

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1964

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

1

СОДЕРЖАНИЕ

<p>И. Г. Муратов — Массовая электрификация — основа реконструкции железнодорожного транспорта . . .</p> <p>М. Н. Розанов — О выборе экономически целесообразной пропускной способности дальних электропередач в послеаварийном режиме</p> <p>Г. М. Павлов и В. В. Кантан — К вопросу о точности решения задачи наиболее выгодного распределения активных нагрузок</p> <p>К. И. Кожевников — Рациональные параметры электропривода металлорежущих станков с программным управлением</p> <p>В. А. Яковенко и С. П. Калинин — Способы повышения коммутационной надежности двигателей прокатных станов</p> <p>А. С. Майкопар — Грозоупорность высоковольтных воздушных линий электропередач</p> <p>К. А. Смирнов — Метод фиксированных параметров и метод базисных относительных приростов для расчета экономичного режима энергосистемы</p> <p>В. А. Карасев — Расчет динамических режимов электромагнитов</p> <p>М. И. Столбун — Магнитоупругие датчики для измерения механических усилий</p> <p>Е. Н. Гришин, Н. Ф. Ильинский и И. П. Копылов — Определение спектра гармоник намагничивающей силы несимметричных обмоток</p> <p>Н. Д. Анисимова, В. И. Соколов и Хамди Эль-Шаир — Устранение самовозбуждения синхронных машин путем подмагничивания ярма статора</p> <p>М. М. Акодис и С. М. Кацнельсон — Ионный преобразователь повышенной частоты</p> <p>А. С. Сандлер и Л. Я. Шапиро — Переходные процессы в вентильно-машинных каскадах</p> <p>Б. А. Константинов — О применении математических методов при нормировании потребления электроэнергии в промышленности</p> <p>А. Б. Ослон — О зависимости сопротивления заземления от размеров заземлителя</p>	<p>1</p> <p>8</p> <p>10</p> <p>18</p> <p>24</p> <p>28</p> <p>35</p> <p>39</p> <p>45</p> <p>47</p> <p>50</p> <p>54</p> <p>59</p> <p>66</p> <p>69</p>	<p>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</p> <p>И. П. Сиуда — Диаграммы потерь и к. п. д. линии электропередачи переменного тока</p> <p>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</p> <p>К вопросу о межгосударственном обмене электроэнергией в западноевропейских странах — Д. С. Арэни</p> <p>СТАНДАРТЫ И НОРМЫ</p> <p>Б. Л. Канер — Правила защиты от статического электричества в химической промышленности</p> <p>ДИСКУССИИ</p> <p>О содержании и преподавании курса «Теоретические основы электротехники». Об улучшении электротехнического образования в высших электротехнических учебных заведениях — П. А. Ионкин. Некоторые вопросы построения курса ТОЭ — А. А. Янко-Триницкий. О режиме нейтрали в электрических распределительных сетях — И. М. Сирота; Л. Д. Наумовский и Я. А. Цирель; З. И. Клебанов, А. Ф. Каменский и С. И. Бойчук; Д. И. Ио-зефавичус; Б. С. Шулов</p> <p>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</p> <p>Напряженность магнитного поля на оси катушки с осевой симметрией (коническая и цилиндрическая катушки)</p> <p>К измерению мощности методом Арона</p> <p>ХРОНИКА</p> <p>Профессор С. А. Ульянов</p> <p>БИБЛИОГРАФИЯ</p> <p>Новые книги Госэнергоиздата</p>	<p>71</p> <p>73</p> <p>77</p> <p>81</p> <p>91</p> <p>93</p> <p>94</p> <p>94</p> <p>95</p>
--	---	---	---

CONTENTS

<p>Extensive Electrification as the Basis for Reconstruction of Railway Transport — P. G. Muratov</p> <p>On Selecting the Economical Transfer Capacity of Long-distance Transmission Lines After Fault Clearance — M. N. Rozanov</p> <p>On How Accurately the Best Real Load Distribution is Determined — G. M. Pavlov, V. V. Kantan</p> <p>Rational Parameters of the Motor Drive for Program Controlled Cutting Machines — K. I. Kozhevnikov</p> <p>Means of Increasing the Reliability of Commutation in Rolling Mill Motors — V. A. Yakovenko, S. P. Kalinichenko</p> <p>Surgeproof Characteristics of High-voltage Overhead Transmission Lines — A. S. Maikopar</p> <p>The Method of Fixed Parameters and the Method of Base Incremental Rates for Calculating Economic Operating Conditions of a Power System — K. A. Smirnov</p> <p>Calculation of Electromagnet Dynamics — V. A. Karasev Magnetically Elexible Sensors for Measuring Mechanical Forces — M. I. Stolbun</p>	<p>1</p> <p>8</p> <p>10</p> <p>18</p> <p>24</p> <p>28</p> <p>35</p> <p>39</p> <p>45</p>	<p>Determining the Harmonic Spectrum for the Magnetizing Force in Unsymmetrical Windings — E. N. Grishin, N. F. Ilyinski, I. P. Kopylov</p> <p>Eliminating Self-excitation of Synchronous Machines by Magnetizing the Stator Yoke — N. D. Anisimova, V. I. Sokolov, Hamdi El-Shair</p> <p>A High-frequency Electronic Converter — M. M. Akodis, S. M. Katsnelson</p> <p>Transients in Machine Units with Rectifiers — A. S. Sandler, L. J. Shapiro</p> <p>About application of mathematical methods in rating of industrial energy consumption — B. A. Konstantinov</p> <p>How the Grounding Resistance Depends of the Dimensions of the Ground Rods — A. B. Oslon</p> <p>FROM OPERATING EXPERIENCE</p> <p>IN OTHER ENGINEERING JOURNALS</p> <p>STANDARDS AND CODES</p> <p>DISCUSSION</p> <p>NOTES AND LETTERS</p> <p>CHRONICLE</p> <p>BIBLIOGRAPHY</p>	<p>47</p> <p>50</p> <p>54</p> <p>59</p> <p>66</p> <p>69</p> <p>71</p> <p>73</p> <p>77</p> <p>81</p> <p>91</p> <p>94</p> <p>95</p>
---	---	--	---



УДК 621.331

Массовая электрификация — основа реконструкции железнодорожного транспорта

Кандидат техн. наук П. Г. МУРАТОВ,
заместитель Министра путей сообщения СССР

Бурное развитие народного хозяйства Советского Союза вызывает быстрый, непрерывный рост перевозок. Основную, подавляющую их часть выполняет железнодорожный транспорт. В минувшем году грузооборот наших железных дорог достиг невиданной в мировой практике величины — около одного триллиона семисот миллиардов тонна-километров. Это почти половина общего грузооборота стальных магистралей всего мира.

Для того чтобы справиться со столь огромным грузопотоком, нам необходимо было наряду со строительством новых железных дорог в самые короткие сроки провести коренную реконструкцию существующих линий. Требовалось решить, на какой основе проводить реконструкцию. Это была весьма сложная технико-экономическая задача. Здесь мало чем мог помочь накопленный за рубежом опыт. В развитых капиталистических странах Европы главная ставка делалась на электрификацию железных дорог, а в США предпочтение отдавалось дизельной тяге. На выбор той или иной основы реконструкции транспорта там влияли местные условия, а самое главное — капиталистический способ производства, конкурентная борьба монополий. Поэтому использовать зарубежный опыт надо было весьма и весьма критически.

Проведенные технико-экономические расчеты и исследования убедительно показали, что у нас, в СССР, наибольший эффект могло дать только рациональное сочетание двух прогрессивных видов тяги — электрической и тепловозной.

Электрифицировать выгодно, в первую очередь, наиболее важные, самые грузонапряженные линии, а также участки дорог с крутыми подъемами. Капиталовложения, на которые приходится идти при электрификации, в данном случае особенно эффективны и очень быстро окупаются. На дорогах со сравнительно небольшой грузонапряженностью целесообразнее заменить паровозы дизельными локо-

мотивами, что требует меньших первоначальных затрат. Правда, в дальнейшем с ростом перевозок зачастую оказывается выгодным электрифицировать и многие из этих линий.

XX-й съезд КПСС наметил твердый курс коренной технической реконструкции железнодорожного транспорта, основой которой стала массовая электрификация дорог и широкое внедрение прогрессивной дизельной тяги. По инициативе Н. С. Хрущева в феврале 1956 года Центральный Комитет КПСС и Совет Министров СССР приняли Генеральный план электрификации железных дорог. Этот план, рассчитанный на 15 лет (1956—1970 гг.) предусматривает перевод на электрическую тягу 40 тыс. км важнейших железных дорог.

Генеральный план сейчас успешно претворяется в жизнь. За восемь лет электрифицировано около 15 тыс. км стальных магистралей. Теперь их общая длина превысила 20 тыс. км. Это намного больше, чем в США, Франции, Англии и ФРГ, вместе взятых. По протяженности электрифицированных железнодорожных линий Советский Союз прочно занимает первое место в мире. В минувшем году на участках с электрической тягой выполнена одна треть общего грузооборота. На долю электровозов и тепловозов приходится более 70 проц. всех перевозок. Уже недалеко то время, когда устаревшие малозкономичные паровозы будут заменены полностью современными локомотивами.

За последние годы в нашей стране вступили в строй действующих крупнейшие в мире электрифицированные железнодорожные магистрали. На электрическую тягу переведено все движение поездов на важнейшем участке Великого Транссибирского пути от Москвы до Байкала длиной в 5,5 тыс. км. Год тому назад пущена другая крупнейшая электрифицированная линия длиной 3,5 тыс. км, связавшая Ленинград с Ленинканом. Электрифицированы все железнодорожные под-

№ 28166

ходы к Москве, многие участки на Украине и в Заполярье, на Урале и в Закавказье, в Сибири и на Дальнем Востоке.

Электрификация железных дорог ведется в нашей стране невиданно быстрыми темпами. Ежегодно на электрическую тягу переводятся участки, общая длина которых превышает 2 000 км. В дальнейшем эта цифра будет непрерывно увеличиваться.

Чтобы достигнуть таких темпов, необходимо было создать соответствующую производственную базу, подготовить кадры, внедрить принципиально новые методы и приемы работ, наладить массовый серийный выпуск сложного электротехнического оборудования, электровозов и электропоездов. Эта поистине грандиозная работа была проделана в очень короткий срок.

Сооружены специальные заводы, выпускающие в год многие десятки тысяч железобетонных опор контактной сети с предварительно напряженной арматурой; организованы специализированные монтажные поезда, которые легко можно передвигать с одного участка на другой; сконструированы и широко используются высокопроизводительные механизмы для рытья котлованов под опоры и других массовых трудоемких операций, выполнявшихся ранее вручную.

Тяговые подстанции, посты секционирования контактной сети и другие объекты системы энергоснабжения строятся по типовым проектам, предусматривающим широкое использование сборно-разборных конструкций, изготовляемых на специализированных заводах. Новые прогрессивные методы строительства и монтажа контактной сети позволяют производить часть работ без перерыва движения поездов, что на грузонапряженных линиях имеет особенно большое значение.

На промышленных предприятиях было резко увеличено производство контактных проводов, тросов, ртутно-выпрямительных агрегатов, тяговых трансформаторов, быстродействующих выключателей, множества других электрических машин, аппаратов и приборов. Большая часть из них была усовершенствована на основе последних достижений современной техники.

Производство электровозов в 1963 г. по сравнению с 1955 г. возросло по количеству втрое, а по мощности — в четыре раза. Теперь в СССР ежегодно выпускается значительно больше магистральных электровозов, чем всеми крупнейшими фирмами таких государств, как США, Англия, Франция, ФРГ, Италия и Япония, вместе взятыми.

Ни одна из этих стран не может конкурировать с Советским Союзом и в постройке электропоездов для пригородных перевозок пассажиров.

Массовая электрификация и широкое внедрение тепловозной тяги потребовали перестройки всех основных отраслей железнодорожного хозяйства. Для того чтобы успешно можно было использовать мощные, быстроходные электрические и дизельные локомотивы, пришлось значительно усилить рельсовую колею, мосты и другие сооружения, удлинить пути на станциях, ввести новые, более совершенные средства управления движением поездов, реконструировать депо, оснастить их сложным современным оборудованием. Гораздо более высокие требо-

вания стали предъявляться и к вагонам, потому что резко увеличились скорости движения, удлинились участки безостановочного следования подвижного состава.

Новая техника не могла быть полностью использована без коренной перестройки организации перевозочного процесса, ломки устаревших порядков и традиций. Электрификация и внедрение дизельной тяги позволили значительно удлинить участки образования локомотивов, то-есть участки, по которым они следуют без отцепки от составов; сократить количество стоянок, требовавшихся ранее для заправки паровозов водой и топливом; сосредоточить тяговые средства в меньшем числе депо, хорошо их оснастить, ввести агрегатно-узловой метод ремонта машин и на этой основе резко поднять производительность труда людей, занятых выполнением ремонтных операций. Одновременно была проведена перестройка транспортной индустрии. Заводы транспорта в короткий срок освоили капитальный ремонт сложных электрических локомотивов и наладили массовый выпуск запасных частей для них.

Значительно изменился энергетический баланс транспорта. Если в 1955 г. железные дороги потребляли всего 5,5 млрд. квт·ч, то в минувшем году почти 21 млрд. квт·ч — около пяти процентов общей выработки энергии в стране. Затраты энергии на тягу поездов увеличились в пять раз. Удельный же расход на измеритель перевозочной работы — 10 тыс. тонна-километров брутто из года в год снижается. По сравнению с 1955 г. в прошлом году он сократился на 15 проц. Это результат упорной борьбы железнодорожников за бережливое, высокоэффективное использование энергетических ресурсов. Важным источником экономии энергии является широкое применение рекуперативного торможения на электрифицированных линиях, проходящих в горной и холмистой местности, где электровозы при движении по спускам возвращают энергию в контактную сеть. Только за один 1963 г. благодаря рекуперации сбережено более 110 млн. квт·ч.

Электрификация железных дорог — составная, неотъемлемая часть осуществления грандиозного ленинского плана сплошной электрификации страны. Еще при составлении плана ГОЭЛРО В. И. Ленин неоднократно запрашивал специалистов о целесообразности электрификации железнодорожных линий. Он мечтал об электрических сверх-магистральных, сочетающих дешевизну перевозок с чрезвычайной провозоспособностью, которые пересекут всю страну. Эта мечта сейчас сбывается.

Сооруженные при электрификации железных дорог линии передачи, а также тяговые подстанции стали надежным источником энергоснабжения как транспортного хозяйства, так и прилегающих районов. Появилась возможность закрыть множество небольших неэкономичных электростанций и обеспечить дешевой энергией из мощных энергосистем огромное число предприятий железных дорог, промышленности, а также совхозов и колхозов. Только за период с 1956 по 1963 гг. на транспорте было закрыто более 700 мелких электростанций. В 1963 году тяговые подстанции отпустили нетранспортным потребителям более 4 млрд. квт·ч.

На некоторых электрифицированных участках железных дорог районные нагрузки, подключенные к подстанциям, даже превышают тяговые. Кроме того, для питания энергией линейных железнодорожных потребителей, расположенных на перегонах и промежуточных станциях, а также механизмов, машин и инструментов, применяющихся при ремонтно-путевых работах, на опорах контактной сети прокладываются специальные 3-х и 2-х проводные линии электропередачи напряжением в 10 и 27,5 кв. В дальнейшем они могут быть использованы и для подключения сельскохозяйственных потребителей. Таким образом перевод железных дорог на электрическую тягу в значительной мере способствует созданию широкоразветвленной сети линий электропередачи, без чего нельзя решить важнейшую задачу — задачу сплошной электрификации страны.

Электрическая тяга обладает высокой технико-экономической эффективностью. Как правило, капиталовложения окупаются за два — три года, а на самых грузонапряженных линиях значительно быстрее.

В результате замены паровозов электрическими локомотивами только за последние пять лет на эксплуатационных расходах сэкономлено более 2 млрд. руб., свыше 140 млн. т угля.

Электрификация позволила значительно поднять скорости движения и веса поездов. Электровозы, благодаря большой мощности и перегрузочной способности, вводят составы значительно большего веса и с большей скоростью, чем паровозы и тепловозы. Например, электровоз ВЛ60 ведет состав по расчетному подъему в два с лишним раза большей скоростью, чем тепловоз ТЭ-3. Резко сокращается и простои поездов на станциях. Все это дает возможность быстрее доставлять грузы и пассажиров, выиграть время и получать огромный народнохозяйственный эффект.

