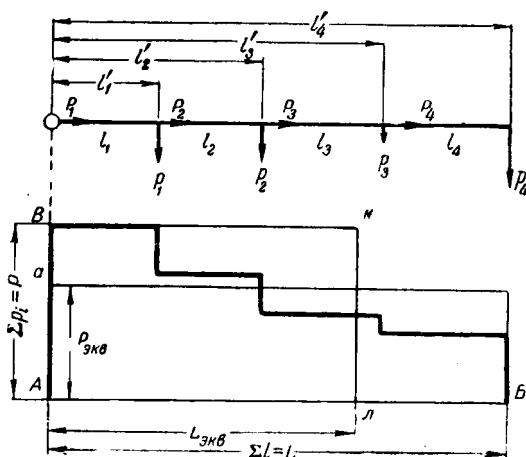


Рис. 1.

Поскольку каждая из сумм моментов нагрузки определяет одну и ту же площадь, можно написать:

$$\sum P_i l_i = \sum p_i l_i'. \quad (1)$$

Ступенчатый график, представленный на рис. 1, может быть заменен эквивалентным прямоугольным графиком. Характерны два случая такой замены: 1) ступенчатый график заменяется прямоугольным $Aa6B$ с основанием прямоугольника, равным длине линии $\sum l_i = L$; 2) ступенчатый график заменяется прямоугольным $ABкл$ с высотой прямоугольника, равной суммарной нагрузке линии $\sum p_i = P$.

В первом случае мы получаем возможность при расчете сети заменить распределенную нагрузку одной эквивалентной сосредоточенной нагрузкой, приложенной на конце линии. Эквивалентная нагрузка

$$P_{\text{экв}} = \frac{\sum p_i l_i'}{L}. \quad (2)$$

Во втором случае мы также получаем возможность заменить распределенную нагрузку сосредоточенной, но в отличие от предыдущего последняя принимается равной суммарной нагрузке линии $\sum p_i = P$, а точка приложения этой нагрузки от источника питания находится на некотором эквивалентном расстоянии

$$L_{\text{экв}} = \frac{\sum p_i l_i'}{P}. \quad (3)$$

Перейдем к относительным значениям эквивалентной нагрузки $P_{\text{экв}}^*$ и эквивалентного расстояния $L_{\text{экв}}^*$, при этом первое будем рассматривать как часть суммарной нагрузки линии, а второе — как часть длины линии. Нетрудно убедиться, что

$$P_{\text{экв}}^* = L_{\text{экв}}^* = \frac{\sum p_i l_i'}{PL} = \alpha. \quad (4)$$

Коэффициент α впервые ввел В. М. Хрущов [Л. 2], который назвал его коэффициентом, харак-

теризующим распределение нагрузки, и вывел эту формулу для его определения.

Коэффициент α может изменяться в пределах от 0 до 1, причем верхний предел относится к случаю, когда по линии осуществляется питание сосредоточенной на ее конце нагрузки, а нижний, когда питание нагрузки осуществляется непосредственно от источника питания.

Коэффициент α можно определить графически, если график распределения нагрузки построить в относительных единицах, приняв за единицу нагрузки суммарную нагрузку, а за единицу длины полную длину линии. Коэффициент α определится ординатой $Aa=Bб$ или абсциссой $Al=Bк$ (рис. 1).

Аналогично может быть построен ступенчатый график распределения квадратов нагрузок, который можно таким же образом, как это сделано было выше, заменить эквивалентным прямоугольным графиком. Высота этого эквивалентного прямоугольника, построенного на основании, равном длине линии, равна эквивалентной квадратичной нагрузке. Основание эквивалентного прямоугольника, высота которого равна квадрату суммарной нагрузки линии, равно эквивалентному расстоянию точки приложения этой нагрузки от источника питания

Аналогично тому, как для графика распределения нагрузки был получен коэффициент α , можно получить коэффициент

$$\beta = \frac{\sum p_i^2 l_i}{P^2 L}. \quad (5)$$

Если график построен в относительных единицах,

$$\beta = \sum p_i^2 l_i'.$$

Следует отметить, что если рассматриваемая линия имеет одинаковое по всей длине сечение, то при чисто активной нагрузке коэффициент β будет пропорционален потерям мощности в линии, а коэффициент α — потерям напряжения.

Имея значения коэффициентов α и β , можно при расчете сети распределенную нагрузку заменить сосредоточенной и этим упростить расчет.

Из уравнений (4), (5) и (1) следует, что сумма моментов распределенных нагрузок

$$\sum P_i l_i = \sum p_i l_i' = \alpha PL, \quad (6)$$

а сумма моментов квадратичных распределенных нагрузок

$$\sum P_i^2 l_i = \beta P^2 L. \quad (7)$$

Для перехода от схемы с распределенными нагрузками к схеме с сосредоточенной нагрузкой нужно на конце линии приложить нагрузку, равную αP , при определении потери напряжения или нагрузку, равную $\sqrt{\beta} P$, при определении потери мощности.

Графики с одним и тем же значением коэффициента α могут иметь различные значения коэффициентов β . При построении графиков с заданным значением α возможны два предельных случая: 1) график имеет форму прямоугольника с основанием, равным единице, и высотой, равной α ;

2) график имеет форму прямоугольника с основанием, равным α , и высотой, равной единице. В первом случае $\beta = \alpha^2$, во втором $\beta = \alpha$.

График распределения нагрузки вдоль кольцевой линии получим из двух сопряженных графиков, которые можно построить, если линию рассматривать как радиальную, питаемую с одной стороны. Один из этих графиков будет соответствовать случаю питания линии в направлении 0-1-2-3-4, а другой — в направлении 0-4-3-2-1 (рис. 2). Площадь первого из них на рис. 2 заштрихована, а второго не заштрихована. Площади этих графиков, дополняя друг друга, образуют прямоугольник $ABГБ$ с основанием, равным длине линии, и высотой, равной сумме нагрузок линии.

При питании с двух сторон кольцевую линию можно разделить в точке токораздела на две ветви. Место точки токораздела на линии определится графически из следующих условий: 1) величины падения напряжения в каждой из ветвей должны быть равны между собой, т. е. графики распределения нагрузки ветвей должны иметь одинаковые площади; 2) сумма потоков мощности обеих ветвей в точке питания кольцевой линии должна быть равна сумме нагрузок линии.

Для определения точки токораздела необходимо на графике (рис. 2) провести разделительную линию ab , параллельную оси абсцисс, таким образом, чтобы площади фигур $aBвгде$ и $бБлжизже$, отсекаемых ею от двух сопряженных графиков, были равны между собой. Эти фигуры и есть графики распределения нагрузки в ветвях кольцевой сети.

Линия ab разделит прямоугольник $ABГБ$ на две части: площадь нижней части $AaбБ$ равна площади заштрихованного сопряженного графика, а верхней $ВабГ$ — площади незаштрихованного графика. Следовательно, прямоугольник $AaбБ$ есть график, эквивалентный заштрихованному графику, а прямоугольник $ВабГ$ — незаштрихованному.

Максимальные ординаты графиков ветвей aB и $бБ$ представляют собой величину потоков мощности в каждой из ветвей кольцевой линии в точке ее питания. Каждый из этих потоков

$$P_g = \alpha' P, \quad (8)$$

где α' — коэффициент распределения нагрузок, определяемый для каждой ветви из соответствующего ей сопряженного графика (для левой ветви из незаштрихованного графика, а для правой — из заштрихованного);

P — суммарная нагрузка кольцевой сети.

По графикам распределения нагрузки в ветвях кольцевой сети путем возведения в квадрат каждой ординаты этих графиков можно построить графики распределения квадратичной нагрузки. Первые дают возможность определить потери напряжения, а вторые — потери мощности в кольцевой сети.

Площадь графика распределения нагрузки в ветви кольцевой линии будем обозначать в даль-

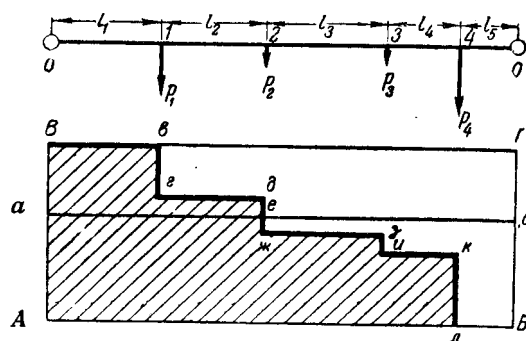


Рис. 2.

нейшем буквой M_k , а сумму площадей графиков распределения квадратичных нагрузок в обеих ветвях — буквой Π_k .

Значение Π_k можно определить другим путем. Для этого возьмем два графика (рис. 3, а и б), которые различны по своей конфигурации, но коэффициенты α и β которых соответственно одинаковы.

Рассматривая какой-либо из графиков распределения нагрузок (рис. 3, а или б), приведем его к виду двухступенчатого эквивалентного графика, первая ступень которого равна единице, а вторая α (рис. 3, в, график $ABвгде$).

Если от такого эквивалентного графика перейти к квадратичному, то первая ступень последнего будет также равна единице, а вторая α^2 .

Длину первой ступени эквивалентного графика (рис. 3, в), ордината которой равна единице, обо-

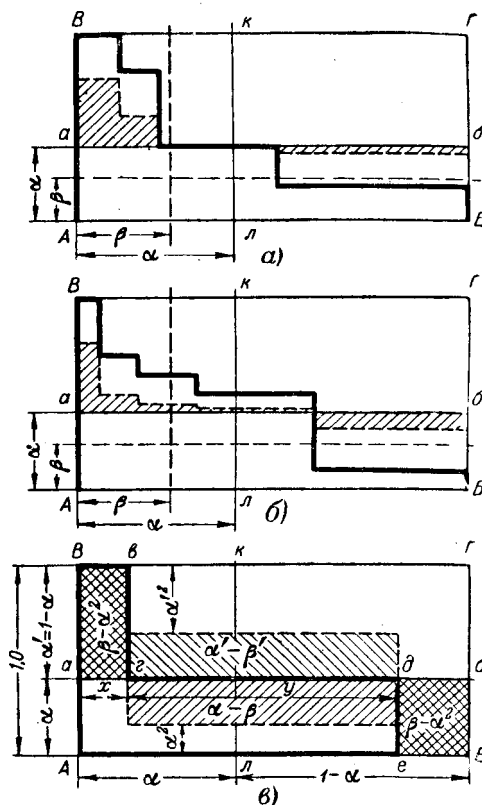


Рис. 3

значим через x , а длину второй, ордината которой равна α , через y . Тогда, как это видно из рис. 3, в, площадь эквивалентного графика, построенного в относительных единицах:

$$\alpha = x + \alpha y,$$

а площадь квадратичного графика

$$\beta = x + \alpha^2 y.$$

Решая совместно эти два уравнения, получим:

$$x = \frac{\beta - \alpha^2}{1 - \alpha} \quad (9)$$

и

$$y = \frac{\alpha - \beta}{\alpha - \alpha^2}. \quad (10)$$

Площадь части $aB\beta g$ эквивалентного графика (рис. 3, в) равна $x(1 - \alpha)$. Следовательно, на основании выражения (9) она будет равна $\beta - \alpha^2$. С изменением формы эквивалентного графика величина этой площади будет изменяться. Она будет стремиться к нулю, если эквивалентный график будет приближаться к одноступенчатому графику $Aa\beta B$ с ординатой, равной α . Это будет соответствовать тому предельному случаю, когда вся нагрузка практически питается непосредственно от источника питания кольцевой линии. Она будет стремиться к своему максимальному

значению, если эквивалентный график будет принимать форму одноступенчатого графика $AB\kappa l$ с ординатой, равной единице. Площадка $aB\beta g$ принимает в этом случае максимальное значение $\alpha(1 - \alpha) = \alpha - \alpha^2$. Это будет соответствовать тому предельному случаю, когда по кольцевой линии питается сосредоточенная нагрузка.

В последнем предельном случае площадь квадратичного графика одной ветви кольцевой линии будет равна $(1 - \alpha)^2 \alpha$, а другой $\alpha^2(1 - \alpha)$. Сумма площадей этих квадратичных графиков ветвей

$$P_{\kappa} = (1 - \alpha)^2 \alpha + \alpha^2(1 - \alpha) = \alpha - \alpha^2.$$

Так как в рассматриваемом случае $\beta = \alpha$, то

$$P_{\kappa} = \beta - \alpha^2, \quad (11)$$

т. е. сумма площадей квадратичных графиков ветвей равна площади $aB\beta g$.

Исследование большого числа графиков показывает, что сумма площадей квадратичных графиков ветвей кольцевой линии во всех случаях равна площади $aB\beta g$. Таким образом, по величине площади $aB\beta g$ или равной ей площади $ed\beta B$ можно определить величину P_{κ} , пропорциональную потере мощности в кольцевой сети. Это позволяет определить величину P_{κ} по формуле (11), т. е. не прибегая к построению графиков, если известны значения α и β для одного из сопряженных графиков кольцевой сети.

Из формулы (11) следует, что потери мощности в кольцевой линии при двустороннем питании меньше потерь при одностороннем питании на α^2 . Отношение этих потерь равно:

$$\frac{\beta - \alpha^2}{\beta} = 1 - \frac{\alpha^2}{\beta}, \quad (12)$$

т. е. переход на двустороннее питание будет тем эффективнее в отношении снижения потерь, чем больше отношение $\frac{\alpha^2}{\beta}$.

Выясненная выше зависимость коэффициентов графика кольцевой сети интересна тем, что она позволяет без расчета определить потерю мощности при двустороннем питании кольцевой линии, если известна потеря мощности при ее одностороннем питании. Кроме того, нет необходимости рассчитывать оба режима одностороннего питания, а достаточно рассчитать только один из этих режимов, так как графиком распределения нагрузки всегда определяется и сопряженный с ним график. Таким образом, для всех трех характерных режимов кольцевой линии достаточно одного расчета.

Из определения сопряженного графика следует, что

$$\alpha' = 1 - \alpha. \quad (13)$$

Кроме этого, поскольку обе заштрихованные площади (рис. 3, в) одинаковы:

$$\alpha - \beta = \alpha' - \beta'.$$

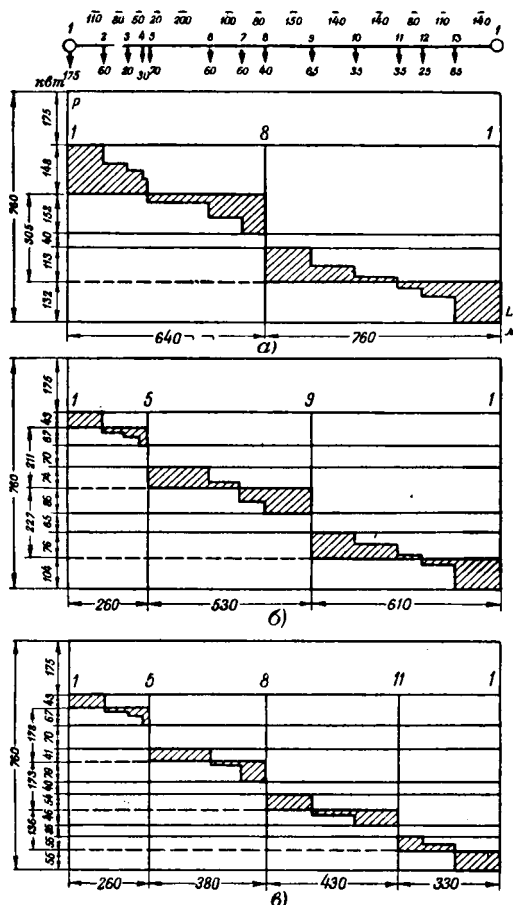


Рис. 4.

Следовательно, для сопряженного графика коэффициент

$$\beta' = \beta + (1 - 2\alpha). \quad (14)$$

Применим полученные выше выводы к конкретному примеру.

Пусть для одного из режимов одностороннего питания кольцевой линии $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,3$, а потеря мощности $\Delta P = 2,15$ кВт. Тогда

$$\beta' = 0,3 + (1 - 2 \cdot 0,4) = 0,5.$$

Следовательно, для другого режима одностороннего питания потеря мощности

$$\Delta P' = 2,15 \frac{0,5}{0,3} = 3,58 \text{ кВт.}$$

Для двустороннего питания

$$P_k = 0,3 - 0,4^2 = 0,14,$$

а потеря мощности

$$\Delta P_k = 2,15 \frac{0,14}{0,3} = 1 \text{ кВт.}$$

Кольцевая городская электросеть часто охватывает один или несколько кварталов и питается от нескольких источников. Расчеты по определению потери напряжения и особенно потерь мощности в такой сети с большим количеством нагрузок громоздки и трудоемки. Применение графиков распределения нагрузки в данном случае может значительно облегчить расчеты и сделать их более наглядными.

Представим себе кольцевую сеть, связывающую группу потребителей, например домов. На рис. 4 построены три графика распределения нагрузки в такой сети: первый (рис. 4,а) — для случая двух, второй (рис. 4,б) — трех и третий (рис. 4,в) — четырех источников питания.

Источники питания можно разместить таким образом, чтобы площади, отсекаемые от сопряженных графиков участков сети и представляющие собой графики распределения нагрузок для отдельных ветвей, были, по возможности, минимальными. После этого можно определить нагрузки источников питания, выбрать сечения отдельных участков сети, определить потери напряжения и мощности в них. Ниже такие расчеты выполнены для сетей с тремя (рис. 4,б) и четырьмя (рис. 4,в) источниками питания. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице.

Нагрузка, распределенная на ветви участка кольцевой сети между двумя источниками питания, заменялась сосредоточенной, приложенной на конце ветви. При определении потери напряжения сосредоточенная на конце ветви расчетная нагрузка $P_k = M_k P$, а при определении потери мощности $P_M = \sqrt{P_k} P$.

Напряжения источников питания сети принимались одинаковыми, равными 380 в.

Сечения кабелей проверялись на нагрев, исходя из предельно допустимой загрузки с учетом коэффициента на условия прокладки и температуру почвы. При выборе сечения учитывалась возможность одностороннего питания каждого участка в аварийных условиях.

Как видно из таблицы, при переходе от трех источников к четырем объем меди в кабелях снижается на 175 дцм³, а потери мощности снижаются на 0,67 кВт. Максимальные потери напряжения на участках сети при трех и четырех источниках питания являются вполне приемлемыми — около 2,5%.

Нагрузки трансформаторов при трех источниках питания составляют 322, 211 и 227 кВт, а при четырех 273, 178, 173 и 136 кВт.

Показатели	Участки сети при трех источниках питания (рис. 4, б)				Участки сети при четырех источниках питания (рис. 4, в)				
	1-5	5-9	9-1	Всего	1-5	5-8	8-11	11-1	Всего
Суммарная нагрузка, кВт	110	160	180	450	110	120	100	110	440
Полная длина, м	260	530	610	1 400	260	380	430	330	1 400
Момент нагрузок, кВт·м·10 ³	28,6	84,8	110	—	28,6	45,5	43	36,3	—
Квадратичный момент, кВт ² ·м·10 ⁶	3,14	13,6	19,7	—	3,14	5,46	4,3	4,0	—
Момент нагрузок графика, кВт·м·10 ³	17,6	45,2	63,7	—	17,6	30	19,05	18,2	—
Квадратичный момент, кВт ² ·м·10 ⁶	1,58	6,25	9,23	—	1,58	3,24	1,67	1,77	—
Коэффициент α	0,615	0,534	0,578	—	0,615	0,66	0,464	0,5	—
Коэффициент β	0,503	0,458	0,468	—	0,503	0,491	0,388	0,442	—
Коэффициент P_k	0,126	0,174	0,135	—	0,126	0,16	0,173	0,19	—
Коэффициент M_k	0,163	0,195	0,152	—	0,163	0,18	0,187	0,212	—
Сечение кабеля, мм ²	50	95	120	—	50	70	50	50	—
Сопротивление, ом	0,109	0,118	0,107	—	0,109	0,114	0,18	0,139	—
Расчетная мощность для определения потери мощности, кВт	39	67	66,2	—	39	48	41,7	48	—
Расчетная мощность для определения потери напряжения, кВт	17,9	31,2	27,4	—	17,9	21,6	28,2	23,3	—
Потеря мощности, кВт	1,14	3,65	3,2	7,99	1,14	1,82	2,16	2,2	7,32
Потеря напряжения, в	5,12	9,7	7,7	—	5,12	6,45	8,8	8,5	—
Объем меди, дцм ³	39	151	219	409	39	80	65	50	234

Инженерная методика расчета реле с выпрямителями

Кандидат техн. наук Г. Г. ГИМОЯН

Донецкий научно-исследовательский угольный институт

Развитие техники релестроения за последние годы характеризуется быстрорасширяющимся применением в устройствах защиты и автоматики реле с использованием полупроводниковых выпрямителей. Расчет и конструирование этих реле встречаются еще ряд затруднений, вызываемых тем, что их схемы по отношению к цепи переменного тока являются нелинейными двухполюсниками. Так, однообмоточные реле или реле с двумя магнитно разобщенными обмотками (например, балансное реле) имитируются схемой рис. 1; реле с двумя индуктивно связанными и включенными навстречу обмотками — схемой рис. 5,б. Встречаются и другие схемы, которые в настоящей работе не рассматриваются.

Аналитическое определение зависимостей электрических величин на входе и выходе выпрямителей в приведенных схемах связано с решением сложных трансцендентных уравнений. Поэтому для инженерных расчетов целесообразно их представить в виде линейных двухполюсников (рис. 7,а), к которым применим закон Ома.

Определение поправочных коэффициентов, требуемых для такого преобразования, составляет предмет настоящей статьи.

Определение коэффициентов производится по методу линеаризации [Л. 1]: полагая напряжение на входе выпрямителя синусоидальным¹, его ток разлагается на гармонические составляющие, для каждой из которых составляется схема замещения, и находятся поправочные коэффициенты.

Для практических расчетов достаточно рассмотреть схему замещения только для первой гармонической, поскольку точность при этом получается достаточно высокой — ошибка не превышает 5 ... 10% [Л. 1 ... 3].

¹ Структура и параметры схемы замещения зависят от того, работает выпрямитель в режиме синусоидального тока или напряжения. Работа схем рис. 1 и 4,б рассматривается только для режима синусоидального напряжения, так как в релейных схемах для снижения потребления и увеличения чувствительности сопротивление источников, питающих выпрямитель, выбирается минимальным [Л. 3].

Как видно из рассмотренного выше примера, метод построения графиков распределения нагрузки дает возможность наглядно и просто определять примерное распределение потоков мощности в сети, потери напряжения и потери мощности. Этим облегчается выполнение технико-экономических расчетов.

В тех случаях, когда для участка сети нецелесообразно применять кабель одинакового сечения и приходится на головных участках применять двоярный кабель, расчет при помощи гра-

Работа выпрямителей на однообмоточных реле. При идеальных вентилях и входном напряжении

$$u = \sqrt{2} U_1 \sin \vartheta; \quad (1)$$
$$\vartheta = \omega t,$$

где U_1 — действующее значение основной (и в данном случае единственной) гармоники на входе выпрямителя;

ω — круговая частота этой гармоники,

работа выпрямителя схемы рис. 1 характеризуется двумя различными режимами, для каждого из которых соотношения между мгновенными значениями токов и напряжений различны.

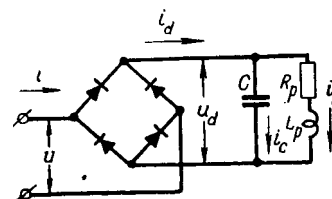


Рис. 1. Схема замещения однообмоточных реле.

Так как на выходе выпрямителя включена емкость, то вследствие зарядки последней выпрямленное напряжение никогда не падает до нуля. Напряжение же на входе выпрямителя изменяется синусоидально и в отдельные части периода становится весьма малым (когда оно меняет свое направление). Поэтому в эти части периода соблюдаются соотношения

$$u_d > |u|; \quad i = 0; \quad i_d = 0, \quad (2)$$

где u , i и u_d , i_d — мгновенные значения напряжения и тока на входе и выходе выпрямителя.

Режим, при котором имеет место условие (2), известен в литературе под названием режима R (режим отсутствия тока) [Л. 1]. В этом режиме цепь переменного и цепь постоянного токов ведут себя совершенно независимо, так как

фического метода несколько усложняется. Сечение двоярного кабеля в этих случаях необходимо привести к основному сечению рассматриваемого участка сети между двумя источниками питания.

Литература

1. В. П. Хашинский. Канализация электрической энергии, КУБУЧ, Ленинград, 1926.
2. В. М. Хрущов. Электрические сети и линии, ч. 1. Госэнергоиздат, 1932.

[12 10. 1953]



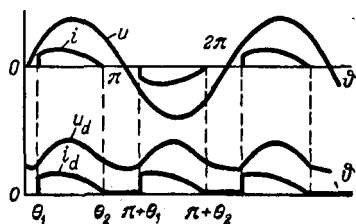


Рис. 2. Линейные диаграммы напряжений и токов на входе (u, i) и на выходе (u_d, i_d) выпрямителя.

выпрямительный мост разрывает их. Согласно линейным диаграммам напряжений и токов (рис. 2) схема работает в режиме R при

$$0 < \vartheta < \theta_1; \quad \theta_2 < \vartheta < \pi + \theta_1; \quad \pi + \theta_2 < \vartheta < 2\pi. \quad (3)$$

После того как абсолютное мгновенное значение напряжения на входе выпрямителя достигает значения напряжения на его выходе, выпрямитель вместо режима R начинает работать в нормальном режиме проводимости, именуемом в литературе режимом N .

При режиме N соблюдаются равенства:

$$u_d = |u|; \quad i_d = |i|. \quad (4)$$

Части периода, в течение которого выпрямитель работает в режиме N , соответствуют промежуткам времени

$$\theta_1 < \vartheta < \theta_2; \quad \pi + \theta_1 < \vartheta < \pi + \theta_2. \quad (5)$$

Коэффициенты активной и реактивной эквивалентных проводимостей согласно [Л. 1] определяются по формулам

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{2} R_p}{2\pi U_1} \int_0^{2\pi} i \sin \vartheta d\vartheta; \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{2} R_p}{2\pi U_1} \int_0^{2\pi} i \cos \vartheta d\vartheta. \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) под знаком интеграла стоит мгновенное значение тока на входе выпрямителя i , тогда как заданным является напряжение на входе U_1 . Связь между данными величинами зависит от параметров цепи. Вследствие наличия большого количества неизвестных (R_p, L_p, C) определение этой связи методами, обычно применяемыми в теории цепей, затруднительно. Для упрощения решение задачи целесообразно произвести сначала для граничных условий $\frac{R_p}{\omega L_p} = \infty$ и $\frac{R_p}{\omega L_p} = 0$, а затем путем сопоставления полученных результатов найти ответ для $0 < \frac{R_p}{\omega L_p} < \infty$.

Работа выпрямителя рис. 1 при граничном условии $\frac{R_p}{\omega L_p} = \infty$ разобрана в [Л. 1].

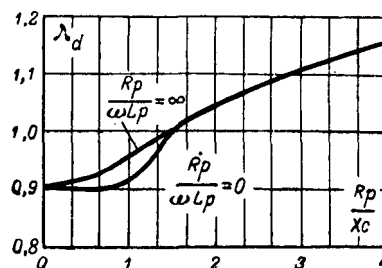


Рис. 3. Значение коэффициентов, определяющих среднее значение выпрямленного напряжения.

При граничном условии $\frac{R_p}{\omega L_p} = 0$ ток установившегося режима, проходящий через активно-индуктивную ветвь i_L , практически не меняется в течение периода. Так как в этом режиме ток через емкостную ветвь не имеет постоянной слагающей, то ток i_L практически равен среднему значению тока на выходе выпрямителя I_d . Поэтому для мгновенного значения тока на выходе выпрямителя справедливы следующие дифференциальные уравнения: при режиме R

$$\frac{1}{X_c} \cdot \frac{du_d}{d\vartheta} + I_d = 0; \quad (8)$$

при режиме N

$$i_d = \frac{1}{X_c} \cdot \frac{du_d}{d\vartheta} + I_d = \frac{\sqrt{2} U_1 \cos \vartheta}{X_c} + \frac{U_d}{R_p}. \quad (9)$$

Углы коммутации θ_1 и θ_2 и коэффициент постоянной слагающей напряжения λ_d можно найти из (1), (8) и (9):

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{U_d}{\sqrt{2} U_1} \cdot \frac{X_c}{R_p} \right); \quad (10)$$

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 - \frac{U_d}{\sqrt{2} U_1} \cdot \frac{X_c}{R_p} (\pi + \theta_1 - \theta_2); \quad (11)$$

$$\lambda_d = \frac{U_d}{U_1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left\{ \cos \theta_1 - \cos \theta_2 + \sin (\pi + \theta_1 - \theta_2) - \frac{U_d}{\sqrt{2} U_1} \cdot \frac{X}{R_p} \cdot \left[\frac{(\pi + \theta_1)^2 - \theta_2^2}{2} - \theta_2 (\pi + \theta_1 - \theta_2) \right] \right\}. \quad (12)$$

Величины θ_1 , θ_2 и λ_d в зависимости от соотношения $\frac{X_c}{R_p}$ определяются графоаналитическим решением последних трех уравнений [Л. 3].

Коэффициенты эквивалентных проводимостей γ_1 и β_1 находятся из (6) и (7) с учетом (9):

$$\gamma_1 = \frac{1}{\pi} \left[\lambda_d (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) + \frac{R_p}{X_c} \left(\frac{\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2}{2} \right) \right]; \quad (13)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\pi} \left[\lambda_d (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) + \frac{R_p}{X_c} (\theta_2 - \theta_1 + \frac{\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1}{2}) \right]. \quad (14)$$

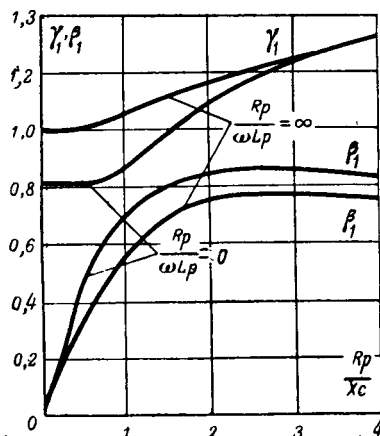


Рис. 4. Расчетные коэффициенты для устройств автоматики и защиты с применением однообмоточных реле.

Зависимости $\lambda_d = f\left(\frac{X_c}{R_p}\right)$; $\gamma_1 = f\left(\frac{X_c}{R_p}\right)$ и $\beta_1 = f\left(\frac{X_c}{R_p}\right)$ для двух вышеназванных граничных условий приведены на рис. 3 и 4. Как видно из кривых, наличие индуктивности сказывается на величине λ_d , γ_1 и β_1 при малых $\frac{X_c}{R_p}$.

Работа выпрямителей на двухобмоточные реле. Работу выпрямителей на реле с двумя магнитосвязанными обмотками рассмотрим на примере реле для дистанционной защиты высоковольтных линий электропередач [Л. 3]. Согласно схеме рис. 5, а рабочая (ОР) и тормозная (ОТ) обмотки этого реле питаются от выпрямителей ВР и ВТ, на входах которых действуют напряжения U_p и U_T . Принимая во внимание, что у любого реального реле коэффициент связи обмоток колеблется в пределах $0 < \frac{M_p}{L_p} < 1$ (здесь L_p и M_p — коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции обмотки реле), работу схемы рис. 5, а в целях упрощения целесообразно рассмотреть для двух граничных условий:

$$\frac{M_p}{L_p} = 0 \text{ и } \frac{M_p}{L_p} = 1.$$

При граничном условии $\frac{M_p}{L_p} = 0$ каждая обмотка реле может имитироваться разобранной выше схемой рис. 1.

При граничном условии $\frac{M_p}{L_p} = 1$ и соотношении $\frac{X_c}{R_p}$, обеспечивающем работу обоих выпрямителей только в режиме N , схему реле можно изобразить в виде линейного четырехполюсника рис. 5, б, на входе и выходе которого действуют соответственно напряжения U_p и U_T .

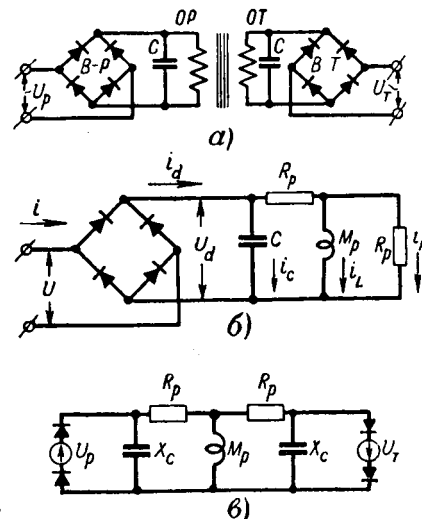


Рис. 5.

а — принципиальная схема дистанционного реле; б — схема замещения двухобмоточного реле; в — схема замещения этого реле при идеальной индуктивной связи обмоток.

Расчет такого четырехполюсника удобнее произвести методом наложения, представив его в виде двух двухполюсников (рис. 5, б), выпрямители² которых работают в режиме N .

Если принимать во внимание, что практически индуктивное сопротивление обмоток реле значительно больше их активного сопротивления, то на основании законов Кирхгофа нетрудно найти выражение тока на выходе выпрямителя [Л. 3]:

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_1 \cos \vartheta}{X_c} + \frac{\sqrt{2} U_1 \sin \vartheta}{2R_p} + \frac{U_d}{2R_p}. \quad (15)$$

Критическое значение $\left(\frac{X_c}{R_p}\right)_k$, при котором вы-

прямитель работает в режиме N , найдем из последнего уравнения, подставляя

$$i_d = 0; \vartheta = \pi \text{ и } \frac{U_d}{\sqrt{2} U_1} = \frac{2}{\pi}:$$

$$\left(\frac{X_c}{R_p}\right)_k \geq \pi.$$

Обратим внимание, что при граничном усло-

$$\text{вии } \frac{M_p}{L_p} = 0 \quad \left(\frac{X_p}{R_p}\right)_k \geq \frac{\pi}{2}.$$

Величины эквивалентных коэффициентов γ_1 и β_1 для обоих граничных условий в зависимости от $\frac{X_c}{R_p}$ приведены на рис. 6.

² Выпрямитель рис. 5, б аналогично с выпрямителем рис. 1 в общем случае может работать в режимах R и N . Метод наложения применим при наличии только режима N .

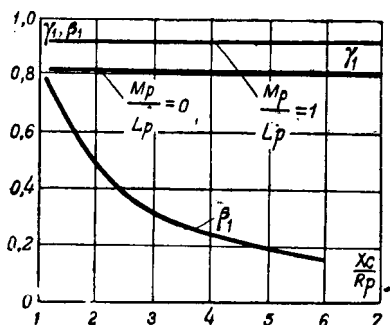


Рис. 6. Расчетные коэффициенты для устройств автоматики и защиты с применением двухобмоточных реле.

Для граничного условия $\frac{M_p}{L_p} = 1$ они определены из (6), (7) и (15).

Из кривых следует, что при учете взаимной индукции активная проводимость несколько уменьшается, а реактивная — остается без изменения.

Приложение. Расчет реле защиты и автоматики с применением полупроводниковых выпрямителей сводится к определению оптимальных параметров схемы, при которых реле обладают наибольшей чувствительностью и наименьшим потреблением, а также надежны в эксплуатации и компактны в выполнении.

В зависимости от типа и назначения реле, разумеется, цель и последовательность расчета различны [Л.1...3]. Для примера решим следующую задачу. При заданных параметрах реле ($P_{ср}$, R_p , $I_{ср}$) и величине сопротивления емкостного фильтра X_c необходимо определить параметры остальных звеньев схемы (выпрямителя, питающего трансформатора и т. д.).

1. В первом приближении, принимая вентили идеальными по кривым $\gamma_1 = f\left(\frac{R_p}{X_c}\right)$ и $\beta_1 = f\left(\frac{R_p}{X_c}\right)$, определяем γ_1 и β_1 , а по ним — активные и реактивные сопротивления схемы замещения:

$$R_{сз} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1^2 + \beta_1^2} R_p \quad \text{и} \quad X_{сз} = \frac{\beta_1}{\gamma_1^2 + \beta_1^2} R_p.$$

2. По заданному $I_{ср}$ определяем средние значения тока и напряжения на выходе выпрямителя: $I_d = K_n \cdot I_{ср}$ (K_n — коэффициент надежности) и $U_d = I_d R_p$.