Но это еще не все. Повышение скорости и веса поездов обеспечивает значительное увеличение пропускной и провозной способности железных дорог. Так, благодаря электрификации Транссибирской магистрали ее провозная способность повысилась более чем в два раза. Таким образом, при переводе на электрическую тягу, с точки зрения повышения провозной способности, получается почти такой же эффект, как при строительстве новой линии. Электрификация отодвигает необходимость строительства параллельных железнодорожных линий, укладки вторых и третьих путей и тем самым уменьшаются издержки народного хозяйства на развитие транспорта.

Каждый электровоз, как правило, заменяет собой два — три паровоза. Кроме того, электрический локомотив обслуживают не три, а два лица. В результате потребность в локомотивных бригадах сокращается на 60—65 проц. Еще в большей мере уменьшается потребность в персонале, занятом на ремонте тяговых средств и экипировочных работах. Все это дает возможность резко поднять производительность труда железнодорожников и одновременно улучшить условия их работы. Уходят в прошлое такие тяжелые профессии, как паровозный котелник, шлакоуборщик, промывальщик котлов и т. д.

Широкое использование на электрифицированных линиях комплекса электрических механизмов и инструментов позволит устранить также тяжелый ручной труд при ремонтно-путевых работах, затрачивать гораздо меньше времени на их выполнение.

Иными словами, с переходом на электрическую тягу труд железнодорожников массовых профессий становится физически более легким, интересным и производительным.

Нельзя сбрасывать со счетов и тот факт, что электрические локомотивы в отличие от паровозов зимой, при сильных морозах, работают более устойчиво. В нашей стране, в районах с суровыми климатическими условиями, это особенно важно. Ведь при паровой тяге в зимнее время зачастую приходится идти на снижение веса поездов. Это приводит к уменьшению провозной способности железных дорог, вызывает затруднения в продвижении грузопотока.

Внедряя в широких масштабах электрическую тягу и получая благодаря этому большие экономические выгоды, железнодорожники неустанно ищут все новые и новые резервы снижения как капитальных вложений, так и эксплуатационных расходов, чтобы достигнуть еще большего эффекта.

До последних лет электрификация железных дорог велась у нас на постоянном токе при напряжении в контактной сети 3000 в. Сравнительно невысокое напряжение при огромных грузопотоках, а, следовательно, и токовых нагрузках требовало подвески проводов очень большого суммарного сечения, затраты значительного количества цветных металлов и, прежде всего, меди. Перед учеными и специалистами была поставлена задача найти пути резкого сокращения расхода медных проводов на каждый километр электрифицируемых линий, чтобы при тех же ресурсах дефицитного металла можно было электрифицировать больше железных дорог.

Проведенные технико-экономические исследования убедительно показали, что наибольший эффект может дать применение новой прогрессивной системы электрической тяги на однофазном переменном токе промышленной частоты. В принципе это был тот же путь, что и использование глубоких вводов высокого напряжения в промышленности. При переменном токе преобразовательная подстанция как бы переносится на сам электровоз и высокое напряжение — 27,5 кв — подводится непосредственно к потребителю энергии.

Расчеты свидетельствовали о том, что в наших условиях применение электрической тяги на переменном токе промышленной частоты позволит вдвое сократить расход меди, в два-три раза уменьшить число тяговых подстанций и на 10—15 проц. удешевить стоимость электрификации железных дорог. Благодаря возможности постоянного параллельного соединения тяговых двигателей и плавной регулировки их вращающего момента использование переменного тока позволяло создать локомотивы с лучшими тяговыми свойствами, обладающие при тех же габаритах и том же весе большей мощностью.

Однако для того, чтобы можно было внедрить новую систему электрической тяги, необходимо было решить целый комплекс весьма сложных технических проблем. Прежде всего потребовалось создать принципиально новые электровозы.

На локомотивах нельзя было устанавливать недостаточно надежные, очень тяжелые ртутно-выпрямительные агрегаты с откачкой воздуха, которые применялись на тяговых подстанциях линий постоянного тока. Нужны были новые, гораздо более надежные и компактные преобразователи. В результате большого труда коллектива работников Всесоюзного электротехнического института имени В. И. Ленина такие преобразователи — запаянные игнитроны — были созданы. Их производство освоил сначала опытный завод института, а затем в массовых количествах Таллинский и Ставропольский заводы.

Новочеркасские электровозостроители, применив эти выпрямители, в содружестве с работниками многих других предприятий промышленности создали первые опытные электровозы серии ВЛ61 (раньше они назывались НО — Новочеркасский однофазный).

Для практической проверки новой системы электрической тяги в 1956—1957 гг. был электрифицирован опытный участок Ожерелье — Михайлов — Павелец протяжением 137 км. На этом участке в эксплуатационных условиях были исследованы и испытаны все главные элементы прогрессивной системы электрической тяги на переменном токе промышленной частоты: электровозы, устройства энергоснабжения и новые устройства связи, сигнализации, централизации и блокировки, необходимые для управления движением поездов.

При переменном токе для устранения мешающих электромагнитных влияний все воздушные линии связи, проложенные вблизи полотна железной дороги, приходится каблировать или заменять радиорелейными. При этом значительно повышается пропускная способность и надежность связи. Реконструируются и устройства автоблокировки, централизации стрелок. Они переводятся на питание током повышенной частоты — 75 гц.

На опытном участке Ожерелье — Павелец была решена еще одна важная проблема — проблема стыкования линий переменного тока с существующими участками, работающими на постоянном токе. В Ожерелье впервые была сооружена автоматическая станция стыкования участков переменного и постоянного тока.

Новая система электрической тяги успешно выдержала первый экзамен. После всестороннего обсуждения перспектив внедрения этой системы, в которой приняли участие крупнейшие ученые и специалисты, при активной поддержке Академии наук СССР, было принято решение: важнейший грузонапряженный участок Транссибирской магистрали Мариинск — Зима длиной в 1 222 км электрифицировать на переменном токе.

Использовать новшество на важнейшей магистрали значило привлечь к нему особое внимание, а, следовательно, быстрее решить все сложные проблемы, довести до эксплуатационно надежного состояния весь комплекс устройств, скорее дать пу-

тевку в жизнь прогрессивной системе электротяги, избежать в дальнейшем строительства большого числа дорогостоящих стыковых пунктов, создать лучшие условия для высокопроизводительной эксплуатации локомотивов.

Электрификация линии Мариинск — Зима была проведена в очень короткий срок — за два года. При этом были разработаны и проверены на практике новые методы расчета и проектирования системы энергоснабжения на переменном токе, внедрены современные, типовые конструкции устройств контактной сети и тяговых подстанций, прогрессивная технология строительных и монтажных работ. На промежуточных тяговых подстанциях на стороне высшего напряжения впервые были применены вместо масляных выключателей отделители и короткозамыкатели. Это позволило не только удешевить строительство подстанций, но и повысить надежность их работы, поскольку сократилось число маслозаполненных аппаратов.

На станциях Мариинск и Зима, где к электрифицируемой линии примыкали ранее существовавшие участки, работавшие на постоянном токе, были сооружены уникальные пункты стыкования двух систем электрической тяги. Подобных устройств нет нигде в мире. Смонтированные здесь специальные переключающие устройства позволяют подавать на отдельные секции контактной сети либо постоянный, либо переменный ток. Эти устройства заблокированы с системой управления стрелками и сигналами таким образом, что при подготовке маршрута автоматически производится переключение контактной сети и обеспечивается невозможность попадания локомотивов под несоответствующее их типу напряжение. Опыт показал, что такие стыковые станции практически не снижают пропускной способности железнодорожной линии, обеспечивая беспрепятственный пропуск большого количества поездов.

Одновременно с разработкой новых устройств энергоснабжения был создан и новый электровоз серии ВЛ60. Этот шестиосный грузовой локомотив развивает часовую мощность 4 140 кВт и может следовать со скоростью до 100 км в час. Удельный расход металла на единицу мощности у электровоза ВЛ60 составляет 33,3 кг на 1 кВт, а у серийного локомотива постоянного тока ВЛ8 — 44 кг.

Несмотря на все трудности, которые пришлось преодолеть в период освоения новой техники, система электрической тяги на переменном токе успешно выдержала испытание в условиях грузонапряженной магистрали с трудным профилем пути и очень суровыми климатическими условиями. Так, на практике было доказано, что эта система может быть применена на любой другой линии, что она может и должна стать главной, основной при дальнейшей электрификации наших железных дорог.

Сейчас на переменном токе промышленной частоты уже электрифицировано около 4 500 км стальных магистралей — больше, чем в любой другой стране. В дальнейшем электрификация будет проводиться главным образом на переменном токе. Постоянный ток применяется только на отдельных, сравнительно небольших участках, непосред-

венно примыкающих к существующим линиям, где сооружение дополнительных пунктов стыкования связано с удорожанием работ и усложнениями в эксплуатации. Уже в 1964 г. более чем на 80 проц. всех электрифицируемых линий будет применена эта прогрессивная система электрической тяги.

К концу 1970 г. на переменном токе должно быть электрифицировано свыше 20 тыс. км дорог. Если учесть, что на каждом километре благодаря внедрению новшества в среднем удастся сберечь около трех тонн меди, то можно подсчитать, что более половины этих линий будут переведены на электрическую тягу за счет использования сбереженного металла. Экономия может быть еще большей, если в контактной сети вместо сталемедных и медных несущих тросов применить сталеалюминиевые, а на станционных путях и некоторых ветках подвешивать не медные, а сталемедные контактные провода. К сожалению, промышленные предприятия и прежде всего Магнитогорский метизно-металлургический завод, несмотря на специальные решения по этому вопросу, недопустимо медленно осваивают технологию производства таких проводов и тросов.

За последние годы многое сделано для дальнейшего совершенствования всех звеньев новой системы электрической тяги. На тяговых подстанциях широко применяются открытые распределительные устройства 27,5 и 110 кВ бесфундаментного типа, что дает большую экономию металла и бетона. Благодаря внедрению комплектных распределительных устройств 10 кВ для наружной установки появилась возможность строить здания тяговых подстанций еще меньшей кубатуры. Значительный эффект дает бестраншейная укладка кабелей на подстанциях. Разработаны и внедряются малообъемные фидерные масляные выключатели, допускающие значительно большее число отключений при коротких замыканиях без смены масла. В результате отпадает надобность в сооружении на тяговых подстанциях обходных шин и устройств масляного хозяйства. Созданы также образцы вакуумных фидерных выключателей и выключателей мощности, позволяющих отключать секции контактной сети под нагрузкой до 600 а.

Проделана большая работа по совершенствованию электровозов переменного тока. На них теперь устанавливаются более мощные выпрямительные агрегаты с последовательным соединением вентиляей, что дает возможность резко сократить количество обратных зажиганий и обеспечить более надежную работу локомотивов. Разработана и сейчас доводится система рекуперативного торможения на электровозах переменного тока.

Начат также выпуск более мощных восьмиосных локомотивов переменного тока серии Н80. Этот самый мощный в мире локомотив развивает часовую мощность в 6480 кВт и может водить большегрузные составы со скоростью до 110 км в час. Удельный расход металла на единицу мощности у электровоза ВЛ80 составляет всего 28,4 кг на 1 кВт.

Налажено массовое производство пригородных электропоездов переменного тока с полупроводни-

ковыми кремниевыми выпрямителями серии ЭР-9. Поезд состоит из пяти моторных и пяти прицепных вагонов. Максимальная их скорость — 130 км в час, среднее ускорение — 0,6 м/сек², суммарная мощность силовых выпрямительных установок — 4000 кВт. Серийный выпуск столь мощного моторвагонного подвижного состава переменного тока с полупроводниковыми выпрямителями организован впервые в мировой практике.

Сейчас уже такие электропоезда работают на Горьковском железнодорожном узле, а в ближайшее время они поступят на пригородные участки, проходящие в районах Красноярска, Владивостока, Ростова-на-Дону, Минска и некоторых других крупных промышленных и административных центров страны. В дальнейшем электропоезда будут состоять из более длинных вагонов, с большим числом мест и дверей, что позволит ускорить посадку и высадку пассажиров, уменьшить стоянки у пригородных платформ, на станциях и благодаря этому быстрее доставлять пассажиров к месту назначения.

В стране выпускаются электровозы с полупроводниковыми кремниевыми выпрямителями. Эти локомотивы имеют более высокий к. п. д. и коэффициент мощности. Они более надежны и удобны в работе, особенно в зимнее время. При их эксплуатации благодаря отсутствию системы водяного охлаждения не требуется перед отправлением в рейс терять время на подогрев выпрямителей.

Теперь задача состоит в том, чтобы в самый короткий срок организовать выпуск кремниевых выпрямителей в таких количествах и такого качества, чтобы впредь все строящиеся электровозы переменного тока оборудовались только этими преобразователями. Такими же вентилями необходимо в ближайшее время оснастить весь парк локомотивов, выпущенных с игнитронами.

Следует форсировать освоение производства управляемых силовых полупроводниковых выпрямителей, что даст возможность широко применять рекуперативное торможение.

На ряде электрифицированных участков вместо сооружения дорогостоящих стыковых станций целесообразно использовать электровозы двойного питания, способные развивать полную мощность как на линиях переменного, так и постоянного тока. В частности, эти локомотивы могут быть использованы для безостановочного пропуска через стыковые станции пассажирских поездов, следующих на дальние расстояния. Большой эффект они дадут и на линиях, электрифицированных на переменном токе, к которым примыкают небольшие участки, ранее переведенные на электротягу постоянного тока. Необходимо, чтобы электровозостроительные заводы быстрее приступили к выпуску таких электровозов.

Сейчас, когда электрические локомотивы выпускаются в небывало больших количествах, когда значительно увеличилась интенсивность их использования, особо важное значение приобретает обеспечение надежной долговечной работы всех их узлов, деталей и увеличение междуремонтных пробегов. Для этого предприятия, строящие электро-

подвижной состав, должны неустанно совершенствовать технологию производства, использовать современные, прогрессивные материалы. Прежде всего надо улучшить коммутацию и повысить износостойчивость узлов тяговых двигателей. Опыт, накопленный зарубежными фирмами, показывает, что при изготовлении коллекторов из меди с небольшой присадкой серебра пробег электровозов без обточки двигателей увеличивается в 5—7 раз. В результате срок службы тяговых моторов на много возрастает, что с лихвой окупает затраты незначительного количества ценного металла. Необходимо также повысить точность сборки двигателей и тщательность обработки коллекторов, что дает возможность упростить коммутацию почти на один балл.

На тяговых двигателях, работающих в очень тяжелых условиях, до сих пор устанавливаются щетки, не удовлетворяющие современным требованиям.

Вопрос о создании и массовом изготовлении высококачественных щеток — это вопрос первоочередной важности. От его решения во многом зависит устойчивость, надежность работы электроподвижного состава железных дорог.

Претворение в жизнь принятых на декабрьском пленуме ЦК КПСС решений о дальнейшем развитии химической промышленности и широком использовании химических продуктов в народном хозяйстве позволит уже в ближайшем будущем значительно шире использовать в электровозостроении, при выпуске различных аппаратов и приборов для тяговых подстанций, при сооружении контактной сети новые прогрессивные синтетические материалы: кремнеорганическую изоляцию, масло- и морозостойкую резину, различные пластмассы и т. д. Это даст возможность повысить надежность и долговечность устройств электрической тяги, снизить их стоимость.

Большой эффект дает автоматизация энергопитающих устройств электрифицированных железных дорог и перевод их на телеуправление. В настоящее время подавляющее большинство тяговых подстанций оборудовано фидерной и агрегатной автоматикой, на многих из них осуществляется программное управление, при котором ртутновыпрямительные агрегаты включаются и отключаются по заранее установленной программе, учитывающей периодические изменения нагрузки.

На пяти тысячах километрах электрифицированных линий внедрено телеуправление тяговыми подстанциями, постами секционирования и разъединителями контактной сети. Благодаря телеуправлению появилась возможность отказаться от содержания на тяговых подстанциях постоянного дежурного персонала и перейти к дежурству на дому. В результате удалось высвободить и использовать на других работах большое число квалифицированных специалистов.

На некоторых тяговых подстанциях линий, электрифицированных на переменном токе, в виде опыта сделан еще один шаг в этом направлении. Здесь полностью упразднен постоянный обслуживающий персонал, и подстанции закрыты на замок. Профилактический же осмотр, ремонт оборудования и

устранение неисправностей производятся специализированными разъездными бригадами.

Телеуправление не только позволяет сократить обслуживающий персонал и связанные с его содержанием расходы, но и создает условия для более быстрого и маневренного управления энергоснабжающими устройствами. Появляется возможность значительно уменьшить время, на которое снимается напряжение с контактной сети для производства ремонтно-реvisionsных работ. На линиях с очень густым движением поездов это имеет особенно важное значение.