3. Согласно полученному U_d находим напряжение и ток на входе выпрямителя $U_{сх}$ и $I_{сх}$:

$$U_{сх} = \frac{U_d}{\lambda_d}; \quad I_{сх} = \frac{U_{сх}}{\sqrt{R_{сз}^2 + X_{сз}^2}}$$

(λ_d находится по кривой рис. 4).

4. По I_d , U_d , $I_{сх}$ и $U_{сх}$ определяем число параллельно (a) и последовательно (n) включенных вентилях в плече [Л.1 и 2], а по ним — результирующее сопротивление вентилях $R_a = \frac{2 \cdot n}{a} r_s$ (r_s — сопротивление одного вентиля).

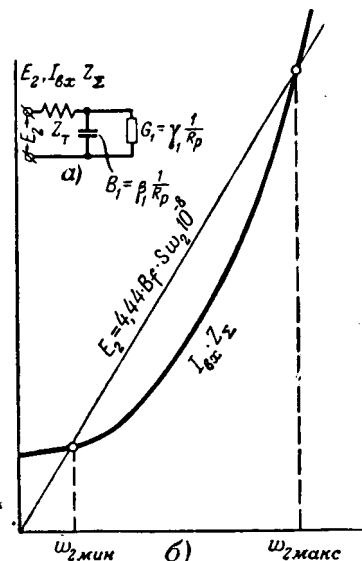


Рис. 7.

а — расчетная схема замещения реле с учетом собственного сопротивления питающего источника; б — графическое решение уравнения срабатывания реле.

5. Добавляя затем R_a к сопротивлению R_p , повторяем расчет для действительных вентилях, т. е. считая активное сопротивление нагрузки $R_d = R_p + R_a$.

6. Минимальное количество витков промежуточного трансформатора, обеспечивающее надежное срабатывание реле, находим из условия равенства э. д. с. E_2 , наведенной на вторичной обмотке трансформатора, и падения напряжения в схеме замещения (рис. 7, а):

$$E_2 = I_{сх} \cdot Z_{\Sigma}, \quad (I,1)$$

где Z_{Σ} — суммарное полное сопротивление схемы замещения;

$$E_2 = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot f \cdot \omega_2 \cdot 10^{-8}; \quad (I,2)$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{(R_{сз} \omega_2^2 + R'_{сз})^2 + (X_{сз} \omega_2^2 + X'_{сз})^2}. \quad (I,3)$$

В последнем уравнении

$C_R \omega_2^2$ и $C_X \omega_2^2$ — активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки промежуточного трансформатора; при определенном типе штампа стали сердечника они зависят только от ω_2 [Л.3];

$R'_{сз}$, $X'_{сз}$ — активное и реактивное сопротивления схемы замещения выпрямителя с учетом собственного сопротивления последнего.

Значение $\omega_{2\text{мин}}$ определяем из биквадратного уравнения, получаемого из (I,1) с учетом (I,2) и (I,3), или же графическим решением уравнения (I,1) (рис. 7, б).

Литература

1. В. Г. Комар. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления. Госэнергоиздат, 1952.
2. И. Л. Каганов. Электронные и ионные приборы. Госэнергоиздат, 1950.
3. Г. Г. Гимоян. Дистанционная защита с применением полупроводниковых выпрямителей. Диссертация, МЭИ, 1954.

[3. 12. 1956]



Танталовые электролитические конденсаторы

Кандидат физ.-матем. наук, доц. И. И. МОРОЗОВ

Москва

Основные недостатки широко применяемых алюминиевых электролитических конденсаторов — малый верхний температурный предел работы ($60 \dots 70^\circ \text{C}$), большой ток утечки, ненадежность в эксплуатации — заставили обратиться к электролитическим конденсаторам с анодами из тантала. Электролитический вентильный эффект в этом случае наблюдается почти в чистом виде при использовании как слабых, так и сильных электролитов [Л. 1 ... 5], что позволяет улучшить характеристики конденсаторов.

Промышленное производство и применение танталовых конденсаторов начались за рубежом в 1949—1950 гг. [Л. 6 ... 12].

Преимущества танталовых конденсаторов перед алюминиевыми следующие: а) повышенный верхний температурный предел работы ($85 \dots 200^\circ \text{C}$); б) уменьшенные габариты низковольтных конденсаторов; в) значительно меньший ток утечки в области положительных температур.

Известны два вида танталовых конденсаторов — фольговые и объемно-пористые. В фольговых конденсаторах анодом служит танталовая фольга толщиной $10 \dots 12 \text{ мкн}$, на которой путем электрохимической формовки образован тонкий (доли микрона) диэлектрический слой окиси тантала. Катодом служит танталовая или алюминиевая фольга толщиной $10 \dots 12 \text{ мкн}$. Анодная и катодная обкладки разделяются тонкой прокладкой ($25 \dots 50 \text{ мкн}$) из бумаги (возможно использование тонких прокладок из ткани или синтетических пористых материалов), пропитанной рабочим электролитом, и свертываются в цилиндрическую секцию, помещаемую в металлический корпус. Рабочим электролитом служит вязкий электролит на основе гликоля и полибората аммония (т. е. такого же состава, как и в алюминиевых конденсаторах), либо на основе гликоля и хлористого

лития. Конденсаторы могут быть с гладкой или гравированной фольгой. Рабочее напряжение конденсаторов выбирается в пределах $6 \dots 150 \text{ в}$, т. е. в меньших, чем для алюминиевых конденсаторов ($6 \dots 500 \text{ в}$). Верхний температурный предел работы фольговых конденсаторов составляет $85 \dots 125^\circ \text{C}$, а интервал емкостей $0,5 \dots 600 \text{ мкф}$.

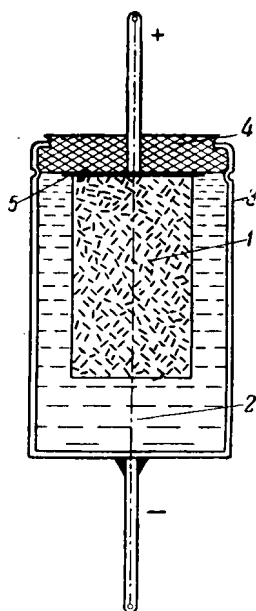


Рис. 1. Схематический вид объемно-пористого танталового конденсатора.

1 — спеченный танталовый анод; 2 — жидкий рабочий электролит; 3 — корпус из серебра; 4 — изоляционная крышка; 5 — танталовая пластинка-держатель анода.

В объемно-пористых конденсаторах анод изготавливается из порошка тантала с размером зерен $10 \dots 30 \text{ мкн}$ путем прессовки таблеток при давлениях $40 \dots 60 \text{ кг/см}^2$ и спекании их в вакууме ($\sim 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$) при высоких температурах (до 1900°C); в результате получается объемно-пористый конгломерат из зерен тантала, соединенных друг с другом, обладающий большой активной поверхностью, локализуемой во всем объеме. Степень увеличения активной поверхности зависит от величины зерен тантала и режимов прессовки и спекания. Формованный объемно-пористый анод помещается в корпус из серебра или другого металла (в последнем случае внутренняя поверхность корпуса серебрится), заполненный жидким рабочим электролитом; металл корпуса вместе с электролитом является катодной обкладкой полярного конденсатора и должен длительно противостоять воздействию сильных электролитов при повышенных температурах. Анодный вывод изолируется от корпуса стойкой изоляционной прокладкой (кремнийорганическая резина, тефлон и др.), при помощи которой корпус одновременно уплотняется.

Схематический вид объемно-пористого танталового конденсатора с цилиндрическим анодом представлен на рис. 1. Применяются также конструкции с анодом в виде диска.

В качестве рабочих электролитов объемно-пористых конденсаторов используются $30 \dots 40\%$ -ные водные растворы серной или фосфорной кислот, а также хлористого лития, обладающие значительно большей проводимостью ($1,5 \dots 12 \text{ ом} \cdot \text{см}$), чем электролиты для фольговых конденсаторов.

Рабочие напряжения объемно-пористых конденсаторов обычно выбираются в пределах $3 \dots 125 \text{ в}$; они ограничиваются сравнительно низким напряжением искрения рабочего электролита. Последовательное соединение конденсаторов позволяет получить блоки на рабочие напряжения до 400 в и более; при этом каждый конденсатор надо шунтировать уравнивающим сопротивлением величиной около $15/C_{\text{мкф}}$ [Мом]. Верхний температурный предел работы объемно-пористых конденсаторов составляет $85 \dots 200^\circ \text{C}$, а интервал емкостей $0,5 \dots 325 \text{ мкф}$.

Сравнение удельных емкостей секций фольговых танталовых и алюминиевых конденсаторов показывает, что в выражении для удельной емкости секции (на частоте 50 гц)

$$C_{\text{уд}} = \frac{K}{U_p \left(1 + 2 \frac{\Delta b}{b} \right) (d_a + d_k + 2d_{np})} [\text{мкф/см}^3],$$

где

U_p — рабочее напряжение;

b — ширина анодной фольги;

Δb — расстояние от края анода до края прокладки;

d_a , d_k и d_{np} — соответственно толщины анода, катода и прокладки, см.

Коэффициент K для гладкого танталового анода может быть взят в пределах 11 ... 11,5 (для алюминия $K \approx 9,5 \dots 10$), что объясняется большей величиной $\frac{\epsilon}{d}$ (d — толщина слоя) для слоя окиси тантала. Кроме того, удельная емкость секции танталового конденсатора увеличивается за счет того, что толщина анода в нем берется для напряжений до 150 в 10 ... 12 мкн, а в алюминиевом 30 ... 50 мкн, толщина прокладки в танталовых конденсаторах также выбирается несколько меньшая. Максимальные расчетные удельные емкости секций с гладкими анодами в интервале рабочих напряжений 12 ... 150 в для танталовых конденсаторов в 1,4 ... 2 раза больше, чем для алюминиевых.

Для танталовых и алюминиевых конденсаторов в корпусах сравнение удельных емкостей в широком интервале рабочих напряжений приведено на рис. 2, где даны максимальные удельные емкости, достигаемые для больших номиналов емкостей в плотно заполненных корпусах. Нивысшая удельная емкость достигается в танталовых объемно-пористых конденсаторах на низкие напряжения (200 ... 600 мкф/см³). Удельная емкость танталовых конденсаторов с травленой фольгой в интервале до 150 в приближается к таковой для объемно-пористых конденсаторов. Удельная емкость танталовых конденсаторов на 85°С с гладкой фольгой до 150 в примерно в 2 раза больше, чем у алюминиевых с травленой фольгой. С увеличением максимальной рабочей температуры удельная емкость танталовых конденсаторов снижается. В интервале 150 ... 420 в удельная емкость алюминиевых конденсаторов больше танталовых, из-за того что в последних осуществляется последовательное соединение отдельных конденсаторов и используются уравнивающие сопротивления.

Танталовые конденсаторы, так же как и алюминиевые, дают заметный ток утечки при включении под постоянное напряжение. Величина тока утечки в исходном состоянии зависит от чистоты тантала и других исходных продуктов, от режима формовки анода, свойств рабочего электролита и длительности тренировки под напряжением. Зависимость величины тока утечки от времени после приложения напряжения и от предыдущего состояния (времени бездействия или пребывания под напряжением) здесь также имеет место. По данным ряда фирм ток утечки танталовых конденсаторов в исходном состоянии при 20°С может колебаться в пределах 0,01 ... 0,1 мка на 1 мкф и 1 в приложенного напряжения, что меньше, чем для алюминиевых конденсаторов.

Наиболее заметное преимущество танталовых конденсаторов проявляется в благоприятной температурной зависимости тока утечки, вплоть до высоких положительных температур (рис. 3), что и позволяет повысить верхний температурный предел их работы. Если ток утечки алюминиевых конденсаторов катастрофически возрастает выше 70°С (кривые 5 и 6), то для танталовых при более высоких температурах этого не наблюдается.

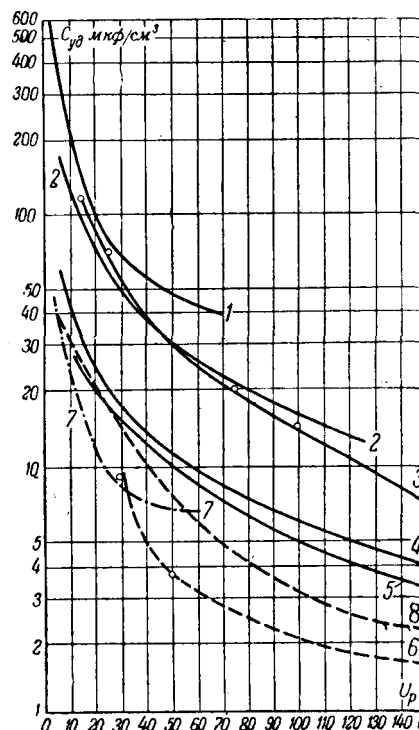


Рис. 2. Максимальные удельные емкости танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов в корпусах в интервале рабочих напряжений 4 ... 150 в.

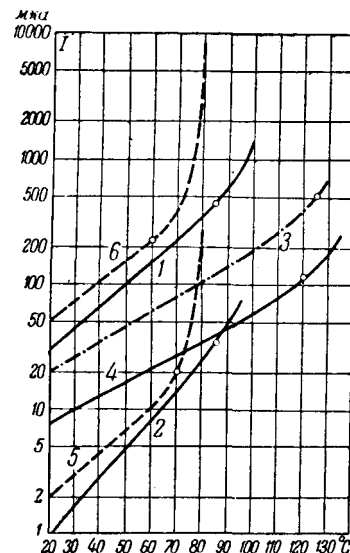
1—танталовые объемно-пористые на 85 и 120°С фирмы LCC (Франция); 2—то же, на 85°С фирмы Файнстил Корпорейшен (США); 3—танталовые с травленой фольгой на 85°С фирмы Джeneral Электрик (США); 4—танталовые с гладкой фольгой на 85°С фирмы Джeneral Электрик (США); 5—то же, фирмы TCC (Англия); 6—алюминиевые ЭГ с гладкой фольгой на 60°С; 7—алюминиевые ЭМ с травленными анодами на 70°С; 8—алюминиевые ЭГ с травленными анодами на 60°С.

В интервале от +20°С до максимальной рабочей температуры ток утечки танталовых конденсаторов на 85 и 125°С увеличивается в 15 ... 50 раз, что при малых исходных токах еще допустимо и не вызывает опасности перегрева и теплового пробоя конденсатора.

Температурно-частотные зависимости емкости и $\lg \delta$ и морозостойкость танталовых фольговых

Рис. 3. Зависимость тока утечки танталовых и алюминиевых конденсаторов от температуры.

1—танталовый с гладкой фольгой на 85°С, 150 в, 12 мкф; 2—танталовый с гладкой фольгой на 85°С, 12 в, 75 мкф; 3—танталовый с травленой фольгой на 125°С, 10 в, 10 мкф; 4—танталовый объемно-пористый на 120°С, 30 в, 25 мкф; 5—алюминиевый ЭМ на 70°С, 60 в, 2 мкф; 6—алюминиевый ЭГ на 60°С, 150 в, 10 мкф.



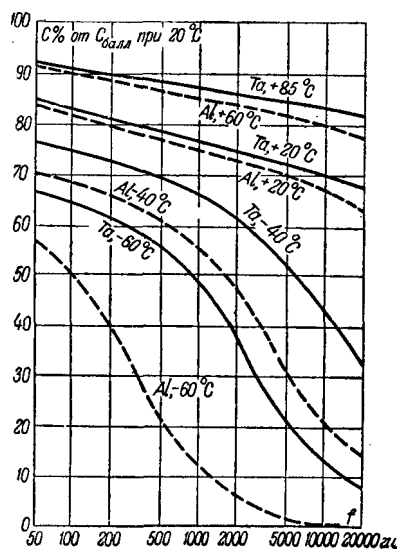


Рис. 4. Зависимости емкости от частоты при различных температурах для танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов с гладкой фольгой 150 в, 10 мкф.

конденсаторов с гладкими анодами мало отличаются от таковых для алюминиевых конденсаторов (рис. 4 и 5). Емкость, измеренная на частоте 50 Гц, меньше емкости, измеренной баллистическим методом (эта емкость при 20° С условно принимается за 100%), на 10 ... 20%; с ростом частоты емкость снижается, особенно резко при низких температурах. На частоте 50 Гц при -40° С емкость уменьшается на 30 ... 35%, а при -60° С — на 40 ... 50%. Угол потерь ($\text{tg } \delta$) с ростом частоты растет, достигая при 20 кГц значений 0,3 ... 0,5; на частоте 50 Гц $\text{tg } \delta$ имеет температурный минимум (в области 20 ... 40° С), а при низких температурах — частотный максимум (в области 4 ... 8 кГц). Для танталовых конденсаторов с травленной фольгой температурно-частотные характеристики несколько ухудшаются.

Для объемно-пористых танталовых конденсаторов температурно-частотные зависимости емкости более благоприятные (рис. 6); при -60° С на частоте 50 Гц емкость уменьшается на 15 ... 20%

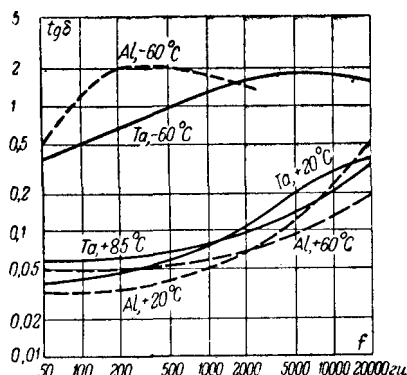


Рис. 5. Зависимости $\text{tg } \delta$ от частоты при различных температурах для танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов с гладкой фольгой 150 в, 10 мкф.

по сравнению с емкостью при 20° С. Однако $\text{tg } \delta$ в интервале 20 ... 85° С более резко возрастает с частотой, достигая при 20 кГц значений 1 ... 2 и более. В зависимости от размеров зерен порошка тантала, режима спекания, соотношения активных поверхностей анода и катода, величины удельного сопротивления рабочего электролита можно получить ту или иную степень уменьшения емкости при понижении температуры и увеличении частоты и разнообразные температурно-частотные зависимости для $\text{tg } \delta$. В частности, конденсаторы с рабочим электролитом на основе хлористого лития, обладающего большим удельным сопротивлением, чем электролит на основе серной кислоты, имеют худшие температурно-частотные зависимости емкости и $\text{tg } \delta$ по сравнению с приведенными на рис. 6.

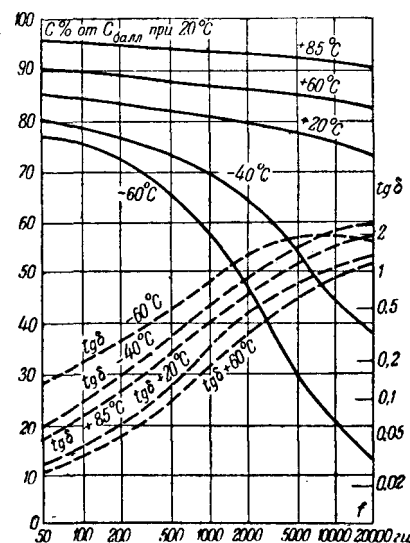


Рис. 6. Зависимости емкости и $\text{tg } \delta$ от частоты при различных температурах для танталового объемно-пористого конденсатора 70 в, 50 мкф, рабочий электролит — серная кислота.

Стабильность характеристик хорошо уплотненных танталовых конденсаторов при повышенных температурах и в различных эксплуатационных условиях вполне удовлетворительная. В частности, через 4 года длительного хранения при +25° С ток утечки конденсаторов увеличился не более чем в 2 раза и емкость увеличилась не более чем на 7%; при +85° С через 1,5 года емкость уменьшилась на 10%, ток утечки увеличился в 10 раз и $\text{tg } \delta$ увеличился в 1,5 раза [Л. 12]. При длительном пребывании танталовых конденсаторов под напряжением при максимальной рабочей температуре основным изменением, связанным с потерей электролита, является уменьшение емкости. Критерием срока службы здесь служит время сохранения 90% исходной емкости; это время составляет около 1000 ч [Л. 12].

Имеются сообщения [Л. 13] о возможности получения низковольтных объемно-пористых танталовых конденсаторов с твердым полупроводником вместо жидкого электролита, обладающих резко

улучшенными температурно-частотными характеристиками и повышенной надежностью. Анод таких конденсаторов после формовки покрывается слоем окиси марганца, поверх которого наносится слой угля, контактирующий вплотную с корпусом. Конденсаторы изготовлены на рабочие напряжения до 35 в и емкость до 100 мкф; при -80°C емкость уменьшается всего на 5% по сравнению с емкостью при 25°C , а потери остаются неизменными, в диапазоне до 20 ... 50 кГц сохраняется до 90% емкости; верхний температурный предел работы — не ниже 65°C . При хранении конденсаторов свыше 500 дней их емкость, потери и ток утечки практически не изменяются.

Литература

1. А. Гюнтершульце и Г. Бетц. Электролитические конденсаторы. Гос. изд-во оборонной промышленности, М.—Л., 1938.
2. R. Audubert. Анодная поляризация тантала. *Journal de Chimie Physique*, т. 37, стр. 102, 1940.
3. R. Audubert. Механизм прохождения тока через танталовый анод. *Journal de Chimie Physique*, т. 38, стр. 46, 1941.

4. D. Vermilia. Анодный слой окиси на тантале. *Acta Metallurgica*, т. 1, стр. 3, 1953.
5. D. Vermilia. Новое исследование кинетики образования анодных пленок окиси тантала. *Journal of the Electrochemical Society*, т. 102, стр. 655, № 11, 1955.
6. M. Whitehead. Танталовые электролитические конденсаторы. *Bell Laboratories Record*, т. 23, стр. 448, № 10, 1950.
7. D. Hall, F. Bergorn. Малогабаритные танталовые конденсаторы. *Electrical Manufacturing*, т. 46, стр. 82, 1950.
8. L. Foster. Танталовые конденсаторы. *General Electric Review*, т. 54, стр. 30, № 10, 1951; *Electronics*, т. 26, стр. 242, № 5, 1953.
9. R. Besson. Электролитические конденсаторы из тантала. *Radio Television*, т. 22, стр. 7, № 218, 1953.
10. N'guyen Thien-Chi, J. Vergnolle. Танталовые электролитические конденсаторы. *Annales de Radioelectricité*, т. 9, стр. 83, 1954; *L'onde Electrique*, т. 35, стр. 318, № 336—337, 1955.
11. E. Flettnermayer. Танталовые конденсаторы. *Funk-Technik*, стр. 554, № 20, 1954.
12. D. Warner. Применение танталовых электролитических конденсаторов. *IRE Transaction on Component Parts*, PGCP-4, стр. 7, № 11, 1955.
13. D. Mac-Lean, F. Power. Твердые танталовые электролитические конденсаторы. *Proceedings of the Institute of the Radio Engineers*, т. 44, стр. 872, № 7, 1956.

[25.12.1956]



Тепловые режимы изоляции конденсаторов

Кандидат техн. наук Г. С. КУЧИНСКИЙ, инж. Е. Л. ЛИТВИНОВА

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В ряде случаев при выборе допустимых рабочих напряженностей изоляции конденсаторов определяющим является тепловой режим. Примером могут служить конденсаторы, работающие при избыточном давлении масла. В этом случае правильный выбор величины избыточного давления может обеспечить отсутствие ионизационных процессов при рабочих напряженностях, и предел увеличения последних определяется исходя из теплового режима изоляции. Другим характерным примером являются конденсаторы продольной компенсации дальних линий электропередачи, для которых в ряде аварийных режимов наряду с кратковременными трех-четыре-кратными перенапряжениями возможны полутора-двухкратные перегрузки длительностью порядка нескольких десятков минут.

В настоящей работе исследование теплового режима изоляции конденсаторов проводилось в двух направлениях: 1) определение установившегося перегрева при различных напряженностях электрического поля и выбор рабочей напряженности из условия допустимого перегрева; 2) определение длительности допустимых перегрузок конденсатора, не приводящих к выходу изоляции из теплового равновесия.

Методика исследований. Исследования производились на образцах, изготовленных из конденсаторной бумаги плотностью $1,08 \text{ г/см}^3$ и толщи-

ной 12 мкм. Площадь обкладок фольги одной секции выбиралась близкой к площади секции конденсаторов, предназначенных для увеличения $\cos \varphi$ и была равна $35 \cdot 10^3 \text{ см}^2$.

В предшествующих работах [Л. 1, 2] была показана целесообразность снижения толщины диэлектрика с точки зрения повышения ионизационных характеристик. Поэтому для уточнения влияния толщины диэлектрика между обкладками фольги на тепловые режимы пакетов секций все опыты проводились на образцах с числом листов между обкладками фольги, равном 7 и 5. Секции выполнялись с фольгой, выступающей по торцам.

Так как тепловой режим изоляции определяется в основном общими геометрическими размерами пакета секций, то их число во всех случаях подбиралось исходя из условия одинаковых геометрических размеров пакета. Пакет секций имел следующие размеры: суммарная толщина секций, стянутых между металлическими щитками, 175 мм, ширина секций 130 мм, высота 300 мм.

Перегрев образцов определялся при помощи термопар, заложенных между секциями. Условия испытания секций создавались, по возможности, аналогичными условиям работы конденсаторов. У большинства крупных конденсаторов промышленной частоты все секции обычно разбиты на пакеты, от которых тепло отводится через масло

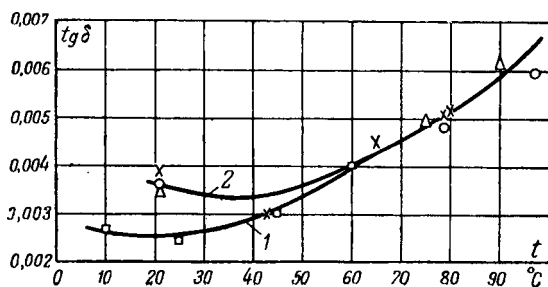


Рис. 1. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры при напряжении $U = 1$ кв.

Бумага толщиной 12 мкм, $n = 7$ листов.

1 — секции конденсатора, бывшего 6 лет в эксплуатации; 2 — опытные образцы.

со всех сторон пакета. При этом, однако, теплоотвод с боковых сторон пакетов несколько затруднен вследствие наличия соседних пакетов секций. Отвод тепла в основном происходит через переднюю и заднюю стенки бака ввиду незначительных размеров его боковых поверхностей.

Установка, применявшаяся в данной работе для испытания образцов, представляла собой бак с образцами, залитый маслом. Тепло отводилось только с верхней и нижней поверхностей бака, установленного на ножках высотой 250 мм. Для устранения теплоотвода с четырех боковых стенок бака они подогревались при помощи электрической проволочной печи. Режим ее работы подбирался из условия отсутствия перепада температуры между внешней поверхностью образцов и внутренней поверхностью боковой стенки бака, что контролировалось соответствующими термомпарами.

Перегрев диэлектрика над температурой окружающей среды во многом зависит от отношения веса диэлектрика P_d к площади теплоотдачи S_T . В табл. 1 для конденсаторов различных конструкций приведены эти отношения, а также расчетные постоянные времени нагрева.

Таблица 1

Сравнение геометрических характеристик исследованных образцов и конденсаторов различных конструкций

Тип конденсатора	Вес диэлектрика P_d , кг	Площадь теплоотдачи S_T , дм ²	$\frac{P_d}{S_T}$, кг/дм ²	Расчетная постоянная времени нагрева, ч
Конденсатор для улучшения $\cos \varphi$ на 10 кв. . . .	15	41,1	0,365	1,55
Конденсатор для улучшения $\cos \varphi$ (выпуск 1939 г.) на 30 кв.	37,5	103,5	0,350	1,32
Конденсатор для продольной компенсации (один из вариантов)	65	211	0,308	1,3
Исследованный пакет секций	6,8	15,6	0,436	1,7

Сушка и пропитка образцов производились при остаточном давлении 0,3 мм рт. ст. Учитывая, что у конденсаторов, находящихся длитель-

ное время в эксплуатации, возможно ухудшение электрических характеристик масла, для пропитки образцов применялось сухое, но неочищенное масло с $\operatorname{tg} \delta = 0,03$ при 100° . На рис. 1 приведены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для исследуемых образцов и для секций одного из конденсаторов для улучшения $\cos \varphi$, бывшего в эксплуатации в течение 5 лет.

Для уменьшения тока в испытательном трансформаторе при испытании образцов параллельно с ними подключались катушки индуктивности. Условия работы схемы во всех режимах были близки к условиям резонанса токов. Общая емкость одновременно подключенных секций с изоляцией из пяти или семи листов выбиралась из условия равенства реактивных мощностей в пакете секций при одинаковых напряженностях поля в диэлектрике.

В работе подлежал исследованию чисто тепловой пробой. Поэтому после каждого режима независимо от результатов испытания при помощи схемы регистрации частичных разрядов [Л. 3] определялось отсутствие ионизационных процессов в секциях при заданном испытательном напряжении. Немногие секции, у которых были обнаружены частичные разряды, в дальнейшем из испытаний исключались.

Определение установившегося перегрева. Установившийся перегрев определялся для напряженности электрического поля 12...24 кв/мм, так как при $E > 24$ кв/мм обычно наблюдался тепловой пробой изоляции.

Первоначально порядок испытания был следующим: для каждого значения напряженности электрического поля предварительно подбиралось такое напряжение печи внешнего обогрева бака, при котором отсутствовал перепад температуры между маслом и стенками бака. Затем одновременно с включением испытательного напряжения включалась печь обогрева бака.

В дальнейшем с целью форсирования условий эксперимента был применен принудительный прогрев образцов от печи нагрева бака до температуры 50...60° С. Затем при подаче на образцы высокого напряжения напряжение питания печи снижалось до значения, обеспечивающего отсутствие перепада между маслом и стенками бака.

На рис. 2 приведены зависимости перегрева изоляции от времени приложения напряжения, полученные с предварительным прогревом масла

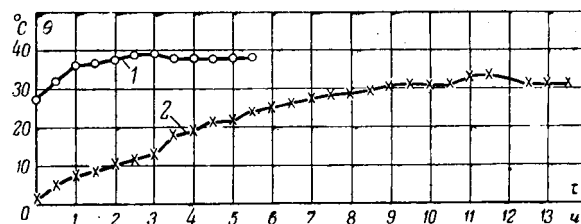


Рис. 2. Зависимость перегрева от времени приложения напряжения.

Бумага 12 мкм, $n = 7$ листов.

1 — с предварительным подогревом масла; 2 — без него.

и без него. В первом случае установившийся перегрев достигается через 3...4 ч, во втором — через 12...14 ч. Большая постоянная времени во втором случае, превосходящая расчетную (табл. 1) в 2...2,5 раза, объясняется зависимостью $\text{tg } \delta$ от температуры. Разница в установившихся температурах для обоих случаев не превосходит 2...5°.

Распределение общего перепада температуры между внутренней, наиболее нагретой частью диэлектрика и окружающей средой несколько различно в образцах с разным числом листов между обкладками, что иллюстрируется табл. 2. Наибольшая доля температурного перепада (~75%) приходится между стенкой бака и окружающей средой. Перепад внутри пакета секций несколько меньше для секций с пятью листами бумаги, что объясняется улучшенным теплоотводом в этих секциях благодаря большему относительному объему фольги в общем объеме секций.

Таблица 2

Распределение перепада температуры в образцах с различным числом листов бумаги в изоляции между обкладками

Участок	Перепад температуры (процент общего перепада) при числе листов	
	5	7
Между стенкой бака и окружающей средой	77	74
Между маслом и стенкой бака	1	1
Между наружной поверхностью пакета секций и маслом	4	5
Внутри пакета секций	18	20

Потери в единице объема диэлектрика в первом приближении (при независимости $\text{tg } \delta$ от напряжения) пропорциональны квадрату напряженности электрического поля в изоляции. Перегрев в первом приближении пропорционален потерям в единице объема диэлектрика. Поэтому зависимость перегрева θ [°C] от напряженности электрического поля E [кВ/мм] должна отображаться выражением

$$\theta = A \cdot E^2, \quad (1)$$

где A — постоянная, зависящая от выбора единиц измерения.

Для образцов при $n=7$ листов зависимость (1) была определена равной:

$$\theta = 8,3E^2, \quad (2)$$

а для образцов при $n=6$ листов

$$\theta = 7,2E^2. \quad (3)$$

Сравнение зависимостей (2) и (3) с экспериментально полученными величинами, приведенное на рис. 3, показывает хорошее их совпадение.

На основе произведенной работы можно сделать предварительный выбор рабочей напряженности с точки зрения теплового нагрева изоляции. Для рабочих режимов конденсаторов предусмат-

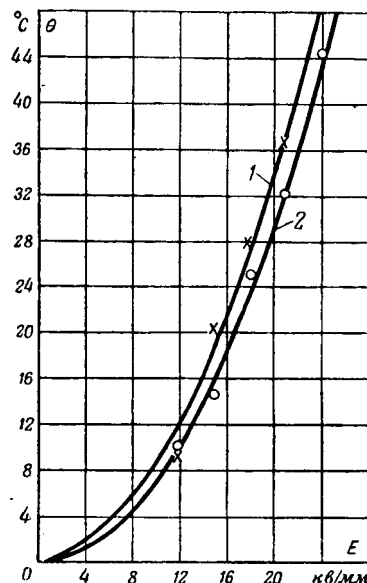


Рис. 3. Зависимость установившегося перегрева образца от напряженности электрического поля.

Бумага 12 мкм.

1 — расчетная кривая для $n=7$ листов по формуле (2); 2 — расчетная кривая для $n=5$ листов по формуле (3); X — экспериментальные точки для $n=7$ листов; O — экспериментальные точки для $n=5$ листов.

ривается температура диэлектрика не выше 60°С при температуре окружающей среды до 35°С [Л. 4]. При более высокой температуре диэлектрика в процессе эксплуатации происходит быстрое термическое разрушение изоляции, приводящее к ухудшению ее электрических характеристик. Поэтому можно принять допустимый перегрев изоляции 25°С.

Для секций с семью листами по 12 мкм напряженность 16...17 кВ/мм не приводит к нарушению теплового равновесия изоляции и перегреву диэлектрика выше 25°С и поэтому может быть выбрана как рабочая напряженность по тепловому режиму изоляции. Аналогично для секций с пятью листами рабочая напряженность может быть принята 18 кВ/мм. Этот вывод вполне согласуется с опытом эксплуатации конденсаторов для улучшения $\cos \varphi$ Московского трансформаторного завода выпуска 1937—1939 гг. с реактивной мощностью в банке 30 кВА. Значительное количество этих конденсаторов работает при рабочей напряженности 16...17 кВ/мм. Выход из строя этих конденсаторов, как правило, объясняется не тепловым пробоем, а возникновением ионизационных процессов при рабочем напряжении. Последнее легко определяется по большому количеству X-воска между листами конденсаторной бумаги в секциях этих конденсаторов. Наличие ионизационных процессов при рабочем напряжении было подтверждено тем, что напряжение ионизации у значительного количества секций после их многолетней работы лежало в пределах 600...1000 в и не превосходило рабочего напряжения секции (1150 в).

Определение длительности допустимых перегрузок конденсатора. Исследование электриче-

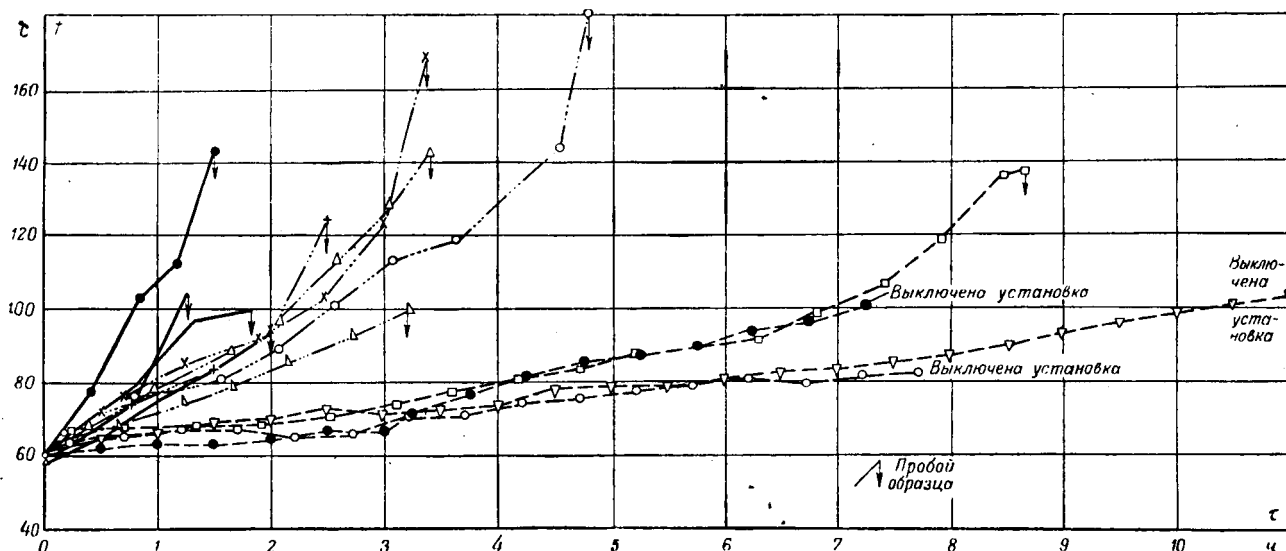


Рис. 4. Зависимость температуры в средней части пакета секций от времени приложения напряжения.