В системе телеуправления, разработанной сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, широко использованы современные бесконтактные полупроводниковые и магнитные элементы, а в последнее время применен прогрессивный печатный монтаж. Эта система обеспечивает надежное управление из одного пункта всеми устройствами энергоснабжения на электрифицированных участках длиной до 180—200 км.

Электрифицированные железнодорожные линии непосредственно связаны с энергосистемами. Поэтому повышение надежности, эффективности и экономичности устройств электрической тяги достигается также путем совершенствования первичных энергоснабжающих устройств: электростанций, районных подстанций, линий электропередачи.

За последние 13 лет средний коэффициент полезного действия тепловых электростанций, благодаря широкому внедрению мощных турбогенераторов, котлов высокого давления и других новшеств, увеличился по абсолютной величине более чем на 7 проц. В результате общий к. п. д. электрической тяги только за счет этого поднялся на 4—5 проц.

Дальнейшее развитие энергетической базы, внедрение на тепловых электростанциях высокоэкономичных агрегатов мощностью 300, а затем 500 и более тыс. квт, создание единой энергетической системы страны, в которую наряду с тепловыми будут входить гидравлические и атомные электростанции, обеспечит еще больший рост к. п. д. электрической тяги. Это значит, что станет экономически выгодным электрифицировать значительно менее грузонапряженные линии, чем сейчас.

Кстати и теперь экономия на эксплуатационных расходах при электрической тяге могла быть значительно выше, если бы тарифы на электрическую энергию, отпускаемую энергосистемами, достаточно были обоснованы. Железнодорожники считают совершенно неправильным, когда в таких энергосистемах, как Иркутская, Куйбышевская и некоторых других тариф на электроэнергию для тяги поездов в 3—4 раза превышает ее себестоимость. Ведь на электрифицированных дорогах затраты на энергию составляют до 15 проц. общих эксплуатационных расходов. Следовательно, искажается истинная эффективность электрической тяги.

Для претворения в жизнь задач, поставленных в Генеральном плане электрификации железных дорог, предстоит еще выполнить огромный объем работ, причем темп их должен с каждым годом нарастать. В ближайшие два года на электрическую тягу будут полностью переведены такие важные

линии, как Москва — Свердловск, Москва — Мичуринск — Воронеж — Ростов-на-Дону, Донбасс — Киев — Львов и некоторые другие. Электровозы придут на смену дизельным локомотивам на грузонапряженной линии Сызрань — Пенза — Поворино. В недалекой перспективе электрические локомотивы поведут поезда из Караганды к Магнитогорску, будет продолжена электрификация Транссибирской магистрали от Слюдянки в сторону Читы и далее на Восток.

Впервые в нашей практике контактные провода подвешиваются одновременно со строительством железной дороги. Речь идет о линии, которая должна связать кратчайшим путем Кузбасс с Тайшетом. В дальнейшем эта электрифицированная магистраль пойдет к Братску. Намного увеличится и протяженность пригородных электрифицированных линий. Новые совершенные средства сообщения получат многие крупные промышленные и административные центры страны.

В Программе нашей партии, принятой на XXII съезде КПСС, предусматривается проведение дальнейшей реконструкции железнодорожного транспорта на основе массовой электрификации. Массовая электрификация — это не только перевод важнейших магистралей на электрическую тягу, но и широкое внедрение электричества во все многочисленные отрасли транспортного хозяйства. Изобилие дешевой электрической энергии позволит в значительных масштабах использовать на предприятиях транспорта высокопроизводительные инструменты, механизмы, машины, новые прогрессивные технологические процессы, механизировать и автоматизировать все трудоемкие работы. Рост энерговооруженности железнодорожников будет способствовать резкому увеличению производительности труда, то-есть решению главной задачи, поставленной нашей партией, в период создания материально-технической базы коммунизма.

[14.11.1963]



В связи с поступившими просьбами, Президиум Центрального совета Всесоюзного общества изобретателей и рационализаторов, Государственный комитет тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения при Госплане СССР, Государственный комитет по машиностроению при Госплане СССР и Государственный комитет по электротехнике при Госплане СССР решили продлить срок Всесоюзного конкурса на лучшее предложение по замене и экономии цветных металлов в электротехнической и машиностроительной промышленности (см. «Электричество», 1963, № 8) до 1 июня 1964 г.

О выборе экономически целесообразной пропускной способности дальних электропередач в послеаварийном режиме

Кандидат техн. наук М. Н. РОЗАНОВ

Москва

Пропускная способность дальних электропередач, связывающих мощные станции (ГЭС или ТЭС) с приемной системой, в нормальных режимах работы выбирается с таким расчетом, чтобы выдавать всю избыточную мощность станции при определенном запасе статической устойчивости (не менее ~15%). Динамическая устойчивость таких электропередач, как показывают многочисленные исследования, может быть повышена до уровня статической устойчивости в послеаварийном режиме применением автоматического регулирования возбуждения сильного действия и другими способами.

Пропускная способность электропередач, выполненных по связанной схеме (рис. 1), в послеаварийном режиме — отключение одной цепи на любом из участков также определяется с учетом необходимого запаса статической устойчивости (порядка 5%), а при наличии продольной компенсации и пропускной способностью последней. Желание повысить пропускную способность в послеаварийном режиме обуславливает в значительной степени сооружение переключательных пунктов и установок продольной компенсации (УПК), включаемых на этих пунктах.

Однако необходимость обеспечения в послеаварийном режиме такой же пропускной способности, как и в нормальном, хотя и при сниженном запасе устойчивости, как правило, нельзя считать обоснованной. Очевидно, в послеаварийном режиме передаваемая мощность может быть снижена на величину резерва активной мощности в приемной энергосистеме.

Отключение генераторов на передающей станции в аварийных режимах уже нашло практическое применение, хотя используется в основном как средство обеспечения устойчивости динамических переходов. На электропередаче Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС — Москва это позволило отказаться от установки системы электрического торможения на шинах станции и установки поперечной емкостной компенсации на промежуточной подстанции.

Таким образом, снижение пропускной способности дальних электропередач в послеаварийных режимах вполне допустимо. При этом экономически может оказаться целесообразным пойти даже на некоторое ограничение потребителей, если это позволит значительно снизить расходы на средства повышения пропускной способности электропередачи.

Настоящая статья излагает методику технико-экономических расчетов, на основании которых

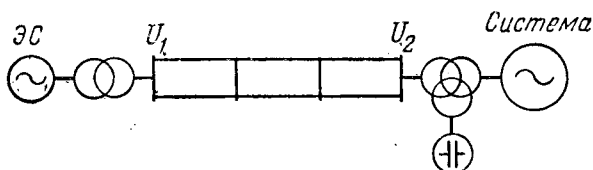


Рис. 1. Связанная двухцепная электропередача.

должна выбираться необходимая пропускная способность электропередач в послеаварийном режиме.

Оптимальный вариант должен выбираться путем сопоставления вариантов с различной пропускной способностью по условию минимума расчетных затрат. Запишем выражение для расчетных затрат:

$$Z = K(p_n + p_a) + I_{\Delta A} + U, \quad (1)$$

где p_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

p_a — отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание;

K — дополнительные капиталовложения в средства повышения пропускной способности;

$I_{\Delta A}$ — ежегодные расходы на покрытие потерь энергии в средствах повышения пропускной способности электропередач;

U — математическое ожидание народнохозяйственного ущерба в приемной энергосистеме от перерывов электроснабжения обусловленных снижением мощности на приемном конце линии в послеаварийных режимах.

Расчет K и $I_{\Delta A}$ выполняется известными методами и затруднений не вызывает.

Определение математического ожидания народнохозяйственного ущерба приближенно можно выполнить следующим образом.

Пусть при аварийном отключении одного из участков электропередачи (рис. 1) мощность на приемном конце линии снижается до $P_{п.ав}$. Относительная вероятная длительность такого режима будет равна:

$$q = n_q \cdot T_q \cdot \frac{l}{100} \cdot \frac{1}{8760}, \quad (2)$$

где n_q — число аварий в год на 100 км линии;

T_q — длительность аварийного ремонта;

l — длина участка линии.

Дефицит мощности в системе будет тогда, когда мощность нагрузки больше суммы мощностей генераторов системы $P_{сист}$ и на приемном конце линии $P_{п.ав}$. Если бы такой режим существовал целый год, то недоотпущенная энергия была бы равна площади F_A , заштрихованной на рис. 2. Так как вероятность этого режима равна q , то математическое ожидание недоотпущенной электроэнергии составит:

$$A = F_A \cdot q. \quad (3)$$

Укажем, что F_A можно приближенно вычислить по формуле

$$F_A = \frac{[P_{\max} - (P_{сист} + P_{п.ав})] T_{ав}}{2}. \quad (4)$$

И, наконец, математическое ожидание народнохозяйственного ущерба от перерывов электроснабжения получится умножением найденной величины

недоотпущенной электроэнергии на средний удельный ущерб c_y на предприятиях, ограничиваемых при дефиците мощности в энергосистеме:

$$Y = A \cdot c_y. \quad (5)$$

Пример. Параметры связанной двухцепной электропередачи:

$$\begin{aligned} l &= 900 \text{ км}; & b_0 &= 3,88 \cdot 10^{-6} \text{ снм/км}; \\ U_n &= 500 \text{ кВ}; & n_q &= 0,2 \text{ раз/год}; \\ x_0 &= 0,294 \text{ ом/км}; & T_q &= 24 \text{ ч}. \end{aligned}$$

Мощность на приемном конце линий в нормальном режиме равна 2000 Мвт. Мощность приемной системы тоже равна 2000 Мвт. График нагрузки потребителей приемной системы представлен на рис. 2. Максимум нагрузки системы составляет 3750 Мвт, т. е. резерв мощности в системе около 7%. Средний удельный ущерб от перерывов электроснабжения равен 0,1 руб/квт·ч.

На генераторах передающей станции и синхронных компенсаторах приемной системы предполагаются установленными АРВ сильного действия, обеспечивающие постоянно напряжение в начале и в конце линии. Кроме того, предполагается наличие специальных средств повышения динамической устойчивости, обеспечивающих устойчивость динамических переходов всегда, когда послеаварийный режим статически устойчив.

Предел статической устойчивости в нормальном режиме, определенный из постоянства напряжений по концам линии ($U_1=525 \text{ кВ}$, $U_2=500 \text{ кВ}$), равен 2320 Мвт. Соответствующий коэффициент запаса—16%. Пропускная способность в послеаварийном режиме—отключение одной цепи на одном из участков—определялась по пределу статической устойчивости с коэффициентом запаса 5%. При отсутствии каких-либо специальных средств повышения пропускной способности $P_{п.ав}$ составляет 1100 Мвт.

Рассматривалось повышение пропускной способности с помощью переключательных пунктов (табл. 1) и установок продольной компенсации УПК (табл. 2) с включением последней как непосредственно в линию, так и на переключательном пункте¹. В указанных таблицах приведены пропускная способность в послеаварийном режиме, а также сопротивление каждой из УПК и суммарная мощность конденсаторов УПК.

На рис. 3 показаны необходимые капиталовложения в средства повышения пропускной способности электропередачи—переключательные пункты и УПК. Капиталовложения подсчитывались по числу выключателей при стоимости одного выключателя $K_v^0 = 250 \text{ тыс. руб.}$ и мощности батарей статических конденсаторов при стоимости 1 Мва—5 тыс. руб. Число выключателей определялось в соответствии со схемами переключательных пунктов, представленными на рис. 4.

Так как наименьших капиталовложений (рис. 3) требует повышение пропускной способности за счет сооружения пере-

¹ Применение неполнофазных режимов для повышения пропускной способности в послеаварийных режимах здесь не рассматривалось, хотя и могло бы дать значительный экономический эффект.

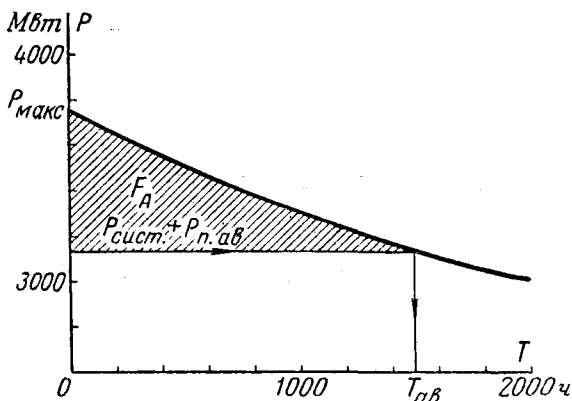


Рис. 2. Годовой график нагрузки по продолжительности.

Вар.	Схема электропередачи	$P_{п.ав}$, Мвт
I		1100
II		1470
III		1660
IV		1760

Таблица 2

Вар.	Схема электропередачи	$X_{упк}$, ом	$Q_{упк}$, Мва	$P_{п.ав}$, Мвт
V		40	520	1280
		80	1500	1530
		120	3440	1890
VI		20	910	1690
		40	2590	2010
VII		20	320	1610
		40	640	1800
		60	960	2040
VIII		20	320	1830
		40	640	2050

ключательных пунктов, то варианты схем с УПК далее не рассматриваются.

Для четырех вариантов схем в 1 табл. были найдены расчетные затраты. В данном случае выражение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$Z = n \cdot K_v^0 \cdot (p_n + p_a) + Y, \quad (6)$$

где n —общее число выключателей на переключательных пунктах.

Зависимость народнохозяйственного ущерба от величины мощности, передаваемой в послеаварийном режиме, представ-

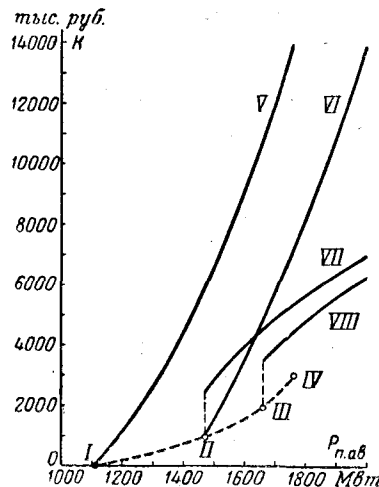


Рис. 3. Капиталовложения в средства повышения пропускной способности линии для вариантов, приведенных в табл. 1 и 2.

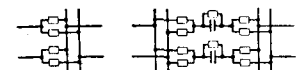


Рис. 4. Схемы переключательных пунктов.

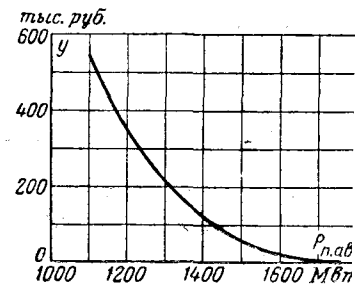


Рис. 5. Зависимость математического ожидания народнохозяйственного ущерба от пропускной способности электропередачи в послеаварийном режиме.

лена на рис. 5. Ущерб определялся по методу, изложенному выше, при

$$q = n_q \cdot T_q \cdot \frac{2l}{100} \cdot \frac{1}{8760} =$$

$$= 0,2 \cdot 24 \cdot \frac{2 \cdot 900}{100} \cdot \frac{1}{8760} = 9,85 \cdot 10^{-3}.$$

Результаты определения расчетных затрат и их отдельных составляющих для вариантов электропередачи I—IV сведены в табл. 3.

Таблица 3

Вариант	$n \cdot K_B^0 (p_H + p_a)$, тыс. руб.	$У$, тыс. руб.	$З$, тыс. руб.
I	—	550	550
II	190	80	270
III	380	10	390
IV	570	—	570

Примечание. В расчетах принято $p_H = 0,125$, $p_a = 0,065$.

Из табл. 3 видно, что наименьшие расчетные затраты имеет вариант электропередачи с одним переключательным пунктом. Его пропускная способность в послеаварийном

режиме равна 1470 Мвт, что составляет 73% от мощности, передаваемой в нормальном режиме. Этот вариант является экономически наивыгоднейшим.

В рассмотренном случае вариант с одним переключательным пунктом остается наивыгоднейшим и даже при вдвое большей величине удельного ущерба от перерывов электроснабжения.

Выводы. 1. Требование, чтобы пропускная способность дальних электропередач в послеаварийных режимах была такой же, как и в нормальном режиме, экономически необоснованно.

2. Пропускная способность дальних электропередач в послеаварийном режиме должна выбираться, исходя из минимума расчетных затрат, куда войдут затраты на повышение пропускной способности и народнохозяйственный ущерб от перерывов электроснабжения потребителей приемной энергосистемы.

3. Повышение пропускной способности дальних электропередач типа рассмотренной в примере в послеаварийных режимах целесообразно осуществлять за счет сооружения переключательных пунктов.