Бумага 12 мкм, $n = 7$ листам.

..... $U = 2,0$ кв; - · - · - $U = 2,5$ кв; — $U = 3,0$ кв.

ских характеристик изоляции секций конденсаторов в режиме перегрузок производилось при значениях напряженности 18...42 кВ/мм. Перед испытаниями пакет секций равномерно прогревался до температуры 60°C , что соответствовало наибольшей температуре в рабочем режиме.

На рис. 4 приведены экспериментально полученные зависимости наибольшей наблюдаемой температуры образцов с семью листами от времени приложения напряжения для различных напряженностей. Зависимости напряженности теплового пробоя E_{np} от времени выдержки секций под напряжением τ [сек] для семи и пяти листов приведены на рис. 5.

Подобная зависимость $E_{np} = f(\tau)$ была определена также расчетным путем по способу, предложенному Гринбергом, Конторовичем и Лебедевым [Л. 5]. При расчете были приняты следующие значения коэффициентов: $\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_0 \cdot e^{a\theta} = 0,003 \cdot e^{1,2 \cdot 10^{-2} \theta}$ (рис. 1); коэффициент

теплопроводности изоляции $k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см} \times \times \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи с поверхности бака $\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$; толщина пакета секций была принята равной $d = 13 \text{ см}$.

При этом было получено:

$$\tau = \frac{3,7 \cdot 10^{14}}{E_{np}^2} \psi \left(\frac{3,0 \cdot 10^{10}}{E_{np}^2} \right), \quad (4)$$

где E_{np} — пробивная напряженность, в/см;

$$\psi(x) = \int_0^\infty \frac{d\xi}{e^\xi - \frac{x}{\xi}}.$$

Зависимость $E_{np} = f(\tau)$, вычисленная по формуле (4), приведена на рис. 5; при $\tau \rightarrow \infty$ она стремится к величине E_∞ [в/см], которая может быть вычислена по формуле

$$E_\infty = \frac{7,78 \cdot 10^6}{d} \sqrt{\frac{k}{a \cdot \epsilon \cdot \text{tg } \delta_0}} \varphi(C), \quad (5)$$

где

$$C = \frac{\lambda \cdot d}{2k}.$$

Для рассматриваемого случая $C = 5,5$, $\varphi(C) = 0,58$; при этом $E_\infty = 11 \text{ кВ/мм}$.

Формулы (4) и (5) выведены без учета теплоотдачи с боковых поверхностей пакета секций, что всегда имеет место в реальном конденсаторе и имело место в рассматриваемом случае вследствие циркуляции масла между пакетом и стенками бака.

На рис. 5 приведена также величина E_∞ [в/см] при $\tau \rightarrow \infty$, вычисленная по формуле, предложенной Мантровым [Л. 6]. При малой толщине изо-

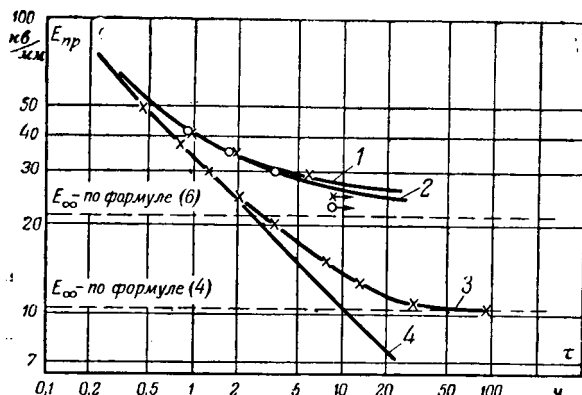


Рис. 5. Зависимость пробивной напряженности от времени выдержки под напряжением при тепловом пробое.

Бумага 12 мкм.

1 — экспериментальная кривая, $n = 5$ листам; 2 — экспериментальная кривая, $n = 7$ листам; 3 — расчетная кривая по формуле (4); 4 — расчетная кривая по формуле (5).

ляции пакета секций эта формула может быть представлена в виде:

$$E_{\infty} = 1,66 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{\lambda \cdot S_T}{a \cdot \epsilon \cdot f \cdot \lg \delta_0 B}}, \quad (6)$$

где S_T — поверхность теплоотдачи бака, см^2 ;
 B — некоторая функция геометрических размеров и тепловых характеристик пакета секций.

В рассматриваемом случае при $S_T = 1560 \text{ см}^2$ и $B = 8200 \text{ см}^2$ $E_{\infty} = 20,5 \text{ кВ/мм}$.

Формула (6) учитывает теплоотвод от всей поверхности пакета секций конденсатора, однако не учитывает теплоперепада внутри пакета секций.

Сравнение опытной кривой $E_{np} = f(\tau)$ с расчетами, произведенными по формулам (4), (5) и (6), показывает, что при $\tau \rightarrow \infty$ результаты расчета по формуле (6) наиболее близко соответствуют экспериментальным данным.

Формула (4) хорошо отвечает опытным значениям зависимости $E_{np} = f(\tau)$ при $\tau < 1 \text{ ч}$. В этом случае, однако, можно пользоваться более простой формулой, выведенной при пренебрежении теплоотводом с поверхности диэлектрика в предположении, что все тепло, выделяемое за счет диэлектрических потерь, идет на разогрев диэлектрика. При этом зависимость $E_{np} = f(\tau)$ приобретает вид [Л. 5]:

$$\tau = 7,5 \cdot 10^{12} \frac{C_T g}{a \cdot \epsilon \cdot f \cdot \lg \delta_0 E_{np}^2} [\text{сек}], \quad (7)$$

где C_T — теплоемкость диэлектрика;

g — удельный вес диэлектрика.

Прямая, вычисленная по формуле (7), также приведена на рис. 5. Следует отметить несколько более низкие значения E_{np} при $\tau \rightarrow \infty$, полученные в настоящей работе в результате расчетов по формуле (6) по сравнению с аналогичными данными, приведенными в [Л. 6], для конденса-

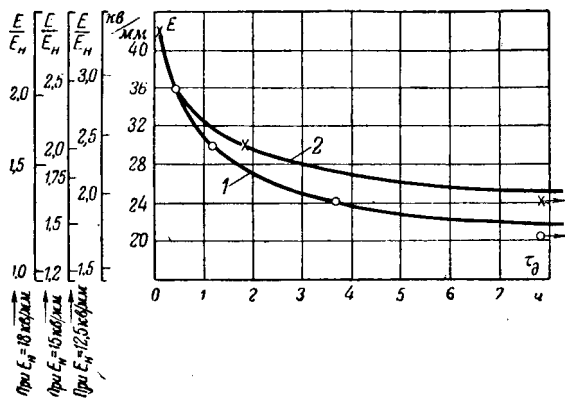


Рис. 6. Зависимость напряженности электрического поля от допустимого времени приложения напряжения, определяемого нагревом диэлектрика до 85°C . Начальная температура диэлектрика 60°C , бумага 12 мкн.
1 — образцы с семью листами, 2 — образцы с семью листами.

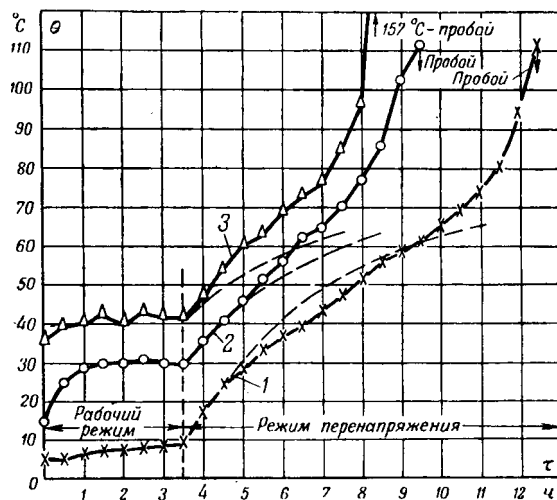


Рис. 7. Зависимость перегрева от времени приложения напряжения для различных рабочих режимов. Бумага 12 мкн; $n = 7$ листов; $U_{пер} = 2,5 \text{ кВ}$.

1 — рабочее напряжение 1,0 кВ; 2 — рабочее напряжение 1,5 кВ;
3 — рабочее напряжение 1,75 кВ.
— — — — — экспериментальные кривые; — — — — — расчетные (экспоненты, постоянная времени 4 ч).

торов промышленной частоты. Мантровым было получено $E_{\infty} = 38,4 \text{ кВ/мм}$, по сравнению с $20,5 \text{ кВ/мм}$ в настоящей работе. Последнее можно объяснить заниженным значением коэффициента a и величины $\lg \delta_0$, принятыми в [Л. 5]. Они расходятся с опытными значениями этих величин, полученными как в настоящей работе, так и в [Л. 7], где при $t > 80^\circ \text{C}$ величина $a = 0,012 \dots 0,015$, а $\lg \delta_0 = (2 \dots 3,8) \cdot 10^{-3}$.

Результаты измерений температуры изоляции в процессе выдержки образцов под напряжением, приведенные на рис. 4, показывают, что для всех режимов максимальная температура, при которой еще не происходит резкого местного возрастания температуры изоляции, в среднем близка к 85°C . При повышении температуры выше 85°C в изоляции происходят необратимые процессы, приводящие к бурному росту $\lg \delta$, росту температуры и в последующем к тепловому пробое.

На основании кривых изменения температуры изоляции рис. 4 можно определить время, при котором в процессе выдержки под напряжением температура в средней части пакета секций достигнет 85°C . Зависимость напряженности электрического поля от времени выдержки, приводящей к нагреву средней части пакета секций до 85°C , экспериментально полученная на образцах с пятью и семью листами, приведена на рис. 6. Видно, что для образцов с пятью листами бумаги допустимы перенапряжения на 10% выше, чем для образцов с числом листов, равным семи.

Выход из теплового равновесия при перегрузках зависит от предшествующего режима работы изоляции. На рис. 7 приведены зависимости перегрева изоляции от времени для случая повышения напряженности до $E_{пер} = 30 \text{ кВ/мм}$ при различных предшествующих режимах: 12, 18 и 21 кВ/мм.

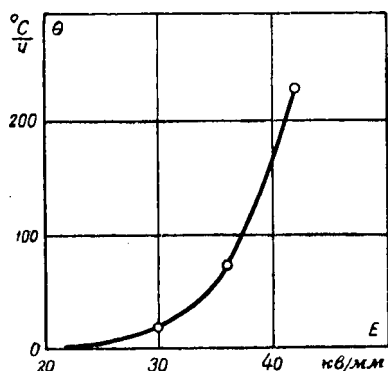


Рис. 8. Зависимость приращения температуры $\Delta\theta$ от перегрузки при предварительном нагреве изоляции в рабочем режиме до температуры 60°C . Бумага 12 мкн.

Из этих кривых следует, что с увеличением рабочей напряженности значительно сокращается время, при котором в процессе перегрузки изоляция конденсатора выходит из теплового равновесия. Нарастание температуры диэлектрика в процессе выдержки под напряжением происходит по закону, весьма близкому к линейному и значительно отличающемуся от экспоненциального. Это объясняется ростом $\text{tg } \delta$ с увеличением температуры (особенно в области повышенных температур), ведущему к ускорению процесса разогрева диэлектрика.

При такой зависимости температуры от времени выдержки изоляции под напряжением нарастание температуры в диэлектрике может быть охарактеризовано ее приращением в единицу времени. Как следует из рис. 7, величина этого приращения ($\Delta\theta$) практически не зависит от режима, предшествующего перегрузке (рабочей напряженности), и определяется только величиной перегрузки. Зависимость $\Delta\theta$ от перегрузки приведена на рис. 8.

На основании этой зависимости легко может быть определена длительность перегрузок, еще не приводящая к выходу изоляции из теплового равновесия, наступающему при ее нагреве выше 85°C . Для определения длительности допустимых перегрузок ($\tau_{пер}$) достаточно определить время

нагрева диэлектрика от температуры рабочего режима до 85°C , считая, что температура диэлектрика увеличивается пропорционально времени со скоростью $\Delta\theta$ в единицу времени:

$$\tau_{пер} = \frac{85 - t_p}{\Delta\theta} \quad (8)$$

Величины допустимого времени приложения заданного напряжения, полученные при таком расчете для диэлектрика конденсатора, предварительно нагретого в рабочем режиме до максимально допустимой рабочей температуры $t_p = 60^\circ\text{C}$, практически не отличаются от аналогичных вышеприведенных зависимостей, полученных экспериментально.

Выводы. 1. В конденсаторах, в которых величина рабочей напряженности ограничивается тепловыми характеристиками изоляции, при условии сохранения в эксплуатации $\text{tg } \delta \leq 0,003$, можно допустить следующие рабочие напряженности: для толщины изоляции между обкладками 80 ... 84 мкн — 16 кВ/мм и для 50 ... 60 мкн — 18 кВ/мм.

2. Длительность допустимых перегрузок с точки зрения теплового режима изоляции определяется временем нагрева диэлектрика до 85°C .

Литература

1. Г. С. Кучинский, В. Т. Ренне и В. М. Файницкий. Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов. Электричество, № 6, 1954.
2. Г. С. Кучинский. Влияние толщины диэлектрика на рабочие напряженности электрического поля в конденсаторной изоляции. ВЭП, № 2, 1954.
3. Г. С. Кучинский. Исследование старения изоляции посредством осциллографирования тока потерь. ВЭП, № 12, 1952.
4. С. К. Медведев. Характеристики конденсаторов для повышения коэффициента мощности при частоте 50 гц. ВЭП, № 8, 1948.
5. Г. А. Гринберг, М. И. Конторович и Н. Н. Лебедев. ЖТФ, т. X, вып. 3, стр. 199, 1940.
6. М. И. Мантров. Расчет пробивного напряжения бумаго-масляного конденсатора при тепловом пробое. ВЭП, № 8, 1953.
7. С. К. Медведев. Бумажно-масляные конденсаторы. ВЭП, № 11, 1950.

[22. 9. 1956]



Электрическая изоляция в условиях влажных тропиков

Кандидат техн. наук В. В. СКИПЕТРОВ,

кандидат сельскохозяйственных наук О. Н. АЛЬБИЦКАЯ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Условия работы электрических машин и аппаратов в местностях с влажным тропическим климатом накладывают весьма существенные ограничения на выбор электроизоляционных материалов, применяемых при изготовлении электрооборудования. Подобные материалы должны обладать стойкостью к действию высокой относительной влажности (90...100%) при температуре, достигающих $+45^\circ\text{C}$, и периодическом выпадении росы. Эти материалы (сами по себе или

после соответствующей обработки) должны противостоять развитию плесневых грибов и прочих микроорганизмов, способных повреждать изоляцию. В ряде случаев к электроизоляционным материалам предъявляются дополнительные требования в отношении стойкости к действию термитов и других животных вредителей.

Выбор электроизоляционных материалов. При выборе электроизоляционных материалов для электрических машин и аппаратов, предназначен-

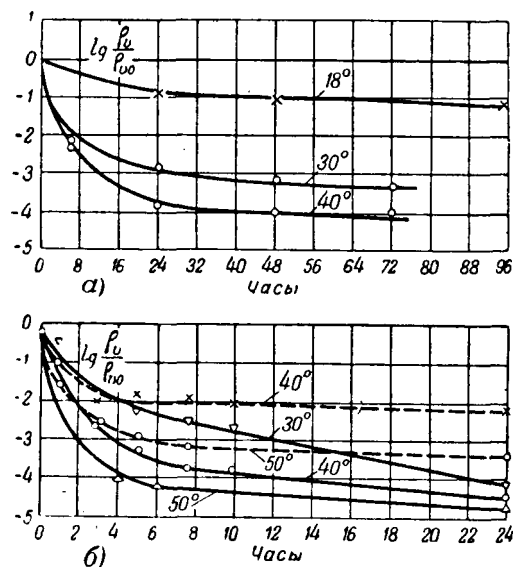
ных для работы в условиях влажного климата, следует исходить из общих закономерностей сорбции влаги твердыми диэлектриками, установленных в результате обобщения многочисленных экспериментальных работ, проведенных в этой области [Л. 1].

Процесс поглощения и количество влаги, сорбированной твердыми электроизолирующими материалами, зависят как от химической природы материалов, так и от их физической структуры. Известна группа материалов, совершенно непроницаемых для водяных паров. Сюда относятся неорганические стекла, правильно обожженная керамика, слюда и некоторые другие неорганические материалы. В то же время для диэлектриков ионного строения, в частности для неорганического стекла, характерна относительно высокая адсорбция влаги поверхностью материала. Из числа органических изоляционных материалов наибольшей влагостойкостью обладают неполярные или слабополярные высокополимеры: полистирол, полиэтилен, полиметилметакрилат, политетрафторэтилен и др. Материалы, содержащие полярные группы (гидроксильные, карбоксильные и др.), отличаются, как правило, повышенной сорбцией влаги. Наибольшее количество влаги поглощают волокнистые полярные материалы: бумаги, картоны, фибра и т. п.

С другой стороны, известно, что при неизменной относительной влажности более высоким температурам соответствует более высокое абсолютное содержание влаги в воздухе. Так, при относительной влажности 80% в 1 кг воздуха при температуре 20°С содержится 11,7 г воды, а при температуре 40°С — 38,4 г. Это обстоятельство, а также увеличение подвижности молекул при повышенных температурах обуславливает значительно более интенсивное увлажнение изоляции электрических машин и аппаратов в условиях влажных тропиков по сравнению со степенью увлажнения изоляции при той же влажности, но при более низких окружающих температурах. В качестве примера (см. рисунок) приведены графики увлажнения гетинакса, текстолита и стеклотекстолита при пребывании образцов в атмосфере 98% относительной влажности при различных температурах. По оси ординат отложены значения логарифма отношения удельного объемного сопротивления увлажненных образцов к удельному объемному сопротивлению образцов в исходном состоянии [Л. 2].

Исходя из приведенных соображений, следует считать, что с точки зрения обеспечения высокой влагостойкости изоляции электрооборудования наиболее выгодным является применение электроизоляционных материалов на основе стеклянного волокна и слюды в сочетании с нагревостойкими и влагостойкими смолами и лаками.

Применение пропитывающих лаков в данном случае должно обеспечивать устранение сорбции влаги поверхностью стекловолокнистых материалов. Поэтому при выборе пропитывающих лаков для этой цели следует учитывать не только влагостойкость лаковой пленки (оценивая ее, в частности, по степени снижения электрических ха-



Изменение удельного объемного сопротивления изоляционных материалов в процессе увлажнения при относительной влажности 98% и различных температурах окружающей среды (по Н. В. Александрову и Г. Е. Голубкову).

а — гетинакс; б — текстолит (сплошные линии), стеклотекстолит (пунктирные линии).

рактеристик в увлажненном состоянии), но и такие ее характеристики, как адгезия к стеклу и достаточно высокая нагревостойкость. В то же время можно ожидать, что использование для изоляции электрических машин и аппаратов материалов на основе (или с высоким содержанием) целлюлозного волокна, натурального шелка, а также асбеста, даже при условии многократной пропитки или покрытия этих материалов влагостойкими лаками не будет обеспечивать достаточно надежной работы электрооборудования в условиях влажных тропиков, если при его эксплуатации не предусмотрено специальных мер защиты изоляции от увлажнения.

Согласно рекомендациям, приведенным в проекте государственного стандарта ГДР VEM/11011, при изготовлении электрических машин «тропического» исполнения (защита типа TFS) в качестве основной изоляции обмоток следует применять материалы на основе стеклянного волокна (стеклолакоткань, стеклотекстолит), а также на основе слюды.

Наряду с этим допускается также применение изоляционных пленок на основе ацетобутирата и триацетата целлюлозы. Обмотки электрических машин рекомендуется выполнять из проводов со стеклоизоляцией или из эмальпроводов с изоляцией на основе синтетических смол (полиамидных, эпоксидных или поливинилацетатей). При этом лобовые части катушек должны быть дополнительно изолированы стеклянной лентой. Обмотки подвергаются двукратной вакуумной пропитке лаком, стойким к действию влаги. На лобовые части обмоток наносится покровный лак.

В руководстве по изготовлению электрооборудования для стран с тропическим климатом, составленным Чехословацким институтом сильноточной электротехники (VUSE-T-300), предусма-

тривается применение для изоляции обмоток электрических машин изоляционных материалов на основе волокнистого стекла и слюды. Обмоточные провода должны иметь стекловолокнистую изоляцию, наложенную либо непосредственно по меди, либо поверх эмалевого покрытия. Руководством предусматривается трехкратная вакуумная пропитка обмоток фенольноалкидным лаком с последующим двукратным погружением в тот же лак и дополнительным покрытием лобовых частей обмотки покровным лаком, содержащим фунгицидные соединения.

Наряду с этим имеются указания на возможность использования при изготовлении электрооборудования для работы в тропических условиях многих электроизоляционных материалов класса А, оправдавших себя в условиях нормального климата, таких, как черная хлопчатобумажная и шелковая лакоткани, лентероид, слоистые прессматериалы на основе бакелизированной бумаги и др. При этом, однако, оговаривается необходимость особо тщательного выбора лаков для пропитки и покрытия материалов указанного типа.

Наблюдения, сделанные работниками электропромышленности СССР во время ознакомления с электротехническими заводами Индии, показали, что в этой стране при изготовлении трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью до 200 кВт на напряжение до 600 в сравнительно широко применяются изоляционные материалы класса А. Изоляция класса В предусматривается лишь для электродвигателей, предназначенных для эксплуатации при высоких рабочих температурах. Статорные обмотки, как правило, выполняются из эмальпровода и в отдельных случаях из провода, изолированного хлопчатобумажной пряжей, а при изоляции класса В — из провода, изолированного стеклянной пряжей. Пазовая изоляция изготавливается в подавляющем большинстве случаев из гибкого миканита на бумажной подложке в сочетании с лентероидом.

Для пропитки обмоток применяются модифицированные алкидные или фенольноалкидные (светлые), а также битумноалкидные (черные) лаки печной сушки. Пропитка обмоток — однократная или двукратная — осуществляется погружением в лак. Для поверхностного покрытия обмоток, которое, однако, применяется не на всех заводах, используется либо серая эмаль, либо черный лак — в обоих случаях воздушной сушки.

Крупные асинхронные электродвигатели на напряжение 3000 в, установленные в машинном зале блюминга металлургического завода Тата, имеют статорную обмотку, выполненную из секций, пропитанных битумным компаундом и покрытых красной глифталевой эмалью. Для защиты изоляции крупных электрических машин от увлажнения в период тропических ливней предусмотрены специальные нагревательные элементы мощностью до 4 кВт, смонтированные в фундаментных ямах машинного зала под корпусами машин. Нагревательные элементы включаются на все время остановки машин.

Опыт эксплуатации силового электрооборудования

в условиях влажного тропического климата Индии показывает, что электрические машины, изготовленные с применением волокнистых изоляционных материалов растительного происхождения (хлопчатобумажные ткани и ленты, электрокартоны, бумаги, фибра, дерево и т. п.), пропитанных органическими составами, требуют принятия специальных мер защиты от увлажнения, поскольку такая изоляция, обладая неустраняемой гигроскопичностью, резко снижает свои электрические характеристики при пребывании в атмосфере с высокой относительной влажностью. Период тропических ливней в Индии неизменно сопровождается резким увеличением аварийности электрооборудования. Такие профилактические меры, как просушка изоляции обмоток после того, как машина находилась некоторое время в нерабочем состоянии, подогрев неработающих машин при помощи специальных нагревающих элементов или путем пропускания тока через обмотки, периодическое включение машин на холостой ход и т. п. значительно усложняют эксплуатацию электрооборудования и, кроме того, не всегда могут быть распространены на весь парк электрических машин. Поэтому следует считать целесообразным отказаться от применения в электрических машинах и аппаратах «тропического» исполнения материалов на основе (или с высоким содержанием) целлюлозного волокна, предусмотрев замену их стекловолокнистыми или стеклослюдяными материалами. Применение волокнистых изоляционных материалов на основе целлюлозы следует допускать лишь в строго ограниченном числе случаев, когда эти материалы выполняют чисто вспомогательную роль, например, в качестве подложек для микаленты. Некоторое удорожание электрооборудования, связанное с переходом к применению стекловолокнистых материалов, компенсируется значительным повышением его надежности.

При выборе изоляционных материалов для электрических машин и аппаратов, предназначенных для работы в условиях влажного тропического климата, необходимо производить оценку этих материалов также и с точки зрения их стойкости к действию плесневых грибов. Как известно, климатические условия влажных тропиков являются наиболее благоприятными для жизнедеятельности различного рода микроорганизмов, к числу которых относятся как одноклеточные организмы (бактерии, дрожжи), так и многоклеточные (плесневые грибы). В результате развития плесневых грибов может иметь место снижение механической прочности ряда органических материалов: текстильных изделий, дерева, кожи и др. Обильное образование плесени на поверхности изоляции между токоведущими частями приводит к снижению поверхностного сопротивления, а при малых изоляционных промежутках — к развитию поверхностного разряда. Такое ухудшение характеристик изоляции обусловлено высоким содержанием влаги в клетках грибов, а также электролитическим характером продуктов жизнедеятельности грибов. Отмечено, что после соответствующей сушки и очистки поверх-

ность изоляционного материала полностью восстанавливает свои первоначальные электрические характеристики. В то же время необходимо принимать во внимание ухудшение внешнего вида машин или аппаратов в результате появления плесени.

Испытания изоляционных материалов на грибоустойчивость, проведенные в ВЭИ в соответствии с методикой, рекомендованной Международной электротехнической комиссией [Л. 3], значительно облегчили решение ряда вопросов, связанных с конструированием и изготовлением электрооборудования, предназначенного для поставок в тропические страны. Результаты этих испытаний, согласующиеся в основном с данными, приводимыми в периодической литературе [Л. 4], позволяют дать оценку большинству изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении и электроаппаратостроении, с точки зрения стойкости к действию плесневых грибов. Установлено, что наиболее грибоустойчивыми являются неорганические изоляционные материалы.

Высокой стойкостью к действию плесневых грибов обладает также большинство кремнийорганических полимеров и изоляционных материалов на их основе, в том числе такие материалы, как резина, стеклотекстолит, стеклолакоткань, формовочный миканит и др. При этом следует иметь в виду, что грибоустойчивость кремнийорганических смол зависит от процентного содержания органической части в молекуле полимера, а также от степени термической обработки. В настоящее время известны кремнийорганические смолы, лаки и эмали, стойкие к действию плесневых грибов после запекания в соответствии с технологическим режимом, принятым в производстве электрооборудования. Наряду с этим имеются кремнийорганические полимеры, приобретающие достаточную грибоустойчивость только после длительной термической обработки, по своей продолжительности превосходящей время запекания, обусловленное требованиями технологии производства. Это обстоятельство делает целесообразным введение в состав некоторых кремнийорганических лаков и эмалей, а также ряда прессматериалов на основе кремнийорганических смол, соответствующих фунгисидных соединений.

Из числа органических изоляционных материалов устойчивыми к действию плесени являются многие термопластические высокополимеры (полиэтилен, полиметилметакрилат, полистирол, политетрафторэтилен, полиамиды, непластифицированный полихлорвинил), ряд синтетических каучуков (нитрилакрильный, хлоропреновый и др.), большинство эпоксидных смол, меламинаформальдегидная и меламинамочевинаформальдегидная смолы, фенольноформальдегидная смола при высокой степени полимеризации, а также стеклотекстолиты на основе этой смолы.

Наряду со стойкостью связующих смол к действию плесневых грибов грибоустойчивость пластических масс обусловлена также стойкостью наполнителей, пластификаторов, смазывающих агентов и прочих компонентов, вводимых в пластмассы в процессе их изготовления. Введение орга-

нических наполнителей, например древесной муки, хлопчатобумажного волокна или ткани, бумаги, резко снижает грибоустойчивость прессматериалов. При изготовлении деталей электрооборудования для поставок в тропические страны следует применять, как правило, прессматериалы с минеральными наполнителями. К числу пластификаторов, отличающихся повышенной стойкостью к действию плесневых грибов, относятся производные фталевой, адипиновой и фосфорной кислот, хлорированные углеводороды, в частности хлорированный дифенил, и др. [Л. 5].

Наличие большого числа компонентов, обладающих различной степенью грибоустойчивости, приводит к тому, что многие прессматериалы, изготовленные на основе смол, стойких к действию плесневых грибов, даже при наличии минеральных наполнителей оказываются недостаточно устойчивыми к поражению плесенью. К числу таких прессматериалов относятся, например, стекловолокнит, фенолиты, некоторые пластмассы на основе меламинамочевинаформальдегидной смолы и др. Грибоустойчивость полихлорвиниловых пластикаторов также в значительной степени зависит от природы введенных в их состав пластификаторов.

Наряду с названными к числу изоляционных материалов, слабо поражаемых плесневыми грибами, могут быть отнесены гетинакс, некоторые сорта битумов, шеллак, пленки на основе триацетат- и ацетобутиратцеллюлозы, нитроцеллюлозные лаки, а также промышленные изоляционные лаки, имеющие в своем составе растительные масла (касторовое, льняное или тунговое). Лаки воздушной сушки более интенсивно поражаются плесневыми грибами, чем лаки печной сушки. Стеклолакоткани, изготовленные с применением органических лаков, подвержены действию плесени в той же мере, как и сами лаки.

Введение в лаки некоторых минеральных наполнителей и пигментов, в частности соединений цинка, свинца и хрома, задерживает развитие плесени. Как показал опыт, пигментированная (серая) масляноглицеральная эмаль печной сушки значительно слабее поражается плесневыми грибами, чем лак, на основе которого она изготовляется.

Наиболее неустойчивы к действию плесневых грибов материалы на основе растительного волокна: хлопчатобумажные ткани, бумаги, электрокартон, фибра, а также лакоткани на хлопчатобумажной основе, текстолиты, кожа и склеивающие составы растительного и животного происхождения.

Рассмотрение указанных данных приводит к выводу о необходимости применения фунгисидной защиты изоляции электрических машин и аппаратов, предназначенных для работы в условиях влажного тропического климата, даже в тех случаях, когда для их изготовления использованы материалы, наиболее стойкие к действию влаги.

Фунгисидная защита изоляции. Поскольку обмотки электрических машин и аппаратов подвергаются, как правило, пропитке изоляционными лаками и в ряде случаев дополнительному покры-

тию покровными лаками или эмалями, то наиболее целесообразным средством защиты изоляции обмоток от действия плесневых грибов является введение в состав применяемых изоляционных лаков или эмалей специальных органических соединений, обладающих фунгисидным действием [Л. 6...10].

При выборе фунгисидов обычно исходят из следующих условий:

- 1) совместимость фунгисида с веществом, в состав которого он вводится;
- 2) достаточно активное и продолжительное фунгисидное действие при отсутствии вредности для обслуживающего персонала;
- 3) достаточная стабильность при нагреве, малая летучесть;
- 4) нерастворимость в воде;
- 5) отсутствие отрицательного влияния на физико-химические и электрические свойства материалов, в состав которых вводится фунгисид, а также на материал изделий, на которые наносится защитное покрытие.

При выборе фунгисида необходимо учитывать также конкретные условия работы каждого изделия. Выбор фунгисидов, удовлетворяющих всему комплексу этих условий, представляет большие трудности. Активность фунгисидных соединений в значительной мере зависит от выбора лака-носителя, а также от концентрации взятого соединения. Следует иметь в виду, что различные виды плесневых грибов обладают различной чувствительностью в отношении фунгисидов. Поэтому для более надежной защиты изделия целесообразно пользоваться смесью нескольких фунгисидных соединений.

В литературе имеются многочисленные указания относительно весьма высокой токсичности для плесневых грибов и других микроорганизмов органических соединений ртути. К их числу относятся как алкилпроизводные ртути (метилмеркуролеат, этилмеркурфосфат), так и арилпроизводные (фенилмеркурацетат, фенилмеркурнафенат, фенилмеркуролеат и др.), а также пиридилртутные соединения. Однако широкому применению ртутьсодержащих препаратов препятствует их значительная токсичность для обслуживающего персонала.

Наряду с органическими соединениями ртути в качестве антисептиков находят применение производные 8-оксихинолина (8-оксихинолят меди, дихлор-8-оксихинолин и др.), производные фенола и нафтола (три-, тетра- и пентахлорфенолы и их медные и цинковые соли, нитрофенол, оксидифенил, бетанафтол и др.), салициланилид и его производные, а также многие другие органические соединения, обладающие фунгисидными свойствами. В последнее время получили, в частности, распространение фторсодержащие органические соединения (динитрофторбензол и др.).

Однако значительная часть названных соединений оказывается нестабильной при повышенных температурах. Естественно, что для введения в состав пропиточных лаков или покровных эмалей печной сушки необходимо подбирать такие соединения, которые не теряли бы фунгисидного

действия в результате прохождения технологического режима сушки пропитанных изделий, а также сохраняли бы свою активность при рабочих температурах. По данным, полученным в ВЭИ, наиболее высокой термостойкостью отличаются три-, тетра- и пентахлорфеноляты меди и цинка, а также 8-оксихинолят меди.

При изготовлении деталей электрооборудования из прессматериалов возможно непосредственное введение фунгисидов в пресскомпозицию в порошкообразном состоянии. В результате опытов, проведенных в ВЭИ, было установлено, что введение в состав пресскомпозиций на основе фенольноформальдегидной, а также некоторых кремнийорганических смол порошкообразного 8-оксихинолята меди (в количестве 1...1,5% к весу пресскомпозиции) делает эти прессматериалы устойчивыми к действию плесневых грибов. Другим способом защиты термореактивных прессматериалов является введение фунгисидов в воскообразные вещества, входящие в состав пресскомпозиций в качестве смазывающих агентов. Мигрируя к поверхности прессматериала, эти вещества обеспечивают вблизи нее достаточную концентрацию фунгисида. Для защиты термопластических материалов рекомендуется вводить раствор фунгисидов в пластификатор. В этом случае также имеет место диффузия фунгисидов (вместе с пластификатором) в поверхностные слои материала.

Наконец, защита прессматериалов и слоистых пластиков может быть осуществлена путем нанесения на поверхность изделий, особенно на те части поверхности, которые подвергались механической обработке, слоя покровного лака или эмали с введенными в них фунгисидными соединениями.

В тех случаях, когда функции защитного покрытия ограничиваются предохранением изоляции обмоток от появления плесени в процессе транспортировки и хранения электрооборудования, это покрытие может быть осуществлено путем нанесения на поверхность пропитанных обмоток фунгисидного лака или эмали низкотемпературной сушки. Создание такого покрытия значительно облегчается тем, что от фунгисидов, вводимых в состав покровных материалов, в этом случае не требуется высокой нагревостойкости. Подобный способ защиты обмоток электрических машин принят, в частности, в Чехословакии.

Защита изоляции обмоток электрических машин и аппаратов от разрушения термитами в достаточной степени может быть достигнута путем применения стекловолоконистых материалов, а также изоляционных лаков и эмалей печной сушки с высокой степенью твердости. Как показали наблюдения работников советской электропромышленности при посещении заводов Индии, термиты представляют опасность только для электрооборудования, установленного в непосредственной близости от поверхности почвы, а также для кабелей, проложенных в земле. В заводских цехах, где полы имеют твердое покрытие, а за электрооборудованием осуществляется повседневное наблюдение, возможность повреждения изоляции термитами весьма маловероятна.