[6.4.1963]



УДК 621.311.1

К вопросу о точности решения задачи наивыгоднейшего распределения активных нагрузок

Кандидат техн. наук Г. М. ПАВЛОВ и кандидат техн. наук В. В. КАНТАН

Ленинград

Введение. Задача наивыгоднейшего распределения активных нагрузок трудна, так как оптимальное распределение нагрузок — функция исключительно большого числа факторов. Поэтому абсолютно точное решение этой задачи, даже с применением счетно-решающих машин, практически невозможно, и на практике пользуются приближенными методами расчета. Применение их оправдано еще и тем, что по мере приближения к абсолютному оптимуму дальнейшее повышение точности расчетов значительно усложняет методику решения задачи, но не дает существенного экономического эффекта.

При приближенном решении возникает необходимость оценки допустимых погрешностей и их влияния на конечный результат — перерасход топлива в энергосистеме.

Этому вопросу пока уделяется недостаточное внимание [Л. 1—3], несмотря на то, что он представляет исключительный интерес и играет существенную роль при выборе средств для решения поставленной задачи.

Неправильная оценка допустимых погрешностей иногда приводит к неверному утверждению — «чем точнее, тем лучше» и как следствие такого подхода делается вывод, что с достаточной точностью задача наивыгоднейшего распределения нагрузок может быть решена только с применением цифровых машин, в то время как аналоговые

машины непригодны для этих целей. Здесь не учитывается, что точность решения задачи зависит не только от методики решения и погрешности решающей техники, но и от погрешности исходных данных, а эта последняя является одной из главных.

Применение приближенного вычисления (в первую очередь это относится к вычислению частичных удельных потерь σ) дает основание некоторым авторам утверждать, что сам метод относительных приростов применим лишь для наивыгоднейшего распределения нагрузок между агрегатами всего одной станции, а между станциями он непригоден [Л. 4 и 5], причем это утверждение делается без какого-либо анализа, а только лишь со ссылкой на неточность определения σ различными способами.

В настоящей статье рассматривается влияние погрешности на перерасход топлива в энергосистеме и делается попытка оценить их при решении поставленной задачи.

Рассмотрим систему уравнений:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_H; \quad (1)$$

$$\frac{\delta_1}{1 - \sigma_1} = \frac{\delta_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{\delta_n}{1 - \sigma_n} = \delta_0; \quad (2)$$

$$\delta_n = f(P_n); \quad (3)$$

$$\sigma_n = \frac{\partial P_{\text{пот}}}{\partial P_n}, \quad (4)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n — мощности станций;
 P_H — нагрузка системы, включая потери в сети;
 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — частичные удельные расходы станций;
 δ_0 — частичный удельный расход балансирующей точки;
 σ_n — частичные удельные потери n -й станции;

Уравнение (1) выражает техническое требование баланса активных мощностей в системе; уравнения (2) — (4) — условия наивыгоднейшего режима работы.

Проанализируем, как сказывается погрешность в решении отдельных уравнений на перерасход топлива в энергосистеме.

Для простоты анализа предположим, что с погрешностью определяется всего лишь одна величина, а другие находятся абсолютно точно.

Погрешность в определении удельного расхода станции δ . Возьмем простейший случай, когда две станции работают на общую нагрузку, и выясним, каким образом влияет погрешность в определении δ на перерасход топлива в целом на обеих станциях.

Эта погрешность зависит от ряда других погрешностей: погрешности расчетной характеристики $\Delta\delta_{\text{хар}}$, погрешности воспроизведения этой характеристики на счетно-решающей машине $\Delta\delta_{\text{воспр}}$, погрешности за счет неточного решения уравнения (2) и погрешности в определении σ .

Так как нас интересует перерасход топлива в функции погрешности частичного удельного расхода, то безразлично, какими составляющими определяется эта погрешность. Пусть $\Delta\delta_{\text{воспр}} = \Delta\delta_{\text{реш}} = \Delta\delta_0 = 0$, тогда

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{\text{хар}}. \quad (5)$$

В целях дальнейшего упрощения можно считать $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, т. е. рассмотреть такой случай, когда поправками на потери $\frac{1}{1-\sigma}$ можно пренебречь.

Наивыгоднейший режим объективно существует. Для его нахождения необходимо оперировать абсолютно точными характеристиками $\delta = f(P)$. Будем называть эти характеристики действительными.

При расчете наивыгоднейшего режима по действительным характеристикам (сплошные линии на рис. 1) распределение суммарной нагрузки P_H определится точками 1 и 2 с значениями частичных удельных расходов $\delta_{1H} = \delta_{2H}$ и мощностями P_{1H} и P_{2H} .

Если вместо действительной характеристики $\delta = f(P)$ на одной из станций, например второй, в расчете используется характеристика с погрешностью $\Delta\delta_2$ (так называемая расчетная характеристика), то распределение суммарной нагрузки будет другим. Вторая станция уменьшит, а первая — увеличит свои мощности по сравнению с наивыгоднейшей на величины ΔP_2 и ΔP_1 .

Поскольку предполагается, что баланс мощностей соблюдается абсолютно точно, то

$$-\Delta P_2 = \Delta P_1 = \Delta P.$$

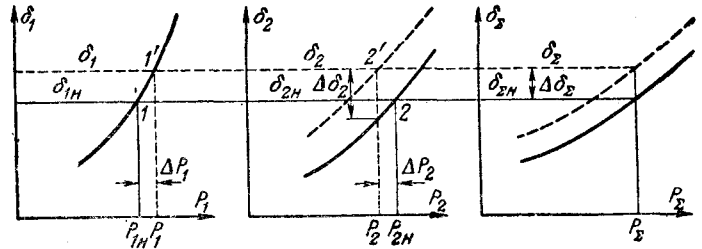


Рис. 1. Влияние погрешности в характеристике на распределение нагрузок.

При отклонении от наивыгоднейшего режима изменение часового расхода топлива на каждой станции определяется уравнением

$$\Delta B_1 = \int_{P_{1H}}^{P_{1H} + \Delta P_1} \delta_1 dP \quad \text{и} \quad \Delta B_2 = \int_{P_{2H}}^{P_{2H} + \Delta P_2} \delta_2 dP \quad (6)$$

или

$$\Delta B_1 = \int_0^{+\Delta P} \delta_1 dP \quad \text{и} \quad \Delta B_2 = \int_0^{-\Delta P} \delta_2 dP. \quad (7)$$

Участок характеристики $\delta = f(P)$ между точками с мощностями P_H и $P_H + \Delta P$ с достаточной точностью можно считать линейным.

В этом случае уравнение участка характеристики может быть записано в следующем виде:

$$\delta = \delta_H + \delta' \Delta P, \quad (8)$$

где δ_H — величина частичного удельного расхода при значении мощности P_H ;

$\delta' = \frac{d\delta}{dP}$ — крутизна характеристики.

При этом изменение расхода топлива на каждой станции найдется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_1 &= \int_0^{+\Delta P} (\delta_{1H} + \delta'_1 \Delta P_1) dP = \delta_{1H} \Delta P + \frac{1}{2} \delta'_1 \Delta P^2 \\ \text{и} \\ \Delta B_2 &= \int_0^{-\Delta P} (\delta_{2H} + \delta'_2 \Delta P_2) dP = -\delta_{2H} \Delta P + \frac{1}{2} \delta'_2 \Delta P^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Перерасход топлива на обеих станциях, обусловленный отклонением режима от наивыгоднейшего, равен:

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2. \quad (10)$$

Поскольку исходный режим был наивыгоднейшим, то $\delta_{1H} = \delta_{2H}$ и тогда

$$\Delta B = \frac{1}{2} \delta'_1 \Delta P^2 + \frac{1}{2} \delta'_2 \Delta P^2 = \frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2). \quad (11)$$

При замене действительной характеристики $\delta_2 = f(P_2)$ на расчетную суммарная характеристика также смещается. На рис. 1 это показано пунктиром.

Нетрудно показать, что смещение суммарной характеристики определится так:

$$\Delta\delta_{\Sigma} = \Delta\delta_2 \frac{\delta'_1}{\delta'_1 + \delta'_2}. \quad (12)$$

Следовательно, новый режим распределения нагрузок будет иметь место при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_\Sigma$, где

$$\delta_\Sigma = \delta_{\Sigma H} + \Delta\delta_\Sigma.$$

Изменение нагрузки определяется как $\Delta P = \frac{\Delta\delta}{\delta'}$,

откуда

$$\Delta P = \frac{\Delta\delta_1}{\delta'_1} = \frac{\Delta\delta_2}{\delta'_1 + \delta'_2}. \quad (13)$$

Подставив выражение (13) в (11), получим:

$$\Delta B = \frac{1}{2} \frac{\Delta\delta_2^2}{\delta'_1 + \delta'_2}. \quad (14)$$

Если при решении задачи будет допускаться погрешность в обеих характеристиках, то частичные удельные расходы расчетного и наимыгоднейшего режимов будут отличаться друг от друга на величину

$$\Delta\delta_\Sigma = \frac{\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1}{\delta'_1 + \delta'_2} \delta'_1. \quad (15)$$

Отклонение мощностей станций от значений наимыгоднейшего режима составит:

$$\Delta P = \frac{\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1}{\delta'_1 + \delta'_2} \quad (16)$$

и для перерасхода топлива получим:

$$\Delta B = \frac{1}{2} \frac{(\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1)^2}{\delta'_1 + \delta'_2}. \quad (17)$$

Перерасход топлива за длительный период равен

$$\begin{aligned} \Delta B_T &= \int_0^T \Delta B dt = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)^2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_1^2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt + \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_2^2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt - \int_0^T \frac{\Delta\delta_1 \Delta\delta_2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt. \quad (18) \end{aligned}$$

Погрешности $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ являются случайными величинами, а в соответствии с законом распределения случайных величин следует считать, что среди большого их числа имеется равное количество погрешностей положительного и отрицательного знака. Так как нет оснований отдавать предпочтение одному знаку перед другим, то можно полагать, что последняя подинтегральная функция [выражение (18)] содержит одинаковое число положительных и отрицательных произведений.

Следовательно, этот интеграл будет по величине близок к нулю или во всяком случае много меньше каждого из первых двух интегралов, и перерасход топлива за длительный период приблизительно определяется из следующего выражения:

$$\Delta B_T = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_1^2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt + \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_2^2}{\delta'_1 + \delta'_2} dt. \quad (19)$$

Отсюда видно, что перерасход топлива за длительный период, вызываемый погрешностью в величине частичного удельного расхода одной из двух параллельно работающих станций, практически не

* Погрешности $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ могут иметь одинаковые и разные знаки. В первом случае они частично или полностью компенсируют друг друга, во втором — суммируются.

зависит от погрешности частичного удельного расхода второй станции. На величину этого перерасхода оказывает влияние лишь наклон характеристики второй станции (производная $\delta'_2 = \frac{d\delta_2}{dP_2}$).

Общий случай параллельной работы многих станций может быть сведен к рассмотренному простейшему случаю двух станций. Следовательно, можно сравнительно просто определить, какой перерасход топлива в системе вызывает погрешность в величине частичного удельного расхода данной конкретной станции, и проанализировать факторы, от которых он зависит:

$$\Delta B_{Ti} = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_i^2}{\delta'_i + \delta'_{\text{ЭКВ}}} dt \quad (20)$$

или

$$\Delta B_{Ti} = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\delta_{\text{иср}}^2 \cdot 10^{-4}}{\delta'_i + \delta'_{\text{ЭКВ}}} \beta_i dt, \quad (21)$$

где $\beta_i = \frac{\Delta\delta_i}{\delta_{\text{иср}}} 100\%$;

$\delta_{\text{иср}} = 0,5 \frac{m \cdot y \cdot T}{M \cdot \text{вм} \cdot \text{ч}}$ — среднее значение частичного удельного расхода станции.

Для определения полного перерасхода топлива в системе следует просуммировать перерасходы, вызываемые погрешностью частичных удельных расходов отдельных станций.

Из выражения (20) видно, что перерасход топлива в системе находится в квадратичной зависимости от величины погрешности $\Delta\delta_i$ и зависит, кроме того, от наклонов характеристик данной станции и эквивалентной остальных станций (в первом приближении характеристики системы), причем этот перерасход тем больше, чем больше участки характеристики станции и системы, т. е. при равных погрешностях $\Delta\delta$ перерасход топлива больше при работе на наиболее пологих участках характеристик станций.

Поэтому наиболее точно и тщательно следует определять исходные данные и проводить расчеты для станций с наиболее пологими характеристиками.

На рис. 2,а приведены типичные характеристики станций и на рис. 2,б эквивалентная характеристика одной крупной энергосистемы. Анализ характеристик показал, что производная δ'_i находится в основном в диапазоне от $1,3 \cdot 10^{-4}$ до $20 \times 10^{-4} \text{ т у. т./Мвт}^2 \cdot \text{ч}$, не считая вертикальных участков, а производная $\delta'_{\text{ЭКВ}}$ эквивалентной характеристики системы от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4} \text{ т у. т./Мвт}^2 \cdot \text{ч}$.

На рис. 3 и 4 показаны сплошными линиями зависимости часового и годового перерасхода топлива в системе (при $T=6000 \text{ ч}$ и стоимости топлива $10,0 \text{ руб/т у. т.}$) от величины погрешности $\Delta\delta_i$ одной станции при различных сочетаниях производных δ'_i и $\delta'_{\text{ЭКВ}}$.

Часовой перерасход топлива дан в процентах от максимального расхода топлива станции с наиболее пологой характеристикой и мощностью 600 Мвт , а величина погрешности $\Delta\delta$ — в процентах от $\delta_{\text{ср}}$.

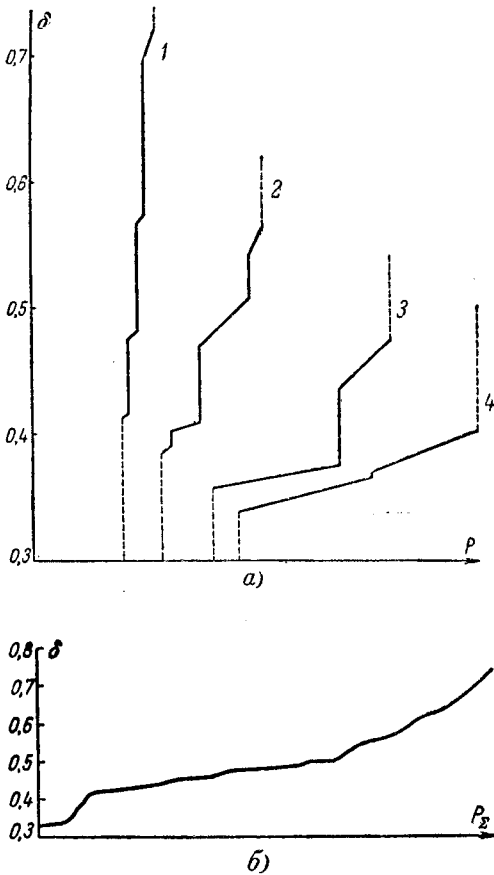


Рис. 2. Типовые характеристики станций и системы.
а — характеристики станций; б — характеристика системы.

равного 0,5 т у. т./Мвт·ч. Из рисунков видно, что по мере приближения к абсолютному оптимуму экономия топлива за счет дальнейшего повышения точности непрерывно снижается.

В разных точках кривой $\Delta B = f(\Delta\delta)$ изменение погрешности на 1% по-разному сказывается на перерасходе топлива. Например, уменьшение погрешности с 5 до 4% уменьшает перерасход на 0,14% (кривая 2 на рис. 3), а уменьшение погрешности также на 1%, но с 1,5% дает снижение перерасхода топлива лишь на 0,03%. В то же время повышение точности расчетов сопряжено с дополнительными затратами (усложняется счетно-решающая техника, требуется большой объем информации). Эти затраты особенно повышаются в случае высокой точности (погрешность 1% и менее). Отсюда следует, что выполнение расчетов с очень высокой точностью может оказаться неоправданным — дополнительные затраты на проведение таких расчетов не окупятся экономией топлива в энергосистеме. Поэтому вряд ли целесообразно стремиться уменьшать погрешности в частичном удельном расходе до величины, меньшей 0,7—1,0% или даже 1—1,5%. Последняя может быть принята за величину допустимой погрешности в частичном удельном расходе при решении задачи наиболее выгодного распределения активных нагрузок без учета потерь в сети.

Указанные величины выбраны ориентировочно. Строгое обоснование оптимальной точности решения задачи может быть дано лишь путем технико-

экономического сравнения дополнительных затрат на повышение точности решения с получаемой за счет этого экономией топлива.

Выражения (17)—(21) отвечают частному случаю, когда при распределении нагрузок можно не учитывать потери активной мощности в сети. Однако в реальных условиях современных протяженных энергосистем потери в сети составляют значительную величину и распределение активных нагрузок между станциями должно производиться обязательно с учетом потерь в сетях.

При этом перерасход топлива в энергосистеме в зависимости от погрешности $\Delta\delta_i$ определяется следующим выражением (см. приложение):

$$\Delta B_{Ti} = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_i^2}{\delta'_i + \delta'_{*ЭКВ}} dt, \quad (22)$$

где

$$\delta'_{*ЭКВ} = \left[\frac{(1-\sigma_1)}{\delta'_1 + \delta_0(k_{11} + k_{12})} + \frac{(1-\sigma_2)}{\delta'_2 + \delta_0(k_{22} + k_{23})} + \dots + \frac{(1-\sigma_n)}{\delta'_n + \delta_0(k_{nn} + k_{n\bar{n}})} \right]^{-1} \quad (23)$$

в отличие от $\delta'_{ЭКВ}$, равного

$$\delta'_{ЭКВ} = \left(\frac{1}{\delta'_1} + \frac{1}{\delta'_2} + \dots + \frac{1}{\delta'_n} \right)^{-1}. \quad (24)$$

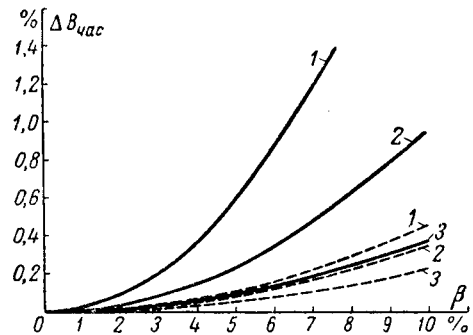


Рис. 3. Зависимость часового перерасхода топлива от погрешности в частичном удельном расходе.

- 1) $\delta'_i = 1,3 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 1,0 \cdot 10^{-4}$; 2) $\delta'_i = 3,4 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 2,5 \cdot 10^{-4}$;
3) $\delta'_i = 10 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 5,0 \cdot 10^{-4}$.

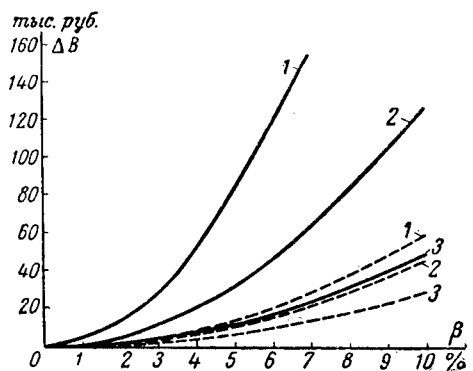


Рис. 4. Зависимость годового перерасхода топлива от погрешности в частичном удельном расходе.

- 1) $\delta'_i = 1,3 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 1,0 \cdot 10^{-4}$; 2) $\delta'_i = 3,4 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 2,5 \cdot 10^{-4}$;
3) $\delta'_i = 10 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ЭКВ} = 5,0 \cdot 10^{-4}$.

Коэффициенты k_{nn} и $k_{n\Sigma}$ учитывают влияние на σ_n соответственно мощности станции n и мощностей остальных станций.

Как показал анализ, проведенный для упомянутой в статье крупной энергосистемы, суммы $(\delta_0 k_{nn} + \delta_0 k_{n\Sigma})$ имеют величину порядка $10 \div 20 \cdot 10^{-4}$. При этом из сопоставления выражений (23) и (24) видно, что величина $\delta'_{*эКВ}$ всегда больше $\delta'_{эКВ}$.

Следовательно, при равных погрешностях $\Delta\delta_i$ перерасход топлива при распределении нагрузок с учетом потерь в сети оказывается значительно меньшим, чем в том случае, когда потери в сети учитывать не требуется.

Это объясняется тем, что потери активной мощности в сети, точнее их изменение при перераспределении нагрузок между станциями за счет погрешности $\Delta\delta_i$, оказывают демпфирующее действие, значительно уменьшая отклонение от оптимального режима, а с ним и перерасход топлива в системе.

Особенно сильно сказывается демпфирующее действие потерь для станций с наиболее пологими характеристиками (рис. 3 и 4), т. е. как раз там, где перерасход топлива был максимальный. Он снижается в этом случае в 5—6 раз.

Компенсирующее действие потерь будет тем значительнее, чем больше эквивалентные сопротивления сети между рассматриваемой станцией i и остальными станциями, особенно с такими, где характеристики наиболее пологие.

Если станции с пологими характеристиками расположены вблизи одна от другой (k_{nn} и $k_{n\Sigma}$ — малы), то потери в сети почти не окажут демпфирующего действия, и тогда за счет погрешности $\Delta\delta_i$ этих станций перерасход топлива может оказаться значительным.

Демпфирующее действие потерь проявляется и приводит к снижению перерасхода топлива за счет погрешности $\Delta\delta_i$ лишь в том случае, если частичные удельные потери станций определяются в процессе решения задачи непрерывно по фактическим значениям их мощностей. Тогда на распределение нагрузок влияют не только сами величины частичных удельных потерь σ , но и производные от них [величины $\delta_0 k_{nn}$ и $\delta_0 k_{n\Sigma}$ в выражении (23)]. Если же потери в сети учитываются по средним значениям частичных удельных потерь σ , найденным на основе расчетов для нескольких типовых режимов хотя бы и по самой совершенной методике, то такого демпфирования не происходит. При этом перерасход топлива определяется тем же выражением (20), где

$$\delta'_{*эКВ} = \left[\frac{(1 - \sigma_1)}{\delta'_1} + \frac{(1 - \sigma_2)}{\delta'_2} + \dots + \frac{(1 - \sigma_n)}{\delta'_n} \right]^{-1}.$$

Частичные удельные потери обязательно необходимо определять в процессе решения задачи непрерывно по фактическим значениям мощностей станций, хотя бы для этого и пришлось пользоваться менее совершенной методикой.

Зависимость перерасхода топлива от величины погрешности $\Delta\delta_i$ при учете потерь в сетях (при минимальных значениях суммы $\delta_0 k_{nn} + \delta_0 k_{n\Sigma}$, равных

$10 \cdot 10^{-4}$) показана пунктирными линиями на рис. 3 и 4.

Из этих рисунков видно, что при учете потерь в сетях перерасход топлива в системе будет значительно меньшим, чем тогда, когда потери в сети учитывать не требуется или они учитываются по средним значениям частичных удельных потерь. При больших значениях сумм $(\delta_0 k_{nn} + \delta_0 k_{n\Sigma})$ перерасход топлива будет еще меньшим. Поэтому в качестве допустимой вполне можно рассматривать погрешность в величине δ , равную $2 - 3\%$ (допустимая абсолютная погрешность $\Delta\delta_{доп} = 0,01 \div 0,015$).

Как указывалось выше, в общем случае погрешность $\Delta\delta$ складывается из нескольких составляющих, являющихся случайными величинами.

В этом случае для перерасхода топлива за длительный период по аналогии с выражением (19) можно написать:

$$\Delta B_{Ti} = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_{i\text{хар}}^2}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}} dt + \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_{i\text{воспр}}^2}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}} dt + \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_{i\text{реш}}^2}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}} dt + \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\Delta\delta_{i\sigma}^2}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}} dt. \quad (25)$$

Из последнего выражения видно, что каждая из составляющих погрешности фактически независимо от других и в той же квадратичной зависимости от величины погрешности приводит к перерасходу топлива в системе. Поэтому нельзя согласиться с утверждением отдельных авторов, что коль скоро исходные характеристики станций известны с погрешностью 5—7%, то и расчет наиболее выгодного распределения нагрузок можно вести с такой же погрешностью.

Наоборот, надо стремиться уменьшить каждую из составляющих погрешности, рассматривая в качестве разумного предела указанную выше величину в 2—3,0% (или 1—1,5% при распределении нагрузок без учета потерь), если дальнейшее повышение точности распределения нагрузок связано с усложнением расчетных устройств и средств автоматизации.

Погрешность в определении частичных удельных потерь в сетях. Из соотношения

$$|\Delta\delta_c| = |\delta_0 \Delta\sigma|$$

получаем:

$$|\Delta\sigma| = \frac{|\Delta\delta_{доп}|}{\delta_0} = \frac{0,01 \div 0,015}{0,4 \div 0,6} = 0,02 \div 0,03.$$

Как правило, величина частичных удельных потерь не превышает 0,2 и лишь у отдельных станций может достигать величины 0,3.

Исходя из этого, можно считать, что частичные удельные потери можно определять с точностью 7—10% и даже 10—15%.

Следует отметить, что в соответствии с выражением (17) наиболее точно необходимо определять частичные удельные потери у станций с пологими характеристиками.

Как известно, частичные удельные потери σ являются функцией активных и реактивных мощ-

ностей станций и нагрузочных узлов, напряжений в узлах системы и конфигурации сети:

$$\sigma = f(P, Q, U, R).$$

В соответствии с этим точность нахождения σ определяется четырьмя основными факторами:

точностью учета конфигурации сети и ее параметров;

точностью методики учета потерь, в частности тем, учитываются ли и насколько точно реактивные мощности и фактические уровни напряжений в системе;

точностью проведения вычислений;

точностью информации об активных и реактивных нагрузках узлов и реактивных мощностях станций.

Конфигурацию сети и фактические уровни напряжений в системе с достаточной точностью можно учесть при решении задачи не только на цифровых, но и на аналоговых машинах.

Основной при определении частичных удельных потерь может явиться погрешность из-за неточной информации о величинах нагрузок в узлах.

При использовании цифровых машин можно пользоваться более совершенной методикой. Однако при этом необходимо иметь большой объем информации не только об активных, но и реактивных нагрузках узлов, о величинах и углах напряжений в узлах и т. д.

В то же время такая информация является, как правило, недостаточно точной, в результате чего даже по самой совершенной методике σ будет определяться со значительной погрешностью.

Поэтому в первую очередь усилия должны быть направлены не на чрезмерное уточнение и усложнение методики, а на повышение точности информации и сокращение ее объема.

Это может быть достигнуто путем приближения расчетных устройств к энергосистемам с получением необходимой информации непосредственно с некоторых особо крупных подстанций. А с этой точки зрения преимущество на стороне аналоговых машин, как более простых по конструкции и в обслуживании.

Погрешность в определении вертикальных участков характеристики $\delta = f(P)$. Как правило, экономические характеристики станций наряду с наклонными имеют и вертикальные участки. При работе станции на этих участках выражения (17)–(25) неприменимы.

На рис. 5 сплошными линиями изображены действительные, а пунктирными — расчетные характеристики станций.

При распределении нагрузки P_2 наивыгоднейший режим в соответствии с действительными характеристиками имеет место при $\delta_{он}$ и мощностях $P_{1н}$ и $P_{2н}$.

При распределении по расчетным характеристикам мощности станций равны соответственно P_1 и P_2 , т. е. мощность станции 1 увеличивается, а станции 2 уменьшается на величину ΔP по сравнению с наивыгоднейшим режимом. При этих нагрузках частичные удельные расходы станций в соответствии с действительными характеристиками станций равны δ_1 и δ_2 , причем $\delta_1 \neq \delta_2$.

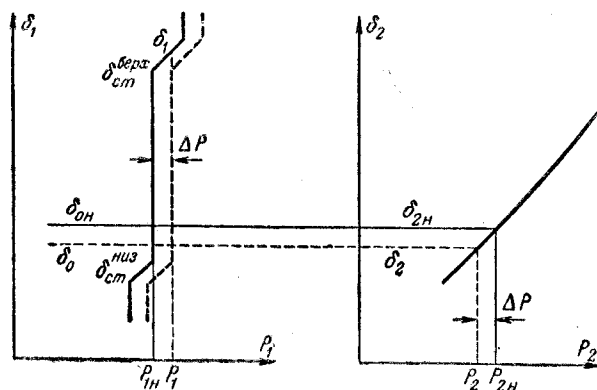


Рис. 5. Влияние погрешности на вертикальном участке характеристики на перерасход топлива.

Изменения расхода топлива на станциях и перерасход топлива за счет отклонения расчетной характеристики станции 1 от действительной соответственно равны:

$$\Delta B_1 = \int_0^{+\Delta P} (\delta_{1ст} + \delta'_1 \Delta P_1) dP = \Delta P \delta_{1ст} + \frac{1}{2} \delta'_1 \Delta P^2; \quad (26)$$

$$\Delta B_2 = \int_0^{-\Delta P} (\delta_{он} + \delta_2 \Delta P_2) dP = -\Delta P \delta_{он} + \frac{1}{2} \delta'_2 \Delta P^2; \quad (27)$$

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 = \Delta P (\delta_{1ст} - \delta_{он}) + \frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2). \quad (28)$$

Перерасход топлива за длительный период равен:

$$\Delta B_T = \int_0^T \left[\Delta P (\delta_{1ст} - \delta_{он}) + \frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2) \right] dt. \quad (29)$$

Так как равновероятно смещение вертикального участка расчетной характеристики как вправо, так и влево, то для перерасхода топлива можно написать:

$$\begin{aligned} \Delta B_T &= \int_0^T \left[\Delta P \frac{(\delta_{ст}^{верх} - \delta_{он}) + (\delta_{ст}^{низ} - \delta_{он})}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2) \right] dt = \\ &= \int_0^T \left[\Delta P \frac{\Delta \delta_{ст}}{2} + \frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2) \right] dt, \quad (30) \end{aligned}$$

причем при длинных вертикальных участках характеристик станций величина $\Delta P \frac{\Delta \delta_{ст}}{2}$ во много раз превышает величину

$$\frac{1}{2} \Delta P^2 (\delta'_1 + \delta'_2).$$

Отсюда видно, что к значительному перерасходу топлива в системе приводит параллельное смещение вертикальных участков характеристик.

На рис. 6 приведена зависимость возможного часового и годового перерасхода топлива в системе от величины смещения вертикальных участков характеристик одной из станций крупной энергоси-

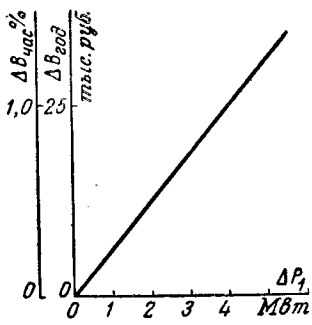


Рис. 6. Зависимость перерасхода топлива от погрешности на вертикальном участке характеристики.

стемы. Часовой перерасход топлива дан в процентах от среднего расхода топлива данной станции.

Определять и воспроизводить в расчетном устройстве вертикальные участки характеристик следует очень тщательно, причем для станций с преобладанием в характеристиках вертикальных участков частичной удельный расход можно определять с большей погрешностью, чем для станций с пологими характеристиками.

В частности, для таких станций потери можно учитывать приближенно по средним значениям σ для трех основных режимов (максимальных, средних и минимальных нагрузок), учитывая их непосредственно в характеристиках станций, особенно в тех случаях, когда это приводит к существенному упрощению расчетного устройства и его обслуживания.

Погрешность в соблюдении баланса мощностей. На рис. 7 рассматривается распределение нагрузок между регулирующей станцией (кривая 1) и остальными станциями системы, представленными эквивалентной характеристикой (кривая 2).

В общем случае, когда частота в системе регулируется несколькими станциями, характеристика станции 1 представляет собой эквивалентную характеристику всех регулирующих станций.

При δ_0 мощности станций 1 и 2 равны соответственно P_1 и P_2 . Из-за неточности отработки равенства (1) сумма этих мощностей отличается от суммарной нагрузки системы на величину небаланса.

При распределении нагрузок на следующие сутки расхождение между суммой мощностей станций и суммарной нагрузкой системы имеет место в первую очередь в результате отличия запланированной нагрузки от фактической, а не из-за погрешности расчетного устройства, так как даже в аналоговом устройстве можно добиться соблюдения равенства (1) с погрешностью менее 0,5%.

Небаланс нагрузок принимает регулирующая станция, которая при этом будет работать с мощностью P'_1 .

Наивыгоднейший режим имеет место при $\delta_{он}$, при котором мощности станции равны соответственно $P_{1н}$ и $P_{2н}$.

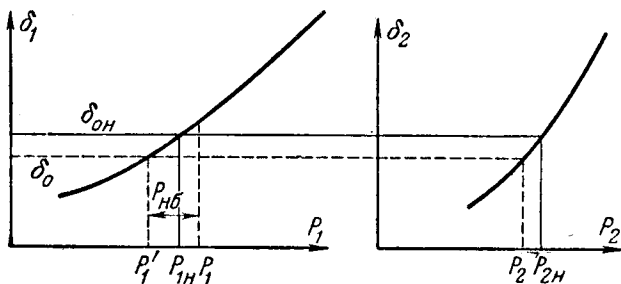


Рис. 7. Влияние погрешности в соблюдении баланса мощностей на распределение нагрузок.