Напротив, при продолжительном хранении оборудования в складских помещениях вероятность нападения термитов очень значительна. В этом случае дерево, из которого изготавливаются ящики, а также упаковочная бумага должны пропитываться специальными антисептическими составами (креозотовым маслом, некоторыми соединениями мышьяка и фтора и др. [Л. 11]).

Система изоляции электрооборудования тропического исполнения, принятая в Советском Союзе. На основе изложенных выше соображений 6. Министерством электропромышленности СССР разработаны специальные руководящие технические материалы по изготовлению электрооборудования, предназначенного для работы в странах с тропическим климатом. В соответствии с рекомендациями, приведенными в этих документах, при изготовлении названного электрооборудования следует применять электроизоляционные материалы на основе бесщелочного стеклянного волокна, слюды и в некоторых случаях асбестового волокна в сочетании с нагревостойкими и влагостойкими смолами и лаками, прессматериалы с неорганическими наполнителями, а также керамические материалы. Не рекомендуется применение для целей электроизоляции хлопчатобумажных и шелковых тканей и материалов на их основе, бумаги, картона, фибры, прессматериалов с древесным и целлюлозным наполнителями, слоистых пластиков с хлопчатобумажной или бумажной основой, а также дерева, за исключением тех случаев, когда эти материалы предназначены для работы в масле. В качестве исключения разрешается также применение тонких бумаг для междуслойной изоляции катушек низковольтной аппаратуры (при условии пропитки последних), микалентной бумаги в качестве подложек для микаленты, используемой при изготовлении секций обмоток крупных электродвигателей с пропиткой битумным компаундом, а также фибры для дугогасительных устройств и предохранителей. Из пленочных материалов допускается применение триацетатной пленки для междуслойной изоляции аппаратных катушек. Для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с изоляцией классов А и В рекомендуется применение битумно-масляных и меламиноглифталевых лаков, для пропитки обмоток с изоляцией класса СВ—кремнийорганических лаков. При изготовлении статорных обмоток высоковольтных электрических машин руководящие материалы предусматривают применение пропиточного битумного компаунда с температурой размягчения по кольцу и шару 120...127° С. Для пропитки катушек низковольтных аппаратов рекомендован термореактивный полиэфирстирольный компаунд.

В качестве покровных эмалей для обмоток машин и аппаратов рекомендуются масляноглифталевые и модифицированные кремнийорганические эмали печной сушки. Для покрытия обмоток, пропитанных битумным компаундом, когда применять лаки или эмали печной сушки не представляется возможным, допускается применение битумно-масляного лака и масляноглифталевой эмали воздушной сушки.

В лаки и эмали, предназначенные для покрытия обмоток машин и аппаратов, руководящие технические материалы предусматривают введение фунгисидных соединений. Для этой цели, в частности, рекомендован 8-оксихинолят меди. Хорошие результаты дает введение в состав серой масляноглифталевой эмали трихлорфенолята меди в количестве 1% к основе.

Обмотки электрических машин и аппаратов рекомендуется выполнять проводами с изоляцией из стеклянной пряжи. Для обмоток с изоляцией класса А предусмотрено применение эмальпровода с изоляцией на основе поливинилацетата. Для изготовления выводных концов рекомендован гибкий провод с изоляцией из кремнийорганической резины с оплеткой из стеклянной пряжи. Для монтажных целей допускается применение проводов с изоляцией из резины или полихлорвинила.

Представляя собой первый опыт создания единой технической документации по изготовлению электрооборудования тропического исполнения, руководящие технические материалы, естественно, не исчерпывают всего комплекса проблем, связанных с выбором изоляции и технологии изолирования электрических машин и аппаратов, предназначенных для стран с тропическим климатом. Условием успешного решения этих проблем является дальнейшее развертывание работ по созданию новых материалов и средств защиты изоляции, а также тщательное изучение опыта эксплуатации электрооборудования в тропических условиях.

Литература

1. М. М. Михайлов. *Электроматериаловедение*. Госэнергоиздат, 1953.
2. Н. В. Александров. *Исследование свойств электроизоляционных материалов при повышенной влажности*. Всесоюзный заочный энергетический институт, 1953.
3. Basic Climatic and Mechanical Rubestness Testing Procedure for Components. IEC, Publication 68, Geneva, 1954.
4. *Электрооборудование и электротехнические материалы для условий тропического и субтропического климата*. Библиографический указатель русской и иностранной литературы 1938—1955 гг. (72 названия), ТБ-156. ЦБТИ МЭП, 1955.
5. B. Doležel. *Napadení plastických hmot plisněmi a možnosti ochrany*. Chemický průmysl, т. 5, стр. 80, № 2, 1955.
6. G. Nedej. *Les agents fongistatiques et fungicides. Leur utilisation dans les peintures. Peintures, pigments, vernis*. т. 31, стр. 791, № 9, 1955.
7. S. S. Blook. *Fungitoxicity of the 8-Quinolins*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, т. 3, стр. 229, № 3, 1955.
8. P. Maurice. *Methods for the Control of Fungi*. Chemical Products, т. 18, стр. 167, № 5, стр. 213, № 6, 1955.
9. H. Rosenberg, J. Mosteller. *Evaluation of Organic Fluorine Compounds for Use in Military Aircraft*. Ind. Eng. Chem., т. 45, стр. 2283, № 10, 1953.
10. S. Bakanaukas, A. Prince. *Requirements for Fungicides in Selected Air Force Materials*. Journal of Applied Microbiology, т. 3, стр. 86, № 2, 1955.
11. R. Leprêtre. *La protection des matériels électriques*. Nature (Paris), т. VII, стр. 211, № 3171, 1949.

[10.4.1957]

Исследования отключающей способности и надежности внутренней изоляции выключателя МГ-110

Кандидат техн. наук В. В. КАПЛАН и кандидат техн. наук В. М. НАШАТЫРЬ

Ленинградский политехнический институт

В течение 1952—1953 гг. в лаборатории ТВН им. Горева Ленинградского политехнического института были проведены исследования [Л. 1] отключающей способности и надежности внутренней изоляции после многократных отключений токов короткого замыкания маломасляного выключателя МГ-110 на 110 кВ, 600 А, 2500 МВА конструкции завода «Электроаппарат» (рис. 1).

Отсутствие лабораторий, в которых можно было бы испытать выключатель при мощности отключения 2500 МВА и нескольких полупериодах горения дуги прямыми методами (от синхронного ударного генератора или колебательного контура) или на синтетической схеме, потребовало дальнейшего развития двухчастотного колебательного контура — синтетической схемы, ранее разработанной в лаборатории ТВН ЛПИ на базе колебательного контура А. А. Горева [Л. 2 ... 6].

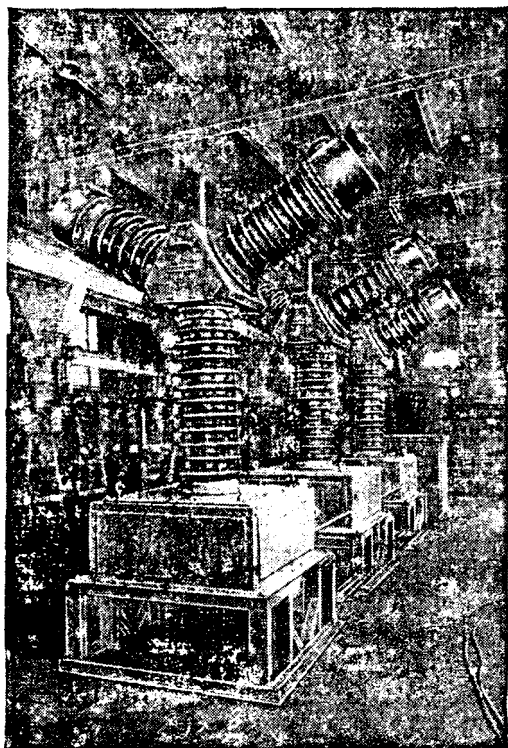


Рис. 1. Маломасляный выключатель типа МГ-110 на 110 кВ 600 А, 2500 МВА завода «Электроаппарат».

промежутках испытуемого выключателя ИВ и отключающего устройства ОУ и в других элементах схемы; второй схемой — для исключения возможности преждевременного гашения дуги в испытуемом выключателе при первом (или втором) переходе тока через нуль, когда еще не подключается цепь восстанавливающегося напряжения и на испытуемый выключатель не подается полное восстанавливающееся напряжение, т. е. для искусственного продления времени горения дуги путем ее поджигания при переходах тока через нуль, предшествующих ее окончательному гашению.

Вариант схемы испытательной установки, где для получения незатухающей кривой тока использована «схема сложения колебательных токов» [Л. 7], показан на рис. 3. В этом случае ток в испытуемом выключателе ИВ получается как сум-

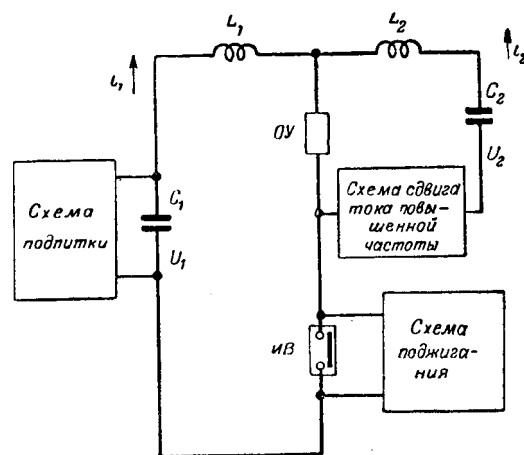


Рис. 2. Принципиальная схема двухчастотного колебательного контура со сдвигом тока повышенной частоты. C_1 и C_2 — конденсаторные батареи; L_1 и L_2 — реакторы; ИВ — испытуемый выключатель; ОУ — отключающее устройство.

ма токов двух колебательных контуров ($C_1—L_1$ и $C_2—L_2$), настроенных соответственно на частоты ω_1 и ω_2 , не равных между собой. В результате ток в выключателе имеет характер биений. При отсутствии потерь в дуговых промежутках ток возрастает от полупериода к полупериоду в течение некоторого времени, а при наличии потерь и при соответствующей степени нарастания амплитуд тока результирующая кривая имеет практически незатухающий характер.

Для поджигания дуги параллельно испытуемому выключателю через отделяющий промежуток ОП (длинную и весьма тонкую плавкую вставку) подключается предварительно заряженный конденсатор C_6 , который при переходе тока через нуль (первом или втором — в зависимости от знака напряжения $U_{\text{под}}$) и при срабатывании

Схема испытательной установки. Для испытания выключателя МГ-110 двухчастотный колебательный контур (рис. 2) был дополнен схемами «подпитки» и «поджигания»: первой схемой — для получения незатухающих колебаний тока в течение всего времени его прохождения (при ограниченной величине напряжения U_1 источника э. д. с. цепи отключаемого тока), т. е. для обеспечения компенсации потерь энергии в дуговых

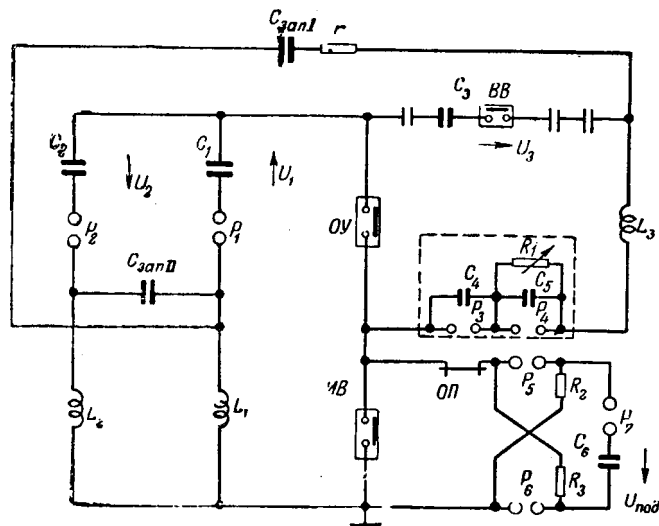


Рис. 3. Развернутая схема испытательной установки. Цепь отключаемого тока; C_1 и C_2 — конденсаторные батареи; L_1 и L_2 — реакторы; $ИВ$ — испытуемый выключатель; $ОУ$ — отключающее устройство. Цепь восстанавливающегося напряжения; C_3 — конденсаторная батарея; L_3 — реактор. Схема сдвига: C_4 и C_5 — конденсаторы; R_1 — шунтирующее сопротивление; P_3 и P_4 — разрядники. Схема одновременного включения контуров: $C_{зан I}$ и $C_{зан II}$ — запальные конденсаторы; P_1 и P_2 — разрядники; $ВВ$ — вспомогательный выключатель; r — демпфирующее сопротивление. Схема поджигания: C_6 — конденсатор; $ОП$ — отделяющий промежуток; P_5 , P_6 и P_7 — разрядники; R_2 и R_3 — шунтирующие сопротивления.

разрядников P_5 , P_6 и P_7 разряжается на дуговой промежуток, тем самым продлевая в нем горение дуги еще на один полупериод. Синхронизирующие разрядники, шунтированные многоомными сопротивлениями R_2 и R_3 , работают так же, как в известной искусственной схеме Бирманса [Л. 8]. При восстановлении напряжения на испытуемом выключателе разрядник P_7 оказывается под суммарным напряжением конденсатора C_6 и напряжения, восстанавливающегося на выключателе, что и приводит к его срабатыванию. Вслед затем срабатывают и разрядники P_5 и P_6 , к которым оказывается приложенным напряжение $U_{под}$.

Опыт начинается с включением вспомогательного выключателя $ВВ$. При этом в «схеме одновременного включения контуров» [Л. 9] через запальные конденсаторы $C_{зан I}$ и $C_{зан II}$ подается высокое напряжение к разрядникам P_1 и P_2 , что вызывает их срабатывание — при этом через отключающее устройство и выключатель начинает проходить ток отключения. После первого (или второго) полупериода его прохождения срабатывает схема поджигания, причем конденсатор C_6 после этого отделяется от выключателя, так как гаснет дуга в отделяющем промежутке. После начала прохождения второго (или третьего) полупериода тока расходятся контакты $ОУ$, а за определенный отрезок времени до перехода тока через нуль срабатывает «схема сдвига» [Л. 10] — пробиваются разрядники P_3 и P_4 , и к испытательной схеме подключается цепь восстанавливающегося напряжения — контур C_3 — L_3 , являющийся источником э. д. с. повышенной частоты ω_2 .

Испытания выключателя. При проверке отключающей способности выключателя существенное значение имеет выбор правильной величины восстанавливающегося напряжения и скорости его

восстановления (частоты собственных колебаний восстанавливающегося напряжения).

При испытании выключателя МГ-110 на половинную мощность (1250 Мва) частота собственных колебаний была принята 3000 гц (в отдельных опытах 1600 гц), а при испытании на полную мощность 1190 гц, что в основном соответствует рекомендациям Международного комитета по выключателям CIGRE (в ГОСТ 687-41 на высоковольтные выключатели они отсутствуют). При этом несколько более тяжелые условия испытаний приняты при полной мощности отключения.

Результаты ряда опытов по определению отключающей способности выключателя МГ-110 приведены в таблице.

Отключаемый ток аэфф	Первая амплитуда восстанавливающегося напряжения, кв макс	Коэффициент превышения амплитуды ¹	Длительность дуги, сек	Собственная частота восстанавливающегося напряжения, гц	Мощность отключения, Мва
6300	192	1,43	0,0241	1600	1200
6150	135	1,01	0,0235	1600	1170
6790	163	1,22	0,0310	3000	1290
6310	152	1,13	0,0297	3000	1200
13200	161,5	1,20	0,0185	1190	2510
12370	155	1,15	0,0185	1190	2340
11000	156	1,16	0,0229	1190	2095
11100	156	1,16	0,0218	1190	2120
12100	138	1,03	0,0213	1190	2300
12000	156	1,16	0,0242	1190	2280
10500	156	1,16	0,0258	1190	2000
12200	158	1,18	0,0253	1190	2300

¹ Имеется в виду превышение над требуемой ГОСТ 687-41 при однофазных испытаниях, эквивалентных трехфазным, величиной (134 кв макс) установившейся составляющей восстанавливающегося напряжения.

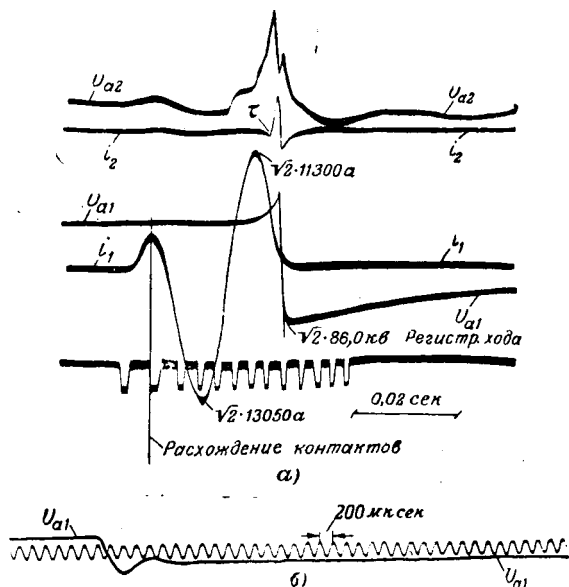


Рис. 4. Электромагнитная (а) и катодная (б) осциллограммы испытания выключателя МГ-110 на отключающую способность.

I_1 — ток в испытуемом выключателе; U_{a1} — напряжение на испытуемом выключателе; U_{a2} — суммарное напряжение на $ИВ$ и $ОУ$; τ — момент подключения цепи восстанавливающегося напряжения; I_2 — ток в цепи восстанавливающегося напряжения.

Как видно из таблицы, при половинной мощности отключения выключатель гасит дугу при времени ее горения в пределах (0,0241 ... 0,0310) *сек*, а при полной мощности отключения — в пределах (0,0185 ... 0,0258) *сек*.

Наибольшая достигнутая при испытании мощность отключения составляла 2 510 *Мва*. Никаких внешних эффектов при проведении данных испытаний не наблюдалось, кроме небольшого выброса масла и дыма из газоотводов. Контакты выключателя находились в хорошем состоянии.

Для иллюстрации на рис. 4, а и б приведены электромагнитная и катодная осциллограммы одного из опытов данных испытаний.

Момент начала расхождения контактов выключателя определялся по ступенчатому регистратору хода.

Проведенные в 1953—1954 гг. в системе Ленэнерго поверочные испытания выключателя МГ-110 подтвердили эквивалентность испытаний на синтетической схеме, поскольку при тех же величинах отключаемого тока получились при испытании в сети те же времена горения дуги в выключателе, что и при испытании в лабораторных условиях, а также подтвердились данные об отключающей способности выключателя, полученные в лаборатории ТВН ЛПИ.

Исследование внутренней изоляции выключателя. Основная задача исследования внутренней изоляции выключателя МГ-110 после многократных отключений токов короткого замыкания сводилась к определению предельного числа отключений выключателем токов короткого замыкания (близких к его предельному току отключения), при которых еще не происходит повреждения его внутренней изоляции и не снижается электрическая прочность изоляции выключателя при разомкнутом состоянии его контактов. Это позволяет обоснованно подойти к выбору гарантированного числа отключений тока короткого замыкания, после которых необходимо производить в эксплуатации ревизию выключателя, обеспечивая определенные запасы в этом отношении.

В основном эти испытания сводились к тому, что внутренняя изоляция выключателя, предварительно подвергнутого многократному отключению тока короткого замыкания, проверялась путем приложения к нему волн коммутационных перенапряжений от специального «генератора коммутационных перенапряжений», приложения в течение длительного времени напряжения промыш-

ленной частоты, измерения токов утечки и сопротивления изоляции.

Если оказывалось, что изоляция выключателя, проверенная после определенного числа отключений им тока короткого замыкания, находилась еще в хорошем состоянии, то выключатель вновь подвергался многократному отключению тока короткого замыкания, затем повторно проверялась его изоляция и т. д.

Осциллограмма рис. 5 иллюстрирует волну коммутационного перенапряжения, которая прикладывалась к изоляции выключателя. Первый пик составлял в пределе $\sim 360 \text{ кВ}_{\text{макс}}$; это напряжение первоначально многократно прикладывалось к выключателю в целом, а затем к одной дугогасительной колонке выключателя. В первом случае амплитуда волны перенапряжения превышала приблизительно в 3,5 раза фазовое напряжение 110-кВ сети, определенно исходя из наибольшего рабочего напряжения, а во втором случае испытательная волна уже имитировала 7-кратные коммутационные перенапряжения.

Длительно приложенное напряжение промышленной частоты (непрерывно в течение 8 ч) составляло 80 $\text{кВ}_{\text{эфф}}$ на одну дугогасительную колонку, что на 25% превышает наибольшее значение напряжения, которое может появиться на выключателе, если он используется в качестве межсистемного (в случае, если системы длительно работают несинхронно).

Токи утечки определялись при приложении к одной дугогасительной колонке выключателя выпрямленного напряжения — 35 *кв*.

Проведенные исследования показали, что после отключения более 80 раз выключателем МГ-110 токов короткого замыкания (близких к его номинальному току отключения 13 200 *а*) его внутренняя изоляция находилась в хорошем состоянии. После же отключения токов короткого замыкания более 94 раз внутренняя изоляция выключателя была повреждена при приложении повышенного напряжения.

Выводы. 1. Маломасляный выключатель МГ-110 завода «Электроаппарат» успешно справляется с отключением токов во всем диапазоне их изменения, вплоть до номинального тока отключения — 13 200 *а*.

Опытно проверенная отключающая способность выключателя соответствует его маркированной мощности отключения — 2 500 *Мва*.

2. Испытание внутренней изоляции дугогасительных колонок выключателя МГ-110 выявило значительную ее надежность после многократных отключений им токов короткого замыкания.

Установлена допустимость в эксплуатации отключения выключателем МГ-110 десяти коротких замыканий без ревизии и смены масла.

Литература

1. В. Б. Гурвич и В. В. Каплан. Новый маломасляный выключатель 110 *кв*. Электрические станции, № 4, 1955.
2. А. А. Горев, В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Двухчастотный колебательный контур для испы-



Рис. 5. Катодная осциллограмма волны коммутационного перенапряжения, прикладываемого к выключателю МГ-110 при проверке его изоляции после многократных отключений токов короткого замыкания.

Об использовании линий электротяговой сети в качестве высокочастотных каналов

Канд. техн. наук К. Г. КУЧМА

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта

Проблема использования линий электротяговой сети для осуществления по ним высокочастотной телефонной связи с электроподвижным составом, телеуправления системой электроснабжения тяги и защиты линий от токов короткого замыкания заслуживает серьезного внимания. Для ее решения необходимы широкие исследования многих вопросов, в том числе теоретических, касающихся первичных и вторичных высокочастотных параметров электротяговых линий.

В настоящее время достаточно исследованы высокочастотные параметры линий электропередачи, которые широко используются для канализации высокочастотной электромагнитной энергии.

При распространении высокочастотной энергии по многопроводным симметричным линиям, какими являются линии электропередачи, возникают волны с одинаковыми коэффициентами распространения. Это позволяет при определении вторичных параметров линий электропередачи исходить лишь из двух волн: нулевой последовательности и междупазной.

Линии электротяговой сети являются также многопроводными, их воздушные провода выполняются обычно из цветных металлов. Расчет высокочастотных параметров таких линий можно упростить, если провода, подвешенные над одним железнодорожным путем и имеющие один и тот же потенциал, заменить эквивалентным проводом, а все нитки рельсов — эквивалентным рельсом, учитывая наличие междурельсовых и междупутных соединений.

Таким образом, при расчете высокочастотных параметров можно исходить из схемы, включающей один эквивалентный рельс и эквивалентные воздушные провода, число которых равно количеству путей железнодорожной линии.

Процесс распространения электромагнитной энергии вдоль многопроводной линии описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка в матричной форме:

$$-\frac{d^2}{dx^2} \|\dot{U}\| = \|Z\| \cdot \|Y\| \cdot \|\dot{U}\|; \quad (1)$$

$$-\frac{d^2}{dx^2} \|\dot{I}\| = \|Z\| \cdot \|Y\| \cdot \|\dot{I}\|. \quad (2)$$

Определение коэффициентов распространения k на основании этих уравнений сводится к решению характеристического алгебраического уравнения n -ной степени.

Для составления такого уравнения необходимо произвести действие над исходными матрицами:

$$\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Y_{11} & (-Y_{12}) & \dots & (-Y_{1n}) \\ (-Y_{21}) & Y_{22} & \dots & (-Y_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-Y_{n1}) & (-Y_{n2}) & \dots & Y_{nn} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} k^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k^2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

Затем из элементов результирующей матрицы составить определитель и, приравняв его нулю, по правилу вычисления определителей представить его в развернутом виде.

Рассматривая двухпутный электрифицированный участок, обозначим:

Z_{11} , Z_{22} — полное сопротивление первого и второго эквивалентного воздушного провода, ом/км ;

Z_{33} — полное сопротивление эквивалентного рельса, ом/км ;

Z_{12} , Z_{21} — полное сопротивление взаимодукции между воздушными проводами, ом/км ;

Z_{13} , Z_{23} — полное сопротивление взаимодукции между рельсом и каждым из воздушных проводов, ом/км .

Тогда служащий для составления характеристического уравнения определитель равен

тания сверхмощных высоковольтных выключателей на отключающую способность. Электричество, № 6, 1951.

3. С. П. Бакуменко, А. А. Горев, В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. К статье А. А. Горева, В. В. Каплана и В. М. Нашатыря „Двухчастотный колебательный контур для испытания сверхмощных высоковольтных выключателей на отключающую способность“, Электричество, № 4, 1952.

4. В. В. Каплан. Двухчастотная схема для увеличения мощности колебательного контура, предназначенного для испытания на отключающую способность аппаратов высокого напряжения. Труды ЛПИ, № 1, 1954.

5. В. М. Нашатырь. О применении сдвига тока повышенной частоты в двухчастотном колебательном контуре для испытания выключателей. Труды ЛПИ, № 1, 1954.

6. В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. О приме-

нении связанных колебательных контуров для испытания „небыстродействующих“ высоковольтных выключателей. Электричество, № 5, 1953.

7. В. М. Нашатырь. Авторское свидетельство № 98455. Способ получения электрического тока промышленной частоты для испытания высоковольтных выключателей.

8. J. Biermanns. Fortschritte im Bau von Druckgasschaltern. ETZ, S. 194, 1938.

9. В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Схема для одновременного включения нескольких контуров высокого напряжения. Журнал технической физики, т. XIV, вып. 5, 1949.

10. В. В. Каплан и В. М. Нашатырь. Схема электрического сдвига начала прохождения тока. Электричество, № 2, 1950.

[11. 11. 1955]



$$D = \begin{vmatrix} Z_{11}Y_{11} - Z_{12}Y_{21} - Z_{13}Y_{31} - k^2; & -Z_{11}Y_{12} + Z_{12}Y_{22} - Z_{13}Y_{32}; & -Z_{11}Y_{13} - Z_{12}Y_{23} + Z_{13}Y_{33} \\ Z_{21}Y_{11} - Z_{22}Y_{21} - Z_{23}Y_{31}; & -Z_{21}Y_{12} + Z_{22}Y_{22} - Z_{23}Y_{32} - k^2; & -Z_{21}Y_{13} - Z_{22}Y_{23} + Z_{23}Y_{33} \\ Z_{31}Y_{11} - Z_{32}Y_{21} - Z_{33}Y_{31}; & -Z_{31}Y_{12} + Z_{32}Y_{22} - Z_{33}Y_{32}; & -Z_{31}Y_{13} - Z_{32}Y_{23} + Z_{33}Y_{33} - k^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

После замены многочленов элементов определителя сокращенными условными обозначениями получим:

$$D = \begin{vmatrix} \gamma_n^c - k^2; & \gamma; & \gamma_n \\ \gamma; & \gamma_n^c - k^2; & \gamma_n \\ \gamma_p; & \gamma_p; & \gamma_p^c - k^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

Вычисляя определитель, получаем следующее характеристическое уравнение:

$$(\gamma_n^c - \gamma - k^2)[(\gamma_n^c + \gamma - k^2)(\gamma_p^c - k^2) - 2\gamma_n\gamma_p] = 0. \quad (6)$$

Следовательно, частные значения коэффициентов распространения могут быть определены из уравнений

$$\gamma_n^c - \gamma - k^2 = 0; \quad (7)$$

$$(\gamma_n^c + \gamma - k^2)(\gamma_p^c - k^2) - 2\gamma_n\gamma_p = 0. \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) вытекает, что в линиях электротяговой сети двухпутного участка при использовании их в качестве каналов токов высокой частоты будут иметь место три волны: первая — с коэффициентом распространения, определяемым по уравнению (7), и две — с коэффициентами распространения, определяемыми по уравнению (8).

Коэффициент распространения первой волны

$$k_1 = \pm \sqrt{\gamma_n^c - \gamma} = \pm \sqrt{(Z_{11} - Z_{12})(Y_{11} - Y_{12})}. \quad (9)$$

Коэффициенты распространения второй и третьей волн

$$k_{2,3} = \pm \sqrt{\frac{\gamma_n^c - \gamma_p^c + \gamma}{2}} \pm \sqrt{\frac{(\gamma_n^c - \gamma_p^c + \gamma)^2}{4} + 2\gamma_n\gamma_p - \gamma_n^c\gamma_p^c}. \quad (10)$$

Определитель, позволяющий найти коэффициенты распространения электромагнитной волны на однопутном участке, представляет минор определителя (5) по элементу, соответствующему второму воздушному проводу:

$$D = \begin{vmatrix} \gamma_n^c - k^2; & \gamma_n; \\ \gamma_p; & \gamma_p^c - k^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

где $\gamma_n^c = Z_{11}Y_{11} - Z_{13}Y_{31}$; $\gamma_p^c = Z_{33}Y_{33} - Z_{31}Y_{13}$;

$$\gamma_p = Z_{31}Y_{11} - Z_{33}Y_{31}; \quad \gamma_n = Z_{13}Y_{33} - Z_{11}Y_{13}.$$

В этом случае характеристическое уравнение для определения коэффициентов распространения имеет вид:

$$(\gamma_n^c - k^2)(\gamma_p^c - k^2) - \gamma_n\gamma_p = 0 \quad (12)$$

$$\text{или } k^4 - k^2(\gamma_n^c + \gamma_p^c) + \gamma_n^c\gamma_p^c - \gamma_n\gamma_p = 0.$$

Следовательно, на однопутном участке

$$k_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\gamma_n^c + \gamma_p^c}{2}} \pm \sqrt{\frac{(\gamma_n^c - \gamma_p^c)^2}{4} + \gamma_p\gamma_n - \gamma_n^c\gamma_p^c}. \quad (13)$$

При вычислении первичных параметров линий электротяговой сети можно пренебречь активной проводимостью (утечкой) между воздушными проводами и землей как величиной малого порядка и емкостной проводимостью между рельсами и землей вследствие малой разности потенциалов между ними и большой активной проводимости. При определении взаимной проводимости между проводами и рельсами можно считать, что рельсы имеют один и тот же потенциал с землей. При этих допущениях коэффициент распространения первой (основной) волны на однопутном участке

$$k_1 = \pm \sqrt{\left(Z_{11} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}}\right)Y_{11}} \quad (14)$$

Сравнивая значения коэффициентов распространения основных волн для двухпутного (9) и однопутного (14) участка, нетрудно прийти к выводу, что затухание в линиях электротяговой сети на однопутном участке будет больше, чем на двухпутном.

Первичные параметры линий зависят в большей степени от проводимости земли и частоты.

Первичные параметры электротяговых линий однопутного участка с одним контактным проводом сечением 100 мм² и медным несущим тросом сечением 120 мм² имеют следующие примерные значения:

	При 50 кГц	При 150 кГц
Полное сопротивление воздушных проводов Z_{11} , Ом/км	28 + j540	64,2 + j1590
Полное сопротивление рельсов Z_{33} , Ом/км	47,8 + j230	133,2 + j620
Полное сопротивление взаимной индукции Z_{13} , Ом/км	35,2 + j7	87 + j160
Проводимость между воздушным проводом и землей Y_{11} , 1/Ом·км	$45,5 \cdot 10^{-4}$	$13,7 \cdot 10^{-4}$
Проводимость между рельсами и землей Y_{33} , 1/Ом·км	1,0	1,0

Проводимость земли σ принята равной $3 \cdot 10^{-13}$ СГСМ.

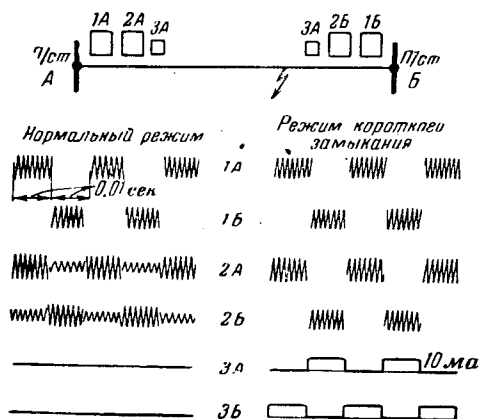
При этих значениях первичных параметров километрическое затухание первой (основной) волны β_1 на однопутном участке на основании выражения (14) будет равно: при частоте 50 кГц 0,014 неп/км; при частоте 150 кГц 0,049 неп/км. Волновое сопротивление линии электротяговой сети при тех же условиях равно 335,0 Ом.

Эти расчетные данные показывают, что с точки зрения затухания возможно использование электротяговых линий, имеющих, как известно, длину 20...25 км, в качестве высокочастотных каналов. Весьма ограниченные по объему экспериментальные исследования, проведенные на Сталинской дороге, подтвердили в первом приближении такую возможность.

Были проверены разработанная система вы-

сокочастотной защиты тяговых линий и система высокочастотной телефонной связи с электроподвижным составом по проводам этих линий. В качестве аппаратуры высокочастотной защиты использованы приемопередатчики типа ПВЗ-К.

Установлено, что независимо от рабочего напряжения для контроля изоляции тяговой линии достаточно поочередной передачи высокочастотных сигналов постами ПВЗ-К, установленными на обоих концах защищаемой линии, т. е. на смежных подстанциях. Такая поочередная передача сигналов через полпериода промышленной частоты обеспечивается посредством ламп манипуляции указанных постов при включении сеток этих ламп на напряжение одной фазы частотой 50 гц, но с противофазным присоединением. Графически принцип высокочастотной защиты тяговых линий приведен на рисунке.



Принцип работы высокочастотной защиты линий электроподвижной сети.

1А и 1Б — передатчики подстанций А и Б; 2А и 2Б — приемники подстанций А и Б; 3А и 3Б — выходные реле подстанций А и Б.

Чувствительность защиты к коротким замыканиям в линии выражается в неприеме сигналов со смежной подстанции, вследствие чего срабатывает выходное реле защиты. Срабатывание защиты имеет место не только при коротких замыканиях, но и при нахождении на защищаемой линии электроподвижного состава, не оборудованного высокочастотными заградителями.

Опытный электровоз, с которым осуществля-

лась высокочастотная телефонная связь, был оборудован заградителем в виде резонансного контура с индуктивной катушкой 0,12 мгн и не вызывал срабатывания защиты. Для телефонной связи были установлены посты МВП-52 на электровозе и одной из подстанций. Ожидавшихся помех от пантографа не наблюдалось. Имели место помехи, вызванные гармониками выпрямленного тока, искрением щеток машин и др. Установлено, что уровень полезного сигнала значительно превышает уровень помех, благодаря чему было достигнуто высокое качество связи (громкость и разборчивость). На прием и передачу при телефонной связи оказывали большое влияние не оборудованные высокочастотными заградителями электровозы, находившиеся на данной линии.

Конструктивно оборудование электроподвижного состава такими заградителями не представляет технической трудности и не требует больших средств. В качестве конденсаторов связи были применены фильтровые конденсаторы типа КМФ-4 с изоляцией на 8 кв.

Во время экспериментов на смежной подстанции, находящейся на расстоянии 21 км, обеспечивался прием сигналов достаточного уровня как при частоте 50, так и 150 кгц. При обеих частотах затухание во всех элементах канала, включая километлическое, в заградителях и фильтрах присоединения перекрывалось приемопередатчиком ПВЗ-К, рассчитанным, как известно, на 2,6 неп. Это позволяет сделать вывод о приближении расчетного километлического затухания к фактическому.

Расчетное же значение волнового сопротивления электроподвижной сети близко к полученному экспериментально И. И. Рыковым и Д. В. Разевигом [Л. 1].