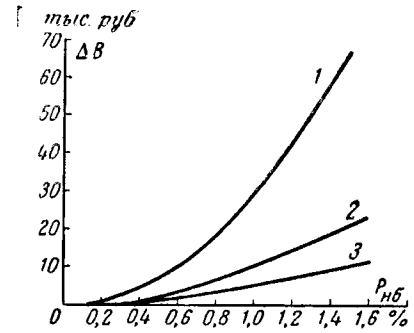


Рис. 8. Зависимость перерасхода топлива в системе от погрешности в соблюдении баланса мощностей.

- 1) $\delta'_{пер} = 3,0 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ост} = 1,5 \cdot 10^{-4}$; 2) $\delta'_{пер} = 1,5 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ост} = 1,5 \cdot 10^{-4}$;
- 3) $\delta'_{пер} = 1,5 \cdot 10^{-4}$; $\delta'_{ост} = 5 \cdot 10^{-4}$.

Мощности станций 1 и 2 в наивыгоднейшем и исходном режиме отличаются на величины ΔP_1 и ΔP_2 , равные

$$\Delta P_1 = -\Delta P_2 = \frac{P_{нб}}{\delta'_1 + \delta'_2} \delta'_1.$$

Тогда на основе равенства (11) для перерасхода топлива в системе можно написать:

$$\Delta B = \frac{1}{2} P_{нб}^2 \frac{(\delta'_1)^2}{(\delta'_1 + \delta'_2)^2} \delta'_1 + \frac{1}{2} P_{нб}^2 \frac{(\delta'_1)^2}{(\delta'_1 + \delta'_2)^2} \delta'_2 = \frac{1}{2} P_{нб}^2 \frac{(\delta'_1)^2}{\delta'_1 + \delta'_2} \quad (31)$$

или

$$\Delta B = \frac{1}{2} P_{нб}^2 \frac{\delta'_{пер}}{\delta'_{ост} + 1}. \quad (32)$$

Из последнего выражения следует, что перерасход топлива в системе в результате неточной отработки уравнения баланса мощностей системы (1) тем меньше, чем полнее эквивалентная характеристика регулирующих станций и чем круче эквивалентная характеристика остальных, нерегулирующих станций по сравнению с характеристикой регулирующих.

Отсюда следует, что с точки зрения экономии топлива к регулированию частоты в энергосистемах должны привлекаться по возможности все электростанции с пологими характеристиками. Чтобы исключить дополнительный перерасход топлива из-за неточного распределения нагрузки между регулируемыми станциями, дополнительная нагрузка должна распределяться между ними в соответствии с их характеристиками.

Зависимость перерасхода топлива в системе от величины небаланса мощностей $P_{нб}$ при различных отношениях $\frac{\delta'_{ост}}{\delta'_{пер}}$ приведена на рис. 8.

Выводы 1. Решение задачи наивыгоднейшего распределения активных нагрузок зависит от большого числа факторов. Повышение точности сопряжено с дополнительными затратами (усложнение счетно-решающей техники, затраты на каналы связи и др.). Эти затраты резко возрастают при приближении к абсолютно точному решению и могут не окупиться экономией топлива по энергосистеме. Поэтому приближенное решение указанной

задачи с определенной допустимой погрешностью вполне оправдано.

2. Влияние погрешности в величинах δ , σ , P на перерасход топлива различно. Следовательно, по каждой из этих величин необходимо определять допустимую погрешность в отдельности. Так, можно считать, что допустимой погрешностью в δ и σ являются величины в 2—3 и 10—15% соответственно (при распределении нагрузок без учета потерь в сети $\Delta\delta_{доп} = 1 \div 1,5\%$).

В качестве допустимой погрешности уравнения баланса мощностей можно принять величину порядка 0,5%.

3. Решение задачи с указанными допустимыми погрешностями вполне возможно как на цифровых, так и на аналоговых машинах. Следовательно, выбор типа счетно-решающей машины не может основываться только на ее возможностях с точки зрения точности, а должен определяться и другими факторами. Эти дополнительные «за» и «против» могут быть получены только в процессе опытной эксплуатации как тех, так и других счетно-решающих машин.

Приложение. Зависимость перерасхода топлива в системе от погрешности при учете потерь в сетях. При учете потерь в сетях условие наивыгоднейшего распределения нагрузок имеет следующий вид:

$$\frac{\delta_1}{1 - \sigma_1} = \frac{\delta_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{\delta_i}{1 - \sigma_i} = \dots = \frac{\delta_n}{1 - \sigma_n} = \delta_0,$$

иначе

$$\delta_{*1} = \delta_{*2} = \dots = \delta_{*i} = \dots = \delta_{*n} = \delta_0,$$

где

$$\delta_{*n} = \frac{\delta_n}{1 - \sigma_n} = \frac{\delta_{nн} + \delta'_n \Delta P}{1 - \sigma_n}.$$

При этом крутизна δ'_{*n} равна:

$$\delta'_{*n} = \frac{d\delta_{*n}}{dP_n} = \frac{\delta'_n (1 - \sigma_n) + (\delta_{nн} + \delta'_n \Delta P) \frac{d\sigma_n}{dP_n}}{(1 - \sigma_n)^2} = \frac{1}{1 - \sigma_n} \left(\delta'_n + \delta_0 \frac{d\sigma_n}{dP_n} \right).$$

Примем станцию i за балансирующую точку.

Частичные удельные потери станции n можно записать как

$$\sigma_n = \sigma_{nн} + k_{n1} \Delta P_1 + k_{n2} \Delta P_2 + \dots + k_{nj} \Delta P_j + \dots + k_n (n-1) \Delta P_{n-1} + k_{nn} \Delta P_n,$$

где

$$k_{nn} = \frac{2}{U_n^2} R_{ni}, \quad k_{nj} = \frac{2}{U_n^2} r_{nj};$$

R_{ni} — эквивалентное сопротивление сети между станциями n и i ;

r_{nj} — сопротивление сети, общее для станций n и j относительно станции i .

Принимая

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= -\alpha_1 \Delta P_i; \\ \Delta P_2 &= -\alpha_2 \Delta P_i; \\ &\dots \\ \Delta P_j &= -\alpha_j \Delta P_i; \\ \Delta P_n &= -\alpha_n \Delta P_i, \end{aligned}$$



$$\sigma_n = \sigma_{nн} + \Delta P_n \left(k_{n1} \frac{\alpha_1}{\alpha_n} + k_{n2} \frac{\alpha_2}{\alpha_n} + \dots + k_{nj} \frac{\alpha_j}{\alpha_n} + \dots + k_{n(n-1)} \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n} + k_{nn} \right).$$

Отсюда

$$\frac{d\sigma_n}{dP_n} = k_{nn} + k_{n1} \frac{\alpha_1}{\alpha_n} + k_{n2} \frac{\alpha_2}{\alpha_n} + \dots + k_{nj} \frac{\alpha_j}{\alpha_n} + \dots + k_{n(n-1)} \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}$$

или

$$\frac{d\sigma_n}{dP_n} = k_{nn} + k_{n\Sigma},$$

где

$$k_{n\Sigma} = k_{n1} \frac{\alpha_1}{\alpha_n} + k_{n2} \frac{\alpha_2}{\alpha_n} + \dots + k_{nj} \frac{\alpha_j}{\alpha_n} + \dots + k_{n(n-1)} \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}.$$

Тогда для крутизны δ'_{*n} получим:

$$\delta'_{*n} = \frac{1}{1 - \sigma_n} [\delta'_n + \delta_0 (k_{nn} + k_{n\Sigma})].$$

Крутизна эквивалентной характеристики $\delta'_{*эКВ}$ равна:

$$\delta'_{*эКВ} = \left[\frac{1}{\delta'_{*1}} + \frac{1}{\delta'_{*2}} + \dots + \frac{1}{\delta'_{*n}} \right]^{-1}.$$

При этом коэффициенты пропорциональности α_n определяются отношением

$$\alpha_n = \frac{\delta'_{*эКВ}}{\delta'_{*n}}.$$

Отклонение мощности станции i от наивыгоднейшей $\Delta P_{iн}$ равно:

$$\Delta P_i = \frac{\Delta \delta_i}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}}.$$

и для перерасхода топлива в системе получаем:

$$\Delta B_i = \frac{1}{2} \frac{\delta_i^2}{\delta'_i + \delta'_{*эКВ}}.$$

Литература

1. Крутиков В. Е., Маралин В. Г. и Синьков В. М., Влияние погрешности в определении относительного прироста на перерасход топлива, «Электрические станции», 1960, № 2.
2. Картвелишвили Н. А., Влияние погрешностей характеристик относительных приростов на эффект оптимального распределения нагрузок между электростанциями, Изв. ОТН АН СССР, «Энергетика и автоматика», 1959, № 6.
3. Зайцев Н. Г., Автоматизация наивыгоднейшего распределения активных нагрузок в энергосистемах с гидростанциями, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Петрозаводск, 1960.
4. Шаханов В. С., О методике вычисления оптимальных режимов объединенных энергосистем с применением современных цифровых вычислительных машин, «Электричество», 1962, № 3.
5. Руденко Ю. Н. и Ясников В. Н., Об определении наивыгоднейшего режима работы энергетических систем, «Электричество», 1962, № 4.
6. Усов С. В., Павлов Г. М., Слабиков В. А. и Будкин И. А., Автоматическое устройство для распределения нагрузок в энергосистемах, «Электричество», 1960, № 4.
7. Маркович И. М., Общая формула потери мощности в сетях и вычисление удельных приростов потерь, «Электричество», 1962, № 4.

[9.8.1963]

Рациональные параметры электропривода металлорежущих станков с программным управлением

К. И. КОЖЕВНИКОВ

Ростов-на-Дону

В настоящей статье рассматривается электропривод позиционных механизмов группы металлорежущих станков с одноступенчатым торможением. Рабочий орган этих механизмов вместе с обрабатываемой деталью или инструментом периодически перемещается из одного фиксированного положения в другое по определенной программе. К числу таких механизмов относится, например, механизм перемещения стола координатного сверлильного станка.

При конструировании и изготовлении позиционных механизмов много внимания уделяется обеспечению надлежащей точности отработки программы перемещений.

Одним из главных источников погрешности является нестабильность или неповторяемость выбега механизма, наблюдаемая в процессе эксплуатации станка¹. Эта погрешность понижается с уменьшением выбега [Л. 1 и 2]. Поэтому рациональные параметры привода проектируемого механизма должны определяться, исходя из принципа обеспечения минимального выбега.

В данной статье приводятся соотношения, определяющие влияние параметров привода на выбег механизма, и рассматривается разработанный на их основе метод совместного расчета рациональных параметров привода. Кроме того, в статье изложены результаты исследования влияния параметров привода на максимальную скорость двигателя, так как эта скорость не должна превышать допустимого значения.

Применение разработанного метода иллюстрируется на примере.

Актуальность рассматриваемых вопросов определяется тем, что точность работы позиционного механизма в значительной степени зависит от параметров привода и ее увеличение за счет применения рациональных параметров не связано с использованием сложных устройств, снижающих надежность станка. Разработанный метод расчета выбега механизма вместе с данными о нестабильности выбега в зависимости от его величины может служить основанием для определения точности работы проектируемого станка.

Выбег механизма и максимальная скорость двигателя. На рис. 1 изображена кинематическая схема позиционного механизма. Привод его осуществляется двигателем постоянного тока параллельного возбуждения, якорь которого подключен к отдельному управляемому преобразователю; регулирование скорости двигателя производится изменением напряжения якоря при постоянном магнитном потоке, равном номинальному.

Ниже рассматривается работа привода с некоторыми текущими параметрами, рациональные значения которых будут определены в дальнейшем. К числу этих параметров относятся:

передаточное число редуктора (i), соединяющего вал двигателя с валом механизма;

динамические свойства системы управления, которые характеризуются формой диаграммы момента двигателя; предполагается, что диаграмма момента имеет произвольную форму с тремя периодами: ускорения, установившегося движения и замедления (рис. 2); диаграммы момента определенной формы (например, прямоугольной) могут рассматриваться как частный случай диаграммы, изображенной на рис. 2, поэтому указанная диаграмма является универсальной. Наибольшие значения момента двигателя принимаются равными максимально допустимой величине, что не вызывает перегрева двигателя в связи с небольшой относительной продолжительностью включения;

номинальные данные двигателя: максимально допустимый момент M_M и маховой момент якоря GD_J^2 .

Как будет показано ниже, для рассматриваемых здесь приводов должно выполняться условие (24), в результате чего пусковой и тормозной моменты двигателя значительно превышают статический момент. В связи с этим расчет рациональных параметров привода выполняется без учета статического момента. Возникающая при этом погрешность (3—8%) не может отразиться на результатах выбора параметров.

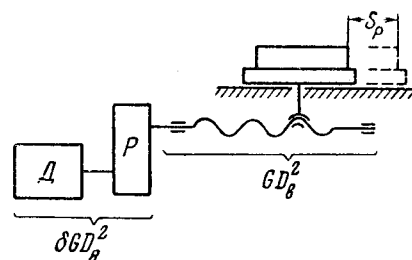


Рис. 1.

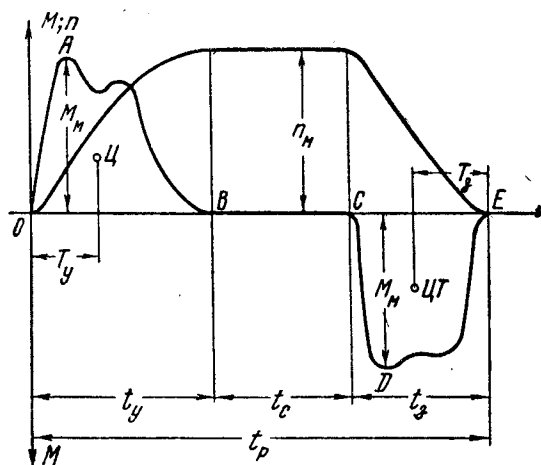


Рис. 2.

¹ Выбег механизма — путь, пройденный рабочим органом механизма в период остановки.

Примем следующие обозначения:

A — угол, отработанный валом двигателя (обороты);

t — время, *сек* (символы снабжаются индексами «у», «с», «з», «р», которые относятся соответственно к периодам ускорения, установившегося движения, замедления и к периоду работы);

n_M — максимальная скорость двигателя, *об/мин*;

GD^2 — суммарный маховой момент установки, *кг·м²*;

S_p — перемещение рабочего органа механизма за время работы, *мм*;

h — ход винтовой линии ходового винта, *мм*;

S_3 — выбег рабочего органа механизма, *мм*.

Воспользовавшись соотношениями, выведенными в ранее опубликованной статье [Л. 3], получим:

$$A_y = \frac{n_M t_y}{60} (1 - a_y); \quad A_z = \frac{n_M t_z}{60} (1 - a_z);$$

$$A_c = \frac{n_M t_c}{60}; \quad n_M = \frac{375}{GD^2} M_M k_y t_y;$$

$$n_M = \frac{375}{GD^2} M_M k_z t_z.$$

Кроме этого,

$$A_p = A_y + A_c + A_z; \quad A_p = \frac{S_p}{h} i;$$

$$t_p = t_y + t_c + t_z; \quad S_3 = S_p \frac{A_3}{A_p}.$$

Здесь:

$$a_y = \frac{T_y}{t_y}; \quad k_y = \frac{M_{c.p.y}}{M_M};$$

$$a_z = \frac{T_z}{t_z}; \quad k_z = \frac{M_{c.p.z}}{M_M};$$

T_y, T_z — абсциссы центра тяжести площадей *OABO* и *CDEC* (рис. 2), *сек*;

k_y, k_z — коэффициенты заполнения этих площадей.

Для сокращения дальнейших выкладок найдем сначала формулу, связывающую продолжительность установившегося движения с параметрами привода, а затем выразим искомые величины — выбег механизма и максимальную скорость двигателя — через продолжительность установившегося движения.

Посредством приведенной выше системы уравнений находим:

продолжительность установившегося движения в относительных единицах

$$y = \frac{t_c}{t_p} = f_1 \sqrt{1 - f_2 \frac{240 \cdot S_p \cdot GD^2 i}{375 h t_p^2 M_M}} - f_1 + 1; \quad (1)$$

выбег механизма

$$S_3 = \frac{S_p f_3 (1 - y)}{2 \left(2 - \frac{1 - y}{f_1} \right)}; \quad (2)$$

максимальную скорость двигателя

$$n_M = \frac{120 S_p i}{h t_p \left(2 - \frac{1 - y}{f_1} \right)}; \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{k_y + k_z}{2(k_y a_y + k_z a_z)}; \\ f_2 &= \frac{k_y a_y + k_z a_z}{k_y k_z}; \\ f_3 &= \frac{4k_y(1 - a_y)}{k_y + k_z}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Коэффициенты f_1, f_2, f_3 зависят только от формы диаграммы момента двигателя в периоды ускорения и замедления и поэтому характеризуют динамические свойства системы управления. При прямоугольной диаграмме момента $f_1 = f_2 = f_3 = 1$, так как $k_y = k_z = 1, a_y = a_z = 0,5$.

Полученные формулы (1), (2) и (3) характеризуют влияние параметров привода на выбег механизма и на максимальную скорость двигателя.

Влияние передаточного числа редуктора на работу механизма. Полагаем, что заданы характеристики механизма (S_p, t_p, h, GD_b^2); номинальные данные двигателя (M_M, GD_n^2) и форма диаграммы момента двигателя (f_1, f_2, f_3). При этом выбег механизма и максимальная скорость двигателя зависят только от передаточного числа редуктора.

Проверим на экстремум зависимость выбега механизма от передаточного числа редуктора.

Как следует из формулы (2), выбег механизма является монотонной убывающей функцией продолжительности установившегося движения. Поэтому для решения поставленной задачи достаточно рассмотреть выражение

$$F(i) = \frac{GD_b^2}{GD_n^2} i = \delta \frac{GD_n^2}{GD_b^2} i + \frac{1}{i}, \quad (5)$$

где GD_b^2 — маховой момент механизма, приведенный к скорости ходового винта, *кг·м²*;

δ — коэффициент, учитывающий маховой момент деталей редуктора и муфты.

Функция $F(i)$ достигает минимума

$$F(i_k) = 2 \sqrt{\frac{\delta GD_n^2}{GD_b^2}} = \frac{2}{i_k}, \quad (6)$$

если передаточное число равно:

$$i_k = \sqrt{\frac{GD_n^2}{\delta GD_b^2}}. \quad (7)$$

При этом время установившегося движения имеет максимальное, а время выбега — минимальное значения. Поэтому передаточное число редуктора i_k является оптимальным; оно, как следует из формулы (7), не зависит от формы диаграммы момента двигателя.

В других исследованиях было показано, что передаточное число, рассчитанное по формуле (7), отвечает и иным критериям оптимума: минимума нагрева двигателя, максимального тока якоря, времени работы.

Найдем соотношения между выбегами механизма и максимальными скоростями двигателя при текущем и при оптимальном значениях передаточного числа редуктора. Сравнение выполняется в предположении, что диаграмма момента имеет наиболее выгодную прямоугольную форму.

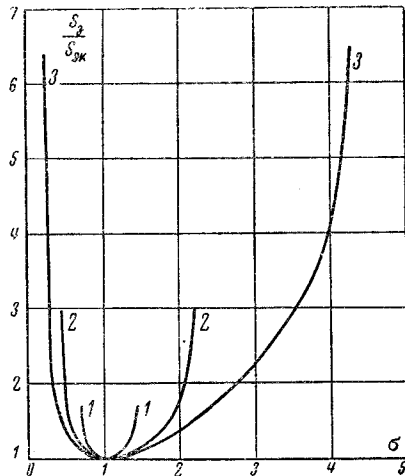


Рис. 3. Зависимость выбега механизма от передаточного числа редуктора.

$$1 - y_k = \frac{t_{ck}}{t_p} = 0,25; \quad 2 - y_k = 0,50; \quad 3 - y_k = 0,75.$$

Воспользовавшись формулами (2) и (3), получим:

$$\frac{S_a}{S_{вк}} = \frac{(1 + y_k)}{(1 - y_k)} \left(\frac{1 - y}{1 + y} \right); \quad (8)$$

$$\frac{n_m}{n_{mk}} = \frac{(1 + y_k) \sigma}{1 + y}; \quad (9)$$

где $\sigma = \frac{i}{i_k}$ — передаточное число редуктора в относительных единицах.

Продолжительность установившегося движения при передаточных числах i и i_k определим по формуле (1) с использованием выражения (5):

$$y = \sqrt{1 - CF(i)}; \quad (10)$$

$$y_k = \sqrt{1 - CF(i_k)}; \quad (11)$$

где

$$C = \frac{240 S_p G D_B^2}{375 h t_p^2 M_m}. \quad (12)$$

Исключив из формулы (10) постоянную при сформулированных выше условиях величину C и используя затем выражения (6) и (7), найдем:

$$y = \sqrt{1 - 0,5(1 - y_k^2) \left(\sigma + \frac{1}{\sigma} \right)}. \quad (13)$$

По формулам (8), (9) и (13) построены графики (рис. 3 и 4), иллюстрирующие влияние передаточного числа редуктора на работу механизма.

Как следует из этих графиков, привод сохраняет способность обрабатывать заданное перемещение рабочего органа механизма в данное время, если передаточное число редуктора находится в определенном диапазоне ($i_{02} \geq i \geq i_{01}$), ограниченном предельными передаточными числами, при которых продолжительность установившегося движения равна нулю. Поэтому, полагая в выражении (13) $y=0$, найдем:

$$\sigma_{0(1,2)} = \frac{1 \mp y_k \sqrt{2 - y_k^2}}{1 - y_k^2};$$

$$i_{0(1,2)} = \sigma_{0(1,2)} i_k.$$

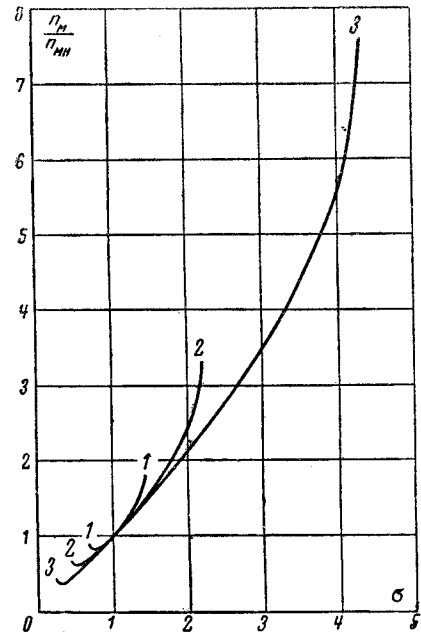


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости двигателя от передаточного числа редуктора. Обозначения те же, что и на рис. 3.

Рассмотрим экстремум, наблюдаемый на графиках, построенных на рис. 4. Посредством формул (9) и (13) устанавливаем, что максимальная скорость двигателя имеет минимум при передаточном числе

$$i_m = \sigma_m i_k,$$

где

$$\frac{16\sigma_m}{(3 + \sigma_m^2)^2} = 1 - y_k^2.$$

На рис. 5 построены графики зависимости передаточных чисел редуктора σ_{01} , σ_{02} и σ_m от про-

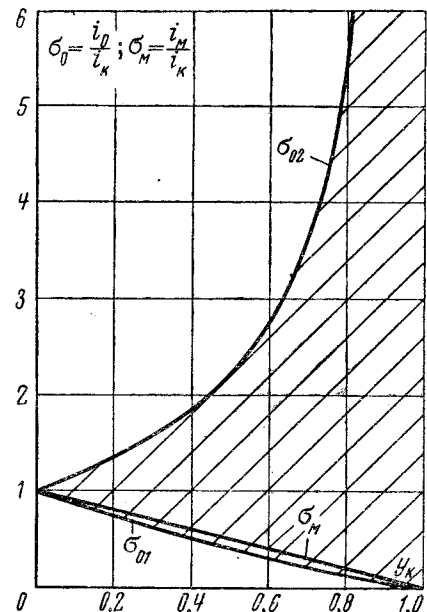


Рис. 5.

должительности установившегося движения при оптимальном передаточном числе. Заштрихованная область на графике определяет условие, при котором привод сохраняет способность выполнять задание. В этой области располагаются передаточные числа, минимизирующие максимальную скорость двигателя.

Влияние динамических свойств системы управления на работу механизма. Полагаем заданными: характеристики механизма (S_p, t_p, h, GD_b^2) и номинальные данные двигателя (M_m, GD_n^2); передаточное число редуктора, равное оптимальному (i_k). При этом выбег механизма и максимальная скорость двигателя зависят только от формы диаграммы момента двигателя, т. е. от динамических свойств системы управления.

Сравним выбеги механизма и максимальные скорости двигателя при некоторой системе управления с универсальной диаграммой момента (рис. 2) и при наиболее совершенной системе управления с прямоугольной диаграммой, которая позволяет получить полное использование перегрузочной способности двигателя в течение всего периода ускорения и замедления и, следовательно, дает возможность обеспечить минимальный выбег. Несмотря на повышенный нагрев двигателя [Л. 4], в данном случае эта диаграмма остается наиболее выгодной, так как уменьшение выбега рассматриваемых механизмов ограничивается только перегрузочной способностью двигателя.

Посредством формул (2) и (3) находим:

$$\frac{S_{ak}}{S_{akn}} = \frac{(1 + y_{kn}) f_3 (1 - y_k)}{(1 - y_{kn}) \left(2 - \frac{1 - y_k}{f_1} \right)}; \quad (14)$$

$$\frac{n_{mk}}{n_{mkn}} = \frac{1 + y_{kn}}{2 - \frac{1 - y_k}{f_1}}. \quad (15)$$

Здесь дополнительный индекс «п» обозначает принадлежность символа к прямоугольной диаграмме момента двигателя.

Продолжительность установившегося движения определяется по формуле (1) с учетом выражения (5) следующим образом:

$$y_k = f_1 \sqrt{1 - f_2 CF(i_k)} - f_1 + 1; \quad (16)$$

$$y_{kn} = \sqrt{1 - CF(i_k)}.$$

Подставив в формулу (16) значение постоянной C из последнего выражения, получим:

$$y_k = f_1 \sqrt{1 - (1 - y_{kn}^2) f_2} - f_1 + 1. \quad (17)$$

Формулы (14), (15) и (17) определяют посредством коэффициентов f_1, f_2, f_3 влияние динамических свойств системы управления на работу механизма. Рассмотрим последовательно работу механизма при симметричных трапециевидных диаграммах классов А, Б, В и Г (рис. 6), отличающихся друг от друга сочетанием знаков угловых коэффициентов в периоды ускорения и замедления.

Ниже (табл. 1) приводятся формулы для определения коэффициентов f_1, f_2, f_3 трапециевидных

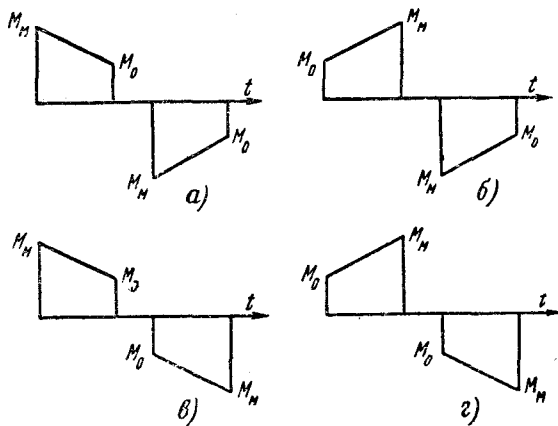


Рис. 6.

диаграмм в зависимости от соотношения между минимальными и максимальными моментами двигателя $d = \frac{M_0}{M_m}$, полученные в результате подстановки в формулы (4) известных выражений для положения центра тяжести площади трапеции и коэффициента заполнения этой площади.

Таблица 1

Коэффициенты	Класс диаграммы моментов			
	А (рис. 6,а)	Б (рис. 6,б)	В (рис. 6,в)	Г (рис. 6,г)
f_1	1	$\frac{3(1+d)}{2(2+d)}$	$\frac{3(1+d)}{2(1+2d)}$	1
f_2	$\frac{2}{1+d}$	$\frac{4(2+d)}{3(1+d)^2}$	$\frac{4(1+2d)}{3(1+d)^2}$	$\frac{2}{1+d}$
f_3	$\frac{2(1+2d)}{3(1+d)}$	$\frac{2(1+2d)}{3(1+d)}$	$\frac{2(2+d)}{3(1+d)}$	$\frac{2(2+d)}{3(1+d)}$

По этим данным и по формулам (14), (15) и (17) при $y_{kn} = 0,75$ построены графики (рис. 7) зависимости выбега механизма и максимальной скорости двигателя от динамических свойств системы управления — от класса диаграммы момента двигателя и от соотношения моментов d . Аргумент d для диаграмм классов А, В и Г изменяется в пределах от 0 до 1, в результате этого форма диаграмм непрерывно трансформируется из треугольной ($d=0$) в трапециевидную ($d<1$) и, наконец, в прямоугольную ($d=1$). Для диаграммы класса Б минимальное значение аргумента равно 0,11, так как при $d<0,11$ привод теряет способность обрабатывать задание.

Влияние номинальных данных двигателя на работу механизма. Принимаем следующие исходные положения: заданы характеристики механизма (S_p, t_p, h, GD_b^2), диаграмма момента двигателя имеет наиболее выгодную прямоугольную форму ($f_1 = f_2 = f_3 = 1$), передаточное число редуктора равно оптимальному (i_k). При этом выбег механизма и максимальная скорость двигателя зависят только

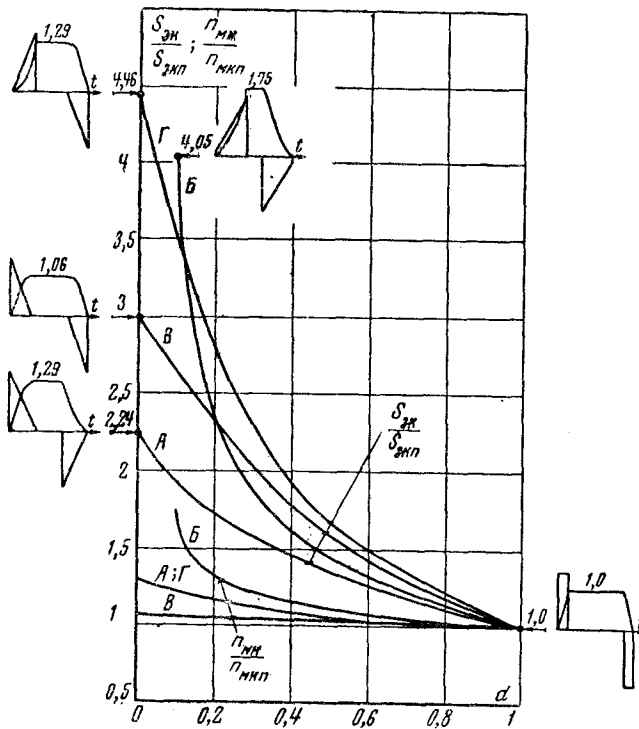


Рис. 7.

от номинальных данных двигателя (M_M, GD_R^2). Исследуем такую зависимость.

Продолжительность установившегося движения для принятых исходных положений определяется по формуле (11). Преобразуем подкоренное выражение в этой формуле, учитывая выражение (12)

$$CF(i_h) = \frac{480S_p \sqrt{\delta GD_B^2} \sqrt{GD_R^2}}{375ht^2 p M_M} = \frac{b_0}{b} = \frac{1}{\beta},$$

где b — динамический показатель двигателя, зависящий от его номинальных данных;
 b_0 — постоянный коэффициент;

$$b_0 = \frac{480S_p \sqrt{\delta GD_R^2}}{375ht^2 p}; \tag{18}$$

$$b = \frac{M_M}{\sqrt{GD_R^2}}. \tag{19}$$

Итак, формула (11) представится в следующем виде:

$$y_k = \sqrt{1 - \frac{1}{\beta}}. \tag{20}$$

Отсюда следует, что привод сохраняет способность выполнять задание при условии

$$\beta = \frac{b}{b_0} \geq 1.$$

Для оценки влияния номинальных данных двигателя на работу механизма определим соотношение между выбегаме механизма и между минимальными скоростями двигателя при двигателях с динамическими показателями b и b_0 .