Несомненно, что для окончательного решения поставленной в данной статье проблемы необходимы более широкие и всесторонние исследования при различных метеорологических условиях.

Литература

1. И. И. Рыков и Д. В. Разевиг. Экспериментальное исследование волновых характеристик контактной сети. Сборник трудов ЦНИИ МПС № 42, 1951.

[6. 6. 1956]



Об основных закономерностях индукционного нагрева

Доктор техн. наук, проф. Г. И. БАБАТ

Всесоюзный заочный инженерно-строительный институт

Явление нагрева индуктированными — наведенными — токами занимает важное место в промышленной электротехнике с момента ее возникновения. В многочисленных конструкциях электрических машин и аппаратов приходится учитывать процессы нагрева, обусловленные циркуляцией индуктированных вихревых токов.

В начале нашего века начинает практически применяться нагрев при помощи токов высокой частоты для технологических целей. В металло-

обрабатывающей промышленности широкое распространение получил нагрев в магнитном быстропеременном поле — нагрев электромагнитной индукцией. Этот метод нагрева применяется в плавильных печах, для поверхностной закалки стали, для штамповки иковки. Применительно к требованиям нагрева металлов магнитной составляющей поля были разработаны методы инженерного расчета конструкций нагревательных катушек — индукторов [Л. 1]. Несколько позже во-

шел в промышленную практику нагрев диэлектрических материалов при помощи электрической индукции в быстропеременном электрическом (конденсаторном) поле. И в этой области были созданы свои методы расчета [Л. 2].

В настоящее время области применения нагрева токами высокой частоты все расширяются. В промышленности применяется нагрев таких материалов, как, например, стекло, которое в одних случаях (при высоких температурах) можно рассматривать как проводник, а в других (в холодном состоянии) как диэлектрик. Ведутся опыты по нагреву различных горных пород, обладающих самыми разнообразными электрофизическими характеристиками. В некоторых случаях применяется индукционный нагрев металлических объектов, например тонких проволок не в магнитных, а в электрических быстропеременных полях. Начинает применяться волновой нагрев, т. е. нагрев в электромагнитном поле при длине волны, меньшей размеров нагреваемого объекта.

Во многих случаях требуется выбрать тип и конструкцию высокочастотной системы так, чтобы обеспечить превращение наибольшей части электромагнитной энергии в полезное тепло в заданном объекте — получить наивысший к. п. д. нагрева. Вместе с тем проблемы нагрева в переменных электрических и магнитных полях тесно связаны с различными другими областями электротехники и радиотехники, где приходится решать обратную задачу — получать наинизший к. п. д. нагрева, т. е. добиваться превращения наименьшей части энергии электромагнитного поля в тепло, которое в данном случае будет считаться уже вредным теплом. В ряде случаев при конструировании высокочастотной аппаратуры: генераторов, трансформаторов, фильтров, экранирующих устройств и т. д. — необходимо так разместить изолирующие и проводниковые материалы, чтобы обеспечить их минимальное нагревание и наименьшие потери высокочастотной энергии.

При некоторых заданных условиях мощность, сообщаемая объекту переменным электромагнитным полем, растет при увеличении частоты, при других условиях уменьшается. Изменение удельного электрического сопротивления нагреваемого материала также различно влияет на поглощаемую этим материалом мощность.

Целесообразно сопоставить основные закономерности индукционного нагрева материалов с различными электрофизическими характеристиками в различных электромагнитных полях. Сопоставление упрощенных формул может помочь выбрать тип и конструкцию высокочастотных устройств, обеспечивающих либо наивысший, либо наинизший к. п. д. индукционного нагрева, выбрать наиболее эффективную для данного случая частоту тока и напряженность электрических и магнитных полей в различных частях конструкции.

В статье приняты следующие обозначения:

E — напряженность электрического поля;
 H — напряженность магнитного поля;

U — напряжение на зажимах нагревателя;

I — ток нагревателя;

l — линейный размер системы индукционного нагрева (расстояние между конденсаторными обкладками при нагреве в электрическом поле и диаметр витка индуктора при нагреве в магнитном поле);

P — мощность, выделяющаяся в нагреваемом объекте;

$\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний;

ρ — удельное электрическое сопротивление;

γ — удельная электрическая проводимость;

ϵ — диэлектрическая проницаемость;

μ — магнитная проницаемость.

Под глубиной проникновения электромагнитной волны в материал объекта понимается расстояние, на котором плоская электромагнитная волна, вошедшая в материал через плоскую поверхность раздела, уменьшит свою амплитуду до $1/e$ (e — основание натуральных логарифмов).

Материалы, у которых глубина проникновения волны больше ее длины, называются прозрачными. К таким материалам относятся диэлектрики, у которых $\gamma \ll \omega\epsilon$ и глубина проникновения электромагнитной волны равна:

$$z_d \approx \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{\epsilon}}{\gamma},$$

где c — скорость света.

Непрозрачными материалами называются такие материалы, у которых глубина проникновения волны меньше ее длины. Эти проводники характеризуются тем, что их ток проводимости значительно больше токов смещения и $\gamma \gg \omega\epsilon$. Глубина проникновения для проводников выражается следующей формулой:

$$z_{np} \approx 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

Однако объект, сделанный из проводящего — непрозрачного материала, может сам иметь размеры меньше, чем глубина проникновения электромагнитной волны. Пронизав объект, волна еще не затухнет. Поэтому объект таких малых размеров сам будет прозрачным, хотя он и сделан из непрозрачного материала.

В табл. 1 приведены основные закономерности для волнового нагрева, т. е. случая, когда длина электромагнитной волны в воздухе много меньше размеров нагреваемой зоны. Эти формулы даны в предположении, что радиус кривизны нагреваемой поверхности много больше длины электромагнитной волны, т. е. рассматривается плоская волна. Расстояние между излучающей поверхностью и поверхностью нагрева, если оно больше длины волны, не будет влиять на процессы у нагреваемой поверхности.

Заметим, что хорошо проводящие вещества отражают электромагнитные волны, а диэлектрики при достаточно больших размерах объекта поглощают их.

Таблица 1

Мощность отраженной ($P_{отр}$) и прошедшей ($P_{прош}$) волны в зависимости от мощности падающей волны $P_{пад}$ при индукционном нагреве, $\lambda_0 \ll l$

Проводники	Диэлектрики
$P_{отр} = (1 - 4,2 \cdot 10^5 \sqrt{\mu f \rho}) P_{пад}$	$P_{отр} = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \right)^2 P_{пад}$
$P_{прош} = 4,2 \cdot 10^5 \sqrt{\mu f \rho} \cdot P_{пад}$	$P_{прош} = \frac{4 \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2}}{(\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})^2} P_{пад}$

В табл. 2 указаны формулы для мощности, выделяющейся в объекте при различных типах нагрева, соответствующих случаям, когда максимальные размеры зоны нагрева много меньше длины электромагнитной волны. Значения удельной поверхностной мощности и удельной объемной мощности могут быть получены путем деления приведенных в табл. 2 значений соответственно на l^2 и l^3 .

Таблица 2

Мощность, выделяющаяся в объекте при индукционном нагреве, $\lambda_0 > l$

Нагрев в электрическом поле	Нагрев в магнитном поле
$E \equiv \frac{U}{l} \equiv \frac{I}{f l^2}$	$H \equiv \frac{I}{l} \equiv \frac{U}{f l^2}$
Проводники, $z \ll l \ll \lambda_0$	
$P \equiv E^2 l f^2 \sqrt{f \rho} \equiv U^2 l^3 f^2 \sqrt{f \rho} \equiv I^2 \sqrt{f \rho}$	$P \equiv H^2 l^3 \sqrt{f \rho} \equiv I^2 \sqrt{f \rho} \equiv \frac{U^2}{l^2} \sqrt{\frac{\rho}{f}}$
Проводники, $z \gg l$	
$P \equiv E^2 l^3 f^2 \rho \equiv U^2 l f^2 \rho \equiv \frac{I^2 \rho}{l}$	$P \equiv \frac{H^2 l^5 f^2}{\rho} \equiv \frac{I^2 l^3 f^2}{\rho} \equiv \frac{U^2 l}{\rho}$
Диэлектрики, $l < \lambda_0 < z_0 \sqrt{\epsilon}$	
$P \equiv E^2 \gamma l^3 \equiv U^2 \gamma l \equiv \frac{I^2 \gamma}{f^2 l}$	$P \equiv H^2 l^5 f^2 \gamma \equiv I^2 l^3 f^2 \gamma \equiv U^2 l \gamma$

При нагреве как в электрическом, так и в магнитном поле мощность, сообщаемая объекту, зависит от частоты и напряженности поля, электрофизических характеристик материала и от геометрической формы и ориентации объекта относительно силовых линий поля нагреваемой зоны. Необходимо подчеркнуть, что зависимость выделяющейся в объекте мощности от величин ϵ и μ , различна при разной форме и ориентации нагреваемого объекта. Но если эти величины близки к единице, то геометрическая форма не влияет на структуру формул для вычисления мощности. Именно этому случаю соответствует табл. 2.

В большинстве случаев нагрева в магнитном поле можно считать, что индуктивное сопротивление системы индуктор — нагреваемый объект значительно больше активного сопротивления, т. е. $\cos \varphi \ll 1$. Точно так же и при нагреве в электрическом поле можно считать, что емкостная составляющая тока значительно больше активной составляющей.

При нагреве металлов как в электрическом, так и в магнитном поле можно различить два случая:

1. Глубина проникновения волны меньше, чем размер зоны нагрева ($z \ll l$), и токи проводимости в объекте сосредоточиваются в тонком поверхностном слое. Это случай «высокочастотного нагрева», когда при любой геометрической форме объекта величина μ не влияет на структуру формул. При $\mu \neq 1$ вместо ρ должно быть подставлено $\rho \mu$.

2. Глубина проникновения больше максимальных размеров зоны нагрева. Зона нагрева прозрачна для переменного электрического или магнитного поля. Вихревые токи в объекте мало изменяют начальное распределение магнитного поля индуктора. Это случай «низкочастотного нагрева».

При нагреве диэлектриков как в магнитном, так и в электрическом поле размеры зоны нагрева всегда много меньше глубины проникновения волны. В диэлектриках можно говорить о поверхностном эффекте лишь при волновом нагревании. Если же размеры нагреваемой зоны диэлектрика меньше длины электромагнитной волны в этом диэлектрике, то и размеры зоны нагрева заведомо меньше глубины проникновения. Зона нагрева является прозрачной и для магнитного и для электрического поля.

Когда нагреваемое тело вытянуто в направлении линий электрического или магнитного поля, повышение ϵ вызывает концентрацию электрического поля в зоне нагрева, а повышение μ — концентрацию магнитного поля. В этом случае величины ϵ и μ могут входить в формулы мощности в первой или во второй степени. Когда же размеры зоны нагрева в направлении силовых линий значительно меньше, чем размеры в перпендикулярных направлениях, то увеличение ϵ и μ может вызвать снижение напряженности электромагнитного поля в зоне нагрева. Для учета этих величин в формулы мощности, выделяющейся в объекте, должен быть введен поправочный множитель, в который ϵ и μ могут входить в виде сложной комбинации.

Литература

1. Г. И. Бабат. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Госэнергоиздат, 1946.
2. А. Н. Мазин, А. В. Нетушил и Е. П. Парин. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, 1950.

[17. 8. 1956]



Номограмма для определения зон защиты стержневых молниеотводов

Инж. Л. М. ЛОПШИЦ

Теплоэлектропроект

Действующие в настоящее время Руководящие указания по защите от перенапряжений [Л. 1] в части определения зон защиты от прямых ударов молнии базируются на лабораторных исследованиях, выполненных в свое время во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина [Л. 2], и отличаются от прежних Руководящих указаний [Л. 3] тем, что в них вновь введено различие в расчетных формулах для стержневых молниеотводов высотой до и более 30 м. В связи с этим выполненная ранее номограмма для расчета зон защиты молниеотводов высотой до 60 м [Л. 4] устарела и в настоящее время может применяться лишь для молниеотводов высотой до 30 м.

На рис. 1 и 2 по материалам [Л. 2] построены кривые, характеризующие собой зоны защиты соответственно одиночных и двойных стержневых молниеотводов. Геометрический смысл параметров защищаемой зоны a , h , h_a , h_x , b_x и r_x ясен из рис. 4; через H обозначена высота ориентировки канала молнии на молниеотвод в равнинных местностях.

Для молниеотводов высотой $h \geq 30$ м принято, что $H = 600$ м, а при $h < 30$ м принято постоянное значение $\frac{H}{h} = \frac{600}{30} = 20$. Необходимо отметить, что Руководящие указания не дают предельных высот молниеотводов, для которых действительные приведенные в них рекомендации, ограничиваясь указанием, что $H = 600$ м можно принимать для „очень высоких молниеотводов“.

Кривые, приведенные на рис. 1 и 2, могут применяться в тех случаях, когда высота молниеотводов не превышает 150 м ($\frac{H}{h} = 4$), что соответствует наибольшей высоте дымовых труб, сооружаемых на электростанциях.

При принятых значениях высоты ориентировки канала молнии для зависимостей, изображенных на рис. 1 и 2, могут быть предложены соответственно следующие эмпирические формулы:

$$\frac{r_x}{h_a} = \frac{1.6}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p_1(h); \quad (1)$$

$$\frac{a}{h_a} = 7 \sqrt[1.3]{1 - \left(\frac{b_x}{r_x}\right)^{1.4}} \cdot p_2(h), \quad (2)$$

где $p_1(h)$ и $p_2(h)$ — коэффициенты, зависящие от высоты молниеотвода (рис. 3).

Отметим здесь, что в Руководящих указаниях¹ для облегчения расчетов принято

$$p_1(h) = p_2(h) = p(h),$$

¹ На рис. 4 и 5 Руководящих указаний допущены ошибки. Вместо $h_x = 0,7h$ и $h_x = 0,9h$ должно быть соответственно $h_x \approx 0,6h$ и $h_x \approx 0,7h$.

где $p(h) = \sqrt{\frac{30}{h}}$ (при $h \geq 30$ м).

Зависимость $p(h)$ показана на рис. 3 пунктиром. Исключая r_x из уравнений (1) и (2) получим расчетную формулу для двойного молниеотвода:

$$\left(\frac{b_x}{1.6h_a \cdot p_1(h)}\right)^{1.4} \cdot \left(1 + \frac{h_x}{h}\right)^{1.4} + \left(\frac{a}{7h_a \cdot p_2(h)}\right)^{1.3} - 1 = 0,$$

которая при $a = 0$ действительна и для одиночного молниеотвода.

Расчет высоты молниеотводов по этой формуле громоздок и требует значительной затраты времени. Предлагаемая номограмма (рис. 4)

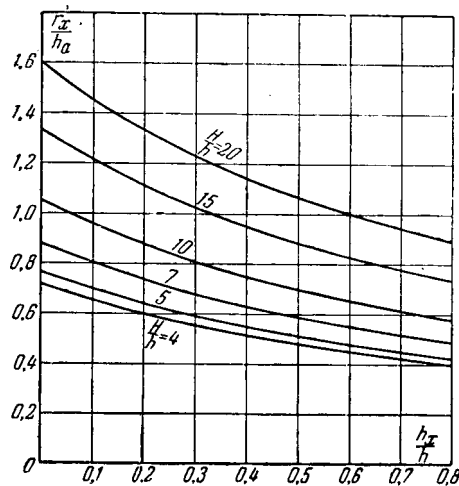


Рис. 1.

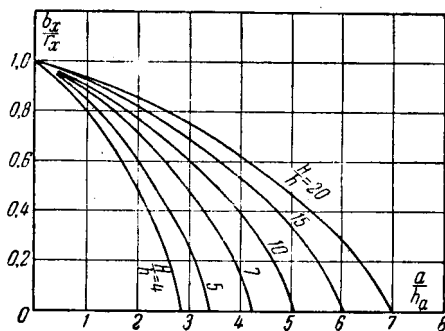


Рис. 2.

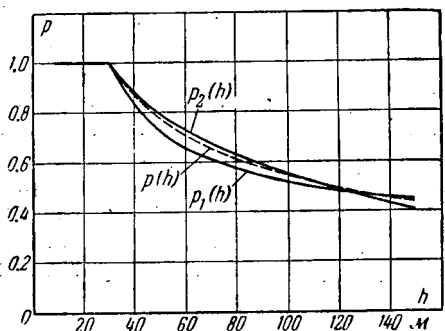


Рис. 3.

позволяет существенно облегчить такие расчеты. Следующие примеры поясняют способ пользования номограммой и иллюстрируют ее возможности.

Пример 1. Объект, имеющий форму параллелепипеда с основанием $48 \times 48 \text{ м}^2$ ($b_x = 24 \text{ м}$) и высотой $h_x = 15 \text{ м}$, расположен между двумя стержневыми молниеотводами высотой по 49 м так, что ось установки молниеотводов совпадает с осью симметрии объекта. Проверить, защищен ли объект, если расстояние между молниеотводами равно 60 м .

Совместим острие измерительного циркуля с точкой оси абсцисс (шкалы центров) $a = 60 \text{ м}$. Другим острием

циркуля коснемся точки $b_x = 24 \text{ м}$. Не меняя полученного раствора циркуля и не сдвигая первого его острия, перенесем второе острие на кривую $h_x = 15 \text{ м}$.

Через эту точку номограммы проходит кривая $h_a = 32 \text{ м}$, т. е. необходимая высота молниеотвода равна $h = h_x + h_a = 15 + 32 = 47 \text{ м}$. Следовательно, в данном случае, т. е. при $h = 49 \text{ м}$, объект расположен в зоне защиты молниеотвода.

Проверку можно было бы произвести и иначе. Радиусом, равным расстоянию от точки $a = 60 \text{ м}$ до точки пересечения кривых $h_x = 15 \text{ м}$ и $h_a = 49 - 15 = 34 \text{ м}$, делаем засечку на оси ординат и находим, что данные молниеотводы могут защищать объект, для которого $b_x = 25 \text{ м}$.

Пример 2. Определить необходимую активную высоту одиночного стержневого молниеотвода, расположенного в центре сооружения цилиндрической формы, диаметром 40 м и высотой 6 м .

Радиусом, равным раствору циркуля от начала координат ($a = 0$) до точки $r_x = b_x = 20 \text{ м}$, делаем засечку на кривой $h_x = 6 \text{ м}$. Проходящая через эту точку кривая дает искомое значение $h_a = 16 \text{ м}$.

Пример 3. Найти на уровне $h_x = 26 \text{ м}$ радиус защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой 120 м , установленного на дымовой трубе электростанции.

Радиусом, равным раствору циркуля от начала координат до точки $h_x = 26 \text{ м}$ на кривой $h = 120 \text{ м}$, делаем засечку на оси ординат. Искомое значение радиуса защиты оказывается равным $b_x = r_x = 59,5 \text{ м}$.

Номограмма построена в предположении, что расстояние a между молниеотводами является заданным, что обычно и имеет место в практике расчетов. В тех исключительных случаях, когда это расстояние подлежит определению, его можно легко найти простейшим геометрическим построением.

В середине отрезка, соединяющего точки, соответствующие заданным значениям b_x (ось ординат) и h_a и h_x (пересечение соответствующих кривых), восстанавливается перпендикуляр. Точка его пересечения со шкалой центров и дает искомое расстояние между молниеотводами.

В заключение следует отметить, что Руководящие указания лишь в незначительной степе-

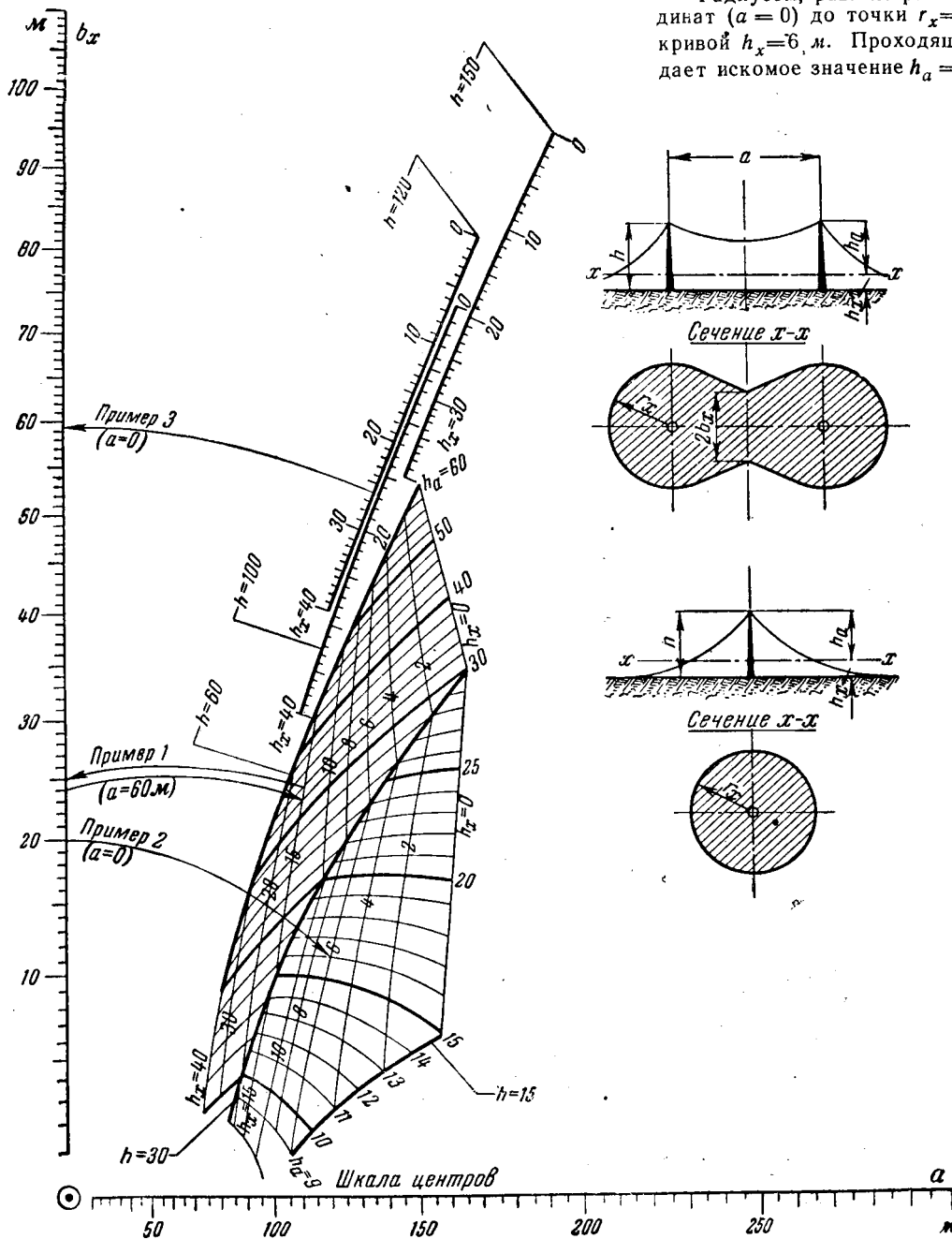


Рис. 4. Номограмма для определения зон защиты стержневых молниеотводов.

Памяти Владимира Константиновича Лебединского (1868 — 1937)

Сотое общее собрание Российского общества радиоинженеров (РОРИ), состоявшееся в декабре 1921 г. в Москве, было отмечено как знаменательный юбилей; он торжественно праздновался научно-технической общественностью столицы. В зале заседаний Всероссийской ассоциации инженеров (теперь конференц-зал Отделения технических наук АН СССР) собралось свыше 100 чел. В отчете о торжестве записано: «По постановлению собрания посланы приветственные телеграммы старейшим учителям по радиотехнике — проф. А. А. Петровскому и проф. В. К. Лебединскому»¹. А. А. Петровский был тогда профессором Военно-морской академии и Ленинградского электротехнического института, а В. К. Лебединский возглавлял Ученый совет Нижегородской радиолаборатории.

Содержание приведенной записи характеризует положение названных ученых в отечественной науке. Если не считать А. С. Попова, то именно они являются пионерами в деле подготовки кадров русских радиотехников. Лебединский читал в Военно-электротехнической школе и в Петербургском политехническом институте курс о новом средстве связи, вернее о научных его основах, а Петровский преподавал ту же дисциплину в Минном офицерском классе в Кронштадте, а затем в Военно-морской академии. Ими были составлены первые руководства, по которым учились не только их слушатели, но и лица, проходившие курс в других учебных заведениях.

¹ Юбилейное собрание Российского общества радиоинженеров. Журнал «Техника связи», № 3, 1922, стр. 116 и 1923, вып. I — II, стр. 41 — 44.



В историю отечественной науки В. К. Лебединский вошел, однако, не только как один из первых преподавателей радиотехники. Его деятельность, длившаяся свыше 40 лет, была тесно связана с историей всей электротехники. Но и ею не ограничивался круг его интересов. Питомец физико-математического факультета Петербургского университета, Лебединский в течение всей жизни преподавал физику, возглавляя кафедру в ряде высших учебных заведений, в том числе и в Военно-медицинской академии (ныне им. Кирова), где эта дисциплина возникла еще во времена В. В. Петрова.

Как и многие ученые-электрики нашей страны, В. К. Лебединский проявил себя на поприще электротехники многолетним активным участием в работе журнала «Электричество», немало сделавшего для развития в России научно-прикладных знаний.

Историки-электротехники, говоря о соответственных этапах развития журнала «Электричество», постоянно называют связанные с историей журнала имена В. Н. Чиколева, А. Н. Лодыгина, Д. А. Лачинова, П. Н. Яблочкова, О. Д. Хвольсона, В. К. Лебединского, В. Ф. Миткевича, М. А. Шателена, С. И. Вавилова, Г. М. Кржижановского. Труд Владимира Константиновича Лебединского в этой области вызывает восхищение. На нем лежала не только редакторская работа, — на протяжении многих лет редкий номер журнала выходил без его участия как автора статьи, рецензии или обзора. Последние всегда являлись плодом очень трудоемкой деятельности их автора, который тщательно следил за всеми событиями, происходившими в науке об электри-

ни учитывают критические замечания относительно упрощения очертания зон защиты [Л. 5]. В следующей редакции Руководящих указаний было бы желательно заменить криволинейную образующую «конуса» зоны защиты близкой к ней ломаной линией, что позволит существенно облегчить графические построения.

Литература

1. Руководящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3—220 кв. Госэнергоиздат, 1954.

2. А. А. Акопян. Труды ВЭИ, вып. 36, Госэнергоиздат, 1940.

3. Руководящие указания по защите от перенапряжений установок переменного тока напряжением 3—220 кв. Госэнергоиздат, 1946.

4. Л. М. Лопшиц. Номограмма для определения зон защиты молниеотводов высотой до 60 м. Электричество, № 10, 1947.

5. И. С. Стекольников и др. Грозозащита промышленных сооружений и зданий. Изд. Академии наук СССР, 1951.

[24.4. 1956]

честве и магнетизме и в практической области применения этих явлений. Ежегодные обзоры В. К. Лебединского в журнале «Электричество» заслужили славу «летописи электротехники». Подробного жизнеописания В. К. Лебединского еще нет, если не считать небольших статей и заметок, появлявшихся разновременно в печати после его смерти². Биограф, который восполнит этот пробел, должен будет подробно осветить деятельность В. К. Лебединского в работе журнала «Электричество».

В формировании Лебединского как ученого-мыслителя большое значение имел Петербургский университет. Хорошо известна роль Физико-математического факультета этого университета как центра пропаганды прогрессивных физических воззрений Фарадея и Максвелла. Под их влиянием начинающие ученые конца XIX в. вырабатывали передовую систему естественно научных взглядов и успешно шли по пути практического приложения достижений учения об электричестве.

Вспоминая этот период, В. К. Лебединский писал: «Университетские учителя научили думать, приоткрыли книгу науки; их ученикам захотелось понять ее лучше учителей. В то же время жизнь заговорила о приложениях электричества, захотелось участвовать в этом движении. Самоусовершенствование или лучше сказать начало действительного понимания, радость овладения предметом появилась в кружковой работе»³. Коллективные формы деятельности пионеров русской электротехники конца XIX в., объединяемых VI (электротехническим) отделом Русского технического общества, органом которого являлся журнал «Электричество», высоко ценились В. К. Лебединским.

Вместе с научным ростом молодых физиков и электротехников выяснялось и их общественное лицо. В. К. Лебединский упоминается в мемуарной литературе как человек передовых социальных взглядов своего времени.

Можно привести немало фактов из жизни В. К. Лебединского, когда он проявлял гражданское мужество, не страшась последствий. Ограничимся одним ярким примером. Это было в 1901 г., когда насчитывавший всего несколько лет существования Электротехнический институт (ныне имени Ульянова-Ленина) становился центром научной электротехнической мысли. Кроме М. А. Шателена, здесь преподавали В. Ф. Миткевич и В. К. Лебединский (он вел курс переменных токов). Поднимавшаяся в то время все выше революционная волна захватывала широкие слои студенчества, и по отношению к ним самодержав-

нием предпринимались жестокие меры; дело вскоре дошло до уличных избиений. Два профессора Электротехнического института М. А. Шателен и В. В. Скобелцын отважно подняли голос против распоясавшейся реакции; тотчас же последовали результаты: эти профессора — любимые учителя студентов, ученые, почитаемые преподавательской коллегией, — были изгнаны по требованию властей из Института. В знак протеста его покинула, не задумываясь, группа преподавателей, в их числе В. К. Лебединский.

Почти полувековая деятельность В. К. Лебединского освещена его ближайшими друзьями М. А. Шателеном, В. Ф. Миткевичем и Б. А. Остроумовым, прошедшими вместе с ним значительную часть его жизненного пути. Они же дали надолго запоминающуюся характеристику всего того, что было сделано Лебединским, ученым-исследователем, учителем и наставником ряда поколений электриков, неутомимым популяризатором научных знаний, выдающимся общественным деятелем.

В памяти современников Владимира Константиновича Лебединского сохранялись воспоминания о его замечательном докладе на VIII Всероссийском электротехническом съезде в 1921 г., который был созван по подписанному В. И. Лениным постановлению Совета Народных Комиссаров «в целях всестороннего обсуждения технико-экономических вопросов, связанных с осуществлением плана электрификации России, а также привлечения широких масс к активному участию в деле электрификации народного хозяйства»⁴. В съезде приняли участие около полутора тысяч человек — до тысячи делегатов и пятисот гостей — из ста двух городов. Характеризуя черты развития научных и прикладных знаний, В. К. Лебединский на конкретных примерах показал, какой отпечаток наложили социальные условия на эту область культуры. «Новейшие достижения науки преобразуют современную технику. Наука второй половины XIX в., — говорил в своем выступлении Лебединский, — открыла все главнейшие электрические явления. Эксперимент конца XIX в. был развит в высшей степени. Это вносило известный отпечаток в науку второй половины XIX в., которая сильно отличалась от науки прежних веков. В ней была особенная сторона, которую можно назвать «деловитостью». Прежняя наука исходила чаще из общих положений, из общего мировоззрения. Наука XIX в. этого отнюдь не дала. В настоящий момент наука собирает себя. Все отдельные вопросы, которые она решила, не соотнобщаясь с общим мировоззрением, она теперь собирает в нечто целое; отсюда-то и получился принцип относительности, отсюда и получилась теория квант».

² М. А. Шателен, В. Ф. Миткевич, «Памяти В. К. Лебединского», *Электричество*, № 5, 1938; Б. Остроумов, «Памяти В. К. Лебединского». Успехи физических наук, 1938, т. XIX, вып. IV; «Владимир Константинович Лебединский», *Известия электропромышленности* слабого тока, № 10, 1937; Б. А. Остроумов, «Владимир Константинович Лебединский (биографический очерк)» в книге В. К. Лебединского «Беседы об электричестве», М. — Л., Изд. АН СССР, 1940.

³ *Электричество*, № 4, 1925, стр. 208.

⁴ Труды VIII Всероссийского электротехнического съезда в Москве 1 — 10 октября 1921 г. Вып. 1. Электрификация России. Организация съезда. Открытие съезда. Доклад Государственной комиссии по электрификации России. Обсуждение плана электрификации. Доклады на пленарных заседаниях съезда. Резолюции. Издание Государственной общеплановой комиссии.

В заключительном слове Г. М. Кржижановский отметил «живую душу» доклада В. К. Лебединского, «нашего известного ученого». «Как физик-мыслитель Лебединский, — подчеркнул председатель съезда Г. М. Кржижановский, — вплотную подвел нас к грандиозным процессам, совершаемым во всей вселенной, проследивая судьбы энергии и в окружающей нас природе и в самих нас. Он намекнул нам, что эксплуатируемые нами машины — это далеко не то, что является венцом наших достижений. Центр тяжести, оказывается, лежит в самих формах человеческого труда, в самих отношениях человека к человеку. Горизонты научные шире тех возможностей, которые в настоящее время воплощаются в жизнь»⁵.

При жизни Владимир Константинович был много раз удостоен почетного признания, но как исключительно скромный ученый он оценивал свои заслуги гораздо ниже. Будучи избранным председателем Российской ассоциации физиков (1922 г.), он отказался от этого поста, убежденный, что его должен занять ученый, имеющий больший вес в науке. В 1928 г., когда при выборах новых членов Академии наук, в академики выдвигались ученые, тесно связавшие свою творческую научную работу с запросами развития Советской страны, инженерно-техническая секция знаменитой Нижегородской радиолaborатории единодушно выдвинула кандидатуру в действительные члены АН СССР В. К. Лебединского, жившего тогда уже в Ленинграде. Но Владимир Константинович отказался от баллотировки. По этому поводу председатель секции, ныне член-корр. АН СССР А. А. Пистолькорс писал Лебединскому:

«Многоуважаемый Владимир Константинович, телеграмму мы получили утром 13 июня (1928 г. — М. Р.) и потому были уже лишены возможности удовлетворить Ваше пожелание о снятии кандидатуры в академики, так как ввиду приближения срока все представления ИТС были отправлены накануне вечером перед отходом поезда. Сожалея об этом, ИТС ни в коем случае не может согласиться с Вашими мотивами, считая, что именно Ваше участие в Академии придаст ее работе в области физики характер, требуемый современным моментом, и просим Вас не снимать кандидатуры» (разрядка наша. — М. Р.)⁶.

Ставя многих своих товарищей (и учеников) выше себя как ученых-исследователей, Владимир Константинович не мог отрицать своих заслуг как ученого-организатора. Вот что гласит запись в его дневнике, датированная 19 сентября 1930 г.: «Я начал сороковой год деятельности; эта осень с первых дней оказалась интересной и удачной. За все прошлое время я не сделал ничего значительного, но всегда ставил себе в заслугу свою инициативу; я начинал многие дела, которые в последующем оказались жизненными; начал студен-

ческую практику по физической оптике в Университете, курс переменных токов в Электротехническом институте, редактировал Физический отдел ЖРФХ О-ва (журнала Русского физико-химического Общества) и «Вопросы физики», после которых пошли разные «новые идеи» в физике, философии и математике и т. д. ...Я сыграл начальную роль в установлении нашего радиолюбительства и пустил в ход на беседах НРЛ (Нижегородской радиолaborатории. — М. Р.) первый разговор о коротких волнах. В 1924—1925 гг. я начал и достиг организации празднования юбилея Попова А. С. Эта инициатива печатно и определенно признана в статье в юбилейном номере журнала «Электричество» (1925, № 4). Я устроил в 1922 г., в тяжелое время, III съезд физиков в Н.-Новгороде ... Съезд совпал с моментом выбора председателя Российской ассоциации физиков и из двух кандидатов, А. Ф. Иоффе и меня, выбрали меня. Но я отказался: я понимал, что это вознесение мое было необоснованным...».

Записи в дневнике В. К. Лебединского освещают путь ученого и его приобщение к новым научным и техническим проблемам. «Для меня теперь единственное общение с окружающими только (почти только) через курсовые лекции; выступление перед теми же студентами, но не в лекционный час, а в пленуме их научного общества — уже ново, занятию ... Осталась на руках одна записочка: «Так красиво описанный Вами ход развития научной мысли об атоме есть ведь, в сущности, диалектический ход. Ведь этим путем идет не только научная мысль, но любое явление в физическом мире. Строение атома являет нам прекрасное доказательство основного закона диалектики — перехода количества в качество». Я действительно затронул диалектический метод».

Большой интерес представляет эпистолярное наследие В. К. Лебединского. Занимая в течение десятилетий видное положение в науке, он переписывался со многими деятелями нашей страны. Его корреспондентами были А. М. Горький, П. Н. Лебедев, Н. А. Морозов, М. А. Шателен, А. И. Садовский, Д. С. Рождественский, О. А. Глаголева-Аркадьева, М. А. Бонч-Бруевич и многие другие. Эта переписка не только отражает многосторонние научные и общественные интересы В. К. Лебединского, но также является ценным материалом для историков науки, в первую очередь — для историков физики и тех ее ответвлений, которым он посвятил свою жизнь.

Рукописное наследие В. К. Лебединского проливает свет на малоизвестную область его научных интересов. Все общавшиеся с ним знают, насколько глубоко он изучал классиков науки. От своих университетских учителей, в особенности от И. И. Боргмана, он унаследовал и сохранил на всю жизнь любовь к творениям Фарадея, Максвелла и Герца. Читавшиеся В. К. Лебединским курсы были насыщены обширным историческим материалом, освещавшим не только ослепительные взлеты научной мысли, но и заблуждения и отклонения от верного пути.

К концу жизни Владимир Константинович

⁵ Труды VIII электротехнического съезда, стр. 157.

⁶ Из личного архива В. К. Лебединского. Записи и другие материалы были представлены Ю. И. Лебединской, которой автор приносит свою глубокую благодарность.

задумал собрать воедино все то, что преподавал своим студентам по истории учения об электричестве. Сохранилась его тетрадь, содержащая программу намеченного курса. Она составлена не по хронологическому, а по систематическому принципу. Кроме введения, трактующего об эволюции взглядов на природу электрических явлений до начала XVIII в., курс состоит из шести разделов: Проводники, Машины и измерительные приборы, Два электричества, Закон Кулона, Приложения электричества, Мысли о значении электричества. Из одной заметки на полях рукописи видно, что программа составлена в 1934 г. (говоря об опытах С. Грея, относящихся к 1709 г., он замечает: «всего 205 лет»).

В то же время В. К. Лебединский был также занят другой своей работой, которую он считал одной из важнейших в своей жизни. Это были его известные «Беседы об электричестве». Популяризацией знаний Владимир Константинович занимался с первых шагов самостоятельной деятельности. «Эта книга, — писал В. К. Лебединский, — предназначается для наших юношей, девушек и всех, заинтересовавшихся наукою об электричестве и великими жизненными приложениями электромагнитного поля. В живом уме первоначальные сведения приводят к вопросам, сомнениям, влекут к более подробному знанию. Поддержать, полнее развить эту здоровую инициативу, направить к ответам на тревожащие вопросы или, по крайней мере, указать, как, в чем, где искать эти ответы — таковая цель моей книги. Я старался достичь этой цели, дав из различных областей учения об электричестве примеры возникновения вопросов и их решения, примеры не-

увязок нашего знания, узлов, в которые оно запутывается иногда так, что, казалось бы, не найти концов, — и примеры их распутывания».

Как и все популярные произведения В. К. Лебединского, «Беседы» отличаются живым и выразительным языком, делающим их доступными и для неподготовленного читателя. Вместе с тем содержание этой книги привлекает к себе внимание и людей, которые сами преподают курс электричества и его применений. Автор не без основания писал в заключении предисловия: «И для тех, кому приходится руководить занятиями нашей молодежи в области электричества, эта книжечка, я думаю, может оказаться полезной»⁷.

Эти строки были написаны Владимиром Константиновичем 20 июня 1937 г., менее чем за месяц до кончины автора, наступившей 12 июля.

Прошло 20 лет с этого дня. Время не изгладило в памяти образа ученого, хотя он сам и считал себя «рядовым» в науке. За эти годы появилась значительная литература по истории физики, электротехники, радио. Изданы и мемуары выдающихся деятелей в этих областях. И во всех этих печатных трудах имя Владимира Константиновича Лебединского по праву занимает то место, которое он заслужил своей полезной научной и общественной деятельностью, своими редкими личными качествами, памятными всем, кто близко с ним общался.

⁷ Проф. В. К. Лебединский. Беседы об электричестве. Изд. АН СССР, 1940, стр. 18.

М. И. РАДОВСКИЙ

Ленинград



Дискуссии

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(Электричество, № 2, 5, 6, 1957)

Кандидат техн. наук П. К. Денисов

Институт комплексных проблем железнодорожного транспорта Академии наук СССР

При оценке технико-экономической эффективности систем электрической тяги прежде всего необходимо установить, как при каждой из рассматриваемых систем реализуются основные требования повышения производительности железнодорожного транспорта, которыми определяется эффект его эксплуатации: повышение веса составов грузовых поездов и повышение скорости доставки грузов и пассажиров.

Первое из указанных требований определяет собой необходимое увеличение силы тяги локомотива, а второе — скорость движения. Но так как сила тяги и скорость движения электровоза, ведущего поезд, в каждый момент времени определяют мощность, развиваемую этим электровозом, то, очевидно, что осуществление указанных технико-экономических требований выражается одним объединяющим мероприятием — повышением мощности электровоза. По условиям выполнения перевозок мощность электровоза должна соответствовать и размерам грузооборота и

пассажирского движения. Остается непреложным одно: с увеличением на железной дороге размеров перевозок требуется и увеличенная мощность локомотива в составе поезда.

Одним из важных преимуществ системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты, определяющим перспективность этой системы, является свойственное только этой системе, весьма ограниченное увеличение стоимости стационарных устройств тягового электрооборудования (тяговых подстанций и контактной сети) при значительном росте грузооборота и размеров движения, т. е. при увеличении веса составов поездов и их скорости, а следовательно, при увеличении мощности электровоза. Это объясняется тем обстоятельством, что при системе переменного тока в отличие от существующей системы постоянного тока 3 000 в контактная сеть не требует усиления проводов, а увеличение мощности тяговых подстанций лишь незначительно увеличивает стоимость их, так как это осуществляется заменой одного трансформатора другим, более мощным.

Расчеты показывают, что при одинаковых условиях профиля и грузооборота размер капиталовложений в уст-

ройства электроснабжения при электрификации на переменном токе лишь незначительно увеличивается при увеличении мощности применяемых электровозов. При электрификации же на постоянном токе 3 000 в эта величина капиталовложений интенсивно нарастает при том же увеличении мощности электровоза.

В приведенной ниже таблице показана экономия капиталовложений в энергоустройства при переменном токе (в процентах по отношению к капиталовложениям при постоянном токе) на двухпутной линии с руководящим уклоном 9‰ для двух вариантов грузооборота.

Мощность электровоза, кВт	Экономия капиталовложений в энергоустройства при переменном токе, %	
	годовой грузооборот 20 млн. т	годовой грузооборот 40 млн. т
$6 \times 400 = 2\,400$	31,6	41,2
$8 \times 575 = 4\,600$	41,5	46,2
$9 \times 575 = 5\,175$	43,2	50,9

Таким образом, если принимать стоимость электровозного парка в системе переменного тока равной стоимости парка электровозов в системе постоянного тока, то трудно установить, что оптимальные скорости движения поездов при переменном токе будут больше, чем при постоянном токе при прочих равных условиях.

Изложенные соображения по методике технико-экономического сравнения систем электрической тяги обойдены в расчетах, приведенных К. Г. Марквардтом в № 2 журнала. Суммарные капитальные затраты, как и эксплуатационные расходы, указанные им на графиках в функции грузооборота, изображают систему переменного тока в весьма черных тонах. В графиках капиталовложений, да и в тексте статьи, нет и намека на то обстоятельство, что мощность электровоза, в конечном счете, определяет эффективность и системы электрической тяги и всего транспортного процесса в целом. На графиках в статье К. Г. Марквардта никакого расхождения кривых зависимости капиталовложений от грузооборота при постоянном и переменном токе нет и в этом одна из главных и принципиальных ошибок его методики; динамика процесса изменения капиталовложений в энергоустройства у него одинакова при постоянном и переменном токе.

Что касается оценки устройств связи при переменном токе, то в своих расчетах К. Г. Марквардт преувеличи-

вает эти затраты, в частности вследствие того, что не учитывает, что кабелирование линий проводной связи может быть осуществлено более дешевым кабелем с алюминиевой оболочкой. Кроме того, применение радиорелейных линий связи также позволит снизить капиталовложения в устройства связи.

То же касается и стоимости работ, связанных с переустройством автоблокировки при переменном токе. Нельзя, ведь, проходить мимо такого обстоятельства, что при переходе с паровой тяги на электрическую все равно приходится производить переустройство цепей СЦБ. Поэтому разница в стоимости переустройств при постоянном и переменном токе в действительности весьма невелика. В то же время такие затраты, как, например, затраты на защиту подземных сооружений от электрокоррозии при постоянном токе или на увеличение строительства зданий для эксплуатационного персонала тяговых подстанций при постоянном токе и некоторые другие в расчетах К. Г. Марквардта отсутствуют.

Указанная на упомянутых графиках капиталовложений разница при электровозах со статическими и вращающимися преобразователями весьма преувеличена и не согласуется, например, с данными французских железных дорог по сравнению стоимости парка электровозов при переменном токе (с учетом моторгенераторных электровозов) и при постоянном токе.

Что касается эксплуатационных расходов, то и по французским данным (7%) и по нашим данным (3...4% — из расчетов проектных организаций) следует, что переменный ток выгоднее постоянного. Из графика же К. Г. Марквардта (рис. 2) следует, что расходы по содержанию электровозов и контактной сети при переменном токе больше, чем при постоянном токе. Он неправильно считает, что рекуперация энергии возможна только при постоянном токе.

Что касается системы распределенного питания постоянного тока, то относительно ее можно сказать, что она может быть и будет целесообразной, но только при применении маломощных электровозов. При применении мощных электровозов в контактной сети с напряжением 3 000 в, по условиям токобъема, потребуются подвеска двойного контактного (медного) провода из-за больших токов электровоза.

В перспективных условиях железнодорожного транспорта СССР большой рост грузооборота будет нормальным явлением, что потребует применения мощных электровозов. При этих условиях система постоянного тока с напряжением 3 000 в менее эффективна.

О ПЕРСПЕКТИВАХ ДУГОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ И О МЕХАНИЧЕСКИХ ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

(Статья Н. С. Климова, *Электричество*, № 12, 1956)

Доктор техн. наук Ю. Г. ТОЛСТОВ,
кандидат техн. наук А. Л. САРКИСОВ

Энергетический институт им. Кржижановского
Академии наук СССР

Оценка, данная автором предлагаемому им дуговому выпрямителю, необоснованно оптимистична. Кроме того, в статье содержатся ошибочные положения. Из статьи нельзя уяснить, какова область применения предлагаемого автором «многофазного дугового вентилля». В области выпрямленных напряжений от 100 до 500 в применяются контактные выпрямители и в последнее время успешно используются полупроводниковые германиевые и кремниевые выпрямители. Как механические, так и полупроводниковые выпрямители обладают очень высоким к. п. д., около 98%.

Такого к. п. д. в этой области напряжения нельзя достичь не только при помощи дуговых, но и ртутных вентилей. Следовательно, многофазный выпрямитель, предложенный Н. С. Климовым, очевидно, не может быть использован в области напряжений 100...500 в, как неконкурентоспособный по сравнению с упомянутыми типами выпрямителей. То же можно сказать и для области напряжений

500...6 000 в. Эта область напряжений постоянного тока широко используется для электрифицированного транспорта и в электрометаллургии. Для преобразования переменного тока данного напряжения в постоянный используются ртутные выпрямители.

Ртутные выпрямители на эти напряжения хорошо освоены, обладают высоким к. п. д. В последнее время разработаны безнасосные типы ртутных вентилей, которые чрезвычайно просты в эксплуатации, не имеют подвижных частей и изнашивающихся электродов. Поэтому ртутные выпрямители в этой области напряжений являются более надежными, чем аппарат с подвижными частями, каким является рассматриваемый в статье многофазный выпрямитель. Таким образом, по эксплуатационной простоте и надежности, по экономичности, по сроку службы в области напряжений 500...6 000 в ртутные выпрямители значительно превосходят предлагаемый механически-дуговой преобразователь.

Область напряжений постоянного тока от 6 до 100 в не имеет большого промышленного значения. Такие напряжения слишком высоки для непосредственного использования потребителем. В то же время эти напряжения слишком низки для передачи энергии постоянным током на дальние расстояния.

Остается область напряжений выше 100 кВ, используемая для целей дальних передач электрической энергии. Поэтому и следует сопоставить предлагаемый Н. С. Климовым выпрямитель с другими типами выпрямителей с точки зрения возможностей их использования для целей передачи энергии постоянным током. В предложении Н. С. Климова есть две стороны: схемная и конструктивная.

Для преобразования переменного тока в постоянный или, наоборот, автор предлагает использовать так называемую полигонную схему вместо обычно используемых мостовых схем. В качестве основного вентиля в такой схеме предлагается механически-дуговой выпрямитель с роликовыми или другими контактами с дутьем и с пульсирующим потоком воздуха.

Рассмотрим каждую из этих сторон предложения.

При присоединении трансформаторов нормальной конструкции к трехфазной сети легко получить 12-фазную полигонную схему, при использовании которой для питания выпрямителя, соединенного по схеме Н. С. Климова, получится выпрямление напряжения с 12-фазной пульсацией. Точно такую же пульсацию выпрямленного напряжения можно получить и при последовательном соединении двух или четырех мостовых схем. При этом для двухмостовой схемы потребуется всего шесть трансформаторных единиц¹.

Получение более высокой пульсации (24-фазной и выше) как для одной, так и для другой схемы потребует применения специальных трансформаторов с соединением обмоток по схеме зигзаг, что при высоковольтных трансформаторах ведет к большому удорожанию конструкции.

Таким образом, в отношении фазности пульсаций полигонная и многомостовая схемы равноценны, за исключением того, что для полигонной схемы требуется вдвое большее число простых трансформаторных единиц либо то же число трансформаторов, но с дополнительными выводами средних точек, что, вообще говоря, будет несколько дороже простых трансформаторов без дополнительных выводов. Это усложнение является первым, хотя и не основным, недостатком полигонной схемы.

12-фазная пульсация является вполне приемлемой для целей практики, поэтому, очевидно, нет необходимости стремиться к дальнейшему увеличению частоты пульсаций, так как указанное выше удорожание конструкции не будет оправдано потребностями эксплуатации. Исходя из этого соображения, мы для большей конкретности рассмотрим именно 12-фазную схему, тем более, что сам автор считает ее перспективной. Такая конкретизация, впрочем, не лишает нашего рассмотрения общности: оно легко может быть распространено на схему с любым числом фаз.

Рассмотрим теперь, на какие параметры должны быть выбраны вентили в полигонной схеме, предлагаемой в статье, и сопоставим их с параметрами вентиля для многомостовых схем, применяемых в настоящее время для целей передачи энергии постоянным током.

Параметрами, характеризующими работу вентиля, являются:

I_k — ток перед началом коммутации (максимальный ток вентиля);

ΔU_0 — наибольший начальный скачок обратного напряжения;

¹ Под «простой трансформаторной единицей» подразумевается обычный двухобмоточный трансформатор с двумя выводами со стороны высокого и двумя выводами со стороны низкого напряжения.

U_{om} — наибольшая амплитуда обратного напряжения;

I_{cp} — средний ток через вентиль.

Последний параметр (средний ток) для дуговых вентилях определяет срок службы электродов или размеры их при заданном сроке службы, в то время как первые три параметра определяют основные вентильные качества аппарата: его размеры, надежность работы, стоимость, расход воздуха, поэтому они являются главными. У ртутных вентилях первые три параметра также являются определяющими.

Для полигонной схемы эти параметры, выраженные через выпрямленное напряжение U_{go} и выпрямленный номинальный ток I_g , будут иметь следующие значения:

$$I_k = I_g; \quad P_{mp} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_g U_{go} = 1,11 I_g U_{go};$$

$$\Delta U_0 = \frac{\pi}{m} U_{go};$$

$$U_{om} = U_{go} \frac{\pi}{m \sin \frac{\pi}{m}} \quad \text{при } m \text{ четном}$$

и

$$U_{om} = U_{go} \frac{\pi}{m} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} \frac{m-1}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}} \quad \text{при } m \text{ нечетном};$$

$$I_{cp} = \frac{I_g}{m}.$$

Число вентилях $n_g = 2m$.

Здесь m — число фаз;

P_{mp} — типовая мощность трансформатора.

Выпишем те же соотношения для многомостовой схемы:

$$I_k = I_g; \quad P_{mp} = \frac{\pi}{3} I_g U_{go} = 1,05 I_g U_{go};$$

$$\Delta U_0 = \frac{\pi}{3} \frac{U_{go}}{n_m};$$

$$U_{om} = \frac{\pi}{3} \frac{U_{go}}{n_m};$$

$$I_{cp} = \frac{I_g}{3};$$

$$n_g = 6n_m,$$

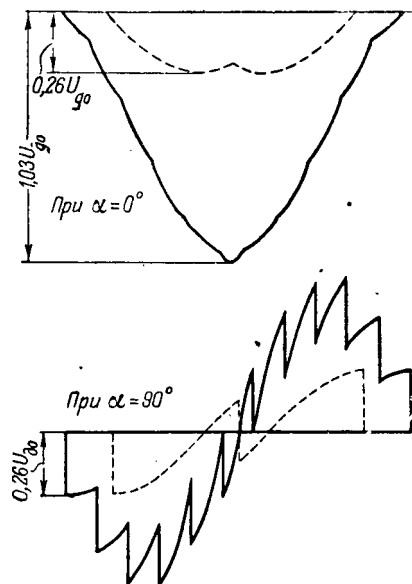
где n_m — число мостов.

Для того чтобы сопоставить оба варианта, рассмотрим численные значения определяющих параметров вентилях конкретной преобразовательной установки на 100 а 100 кВ (см таблицу).

Схема преобразовательной установки	P_{mp} , кВа	Число вентилях	I_k , а	ΔU_0 , кВ	U_{om} , кВ	I_{cp} , а	Фазность пульсаций	Число транс- форматорных единиц	$U_{ф.мр}$, кВ	$I_{ф.мр}$, а
Одномостовая . . .	10 400	6	100	105	105	33,3	6	3	42,6	81,6
Двухмостовая . . .	10 400	12	100	52,5	52,5	33,3	12	6	21	81,6
Четырехмостовая . .	10 400	24	100	26,2	26,2	33,3	12	12	11,65	81,6
Полигонная 12-фаз- ная	11 100	24	100	26,2	103	8,35	12	12	18,6	50

Сравнение этих цифр показывает, что для вентиляей полигонная схема дает наилучшие показатели. В самом деле, если сравнить полигонную схему с четырехмостовой, то наибольшее значение скачка обратного напряжения на вентиле получается в обоих случаях одинаковое. Однако и число вентиляей, однако максимальное обратное напряжение в полигонной схеме, т. е. номинальное напряжение вентиля, получается в 4 раза выше, чем в четырехмостовой схеме.

Для иллюстрации на рисунке показаны кривые обратного напряжения на вентилях в полигонной и четырехмостовой схемах при $\alpha = 0$ и при $\alpha = 90^\circ$, которые, к сожалению, в статье Н. С. Климова не приводятся.



Кривые обратного напряжения при $\alpha = 0$ и при $\alpha = 90^\circ$ эл. в 12-фазной полигонной (сплошная линия) и четырехмостовой (пунктирная линия) схемах.

В отношении номинального напряжения вентиля полигонная схема сравнима лишь с одномостовой схемой, однако в этом случае одномостовая схема имеет в 4 раза меньше вентиляей (6 вместо 24) на то же номинальное напряжение, как и в полигонной схеме.

Правда, в этом случае в одномостовой схеме при угле регулирования 90° скачок обратного напряжения получается в 4 раза больше, чем в полигонной (при $\alpha = 0$ скачки напряжения в обоих случаях невелики), однако в настоящее время разработаны меры замедления нарастания обратного напряжения на вентиле путем применения шунтирующих емкостно-омических цепочек или при помощи насыщающихся реакторов и, таким образом, опасность возникновения обратных зажигания в момент окончания коммутации устраняется и главное значение приобретает амплитуда обратного напряжения.

Таким образом, по напряжению в полигонной схеме вентили находятся в значительно более тяжелых условиях, чем в четырехмостовой схеме при одинаковом количестве вентиляей в обоих случаях. При использовании средств, замедляющих нарастание обратного напряжения, вентили в полигонной схеме будут находиться в тех же условиях по напряжению, как и в одномостовой схеме, однако последняя является, несомненно, более экономичной, так как содержит всего 6 вентиляей вместо 24. Следует отметить, что средний ток вентиля за период в полигонной схеме будет меньше, чем в мостовой, в нашем случае в 4 раза, однако это является скорее недостатком, чем достоинством, так как по существу означает большое недоиспользование вентиляей по току, кроме того, как уже указывалось выше, этот параметр не имеет столь важного значения, как первые три.

Необходимо также указать, что трансформаторы в полигонной схеме будут находиться в значительно более тяжелых условиях, чем в многомостовой схеме. Обычно один из полюсов постоянного тока заземляется. В этом случае в нашем примере схемные обмотки мостов будут

находиться относительно земли под напряжением постоянного тока соответственно для первого моста 125 кВ, второго 37,5 кВ, третьего 62,5 кВ, четвертого 87,5 кВ. Соответственным образом должна быть выбрана и главная изоляция обмоток этих трансформаторов. В полигонной же схеме все трансформаторы будут поочередно находиться под полным потенциалом постоянного тока 100 кВ, следовательно, трансформаторы для полигонной схемы будут более дорогими, чем для многомостовой.

Перейдем теперь к конструктивной стороне предложения Н. С. Климова. Основным недостатком предложения является большая инерционность регулирования, связанная с наличием воздушораспределения и вращающихся частей. Для того чтобы сделать надежную работу передачи постоянного тока, необходимо иметь такую систему регулирования, которая бы обеспечивала изменение угла управления отдельных вентиляей в течение долей периода. Утверждение автора, что «при аварийных режимах вентили нельзя сразу включить и автоматическое повторное включение производят не ранее чем через 0,5 сек», является ошибочным.

Далеко не при всяких аварийных режимах производят полное отключение передачи. Если бы это было так, то необходимой надежности работы передачи постоянного тока нельзя было бы добиться.

Например, при пропусках зажигания и прямых пробоях инвертора в течение долей периода меняется угол управления одного из вентиляей с тем, чтобы не допустить опрокидывания инвертора. При аварийном заперении выпрямителя его в течение долей периода переводят в инверторный режим, при этом угол управления очень резко изменяется за тысячные доли секунды. Можно было бы привести еще несколько примеров, когда требуется очень быстрое изменение угла регулирования преобразователей, однако вполне достаточно ограничиться и этими.

Разумеется, что вентили рассматриваемой системы, как, впрочем, признает и сам автор, не могут обеспечить указанных выше скоростей регулирования, а без этого они не могут быть использованы для целей передачи постоянного тока. Следовательно, рассматриваемая система механически-дуговых вентиляей непригодна для использования в системе передачи постоянного тока.

Выше мы уяснили, что для других параметров постоянного тока дуговые вентили использовать также не рационально, так как другие системы значительно более совершенны. Таким образом, предлагаемое в статье устройство не имеет перспектив практического использования.

На этом, собственно, можно было бы и закончить рассмотрение статьи, если бы в ней не было некоторых ошибочных положений, касающихся свойств дуговых вентиляей. Касаясь вопроса зажигания дуги между коммутационными элементами предлагаемого многофазного дугового вентиля, автор статьи ошибочно полагает, что коммутационный промежуток будет пробиваться с допустимым разбросом во времени. Известно, что величина пробивного напряжения одного и того же промежутка при отсутствии искусственного ионизатора не является одной и той же. Разброс в значениях пробивного напряжения может колебаться в пределах $\pm 10\%$ от некоторой средней величины [Л. 1], что в рассматриваемом вентиле будет служить источником разброса моментов зажигания. В соответствии со сказанным пробивное напряжение коммутационных промежутков общей длиной в 4 мм при атмосферном давлении воздуха и при принятых электрических параметрах рассматриваемого преобразователя будет колебаться около некоторого среднего значения, равного 12 кВ, в интервале между 10,8 и 13,2 кВ. Указанным границам пробивного напряжения соответствуют значения угла зажигания $\alpha_1 = 30^\circ$ эл. и $\alpha_2 = 24^\circ$ эл., разность между которыми и определяет величину разброса.

Как значения α_1 и α_2 , так и разница между ними резко возрастают с увеличением давления воздуха. Однако даже такую величину разброса, как 6° эл., нельзя считать допустимой при нормальном режиме работы преобразователя, так как этим определяется качество работы преобразователя.

Одним из недостатков дуговых вентиляей Э. Маркса был недопустимый разброс зажигания, который при скорости воздуха центрального дутья в 100 м/сек составлял

5...6° эл. Этот недостаток в дуговых вентилях Э. Маркса стремились устранить при помощи специальной схемы уточнения зажигания, значительно усложнившей весь аппарат в целом. Необходимо применения уточнения зажигания в системе управления рассматриваемого преобразователя является очевидным и, следовательно, утверждение Н. С. Климова о предельной простоте схемы управления не обосновано.

Приведенные значения угла зажигания $\alpha = 30^\circ \dots 24^\circ$ эл. свидетельствуют о значительной величине мертвой зоны угла регулирования. Это приводит, с одной стороны, к значительному ограничению диапазона регулирования и значительному недоиспользованию мощности выпрямительной установки (по напряжению), с другой стороны, — к ухудшению коэффициента мощности установки. Наличие такой огромной мертвой зоны угла регулирования является серьезным дефектом предлагаемого в статье многофазного дугового вентиля. Необходимо иметь в виду, что как величина разброса зажигания, так и величина мертвой зоны угла регулирования будут резко возрастать по мере износа (обгорания) электродов, так как с обгоранием электродов увеличивается разрядный промежуток и изменяется форма рабочей поверхности электродов.

В этом отношении дуговые вентили Э. Маркса выгодно отличаются от рассматриваемого, так как благодаря наличию там экранирующих электродов электрическая прочность рабочего промежутка и четкость зажигания перестают зависеть от изменяющейся в процессе износа формы главных электродов. Недостатки, связанные с обгоранием электродов, Н. С. Климовым не предвидятся, вероятно, потому, что он пренебрегает обгоранием электродов, которое в действительности будет иметь место, хотя и, может быть, в несколько меньшей степени, чем в дуговых вентилях Э. Маркса.

Заявление о значительно меньшем обгорании электродов, приписываемое Н. С. Климовым своему преобразователю, является необоснованным. В рассматриваемом дуговом вентиле нет каких-либо существенно новых условий работы электродов с точки зрения их износа, выгодно отличающих его от дугового вентиля Э. Маркса. А меньший износ электродов за счет меньшей продолжительности нахождения его в работе не является каким-либо качественно новым условием работы. Присущим только рассматриваемому многофазному преобразователю, как это считает автор статьи. Это целиком следует отнести к особенностям полигонной схемы, дающей очень низкий коэффициент использования вентилей по току, ибо электроды вентилей любого типа, в том числе и дугового Э. Маркса, включенного в эту же полигонную (12-фазную) схему выпрямления, будут находиться в работе столько же времени, сколько каждая пара электродов рассматриваемого преобразователя.

Также ошибочным является заявление автора, будто среднее падение напряжения в многофазном дуговом вентиле вследствие малой продолжительности горения дуги во много раз меньше. Если на каждой паре электродов дуга горит по 30° эл., то в самом преобразователе в целом она существует непрерывно, переходя через равные интервалы времени, определяемые числом фаз выпрямления (в частности, 30° эл. при 12-фазном выпрямлении), с одной пары электродов на другую. Следовательно, среднее падение напряжения в многофазном дуговом вентиле не будет зависеть от продолжительности горения дуги на одной паре электродов и будет одной и той же для любого числа фаз выпрямления. При этом необходимо заметить, что падение напряжения, а также и

потери мощности по своей абсолютной величине оказываются не такими уже незначительными, чтобы не учитывать их при конструировании рассматриваемого вентиля. Если принять суммарную длину дуг, горящих в рассматриваемом вентиле, неизменной и равной 4 мм (не считаясь с их удлинением в период коммутации) и предположить, что скорость движения дуги равна нулю, то при токе 100 а величина падения напряжения согласно экспериментальным данным [Л. 2] составит порядка 30...40 в (при учете же удлинения дуги и скорости движения дуги величина эта окажется значительно большей). В соответствии с приведенными значениями падения напряжения потери мощности в дуге составят при токе 100 а 3...4 кат. Эти цифры указывают на необходимость охлаждения всей контактной системы, в особенности в области кратера дуги, осуществление которого в рассматриваемом многофазном вентиле представляет большие трудности и связано с значительными усложнениями всей конструкции.

В статье при рассмотрении вентильной прочности остается неясным, по сравнению с чем промежуток увеличивается со скоростью, в 2 раза большей. Если сравнение ведется с дуговым вентилем Э. Маркса, то и там, как известно, рабочий промежуток вследствие механического уноса распавшейся плазмы воздушным потоком в обе стороны от зажигающей камеры восстанавливается со скоростью, равной удвоенной скорости центрального дутья.

Остается также непонятным, как мыслится автором предложения работа распределителя при широких изменениях угла коммутации. Автор статьи пишет, что при помощи распределителя воздушное дутье подается только к тем коммутационным элементам, в которых в данный момент происходит коммутация тока. А известно, что длительность горения зависит от тока нагрузки и при перегрузках может доходить до 180° эл.

Если допустить, что в таких случаях распределитель, строго следуя за изменениями угла коммутации γ , мгновенно изменит продолжительность подачи воздушного потока к коммутационным элементам (в соответствии с величиной γ), то трудно представить себе практическое осуществление такого распределителя.

Если же допустить, что распределитель не регулируемый, но заранее установлен на наибольшую длительность подачи воздушного потока, соответствующего максимальному значению $\gamma = 150^\circ$ эл., то роль распределителя в этом случае практически утрачивается. Кроме того, при больших углах коммутации дуга будет сильно растягиваться и возможны обрывы дуги до естественного прекращения тока через нуль, что вызовет большие перенапряжения.

На основании проведенного анализа можно прийти к выводу о том, что предлагаемый Н. С. Климовым многофазный дуговой вентиль является перспективным аппаратом в силу ряда серьезных недостатков, устранение которых в лучшем случае приводит к значительным усложнениям всего устройства, а в некоторых случаях оказывается невозможным.

Литература

1. Вентильные разрядники. Под общей редакцией проф. Л. И. Сипотинского. Труды ВЭИ, вып. 53. Госэнергоиздат, 1941.

2. О. Б. Брон. Электрическая дуга в аппаратах управления. Госэнергоиздат, 1954

К СТАТЬЕ О. Г. ВЕГНЕРА „ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ КОММУТАЦИИ ТОКА В КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИНАХ“

(Электричество, № 7, 1956)

Н. А. ПАНФИЛОВ, инж. О. П. СИДОРОВ
НИИ МЭП

В статье О. Г. Вегнера рассматриваются пути развития современной теории коммутации; при этом указывается на неправильность основных положений классической теории коммутации.

Как известно, классическая теория коммутации основана на постоянстве удельного переходного сопротивления между коллектором и щетками. Это положение дает возможность использовать метод суперпозиции токов, т. е. рассматривать реальный ток в короткозамкнутой секции в виде суммы двух токов — тока прямолинейной коммутации и добавочного поперечного тока. Благодаря

этому можно рассчитать наиболее простым путем различные коммутационные процессы.

Автор указывает, что в действительности отклонения от закона постоянства удельного переходного сопротивления настолько велики, что применение метода суперпозиции токов в короткозамкнутом контуре оказывается совершенно необоснованным.

Такое утверждение не может быть признано правильным. Действительно, ряд положений классической теории является довольно грубой абстракцией, в частности, положение о том, что переходное удельное сопротивление в процессе коммутации остается постоянным. Однако значение классической теории коммутации не утеряно, и она может быть применена для анализа некоторых сторон коммутационного процесса с соответствующими уточнениями.

Известно, что в настоящее время расчет коммутации проводится, почти исключительно основываясь на классической теории, причем во многих случаях результаты расчетов существенно не расходятся с практикой. Зачастую в весьма сложных случаях, в особенности если речь идет о крупных машинах постоянного тока, возможно, только пользуясь классической теорией, правильно оценить и наладить коммутацию. Например, Р. Рихтеру, пользуясь классической теорией коммутации, удалось установить причину искрения уже изготовленной двухколлекторной многоамперной машины (110 в, 3500 а, 1000 об/мин) и дать конкретные рекомендации по устранению искрения¹. Можно привести много подобных примеров.

Поэтому правильнее ставить вопрос не о замене классической теории коммутации какой-то новой теорией, а об уточнении положений классической теории.

Автор совершенно справедливо отмечает, что изучение физических процессов, происходящих в щеточном контакте, создает возможность для дальнейшего развития современной теории коммутации. Именно изучение этих явлений показало, что ионно-электронные процессы в контактном слое имеют особое значение в начале и конце коммутационного периода, а также при больших плотностях тока под щеткой. Однако при малых плотностях тока положение о постоянстве контактного сопротивления остается в значительной мере правильным.

С целью разъяснения электромагнитной стороны процесса коммутации и установления взаимосвязи всех коммутационных факторов автор рассматривает процесс коммутации в секции и при этом относит переходные падения напряжения ΔU_κ (напряжение под набегающим краем щетки) и ΔU_c (напряжение под сбегающим краем щетки) в разряд „вынуждающих“, т. е. создающих ток в короткозамкнутом контуре:

$$e_s = e_\kappa + \Delta U_\kappa + \Delta U_c. \quad (1)$$

Исходя из уравнения (1), автор делает следующий вывод: „Под влиянием этой „вынуждающей“ э. д. с. изменяется ток в секции, в результате чего появляется реактивная э. д. с. самоиндукции e_s и падение напряжения в сопротивлении секции $i r$. Характер изменения тока может быть лишь таким, при котором в любой момент времени суммарная вынуждающая э. д. с. полностью компенсируется суммарной реактивной разностью потенциалов“:

$$e_s = e_\kappa + \Delta U_\kappa + \Delta U_c = -e_s + i r. \quad (2)$$

Причины, по которым относится падение напряжения в разряд „вынуждающих“ по отношению к секции, автор объясняет следующим образом: „Представим себе условия коммутации при полном отсутствии э. д. с. e_κ . Тогда при вращении коллектора будет наблюдаться повышение плотности тока и падения напряжения в сбегающем крае щетки и уменьшение этих величин в набегающем крае. В этом случае разность потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_\kappa$ является единственной, вынуждающей изменение тока в секции в нужном направлении и способной компенсировать возникающую при этом реактивную э. д. с. Разность потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_\kappa$ является частью напряжения сети в случае двигателя или частью э. д. с. в случае генератора.

Щетка рассматривается здесь как средство, позволяющее ввести в контур секции часть внешней для нее

э. д. с. При ускоренной коммутации, наоборот, разность потенциалов $\Delta U_\kappa - \Delta U_c$ будет противодействовать э. д. с. e_κ , но во всех случаях эта разность потенциалов является для секции внешним, вынуждающим изменение в ней тока фактором, действующим в том или ином направлении“.

С таким утверждением автора нельзя согласиться. Известно, что для мгновенных значений тока в коммутируемой секции метод суперпозиции применим для случая, когда сопротивление переходного слоя щетки изменяется по произвольному нелинейному закону.

Пусть при $e_\kappa = 0$ мгновенное значение тока под набегающим краем щетки будет:

$$i_\kappa = i'_\kappa - i_q, \quad (3)$$

а под сбегающим

$$i_c = i'_c + i_q, \quad (4)$$

где i'_κ и i'_c — мгновенные значения токов набегающего и сбегающего краев в предположении, что индуктивность секции $L_c = 0$;

i_q — мгновенное значение поперечного тока коммутации, обусловленного наличием индуктивности секции.

Тогда „вынуждающая“ разность потенциалов равна:

$$\Delta U_c - \Delta U_\kappa = (i'_c + i_q) R_c - (i'_\kappa - i_q) R_\kappa, \quad (5)$$

где R_c и R_κ — мгновенные значения переходных сопротивлений соответственно под сбегающим и набегающим краями щетки.

Схему замещения коммутируемой секции для случая $L_c = 0$ можно представить согласно рис. 1, где R'_c — сопротивление секции и R_n — сопротивление петушка.

Для упрощения задачи положим, что $R'_c \approx R_n \approx 0$. Такое допущение справедливо применительно к машинам средней и большой мощности. Тогда схема замещения упростится (рис. 2) и из нее следует, что при произвольной характеристике щеточного контакта имеет место равенство

$$i'_c R_c - i'_\kappa R_\kappa = 0. \quad (6)$$

Применяя метод суперпозиции и подставив (6) в (5), получим:

$$\Delta U_c - \Delta U_\kappa = i_q (R_c + R_\kappa). \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), разность потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_\kappa$ является в этом случае не частью напряжения сети, а падением напряжения в переходном слое щеточного контакта от поперечного тока коммутации, который, в свою очередь, обусловлен наличием индуктивности секции.

В общем случае, когда величинами R_n и R'_c пренебречь нельзя (рис. 1), аналогичным путем можно получить:

$$\Delta U_c - \Delta U_\kappa = i_q (R_c + R_\kappa) - \frac{(i_c - i'_n)}{2} (R'_c + 2R_n). \quad (8)$$

Второй член в правой части выражения (8) обусловлен напряжением сети.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:
1. Положение автора о том, что разность потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_\kappa$ является только частью напряжения сети (двигатель) или э. д. с. якоря (генератор), является ошибочным. Основная часть разности потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_\kappa$ создается в переходном слое щеточного контакта от поперечного тока коммутации i_q , обусловленного наличием индуктивности секции (т. е. наличием в секции реактивной э. д. с.) и лишь незначительная часть [уравнение (8)] — напряжением сети (двигатель) или э. д. с. якоря (генератор).

¹ R. Richter. Е. и. М., стр. 265, № 12, 1955.

2. Очевидно, что причиной изменения тока в секции в процессе коммутации является переход ее из одной параллельной ветви в другую, вследствие чего ток изменяется от i до $-i$. Все прочие причины (индуктивность, переходное сопротивление щеток, внешние поля и т. д.) лишь тем или иным способом влияют на закон изменения тока в секции.

3. При отсутствии коммутирующей э. д. с. e_k реактивная э. д. с. e_s компенсируется не напряжением сети (двигатель) или э. д. с. якоря (генератор), как полагает автор, а падением напряжения от поперечного тока коммутации i_q в сопротивлениях коммутирующего контура.

Неправильно также утверждение автора, что форма кривой коммутации, приведенной в его статье на рис. 5, получается в случае недостаточной величины коммутирующей э. д. с. e_k . В этом случае, как заявляет автор, коммутация завершается за счет появления вынуждающей разности потенциалов $\Delta U_c - \Delta U_n$ в контуре секции, что сопровождается неизбежным увеличением плотности тока в сбегавшем крае щетки и переходного падения напряжения в нем.

Как нами было уже показано, переходные падения напряжения нельзя рассматривать как э. д. с., „вынуждающие“ изменение тока. Таким образом, становящихся очевидным, что положение автора о „вынуждающих“ падениях напряжения, которые вводятся в коммутирующую секцию при помощи щетки, является ошибочным.

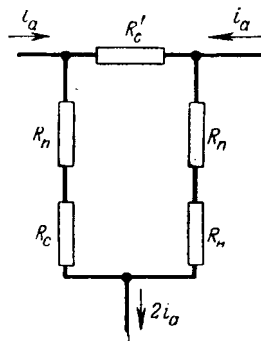


Рис. 1.

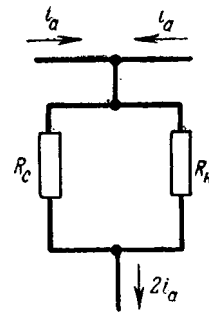


Рис. 2.

Что же касается ступени „малого тока“ и влияния ее на коммутацию, то это положение автора кажется нам правильным, так как при наличии ступени малого тока имеет место минимальная мощность разрыва проходящего тока.

Получение ступени малого тока, как можно сделать вывод из статьи О. Г. Вегнера, заключается в создании несколько ускоренной коммутации, что само по себе не вызывает затруднений, однако практическая настройка коммутации этим методом далеко не всегда решает эту проблему.



Заметки и письма

О МЕТОДЕ „ПРИВЕДЕНИЯ К УСТАНОВИВШЕМУСЯ РЕЖИМУ“

За последние годы в отечественной литературе появилось значительное количество работ, посвященных приближенным методам расчета переходных процессов в сложных цепях. В связи с развитием быстродействующих цифровых электронных машин значение этих методов уменьшилось, однако они представляют интерес и до настоящего времени.

В 1950 г. был опубликован метод расчета переходных процессов¹, названный позже методом „приведения к установившемуся режиму“. По утверждению автора, предложенный им метод пригоден для расчета переходных процессов в сложных линейных цепях, а также для таких нелинейных цепей, у которых на интервалах возможной линейной аппроксимации. Метод рекомендовался также для решения динамических задач в других областях, не связанных с электротехникой.

О методе можно сделать следующие замечания.

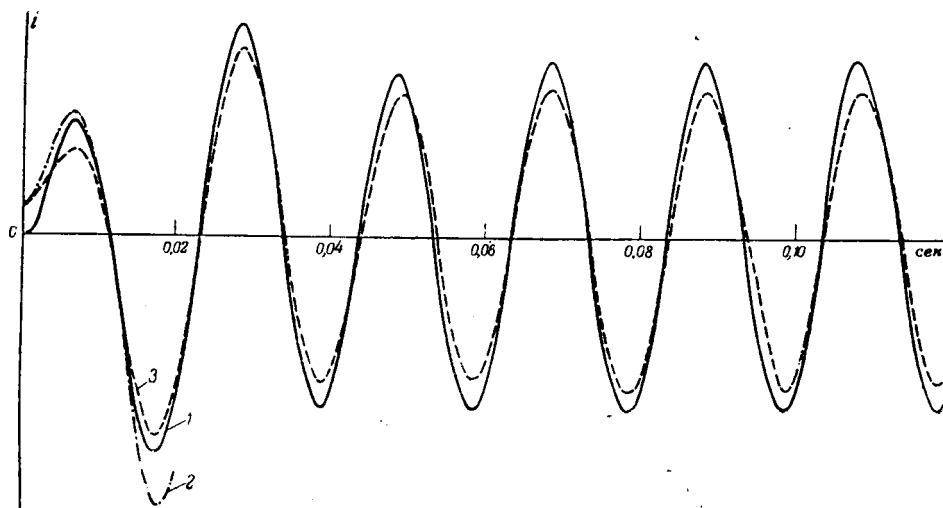
Точность расчета зависит от величины выбираемого интервала периодизации τ и расположения его относительно искомой функции. При прочих равных условиях погрешность снижается, если граница интервала проходит вблизи нуля искомой величины, и возрастает, если граница оказывается вблизи ее максимума. Удачно выбрать интервал периодизации τ с учетом изложенных соображений обычно затруднительно, так как в начале расчета еще не известен ход искомой функции. Кроме того, погрешность вычислений на интервале τ неодинакова и зависит от момента времени, для которого ведется расчет. Следует отметить, что сходимость ряда зависит также от угла включения ϕ синусоидального возмущающего воздействия.

¹ Э. А. Меерович. Расчет переходных процессов в сложных электрических цепях. Известия АН СССР, ОТН, № 10, 1950.

На погрешность влияет и выбранная величина коэффициента затухания λ . При увеличении λ сходимость ряда ухудшается. При уменьшении λ погрешность возрастает от пренебрежения вторым краевым условием. В каждом частном случае, вероятно, существует некоторое оптимальное значение λ , при котором погрешность будет наименьшей.

Частота периодизации $f_{пер}$, как указывает автор ме. тода, должна не совпадать и не быть кратной какой нибудь из собственных частот схемы. В случае несоблюдения этого условия существенно возрастет ошибка от пренебрежения членами, содержащими значения искомой функции в момент $t = \tau_k$, так как в этом случае подобная операция соответствует пренебрежению импульсными силами, действующими в резонансе с одной из собственных частот. Следует отметить, что при больших величинах интервала τ выполнить это условие невозможно для тех случаев, когда частота периодизации $f_{пер}$ меньше ширины размыва резонансного пика частотной характеристики цепи. Это имеет место, например, при расчетах переходных процессов в электрических сетях.

При пользовании методом может возникнуть необходимость повторения трудоемкого расчета заново при иной величине интервала τ , например в случае, если в ходе расчета выяснится необходимость определения значений искомой функции для времен, несколько больших первоначально выбранного интервала, или, если, кроме выяснения „общего характера“ процесса на большом интервале времени τ , нужно уточнить значения искомой функции в начальные моменты времени. Необходимость повторения расчета заново возникает также всякий раз, когда целесообразно рассмотреть переходный процесс при новом угле включения ϕ . Эта особенность метода излишне осложняет анализ и уменьшает его гибкость. При расчетах по этому методу рациональный подбор величин τ , $f_{пер}$ и λ может быть произведен в каждом отдельном случае только путем неоднократных попыток, последующей их оценки и повторений расчета, так как более эффективных рекомендаций автор метода не приводит.



Результаты расчета переходного процесса.

1 — расчет классическим методом; 2 — расчет методом „приведения к установившемуся режиму“, $\tau=0,02$ сек;
3 — расчет методом „приведения к установившемуся режиму“, $\tau=0,12$ сек.

Практический расчет переходных процессов по этому методу громоздок и требует большого количества вычислений. Чтобы получить значение искомой функции в данный момент времени, необходимо определять углы сдвига различных гармоник, затем по тригонометрическим таблицам находить мгновенные значения отдельных гармоник и производить их суммирование. Эту операцию нужно повторять для каждого момента времени. Следует подчеркнуть, что поскольку углы сдвига отдельных гармоник не являются постоянными, а зависят от условий решаемой задачи, то указанную весьма трудоемкую часть вычислений нельзя упростить составлением каких-либо вспомогательных таблиц, облегчающих расчет. Кроме того, невозможно составить одну универсальную вспомогательную таблицу также и потому, что интервал τ , частота периодизации $f_{пер}$ и коэффициент затухания λ не могут быть установлены постоянными. Для некоторого облегчения расчетов нужно иметь целый набор таблиц с различными сочетаниями величин τ , $f_{пер}$, λ и ϕ .

Точный „метод приведения к установившемуся режиму“ не имеет практического значения ввиду того, что расчет значительно усложняется из-за необходимости дополнительного определения значений искомой функции на границе интервала τ при $t = \tau_k$. Кроме того, введение периодизированной импульсной функции ухудшает сходимость ряда, что вносит добавочные трудности при расчете.

Предложенное автором название „метод приведения к установившемуся режиму“ нельзя признать удачным. Это название может быть отнесено также ко всем частотным методам и не является характерным для рассматриваемого метода.

В качестве иллюстрации приведем пример расчета переходного процесса в цепи rLC при включении ее на синусоидальную э. д. с. Для проверки результатов задача была решена классическим методом (см. рисунок).

Параметры цепи: $r = 10,8$ ом; $L = 0,1$ гн; $C = 0,26 \cdot 10^{-3}$ ф.

При выборе расчетного интервала $\tau = 0,02$ сек, $f_{пер} = 12,5$ гц и $\lambda = 0,5$ (учитывались гармоники до 15-й включительно) ошибки вычислений тока, отнесенные к амплитуде тока в установившемся режиме, имеют следующие значения: в начале интервала 16,93%, в конце интервала 36,24% и при определении амплитуды наибольшего значения тока 28,62%. Погрешность вычисления фазы тока равна 15° .

При выборе расчетного интервала $\tau = 0,12$ сек, $f_{пер} = 2,09$ гц и $\lambda = 0,5$ (учитывались гармоники до 51-й

включительно) ошибки вычислений составляют: в начале интервала 16,03%, в конце интервала 13,24% и при определении первого максимума 17,61%.

Кандидат техн. наук О. В. Мамонтов

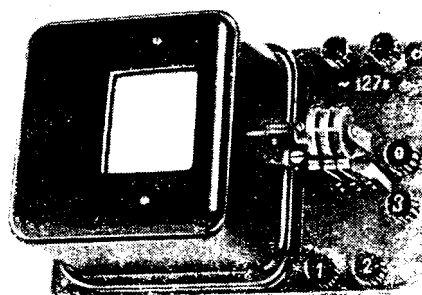
Лаборатория управляющих машин и систем АН СССР

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ОТМЕТЧИК ВРЕМЕНИ

Процесс съемки при осциллографировании затяжных нестационарных процессов, например таких, как работа телеустановки, пуск или остановка двигателя, действие схемы на подвижном составе и т. д., длится десятки секунд. Малая скорость подачи ленты не позволяет в этих случаях использовать для установления масштаба времени вибратор, дающий частоту 500 гц. Следовательно, единственным способом определения масштаба времени, если все вибраторы осциллографа заняты, что часто имеет место при использовании трехвибраторного осциллографа, является снятие специальной масштабной осциллограммы. В то же время скорость подачи ленты не является строго постоянной, а зависит от количества ленты в кассете и напряжения на двигателе лентопротяжного механизма, и поэтому масштабная осциллограмма не всегда может дать нужную точность.

По предложению автора был изготовлен электромеханический отметчик времени, позволяющий наносить на осциллограмму отметки времени с определенной периодичностью без использования для этой цели одного из вибраторов осциллографа.

Прибор состоит из небольшого конденсаторного двигателя типа Д-104, на вал которого насажены три кон-



МОЩНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ¹

Полупроводниковые выпрямители обладают рядом существенных преимуществ перед выпрямителями других типов, вследствие чего их применение в течение последних лет резко возросло, особенно применительно к большим мощностям.

Селеновые выпрямители в настоящее время используются мощностью 50 *квт* и выше. Усовершенствования производства и хорошие эксплуатационные данные сделали экономически целесообразным их применение при напряжениях до 100 *в* и выше. Срок службы высококачественных селеновых выпрямительных элементов достигает 50 000 ч. Существуют установки, которые проработали по 20 и более лет без серьезных повреждений. Для производства соляной кислоты одна из фирм использует селеновый выпрямитель на 23 000 *а*, 67 *в*. Это, по-видимому, самый мощный селеновый выпрямитель из всех существующих.

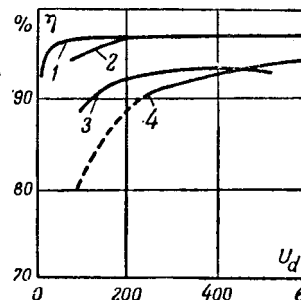
Германиевые выпрямители обладают рядом преимуществ по сравнению с селеновыми. Параметры германиевых выпрямителей более стабильны, они выдерживают значительно большие обратные напряжения и могут работать при значительно более высоких плотностях прямого тока. Если селеновые выпрямительные элементы работают при плотности тока порядка 50 *ма/см²*, то германиевые — при плотности порядка сотен ампер на квадратный сантиметр.

После работы германиевых выпрямителей с номинальной нагрузкой в течение 12 000 ч не отмечалось изменения прямого падения напряжения и обратного тока. Имеются данные об испытаниях германиевых выпрямителей при номинальной нагрузке в течение 30 000 ч, в процессе которых также не отмечалось изменения характеристик. Возрастание обратного тока при хранении, как это имеет место у селеновых выпрямительных элементов вследствие так называемого явления расформовки, у германиевых выпрямителей отсутствует. Коэффициент полезного действия германиевых выпрямителей составляет около 97% и остается высоким даже при низких выпрямленных напряжениях благодаря тому, что прямое падение напряжения весьма мало (около 0,5 *в*). На рисунке приведена зависимость к. п. д. четырех типов выпрямителей на 15 000 *а* от выпрямленного напряжения, из которой видно, что при напряжениях ниже 200 *в* наибольший к. п. д. имеют германиевые выпрямители. Это позволяет с успехом использовать их для питания электролитических установок различного назначения, где благодаря возможности снижения рабочего напряжения упрощается конструкция установок и улучшается безопасность работы с ними.

Вследствие особенностей вольт-амперной характеристики германиевого выпрямительного элемента (наличие тока насыщения в обратной ветви характеристики и значительная крутизна рабочего участка прямой ветви) необходимо для последовательного и параллельного соединения подбирать выпрямители с весьма близкими характе-

ристиками, что не всегда представляется возможным. Для увеличения выпрямленной мощности ряд фирм рекомендует изготавливать трансформаторы, от которых питаются выпрямители, с несколькими вторичными обмотками и производить требуемые соединения на стороне постоянного тока.

Производство германиевых выпрямителей за рубежом быстро развивается. С 1952 по 1955 г. включительно только фирмой Джeneral Электрик было выпущено свыше 5 млн. германиевых выпрямительных элементов, в том числе в 1955 г. около 3 млн. Интенсивно ведутся разработки новых германиевых выпрямительных элементов и устройств. Той же фирмой изготовлены экспериментальные образцы германиевых выпрямительных элементов с площадью электронно-дырочного перехода 180 *мм²*. Элементы выдерживают обратное напряжение 70 *в*; три таких элемента обеспечивают выпрямленный ток 1 000 *а*.



Зависимость к. п. д. различных выпрямителей от выпрямленного напряжения. Нагрузка 15 000 *а*.

Выпрямители: 1 — германиевый; 2 — контактный; 3 — двигатель-генераторный; 4 — ртутный.

Ведутся работы по изготовлению опытного образца германиевого выпрямительного элемента с площадью электронно-дырочного перехода 300 *мм²*. Фирмой Бритиш Томсон Хустон разработано свыше 10 типов различных германиевых выпрямительных элементов на токи 0,1...100 *а* и максимальные обратные напряжения 25...300 *в*, в том числе выпрямительный элемент на максимальное обратное напряжение 200 *в* при токе нагрузки 20 *а* (естественное воздушное охлаждение при окружающей температуре до 35°C) и элемент на максимальное обратное напряжение 100 *в* при токе нагрузки 50 *а* (форсированное воздушное охлаждение при окружающей температуре до 35°C).

Столь же быстрыми темпами развивается производство выпрямительных устройств из германиевых выпрямительных элементов. Первые данные об эксплуатации свидетельствуют о перспективности их применения в мощных выпрямительных установках. В литературе сообщалось об эксплуатации германиевого выпрямителя мощностью 300 *квт* в течение 12 мес. Выпрямитель работал на электролизер при напряжении около 270 *в* и токе 1 100 *а* с к. п. д. 98,5%. В США находятся в эксплуатации герма-

¹ По материалам иностранной периодики за последние 2 года.

тактные латунные шайбы со вставками из изоляционного материала. На первой шайбе имеется одна вставка, на второй — две и на третьей — три. Через одну из этих шайб заводится цепь вибратора, который записывает наиболее медленно изменяющуюся величину.

Питание двигателя осуществляется от сети переменного тока напряжением 127 *в*. Двигатель, а вместе с ним и шайбы вращаются с постоянной скоростью. Таким образом ток, пропускаемый через одну из шайб, прерывается с определенной периодичностью, что и отмечается на фотобумаге. У двигателя типа Д-104 скорость вращения выходного вала в зависимости от примененного редуктора составляет 100 или 33,3 *об/мин*.

Следовательно, в первом случае можно получить отметки времени через 1/100, 1/50 или 1/25 *мин*, а во втором случае — через 1,80, 0,90 и 0,45 *сек*.

Если цепь, в которую включен вибратор, обладает большой индуктивностью, то шайбу следует включать параллельно части добавочного сопротивления.

Прибор (см. рисунок) смонтирован на изолированном основании, контактные шайбы хорошо изолированы от двигателя (вал имеет эбонитовую вставку). Двигатель и конденсатор помещены под крышку, а шайбы и щетки доступны для осмотра.

Инж. К. Н. Осолков
Московский метрополитен им. В. И. Ленина



ниевые выпрямительные устройства для питания электролитических установок на 15 в и 160 000 а; 24 в и 40 000 а; 30 в и 10 000 а и ряд других.

Все более расширяется область применения германиевых выпрямителей. В частности, изготовлены выпрямители для питания дуговых фонарей кинопроекторных аппаратов, выпрямитель мощностью 1000 кВт (255 в, 3 920 а), предназначенный для питания электролизера и рассчитанный на непрерывную работу при полной нагрузке. В декабре 1955 г. в Англии были произведены успешные испытания электровоза, на котором установлен германиевый выпрямитель с воздушным охлаждением мощностью 750 кВт.

Относительно высокая стоимость чистого германия не является препятствием к применению германиевых выпрямителей, так как количество германия, необходимое для изготовления выпрямительного элемента, сравнительно невелико. Если стоимость двигательного преобразователя принять за 100 единиц, то стоимость ртутного выпрямителя той же мощности будет 139, контактного выпрямителя 79, а германиевого 74.

Кремниевые выпрямители могут работать при более высоких окружающих температурах (до 300°), чем германиевые и селеновые. Потери выпрямителя на 400 в, собранного из селеновых элементов, рассчитанных на работу при температуре окружающей среды +125° С, только в прямом направлении в 10 раз превышают потери при прохождении прямого тока через кремниевый выпрямительный элемент.

Кремниевые выпрямители весьма надежны в эксплуатации. Полные данные относительно срока их службы пока отсутствуют. Испытания при окружающей температуре +150° С при номинальной нагрузке в течение 6 мес. показали, что электрические характеристики большинства выпрямителей остаются практически неизменными. По предварительной оценке срок службы кремниевых выпрямительных элементов составляет около 200 000 ч. Из всех известных типов полупроводниковых выпрямителей кремниевые выдерживают наиболее высокие обратные напряжения. Выпускаются кремниевые выпрямительные элементы на максимальное обратное напряжение 400 в при среднем токе в прямом направлении 0,4 а (при окружающей температуре 135° С). Сообщалось об изготовлении образца кремниевого выпрямительного элемента на максимальное напряжение 1 000 в. При увеличении окружающей температуры на 10° С напряжение пробоя кремниевых выпрямительных элементов возрастает в среднем на 1%.

В США выпускаются выпрямительные устройства на базе кремниевых выпрямительных элементов. Так, фирма Вестингауз выпустила стабилизированные кремниевые выпрямительные устройства для электрооборудования самолетов мощностью до 5,5 кВт с принудительным воздушным охлаждением (температура окружающей среды до ±120° С). Стабилизация напряжения в этих выпрямителях осуществляется при помощи двухкаскадного магнитного усилителя. В выпрямителе этой серии на 28 в, 200 а при колебаниях напряжения трехфазной питающей сети (200 в, 400 гц) и частоты в пределах ±5% колебания выпрямленного напряжения не превышают 1 в. Пульсации на выходе выпрямителя — менее 1 в; время восстановления не более 0,2 сек. Выпрямитель выдерживает 150%-ную нагрузку в течение 5 мин или 250%-ную нагрузку в течение 1 мин при последующей нагрузке, равной 50% номинальной в течение 10 мин. Вес выпрямителя — около 28,6 кг; объем — около 27 дм³.

Инж. С. М. Ашавский

КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ 200 кВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ЛАМАНШ

Осенью 1956 г. объединенный англо-французский комитет по подготовке прокладки высоковольтной кабельной линии через Ламанш объявил, что во изменение первоначальных наметок связь английской и французской сетей будет осуществлена через один подводный кабель 200 кВ постоянного тока пропускной способностью 150 Мвт.

Как уже сообщалось, первоначально предполагалось связать обе страны трехфазной кабельной линией 132 кВ пропускной способностью 100 Мвт. Линия должна была

состоять из четырех одножильных газонаполненных кабелей, один из которых должен был служить резервом. Применение постоянного тока представлялось на этом этапе мало реальным; рассматривалась лишь возможность использования четвертого резервного кабеля для опытов по передаче постоянным током с возвратом через море.

При обсуждении первоначального проекта в английском Институте инженеров-электриков и на Международной конференции больших электрических сетей в Париже предложения комитета встретили серьезную критику. Действительно, нагрузка английской сети составит на расчетном уровне 20 530 Мвт, нагрузка французской сети 16 620 Мвт; при параллельной работе французской сети с другими европейскими странами мощность энергообъединения на материке сможет доходить до 35 000 Мвт. Синхронная связь двух столь значительных систем через кабельную линию малой пропускной способности затруднительна, даже при условии перевода всей британской системы с ручного регулирования частоты на автоматическое.

В частности, синхронная связь лишила бы Англию возможности прибегать при дефиците мощности к временному снижению частоты, если только не будут приняты меры для выхода английской сети на это время из параллельной работы. Указывалось, что эти трудности можно будет избежать при гибкой связи обеих сетей через линию постоянного тока.

В настоящее время, учитывая успехи последних лет в области передачи энергии постоянным током в Швеции и в СССР, комитет признал передачу постоянным током 200 кВ через Ламанш технически осуществимой в ближайшем будущем. В Швеции с 1 января 1956 г. введена в нормальную промышленную эксплуатацию подводная кабельная линия 100 кВ постоянного тока, 20 Мвт, между материком и островом Готланд. Перевод этой линии из опытной эксплуатации в промышленную позволил заменить дорогую энергию паротурбинной станции Слите на острове, работавшую на импортном топливе, энергией гидроэлектростанций материковой Швеции; в результате стоимость 1 кВт·ч на острове Готланд снизилась в 1,65 раза. В настоящее время в Швеции проектируется удвоение мощности и напряжения Готландской передачи; намечается также перевести на постоянный ток одну из действующих трехфазных линий 220 кВ в целях увеличения ее пропускной способности.

При выборе рода тока для кабельной линии через Ламанш учитывались также благоприятный опыт работы подземного кабеля 200 кВ постоянного тока между Каширой и Москвой и работы советских инженеров и ученых по осуществлению более мощных линий постоянного тока в нашей стране.

Наиболее дешевой схемой передачи энергии по одному кабелю постоянного тока была бы схема, принятая для первой очереди Готландской линии: передача тока одной полярности по одножильному кабелю с возвратом через море. Однако такая схема встретила возражения со стороны Морского ведомства: магнитное поле одножильного кабеля постоянного тока влияло бы при возврате тока через море на стрелки компасов на кораблях, движущихся по проливу. Как показал анализ, ошибка в показаниях компаса на корабле, плывущем непосредственно над кабелем, пропорциональна току в кабеле и косинусу угла между кабелем и направлением север — юг; она обратно пропорциональна глубине заложения кабеля. При токе в 750 а отклонение магнитной стрелки компаса могло достигать 4°. В связи с этим принято решение отказаться от возврата тока через море. Центральная жила кабеля, изолированная на полное напряжение, будет окружена слабо изолированной концентрической токоведущей оболочкой, сечение которой достаточно для возврата рабочего тока. Рассматривается и вариант кабеля с двумя одинаковыми жилами, работающими при напряжении ±100 кВ относительно земли. В обоих вариантах внешнее магнитное поле практически устраняется.

Преобразователи будут ртутными (по-видимому, шведского производства) и конструктивно близкими к преобразователям Готландской передачи. Однако учитывая в 3...4 раза больший номинальный ток передачи, требуется увеличить как число параллельных анодов, так и номинальный ток каждого анода. Схема преобразования будет восьмиступенчатой каскадно-мостовой. Как известно,

такая схема позволяет осуществить 24-фазный режим преобразования.

Принимая во внимание, что вероятность повреждения якорями и рыболовными тралями растет с увеличением числа кабелей, комитет признал надежность линии из одного кабеля постоянного тока соизмеримой с надежностью линии из четырех подводных кабелей переменного тока. Стоимость же линии и объем работ по прокладке кабелей через Ламанш в варианте постоянного тока значительно меньше.

Переход к варианту постоянного тока и повышение пропускной способности линии до 150 Мвт существенно повышают экономичность связи сетей Англии и Франции. Благодаря использованию несовпадения максимумов в суточном, недельном и годовом разрезе общая установленная мощность тепловых станций может быть сокращена в обеих странах на 300 Мвт. Чистая экономия в капитальных затратах (за вычетом стоимости линии постоянного тока) составит по расчетам Сайкса 17 млн. фунтов стерлингов, т. е. почти в 3 раза больше, чем в первоначальном варианте связи на трехфазном токе.

Годовая экономия от использования в Англии избыточной летней энергии французских гидроэлектростанций оценивалась первоначальным проектом в 100 тыс. фунтов стерлингов. Благодаря повышенной пропускной способности кабе-

ля и росту цен на уголь за последние 4 года эта экономия будет по меньшей мере в 1,5 раза больше. Увеличится также эффект от суточного обмена энергией в зимний период, при котором французские гидроэлектростанции участвуют в часы максимума в покрытии пика английской сети и накапливают воду в часы провала за счет передачи энергии английских паротурбинных станций во французскую сеть. По первоначальному проекту годовая экономия от такого суточного обмена оценивалась в 150 тыс. фунтов стерлингов. Наконец, годовая экономия от вытеснения мало экономичных тепловых станций более экономичными, оценивавшаяся по первоначальному проекту в 350 тыс. фунтов стерлингов, будет по последним данным по меньшей мере на 50% выше.

Работы по сооружению кабельной линии постоянного тока через Ламанш предполагается начать в 1957 г. и закончить в 1960 г.

Литература

1. J. H. M. Sykes, Engineer, стр. 433, № 5253, 1956.
2. F. J. Lane, Direct Current, т. 3, № 2, стр. 39, 1956.
3. El. Review, т. 159, стр. № 10, 1956.
4. J. H. M. Sykes, El. World, стр. 16, № 15, 1956.

Кандидат техн. наук Я. М. Червоненкис



Хроника

К РАЗВИТИЮ СВЯЗЕЙ ЖУРНАЛОВ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» И «DEUTSCHE ELEKTROTECHNIK»

В мае с. г. в Москву прибыли из Берлина главный редактор журнала «Deutsche Elektrotechnik» (ГДР) Норберт Васс и главный редактор журнального отделения издательства «Technik» (ГДР) Вольфганг Киммель для ознакомления с постановкой работы редакции журнала «Электричество», а также Государственного энергетического издательства и для обсуждения с редакцией и редколлегией журнала «Электричество» вопросов развития научно-технических и деловых связей между обоими журналами.

Журнал «Deutsche Elektrotechnik» издается с июля 1947 г. и является печатным органом «Свободной организации немецких инженеров», имеющей в своей структуре «Электротехническую палату». «Deutsche Elektrotechnik» издается в текущем году тиражом 7 500 экз. Журнал в полиграфическом отношении хорошо оформлен; содержание его разнообразно в расчете на весьма широкий в смысле научно-технической подготовки и интересов круг читателей; изложение статей отличается компактностью и излишне не перегружается математическим аппаратом.

20 мая с участием гостей состоялось очередное заседание редакционной коллегии журнала «Электричество». Присутствуя при рассмотрении редколлегией текущих вопросов повестки заседания, гости имели возможность познакомиться с обычной работой редколлегии журнала «Электричество», с характером и порядком обсуждения редколлегией вопросов о вышедших из печати последних номерах журнала, об утверждении плана и содержания подготавливаемых к выпуску очередных номеров журнала и других вопросов.

Затем редколлегия заслушала сообщение главного редактора журнала «Электричество» проф. Н. Г. Дроздова о цели приезда руководителей «Deutsche Elektrotechnik» и «Veb Verlag Technik».

Выступивший с приветствием Вольфганг Киммель сказал:

— Дорогие товарищи! Мы чрезвычайно обрадовались возможности принять участие в заседании редакционной коллегии уважаемого журнала «Электричество». Прибыв в Советский Союз, мы тем самым как бы построили мост между редакциями наших журналов, и мы надеемся, что по этому мосту пройдут еще многие и многие товарищи. Мы привезли с собой несколько книг, а также журналов, которые выпускает наше издательство, для того чтобы вы

предварительно познакомились хотя бы в небольшой мере с нашей работой. Сотрудничество, к которому мы стремимся, послужит дальнейшему развитию техники наших стран и, следовательно, будет способствовать процветанию социалистической экономики. Разрешите выразить надежду на успех начатого сегодня сотрудничества и рассчитывать на скорый ответный визит с вашей стороны. Разрешите надеяться, что я и товарищ Васс сможем вскоре приветствовать вас, наших дорогих коллег, в Берлине. Мы с интересом следили сегодня за работой вашей редакционной коллегии и надеемся, что в следующие дни сможем детально познакомиться с работой редакции журнала «Электричество» и работой Госэнергоиздата, обменяясь опытом и договориться об укреплении деловых связей.

В своем слове Норберт Васс — главный редактор журнала «Deutsche Elektrotechnik» — вначале остановился на тематических задачах руководимого им журнала, упомянув в связи с этим о проблемах в области электрических машин и аппаратов, методов и приборов для измерения, управления и регулирования электрических и неэлектрических процессов в промышленном производстве, на транспорте, в сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства. Круг читателей «Deutsche Elektrotechnik» весьма широкий — от студентов техникумов и институтов до академиков. «Это, — сказал Н. Васс, — накладывает известный отпечаток на характер и изложение статей в нашем журнале и делает его действительно несколько отличным от характера содержания журнала «Электричество». Но объединяет оба журнала одно: все, что обсуждается и предлагается нашими журналами, имеет конечной целью облегчить работу наших инженеров. И это, очевидно, главное, ибо наши журналы должны всемерно помогать нашим ученым и инженерам двигать технический прогресс в области электротехники и электроэнергетики вперед и как можно быстрее вперед. Обмен опытом в таких случаях приносит огромную пользу. Вот уже 3 года на каждом заседании нашего редакционного комитета мы внимательно рассматриваем и обсуждаем каждый вышедший из печати номер журнала «Электричество», выбирая из вашего журнала все, что необходимо нашим читателям. Наиболее важные статьи из «Электричества» переводятся нами целиком, из других же статей мы делаем расширенные рефераты и регулярно публикуем их на страницах нашего журнала.

В нашем письме, о котором упомянул в своем сообщении профессор Дроздов, содержится семь предложений по сотрудничеству редакций наших журналов. Мы надеемся, что эти предложения послужат основой в развитии наших дальнейших взаимоотношений. Наша страна рассчитывает на большую помощь Советского Союза в деле решения наших насущных научных и технических проблем. Наши инженеры затрудняются пока самостоятельно решать отдельные проблемы. Назову некоторые из них: вопросы изготовления и применения полупроводников; вопросы, связанные с конструированием и постройкой крупных турбогенераторов (в ГДР — наибольший турбогенератор 50 Мвт, в СССР — 200 Мвт); вопросы (особенно теории), связанные с гашением дуги; вопросы дистанционного управления и автоматизации электрических станций; некоторые вопросы энергоснабжения народного хозяйства и др.

Институт, в котором мы сегодня находимся, имеет три учебных здания; это показательно, ведь задачи, которые вы решаете, огромны. Наш энергетический институт тоже имеет три здания, но они далеко не такие большие. И все же мы думаем, что сможем не только «получать» от вас, но сможем и «давать» вам то, что в наших силах.

Сейчас нас очень интересуют вопросы механизации и автоматизации производства электрических машин. В этом деле большую помощь наши инженеры получают от чтения журнала «Электричество».

Мы очень хотели бы поучиться у вас организации читательских конференций, ознакомиться с тем, как проходит такая конференция, какие цели ставят перед собой участники конференции и каких результатов вы добиваетесь. Далее нас интересует, как вы относитесь к проведению на страницах журнала конкурсов. В № 5 нашего журнала мы объявили конкурс на лучшую статью по решению энергетической проблемы нашей страны.

У нас много вопросов, много пожеланий; есть наверное вопросы и пожелания с вашей стороны, и мы надеемся в процессе наших последующих деловых встреч все это разрешить. Я хочу напомнить те предложения, которые по нашей мысли могли бы явиться исходными для дальнейшего сотрудничества и сближения: 1. Обмен тем. планами. 2. Обмен очередными номерами на стадии сигнала. 3. Обмен краткими аннотациями по статьям обговоренной сторонами тематики. 4. Обзоры в кратком изложении ($\frac{1}{2}$ —2 печ. стр.) по ряду статей обусловленной тематики. 5. Обмен статьями, опубликование которых целесообразно осуществлять в обоих журналах: так поставить это дело, чтобы статьи появлялись одновременно (в номерах одного месяца). 6. Обмен рукописями (с согласия их авторов), представляющими интерес лишь для одного из наших журналов. 7. По оплате авторского гонорара наложить такой порядок, чтобы русские авторы за статьи в Д.Е. получали гонорар в «Электричестве», а немецкие авторы за статьи в «Электричестве» получали гонорар в Д.Е.

Члены редколлегии журнала «Электричество» положительно оценили проявленную немецкими коллегами инициативу и нашли приемлемыми значительную часть предложений о сотрудничестве журналов. Сотрудничество должно быть начато. Члены редколлегии журнала «Электричество» выразили надежду, что редакция журнала «Deutsche Elektrotechnik» при использовании материалов журнала «Электричество» будет иметь в виду большой путь, пройденный советскими специалистами по строительству социалистической экономики, социалистической электрификации народного хозяйства, и на основе этого опыта будет соответственно направлять технические и идеи электротехников молодой Германской Демократической Республики и на решения важнейших электротехнических проблем правильно воспитывать научные и инженерные взгляды и методы в среде немецкой электротехнической общественности, органом которой является «Deutsche Elektrotechnik». Советский Союз и другие социалистические технически развитые страны и в их числе Германская Демократическая Республика помогают друг другу в научном, техническом и экономическом отношениях бескорыстно и действительно дружно.

От имени Государственного энергетического издательства работников «Veb Verlag Technik» и редакции

«Deutsche Electrotechnik» приветствовал А. Д. Смирнов — главный редактор Госэнергоиздата. Он выразил уверенность, что установленный сегодня контакт будет развиваться к пользе обеих сторон. Просмотр номеров «Deutsche Elektrotechnik» позволяет говорить о том, что не только немецкому журналу есть, что позимствовать в журнале «Электричество», но и последний не без пользы сможет использовать многие достижения редакции немецкого журнала по ведению последнего, имея в виду и тематический комплекс, принятый в немецком журнале, и порядок редакционной подготовки материалов, и даже такой внешний элемент редакционной работы над журналом, как удачное сочетание текста и иллюстраций к нему. Наконец, заслуживает быть отмеченным, что немецкому журналу удается в весьма кратких по размеру статьях хорошо, доходчиво излагать смысл темы и идеи автора каждой статьи.

В последующие дни своего пребывания в Москве Н. Васс и В. Киммель поделились с коллективом сотрудников журнала «Электричество» опытом работы редакции журнала «Deutsche Elektrotechnik» и получили, в свою очередь, подробную информацию о практической деятельности редакции журнала «Электричество» на всех стадиях — от момента получения рукописи до сдачи в печать готового номера.

В ТЕХНИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ МЭС

О применении переносных заземляющих заградителей при ремонтах линий электропередачи. Как показывает опыт эксплуатации средств связи, наибольшее число часов простоя высокочастотных каналов по линиям электропередачи вызвано заземлением проводов линий электропередачи у мест производства ремонтных работ. Эти простои при отсутствии резервных проводных каналов связи совершенно недопустимы и должны быть претупреждены. С этой целью на основе изобретения Я. Л. Быховского в 1956 г. Центральной лабораторией ВВС Мосэнерго было разработано устройство, обеспечивающее защитное заземление линии электропередачи без нарушения работы высокочастотных каналов связи и телемеханики. Серийное производство таких переносных заземляющих заградителей освоено в текущем году Электроремонтным заводом Ростозэнерго.

Переносный заземляющий заградитель рассчитан на ток короткого замыкания в 6000 а в течение 2 сек и состоит из катушки индуктивности 4 мГн, намотанной проводом марки ПЭЛ диаметром 1,25 мм в количестве 470 витков и низковольтного купроксного разрядника из пяти пар шайб диаметром 20 мм. Вес заградителя 3,5 кг, размер 170×110×150 мм.

Для времени отключения, отличного от 2 сек, допустимый ток короткого замыкания заградителя определяется

по формуле $I_t = I_2 \sqrt{\frac{2}{t}}$, где t — время действия основ-

ной защиты для места производства работ плюс время выключателя.

В целях сохранения действия каналов высокочастотной связи и телемеханики на время проведения ремонтных работ на линиях электропередачи Техническое управление МЭС в решении № 7/Э от 31 мая 1957 г. предусмотрело, что при ремонтных работах на линиях электропередачи любых напряжений все защитные заземления фаз, к которым подключены каналы высокочастотной связи и телемеханики, должны производиться через переносные заземляющие заградители; в случае же, когда в месте производства работ токи короткого замыкания превышают величину, допускаемую для одного заградителя, в решении рекомендуется параллельное включение двух или более заградителей.

Включение заградителя на месте работ при ремонтах линий электропередачи производится в расщелку заземления тех фаз, на которых работают высокочастотные посты связи и телемеханики. При необходимости наложения заземления в нескольких местах линии ставится соответствующее количество переносных заградителей, причем все они включаются на одну и ту же фазу.

Затухание, вносимое переносным заземляющим заградителем в высокочастотный канал, не менее 0,2 неп в диа-

пазоне частот от 30 до 300 кГц. При работе автоматического регулирования уровня постов в пределах до 2 неп количество заградителей, включенных в канал, может доходить до 10 шт.

Присоединение переносного заградителя к проводу и

заземлению должно производиться в порядке, предусмотренном Правилами техники безопасности для наложения заземлений.

Инж. В. Е. Барков
Техуправление МЭС

В ТЕХНИЧЕСКОМ СОВЕТЕ ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТА

В Техническом совете института «Тяжпромэлектропроект» были рассмотрены доклады Ленинградского проектно-экспериментального отделения о новой системе автоматической стабилизации скорости двигателей при ударной нагрузке и о рациональных схемах электроснабжения прокатных цехов. После выступления Г. М. Левина по первому вопросу была заслушана рецензия Металлургического отдела ГПИ в Москве, а также Харьковского и Ленинградского отделений института. Технический совет констатировал, что выполненные Ленинградским экспериментальным отделением работы по системе стабилизации скорости прокатных двигателей с использованием ионных возбuditелей представляют значительный интерес.

Предложенная схема регулятора скорости хорошо зарекомендовала себя на штрипсовом стане 300 Макеевского металлургического завода и может быть рекомендована к применению при параллельной схеме питания двигателей. Эта схема может обеспечить достаточно высокое быстродействие, которое, однако, будет уступать быстродействию при блочной схеме питания.

Схема параллельного питания двигателей вполне допустима по технологическим требованиям для ряда непрерывных прокатных станов (заготовочных и полосовых станов, черновых клетей проволочных и сортовых станов). Для чистовых клетей сортовых и проволочных станов следует предпочесть блочную схему питания.

Кроме технологических требований, при выборе схемы питания следует учитывать график загрузки двигателей, диапазон регулирования скорости, величину токов короткого замыкания, конструктивные соображения и т. п. Поэтому в каждом конкретном случае должно производиться сопоставление технико-экономических расчетов. При этом, если применение параллельной схемы не дает значительного экономического эффекта, то следует применять блочную схему питания прокатных двигателей.

Для определения параметров регуляторов (чувствительность, быстродействие) и обоснованного выбора схемы питания экспериментальными отделениями института совместно с технологическими организациями (ЦНИИТМАШ, ЦНИИЧЕРМЕТ) будет проведена работа по исследованию технологических требований при непрерывной прокатке на различных станах.

О рациональных схемах электроснабжения прокатных цехов был заслушан доклад Я. М. Бера и рецензии Харьковского, Ленинградского, Ростовского, Свердловского отделений и отделов ГПИ в Москве. Отметив полезность выполненной Ленинградским экспериментальным отделением работы, Технический совет указал на необходимость значительной доработки ряда вопросов, особенно в отношении рекомендаций по выбору способов канализации электроэнергии для питания района прокатных цехов.

Технический совет признал нецелесообразным осуществление самопуска крупных электродвигателей прокатных станов. При наличии АВР крупные двигатели с реакторным или автотрансформаторным пуском должны автоматически отключаться от сети при действии АВР. Допустимость самопуска прочих двигателей прокатного цеха должна определяться в зависимости от местных условий. Рекомендовано широкое применение синхронных двигателей на напряжение 10 кВ при мощности 1500 кВт и более. Признано целесообразным применение в отдельных случаях продольной компенсации реактивной мощности в схемах электроснабжения электроприемников с ударной нагрузкой в прокатных цехах.

Технический совет обратился в МЭС с предложением регламентировать в «Правилах устройства электротехнических установок» или изданием отдельного решения: а) увеличение допускаемых величин колебаний напряжения на шинах подстанций прокатных цехов при применении мощных синхронных двигателей с ударными нагрузками и ионных электроприводов; б) повышение величины допускаемого снижения частоты при питании мощных синхронных двигателей с ударными нагрузками от мало-мощных и изолированных энергосистем. Кроме того, Технический совет считает необходимым облегчить требования Правил в отношении прохождения воздушных линий 35...220 кВ по территории промышленных предприятий (ширина полосы отчуждения, допускаемые приближения, пересечения производственных зданий и внутризаводских коммуникаций и т. п.).

Инж. А. А. Ермилов
Москва



СОВЕТСКОЕ НАЦИОНАЛЬНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ИСТОРИКОВ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

В конце июня с. г. Институт истории естествознания и техники Академии наук СССР на расширенном совещании, в котором приняли участие представители высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов Москвы, Ленинграда, Киева, Тбилиси и других городов, а также авторы работ по истории науки и техники, образовал Советское национальное объединение историков естествознания и техники.

На совещании были заслушаны и обсуждены доклады проф. Н. А. Фигуровского, проф. П. С. Кудрявцева, проф. А. А. Зворыкина и директора Политехнического музея Н. Н. Позднякова.

После принятия положения о Советском национальном объединении историков состоялись выборы Комитета, бюро объединения и руководителей секций. Руководителем секции энергетики и связи избран проф. Л. Д. Белькинд.



А. С. КАСАТКИН и М. А. ПЕРЕКАЛИН. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Издание шестое, заново переработанное. 376 стр., ц. 13 руб. 35 коп. Госэнергоиздат, 1955.

Допущено Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР в качестве учебника для неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений.

Курс изложен в 23 главах. Основному содержанию предпосланы предисловие и введение, а в заключение приведен алфавитный указатель. В главах I—VI рассмотрены основные сведения по линейным и нелинейным электрическим цепям постоянного тока, электромагнетизму и электрическому полю; в главах VII—XIII — по однофазному и трехфазному переменным токам, несинусоидальным переменным токам, нелинейным цепям переменного тока, переходным процессам в электротехнических устройствах и электрическим измерениям; в главах XIV—XVII — по трансформаторам, асинхронным, синхронным и коллекторным машинам; в главах XVIII—XX — по электронным и ионным приборам и аппаратам, элементам электропривода; в главах XXI—XXIII — электрическая аппаратура, сети и подстанции, электрические станции.

Содержание учебника отвечает требованиям программы курса общей электротехники для студентов неэлектротехнических специальностей высших технических учебных заведений, утвержденной МВО СССР, и заслуживает одобрения. Вместе с тем следует отметить ряд недостатков.

В курсе отсутствуют разделы, посвященные автоматизации производства и электротермии, предусмотренные программой. На наш взгляд, добавление этих глав необходимо даже в том случае, если потребуются сокращения материала по другим разделам. Слабо отражены вопросы экономики, например: не приведены сведения о стоимости проводниковых и изоляционных материалов, сравнительной стоимости двигателей постоянного и переменного тока, не указано на экономии проводникового материала, получаемую в трехфазных цепях по сравнению с однофазными, и др. Недостаточно отражены достижения отечественной и зарубежной техники в области электрических машин и полупроводниковых приборов.

Наряду с разделами, изложенными ясно и доходчиво, имеются главы, требующие в дальнейшем переработки. К числу последних относятся главы: XIV — «Трансформаторы», XVI — «Синхронные машины» и XVII — «Коллекторные машины», в которых изложение утратило доходчивость и, кроме того, встречаются неоправданные повторения.

В главе XIV (§ 14-7, стр. 178) введение понятия «приведенный трансформатор». обосновывается удобством построения векторной диаграммы и «возможностью непосредственного сопоставления параметров первичной и вторичной обмоток». Но при этом авторы не указывают на возможность сопоставления, а также расчета различных режимов работы трансформатора и, опуская векторную диаграмму приведенного трансформатора, не подчеркивают, что только у приведенного трансформатора можно складывать напряжения, токи и сопротивления и благодаря этому получить электрическую схему замещения и соответствующую ей смещенную векторную диаграмму (фиг. 14-9). Параграф 14-10 «Опыт короткого замыкания» должен был бы предшествовать § 14-9 «Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке»; в этом случае представилась бы возможность привести важное соотношение

$$\Delta U\% = \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_r \sin \varphi_2).$$

Непоследовательно написана глава XVI «Синхронные машины». В § 16-1 «Основные определения» авторы, излагая принцип действия синхронной машины, преждевременно описывают работу нагруженного генератора, что оказывается неясным для читателя, так как понятие о реакции якоря дается несколько позднее; здесь же рассматривается параллельная работа синхронных генераторов, что совершенно непонятно читателю, совершающему путешествие

шуму к изучению синхронных машин. Эти же вопросы затем вновь рассматриваются более подробно в последующих параграфах.

На стр. 232 неудачно описан переход синхронной машины от генераторного к двигательному режиму. Здесь неоправданно опущены несложные векторные диаграммы, наглядно поясняющие происходящие процессы. Целесообразно вопросы, относящиеся к синхронному двигателю, выделить в отдельный параграф.

Изложение сущности параллельной работы генератора с сетью разбросано на стр. 233 (§ 16-1), стр. 240 (§ 16-6), и стр. 243 (§ 16-8) указанной главы. При этом неизбежные повторения одних и тех же положений приводит в результате к расплывчатому описанию физических явлений.

Приведенная на стр. 241 фиг. 16-17 непонятна, так как ни в тексте, ни в подписи к рисунку не поясняются кривые 1, 2, 3, изображенные на рисунке, что затрудняет понимание важного вопроса о моменте включения генератора на параллельную работу. Не упоминается о широко применяемом включении синхронных машин на параллельную работу с мощной сетью способом самосинхронизации.

В главе XVII — «Коллекторные машины» весьма нечетко описан процесс самовозбуждения генератора постоянного тока. Так, на стр. 266 читаем: «Самовозбуждение продолжается, пока э. д. с. увеличивается быстрее, чем ток возбуждения». Это утверждение непонятно, так как скорость увеличения э. д. с. в процессе самовозбуждения изменяется, снижаясь существенно за точкой перегиба, причем процесс самовозбуждения может продолжаться в зависимости от сопротивления цепи возбуждения. Кроме того, остается неясным, почему процесс самовозбуждения заканчивается при разных э. д. с. и какова при этом роль величины сопротивления цепи возбуждения и скорости вращения якоря. Следовало бы ввести понятие о критическом сопротивлении и при рассмотрении процесса самовозбуждения исходить из уравнения электрического равновесия цепи возбуждения генератора.

Далее сказано: «Когда с увеличением нагрузки этот поток достигнет значения, соответствующего прямолинейнонасыщенной части магнитной характеристики, тогда дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки вызовет вместо увеличения нагрузочного тока уменьшение этого тока и резкое падение напряжения машины». Следовало бы оговорить, что уменьшение тока происходит именно из-за того, что вследствие быстрого саморазмагничивания машины и связанного с этим резкого уменьшения напряжения ток якоря неизбежно начинает уменьшаться.

На стр. 267 неудачно сформулировано положение о токе короткого замыкания генератора с параллельным возбуждением: «Таким образом, режим короткого замыкания не опасен для этого генератора. Однако при переходе к этому режиму коллектор машин может серьезно пострадать от сильного искрообразования при больших перегрузочных токах». При такой трактовке создается противоречивое заключение: с одной стороны, режим короткого замыкания не опасен, а с другой — он опасен. На стр. 273, где говорится о возможном разное двигателя с параллельным возбуждением, не указано, что разнос при обрыве цепи возбуждения возможен при холостом ходе или при незначительной нагрузке. При полной же нагрузке двигатель может сгореть, если защита от тока короткого замыкания его не отключит.

На стр. 279 (фиг. 17-52) приведена, как гласит подпись, «Схема применения электромашинного усилителя в системе генератор—двигатель для поддержания постоянного напряжения на зажимах двигателя». Однако по схеме не получится за счет воз-

действий задающей обмотки и отрицательной обратной связи по напряжению; очевидно, что характер изменения его будет периодический — типа автоколебаний. Для подавления их следовало бы показать третью обмотку электромашинного усилителя со стабилизирующим устройством. Тогда бы схема соответствовала приписываемым ей свойствам.

Неудовлетворительно изложен вопрос о выборе и расчете сечений проводов и кабелей по допускаемой потере напряжения и по нагреву. В книге не даны требования, предъявляемые к электропроводам, а также порядок выбора сечений проводов и плавких предохранителей к ним. Не указано, в каких случаях следует производить расчет сечений проводов на нагрев и в каких по допускаемой потере напряжения. Неясно сформулировано назначение плавких предохранителей (§ 1-11, стр. 29): «Плавкий предохранитель должен надежно защищать провода установок от опасной перегрузки». Следовало бы указать, что плавкие вставки предохранителей размыкают электрические цепи установок при возникновении тока перегрузки сверх допускаемого предела и тока короткого замыкания, и упомянуть о том, что в настоящее время в вопросе защиты сетей низкого напряжения промышленных установок, административных и жилых помещений проектные организации ориентируются на преимущественное применение автоматов перед предохранителями.

Опыт преподавания показывает, что студенты, изучив этот раздел по учебнику, не могут самостоятельно произвести необходимые расчеты.

Считаем необходимым сделать ряд замечаний, касающихся неудачных или неточных формулировок, встречающихся в учебнике.

Неудачно сформулирован первый закон Кирхгофа (§ 2-1, стр. 30): «... в любом узле сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла». В примитивном понимании «токи направленные» к данному узлу могут быть токами других узлов, поэтому ниже читаем: «Не следует забывать, что в каждое уравнение, выражающее первый закон Кирхгофа, входят токи только тех ветвей, которые сходятся в одном каком-либо узле, а не токи всех ветвей данной цепи». Последнее замечание оказалось бы излишним при общепринятой формулировке первого закона Кирхгофа и не вызвало бы сомнения о токах, входящих в уравнения.

Далее в расчете сложной цепи (стр. 31) замечание о том, что «Число уравнений, которое можно составить по первому и второму законам Кирхгофа, всегда больше числа неизвестных токов, равного числу ветвей цепи», не является строго математической постановкой задачи, хотя физическое содержание каждого уравнения имеет конкретный смысл. Следовало бы указать, что система уравнений должна быть линейнонезависимой, а это требование удовлетворяется, если уравнения написаны для независимых узлов и контуров сложной цепи. Здесь и в других методах

расчета сложных цепей необходимо привести метод баланса мощностей для проверки правильности расчета токов.

В § 7-3 (стр. 76) дано неудачное и нестрогое определение среднего значения переменной величины: «Средним значением всякой переменной величины за какой-нибудь промежуток времени называется такая постоянная величина, произведение которой на указанный промежуток времени равно интегралу данной переменной величины за тот же промежуток времени». Это — следствие из известного определения:

$$v_{cp} = \frac{1}{b-a} \int_a^b y dx.$$

Нет необходимости приводить его словесно, а следует непосредственно воспользоваться указанным соотношением, приведя геометрическую интерпретацию среднего значения синусоидально изменяющейся величины.

При определении постоянной времени τ (§ 5-7, стр. 64) необходимо добавить — электромагнитная, так как известно, что в общем случае в электрической машине различают электромагнитную, электромеханическую и постоянную времени нагрева.

В главе XX на стр. 328 читаем: «На щитке большинства электродвигателей указывается в качестве их номинальной мощности так называемая длительная мощность». Это неточно. Необходимо было дать понятие также номинальной мощности двигателей, предназначенных для кратковременного и повторно-кратковременных режимов работы тем более, что эти режимы в этом же параграфе рассматриваются.

Для активизации самостоятельной работы студентов необходимо в учебнике привести список основной литературы, которая может быть использована для углубленного изучения отдельных разделов курса. Учитывая, что студенты заочного обучения также пользуются этим учебником, желательно раздельно, трудно поддающиеся усвоению, иллюстрировать численными примерами.

После устранения указанных недостатков рецензируемая книга А. С. Касаткина и М. А. Перекалина может рассматриваться как один из основных учебников для высшей школы.

Настоящая рецензия составлена коллективом кафедры общей электротехники Уральского политехнического института им. Кирова.

М. Г. Резин, Г. П. Кропачев, Л. В. Бурде,
С. В. Сергеев, Г. Ф. Семенов, И. Г. Осыховский,
Я. И. Дробинин, Э. К. Кочнев, Р. Н. Милайкина,
Е. И. Парамонова, М. Н. Лихачев

г. Свердловск

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Анго М. А. ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ. Пер. с франц. В. М. Скобелева под ред. А. И. Грибанова. 81 стр., ц. 2 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Боголюбов Н. Н. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ. 9 стр. На англ. яз. Москва.

Волобуев Л. Н. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ. 67 стр., ц. 85 коп. Ивановск. кн. изд.

Ершов И. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИЙ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЕЙ 94 стр., ц. 4 руб. Трансжелдориздат.

Залесский А. М. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. 540 стр., ц. 18 руб. Госэнергоиздат.

Иоффе А. Ф. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. 2-е испр. и доп. изд. 491 стр., ц. 20 руб. Академиздат.

Кауфман М. С. и Янкин Г. М. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. Под ред. Р. А. Ниландера. Ч. 1. 262 стр., ц. 6 руб 10 коп. Госэнергоиздат.

Кржижановский Г. и Вейц В. ЕДИНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СССР. 62 стр., ц. 1 руб. 50 коп. На англ. и франц. языках. Изд.-во иностр. литературы.

Кузнецов М. И. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Учебн. пособие для техн. училищ. Под ред. С. В. Страхова, 5-е изд., переработ. 423 стр., ц. 7 руб. 5 коп. Трудрезервиздат.

Левшин В. Л. ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ. 48 стр., ц. 80 коп. Академиздат.

Мезенцев В. А. АТОМ И АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ Изд. 3-е, переработ. 200 стр., ц. 3 руб. 10 коп. Воениздат.

Овчинников Н. Ф. ПОНЯТИЕ МАССЫ И ЭНЕРГИИ В ИХ ИСТОРИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ И ФИЛОСОФСКОМ ЗНАЧЕНИИ 184 стр., ц. 5 руб. 65 коп. Академиздат.

Остерман Л. А. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ И ТРИОДАХ. 34 стр., ц. 1 руб. 20 коп. Моск. Дом научно-техн. пропаганды.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ. Под общ. ред. Р. Ши. Пер. с англ. под ред. А. В. Красилова. 288 стр., ц. 15 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. 184 стр., ц. 2 руб. 35 коп. Сельхозгиз.

ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (ВЛ) ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ И СБЛИЖЕНИИ С ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ СВЯЗИ И СИГНАЛИЗАЦИИ 8 стр., ц. 35 коп. Госэнергоиздат.

Пресс Ф. П. ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ. 32 стр., ц. 65 коп. Госкультпросветиздат.

Радченко Л. А. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ. РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ. 272 стр., ц. 5 руб. 95 коп. Гостехиздат УССР.

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОДСТАНЦИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Сборник статей. Пер. с франц. под ред. Л. И. Двоскина. 31 стр., ц. 1 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Саакян А. Е. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ, ПРОВОДОВ И ШНУРОВ С РЕЗИНОВОЙ И ПОЛИХЛОРВИНИЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. 240 стр., ц. 5 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

Семеновский П. МИРНЫЙ АТОМ. АТОМНАЯ ТЕХНИКА В СССР И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ. На англ. яз. 95 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Изд. ин. лит. (то же на франц. яз.)

ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Переводы статей под ред. Р. Л. Райнеса. 32 стр., ц. 1 руб. 90 коп. Госэнергиздат.

Толстов Г. П. КУРС МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА. Изд. 2-е, т. 1. 551 стр., ц. 11 руб. 40 коп. Гостехиздат.

Фатеев Е. М. ВЕТРОДВИГАТЕЛИ И ВЕТРОУСТАНОВКИ. 2-е переработ. изд. 536 стр., ц. 9 руб. 25 коп. Сельхозгиз.

Фатеев Е. М. ВЕТРОДВИГАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Изд. 2-е доп. и переработ. 323 стр., ц. 12 руб. Машгиз.

Шугайлин А. В. ВЫДАЮЩИЙСЯ ФИЗИК — МАТЕРИАЛИСТ П. Н. ЛЕБЕДЕВ. 175 стр., ц. 7 руб. Изд. АН УССР.

Терно О. К. ВОПРОС О РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ. 19 стр., ц. 60 коп. Изд. Таллинского политехн. института.

ТРУДЫ МЭИ им. МОЛОТОВА. ВЫП. 28. 359 стр., ц. 12 руб. 75 коп. Госэнергиздат.

Чернобровов Н. В. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. УЧЕБН. ПОСОБИЕ ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ. 496 стр., ц. 11 руб. 35 коп. Госэнергиздат.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МГНИТИЗМ. Под ред. Г. С. Ландсберга. Изд. 2-е, переработ. 448 стр., ц. 9 руб. 95 коп. Гостехиздат.

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА 380 кВ В ШВЕЦИИ. СБОРНИК СТАТЕЙ И ДОКЛАДОВ. Перевод под ред. А. Б. Крикунчика. Вып. 2. АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. ТРАНСФОРМАТОРЫ. 100 стр., ц. 6 руб. Госэнергиздат.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕЛЕЙ. Пер. с англ. (Материалы комиссии по атомной энергии США). 458 стр., ц. 35 руб. 90 коп. Изд. иностр. лит.

Язынин Н. А. ОПЫТ РАБОТЫ САРАТОВСКОЙ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ. 70 стр., ц. 1 руб. 70 коп. Коммуноиздат РСФСР.



ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСЕЙ АВТОРАМИ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

1. Размер статьи не должен превышать 0,5 авт. листа (12 стр. машинописного текста через 2 интервала с 5—6 рис.).

2. Оригинал статьи представляется в одном экземпляре (первом с машинки), отпечатанном через два интервала, с полями 4—5 см.

Оригинал должен быть тщательно проверен и подписан автором (цитаты заверяются подписью автора особо каждая, с указанием точного источника). Ниже подписи автор проставляет свою фамилию, полностью имя и отчество, домашний адрес, место работы, занимаемую должность, телефон.

3. Примененные автором обозначения вписываются им на отдельном листе с указанием: 1) что символ обозначает, 2) какого алфавита буква, 3) строчная или заглавная; аналогичное пояснение делается и в отношении индексов.

4. Формулы отчетливо вписываются от руки чернилами выделенными строками, а не в строках текста. Таблицы не должны быть громоздкими; все наименования в них проставляются полностью.

5. При вписывании букв, индексов, символов и других знаков следует соблюдать правильные их начертания во избежание смешения сходных изображений: заглавных и строчных букв (С и с, К и к, О и о, S и s, U и u, V и v и др.), букв, трудно различимых в рукописи (e и l, I и J, g и q, n и u, v и v (греч.), x и χ (греч.), d и a (греч.) ε, ζ и др.

Заглавные (прописные) буквы рекомендуется подчеркивать карандашом двумя черточками снизу

(например, O), а строчные — сверху. 0 (ноль) не подчеркивать. Греческие буквы — заключать в кружки цветным карандашом.

6. Нумерация сноска к тексту, ссылок на литературу, ссылок на рисунки выполняется раздельно в порядке собственной последовательности в тексте.

Библиографический указатель (Литература) составляется в следующем порядке: а) для журналов — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название статьи (иностранный в русском переводе), название журнала, часть или том (для журналов не имеющих счета томов, — номер), страница начала статьи, год издания; б) для книг — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), заглавие книги, ссылка на страницы, наименование издательства (для иностранных изданий — место издания), год издания.

7. Иллюстрации должны быть перечислены в специальной описи. На обороте каждого рисунка автор должен указать свою фамилию и номер, соответствующий ссылке в тексте.

8. Пометки и надписи, относящиеся к графическому материалу, должны быть сделаны вне площади рисунка.

9. Условные обозначения в площади рисунка должны быть краткими и общеупотребительными.

10. Фотоснимки должны быть отпечатаны на белой глянцевой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей. Главный предмет съемки не должен сливаться с фоном или подавляться последним.

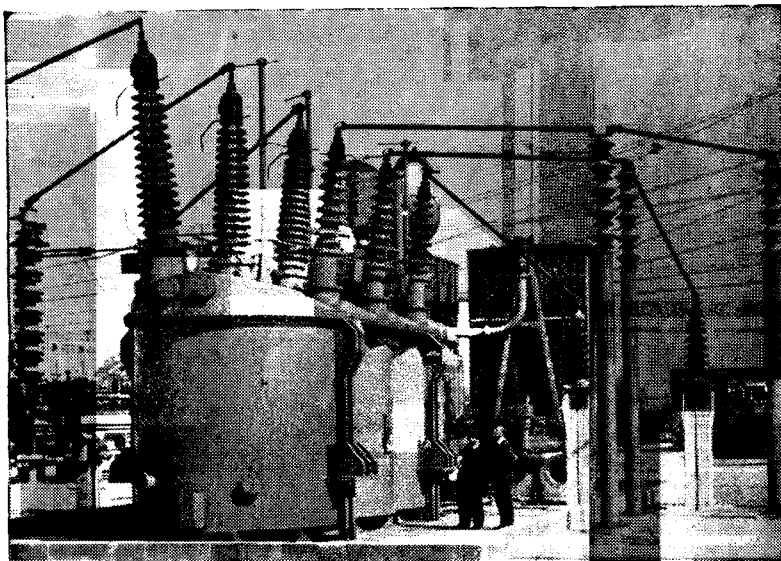
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Бутневич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников** (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин.**

Адрес редакции: Москва К-12, Б. Черкасский пер., д. № 2. Телефон: К 4-24-80.

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт, почтовый ящик № 648.



Трансформаторы и Распределительство

Один из двух трансформаторов «Инглиш Электрик» 132/274 кв. 120 000 квт. на электростанции «Дракедаун» Центрального Энергоуправления, соединяющий две линии единой британской системы электропередач.

Трансформаторы

Благодаря непрерывному прогрессу в области исследования и развития фирма «ИНГЛИШ ЭЛЕКТРИК» вносит много заметных вкладов по усовершенствованию трансформаторов для линий передач в странах всего мира, с постоянно увеличивающимся напряжением до 420 кв. и выше, когда это требуется.

В эксплуатации находятся многие большие трансформаторы фирмы, напряжением до 275 кв. Ниже приводятся примеры новых заказов: первые британские трансформаторы 330 кв. для Австралии; группа генераторных повысительных трансформаторов 240 000 квт, 330 кв. для гидроэлектростанции в Карибском ущелье в Федерации Родезии и Ниазаланда; генераторные трансформаторы для первых турбогенераторов 200 000 квт. единой британской системы 275 кв.

По последнему заказу фирма «Инглиш Электрик» закончила поставку в СССР двенадцати трехфазных трансформаторов 115 кв. по 200 000 и 31 500 квт.

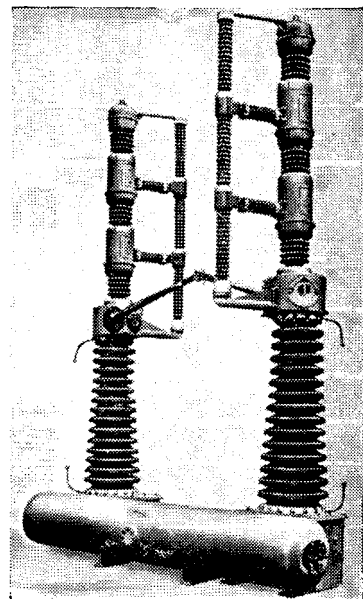
Кроме таких больших трансформаторов для линий электропередачи фирма изготавливает трансформаторы и для местных распределительных сетей, а также различные типы трансформаторов для промышленного и другого применений.

Воздушные выключатели

Во всех наружных воздушных выключателях «Инглиш Электрик» применяются стандартные узлы разрывов. Эта серия типов выключателей производится на номиналы от 132 кв., 2500 мвт. (с 2-мя разрывами на фазу) до 330 кв., 10 000 мвт. (с 6-ью разрывами на фазу).

Преимущества такой узловой конструкции выключателей следующие:

- Упрощенное обслуживание и эксплуатация благодаря одинаковой технологии и устройству для всех напряжений.
- Экономия в запасных частях — благодаря стандартизации.
- Конструкция выключателей более высокого напряжения из деталей, испытанных долгим опытом при более низких напряжениях.
- Номинал короткого замыкания испытан на отдельных узлах разрывов.



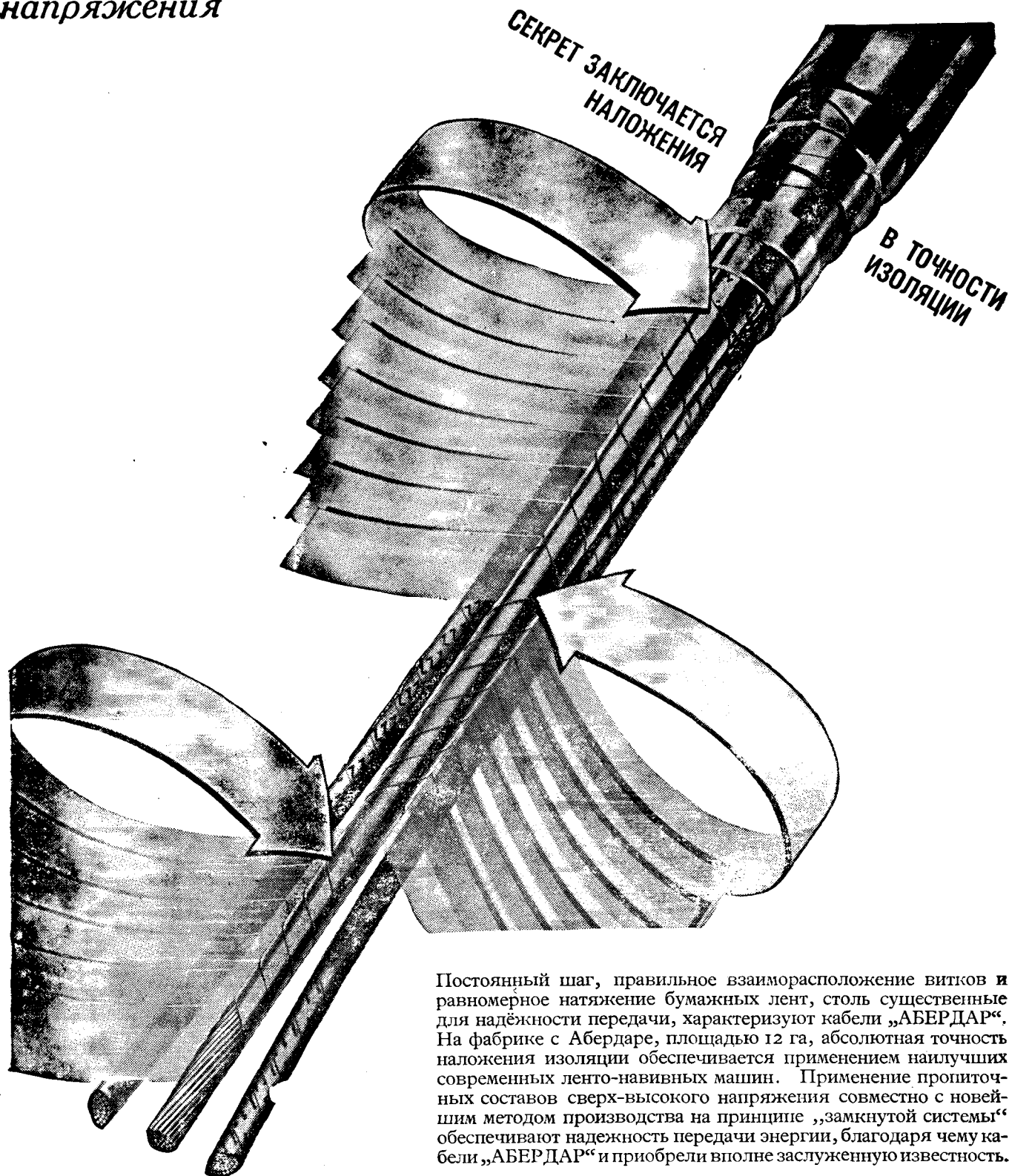
Одна фаза 3-х фазного воздушного выключателя 752-330 кв. 7500-10 000 мвт, с шестью разрывами на фазу серии высоковольтных выключателей «Инглиш Электрик», в которых использованы стандартные разрывы и другие стандартизированные детали.

'ENGLISH ELECTRIC'

Цена 8 руб.

37

Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения



Aberdare Cables

ABERDARE CABLES LIMITED • NINETEEN WOBURN PLACE • LONDON • АНГЛИЯ

Вологодская областная универсальная научная библиотека
Фабрика: Aberdare, Glam., South Wales.
www.booksite.ru