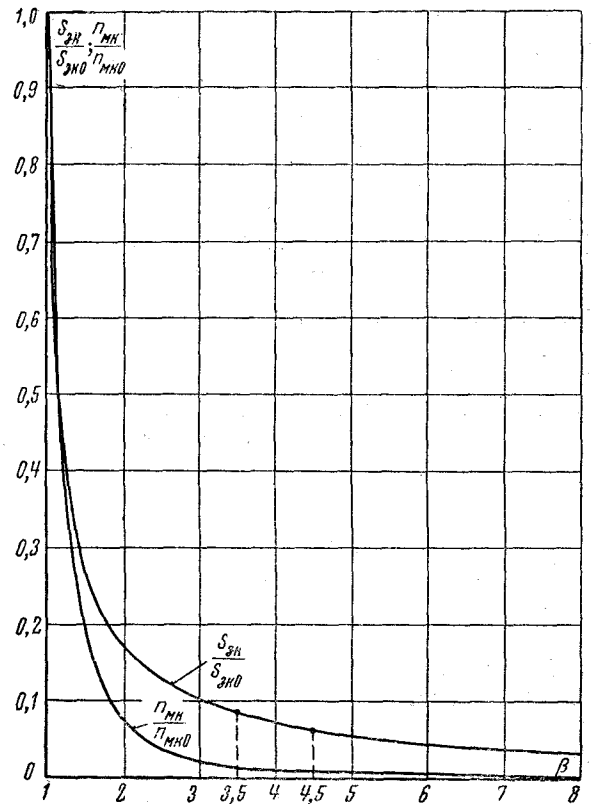


Рис. 8.

Посредством формул (2) и (3) находим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_{ЭН}}{S_{ЭП}} &= \frac{1 - y_k}{1 + y_k}, \\ \frac{n_{Мк}}{n_{Мк0}} &= \frac{i_h}{1 + y_k}, \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

где i_h и i_{k0} — оптимальные передаточные числа редуктора для двигателей с динамическими показателями b и b_0 .

В соответствии с формулой (7)

$$\frac{i_h}{i_{k0}} = \sqrt{\frac{GD_{Я0}^2}{GD_R^2}}.$$

Для двигателей постоянного тока имеет место следующее соотношение [Л. 5]:

$$GD_R^2 = \gamma M_n^{1.5},$$

где γ — постоянная для двигателей данной серии.

Поэтому

$$\left. \begin{aligned} \frac{i_h}{i_{k0}} &= \frac{1}{\beta^3}, \\ \frac{n_{Мк}}{n_{Мк0}} &= \frac{1}{\beta^3 (1 + y_k)}. \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

По формулам (21), (22) и (20) построены графики (рис. 8), иллюстрирующие влияние номинальных данных двигателя на работу механизма.

Принципы расчета рациональных параметров привода. Динамические свойства системы управления должны формироваться посредством выбора схемы и ее параметров так, чтобы диаграмма момента двигателя в максимальной степени прибли-

жалась к прямоугольной, учитывая при этом закономерности (рис. 7), определяющие повышение выбега механизма, вызванное отклонением формы диаграммы от прямоугольной.

Минимальное увеличение выбега возникает в том случае, если угловой коэффициент в период ускорения отрицательный, а в период замедления — положительный (диаграмма класса А, рис. 6,а). При реализации этого принципа в приводах с типовыми системами управления выбег механизма против возможного минимума увеличивается не более, чем на 20—35%, а максимальная скорость повышается на 3—5% при обеспечении высокой надежности работы системы.

Максимальное повышение выбега (до 4,5 раза) происходит в том случае, если угловой коэффициент в период ускорения положительный, а в период замедления — отрицательный (диаграмма класса Г, рис. 6,б).

Предварительный выбор двигателя выполняется так, чтобы его динамический показатель b_n , определенный по каталожным данным двигателей (табл. 2), соответствовал рациональному динамическому показателю b_p .

Таблица 2

Тип двигателя	P_n , квт	n_n , об/мин	M_n , кг·м	$GD_{я}^2$, кг·м ²	b_n
П-11	0,30	1 650	0,177	0,012	3,22
П-12	0,45	1 700	0,258	0,015	4,20
П-21	0,70	1 700	0,401	0,045	3,78
П-22	1,0	1 700	0,573	0,055	4,89
П-31	1,5	1 800	0,813	0,085	5,57
П-32	2,2	1 700	1,26	0,105	7,78
П-41	3,2	1 600	1,95	0,150	10,0
П-42	4,5	1 800	2,44	0,180	11,5

Примечание. Максимально допустимый момент двигателя принят равным $2M_n$ [Л. 6]

Как следует из графиков, изображенных на рис. 8, рациональный динамический показатель находится из соотношения

$$\beta_p = \frac{b_p}{b_0} = 3,5 \div 4,5.$$

Отсюда с учетом формулы (18)

$$b_p = (4,5 \div 5,8) \frac{S_p \sqrt{\delta GD_B^2}}{ht_p^2}.$$

Эта формула, выведенная для прямоугольной диаграммы момента, может быть распространена на приводы с современными системами управления, при которых достигается высокий коэффициент заполнения и $f_1 \approx 1$:

$$b_p = (4,5 \div 5,8) f_2 \frac{S_p \sqrt{\delta GD_B^2}}{ht_p^2}. \quad (23)$$

Применение двигателя с динамическим показателем, отличающимся от рационального, приводит к резкому повышению выбега ($b_n < b_p$) либо к значительному уменьшению выбега за счет существенного увеличения габарита и веса установленного двигателя ($b_n > b_p$).

Результаты предварительного выбора двигателя корректируются с учетом желаемых, технически целесообразных пределов повышения мощности электрооборудования станка и условие, обеспечивающее незначительное влияние изменения статического момента, наблюдаемое в процессе эксплуатации, на выбег:

$$\frac{M_m}{M_c} > 8 \div 10. \quad (24)$$

Передаточное число редуктора выбирается с максимальным приближением его к оптимальному, рассчитанному по формуле (7).

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, небольшое отклонение выбранного передаточного числа от оптимального, вызванное, например, применением стандартного редуктора, мало отражается на выбеге механизма.

Пример расчета рациональных параметров привода стола координатного сверлильного станка с программным управлением. Характеристики механизма: $S_p = 10$ мм, $t_p = 3$ сек, $h = 4$ мм, $GD_B^2 = 3,5$ кг·м², $M_{св} = 0,62$ кг·м.

Приводной двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением питается от отдельного преобразователя. Для управления процессами разгона и торможения применяется типовая система управления.

Динамические свойства этой системы характеризуются коэффициентами: $f_1 = 1$; $f_2 = 1,4$; $f_3 = 0,86$, рассчитанными по формулам (4) при следующих исходных данных, полученных посредством обработки экспериментально снятой осциллограммы момента (тока якоря): $k_y = 0,71$; $a_y = 0,43$; $k_a = 0,71$; $a_a = 0,57$.

Рациональный динамический показатель двигателя, вычисленный по формуле (23), лежит в пределах $3,74 \div 4,82$. По табл. 2 выбирается двигатель единой серии П-12 с динамическим показателем $b_n = 4,2$ и с номинальными данными $P_n = 0,45$ квт, $n_n = 1 700$ об/мин, $M_n = 0,258$ кг·м, $GD_{я}^2 = 0,015$ кг·м².

Оптимальное передаточное число редуктора, рассчитанное по формуле (7), $i_k = 13,4$. Принимается редуктор с передаточным числом $i = 13$. Отклонение этого передаточного числа от оптимального вызывает крайне незначительное повышение выбега стола.

При выбранных параметрах привода выполняется условие (24), так как

$$\frac{M_m}{M_c} = \frac{2 \cdot 0,258}{\frac{0,62}{13}} = 10,8.$$

По формулам (1), (2) и (3) находим: выбег стола $S_a = 0,314$ мм и максимальную скорость двигателя $n_m = 697$ об/мин, которая не превышает допустимое значение $1 700$ об/мин.

При наиболее совершенной системе управления с прямоугольной диаграммой момента двигателя выбег стола $S_{a,п} = 0,25$ мм, что на 20% меньше, чем при типовой системе управления. Таким образом, добротность типовой системы управления составляет 80%.

Литература

1. Голован А. Т., Основы электропривода, Госэнергоиздат, 1959.
2. Сандлер А. С., Электрооборудование производственных механизмов, Госэнергоиздат, 1958.
3. Кожевников К. И., Выбор передаточного числа редуктора приводов вспомогательных механизмов прокатных станков, «Электричество», 1957, № 7.
4. Кожевников К. И., Диаграмма тока двигателя вспомогательных механизмов прокатных станков, «Электричество», 1956, № 6.
5. Гейлер Л. Б., Электропривод в тяжелом машиностроении, Машгиз, 1958.
6. Вешневский С. Н., Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей, Госэнергоиздат, 1954. [26.8.1963]



Способы повышения коммутационной надежности двигателей прокатных станов

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ЯКОВЕНКО и инж. С. П. КАЛАНИЧЕНКО

Харьков

Увеличение производства черных металлов наряду с другими мероприятиями обеспечивается улучшением использования оборудования, интенсификацией технологических процессов, автоматизацией и механизацией металлургических агрегатов и т. п.

Повышение производительности прокатных станов, осуществляемое увеличением обжатия и сокращением времени их разгона, торможения и реверса, создает весьма напряженные условия работы электрического привода. Процессы коммутации электрического тока в двигателях прокатных станов и преобразовательных агрегатах значительно осложнены, так как они проходят при резко переменных нагрузках. Поэтому повышение коммутационной надежности электрических машин является одним из путей повышения производительности прокатного стана.

При резко переменных нагрузках коммутирующий поток добавочных полюсов отстает от изменения тока из-за реактивного действия вихревых токов в массивных частях магнитопровода. В результате этого в коммутирующих витках обмотки якоря появляется нескомпенсированная э. д. с. (Δe_s), что и является одной из причин ухудшения коммутации.

Величина сдвигнутого потока дополнительных полюсов определялась в прокатном двигателе типа ПБК-380/125 непосредственно в условиях эксплуатации, а также в лабораторных условиях в генераторе постоянного тока типа МПТ99/47А (1350 кВт, 550/820 в, 850 об/мин). Обе машины выполнены с массивной станиной и расслоенными сердечниками добавочных полюсов. Во время переходного процесса в генераторе МПТ99/47А производилось фотографирование интенсивности искрения щеток.

По величине сдвигнутого потока дополнительных полюсов была рассчитана величина нескомпенсированной реактивной э. д. с., значение которой составляет несколько вольт (рис. 1).

К причинам, затрудняющим нормальную коммутацию машин, следует отнести наличие в коммутирующих витках обмотки якоря трансформаторной э. д. с. (e_t), возникающей при регулировании величины основного магнитного потока машины.

Для крупных прокатных двигателей трансформаторная э. д. с. обычно не превышает десятых долей вольта, что подтверждается осциллограммами, снятыми в процессе эксплуатации двигателя ПБК380/125.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что главной причиной ухудшения коммутации электрических двигателей прокатных станов является отставание потока дополнительных полюсов от изменения тока нагрузки, вызванная реактивным действием вихревых токов в магнитопроводе.

Величину сдвигнутого потока можно определить расчетным путем при известном законе

изменения н. с. вихревых токов, создаваемой изменяющимся магнитным потоком дополнительных полюсов.

При изменении тока по закону экспоненты указанную н. с. можно вычислить по следующей формуле [Л. 1]:

$$F_{ja} \approx F_0 \frac{T}{T - T_a} \left(e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{T_a}} \right), \quad (1)$$

где

$$F_0 = 0,66 \frac{l_j}{q^2 \rho} B_0;$$

$$R_w = R_\delta + R_j \left(1 + \frac{R_\delta}{R_\sigma} \right);$$

$$q^2 = \frac{l_j \left(1 + \frac{R_\delta}{R_\sigma} \right)}{2ab\rho R_w};$$

B_0 — установившееся значение магнитной индукции в станине от полного потока дополнительных полюсов;

l_j — средняя длина магнитной силовой линии потока дополнительных полюсов в станине;

ρ — удельное электрическое сопротивление материала станины;

R_δ — магнитное сопротивление воздушного зазора под дополнительными полюсами;

R_σ — магнитное сопротивление потоку рассеяния дополнительных полюсов;

R_j — магнитное сопротивление немагнитных прокладок;

a и b — размеры сторон поперечного сечения станины;

T_a — постоянная времени якорной цепи машины;

$T = \frac{q^2 a^2 b^2}{\pi^2 (a^2 + b^2)}$ — постоянная времени 1-й гармоники вихревых токов в станине.

Для уменьшения степени отставания потока дополнительных полюсов от изменения тока нагрузки возможны два пути:

применение шихтованного магнитопровода дополнительных полюсов;

обеспечение форсировки возбуждения при резких изменениях нагрузки.

Первый путь направлен на уменьшение величины вихревых токов за счет увеличения удельного электрического сопротивления материала магнитопровода.

Лабораторные исследования на моделях магнитопровода показали, что удельное сопротивление шихтованных сердечников с толщиной листов стали, равной 0,5 и 4 мм, повышается примерно в 100 и 40—50 раз соответственно.

Практически в шихтованном магнитопроводе крупной машины неизбежно наличие отдельных замкнутых контуров (стяжные шпильки, болтовые

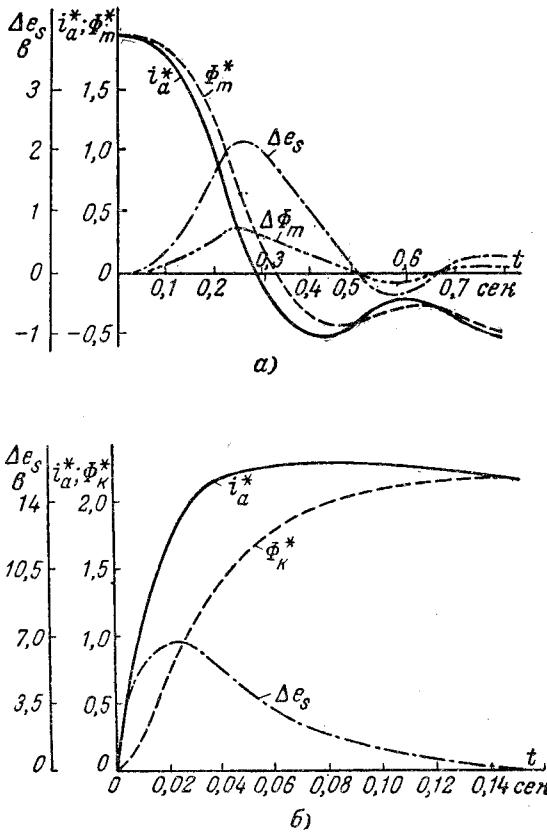


Рис. 1. Графики переходного процесса.

а — двигатель ПБК380/125 ($I_n=9200$ а, $\Phi_{mn}=5,6 \cdot 10^6$ мкс, $e_{sH}=5$ е, $n_n=60$ об/мин); б — генератор МПГ99/47А ($I_n=2460$ а, $\Phi_{rH}=0,5 \cdot 10^6$ мкс, $e_{sH}=7$ е);

$$i_a^* = \frac{i_a}{I_n}; \Phi_m^* = \frac{\Phi_m}{\Phi_{mn}}; \Phi_k^* = \frac{\Phi_k}{\Phi_{kH}}; \Delta \Phi_m^* = \Phi_m^* - i_a^*;$$

$$\Delta e_s \approx e_s \cdot \Delta \Phi_m^* \cdot \frac{n}{n_n};$$

e_{sH} — среднее значение реактивной э. д. с. при номинальной нагрузке.

соединения и т. п.), что снижает эффективность шихтования.

Исследования, проведенные на двигателе типа ПБК 250/145 с шихтованной статорной обмоткой, показали, что сдмпфированный поток дополнительных полюсов уменьшается примерно в 5 раз. Исследования, проведенные на других машинах [Л. 2], дали такие же результаты.

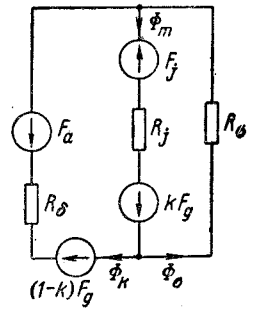
Ко второму пути повышения коммутационной надежности электродвигателей следует отнести применение индуктивных шунтов или диверторов. Задача дивертора — обеспечить такую форсировку возбуждения дополнительных полюсов, чтобы коммутирующий поток во время переходного процесса изменялся пропорционально изменению тока нагрузки.

Законы изменения магнитных потоков дополнительных полюсов могут быть получены на основании электрической схемы замещения магнитной цепи дополнительных полюсов, приведенной на рис. 2.

Для электрической машины, выполненной без компенсационной обмотки, соответствующие формулы имеют следующий вид:

Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи добавочных полюсов.

Φ_k — коммутирующий поток; Φ_δ — поток рассеяния; Φ_m — полный поток; F_k — н. с. обмотки добавочных полюсов; F_a — н. с. якоря; F_j — н. с. вихревых токов в магнитопроводе; k — коэффициент сцепления потока рассеяния с обмоткой добавочных полюсов; R_δ — магнитное сопротивление воздушного зазора под добавочными полюсами; R_σ — магнитное сопротивление потоку рассеяния; R_j — магнитное сопротивление немагнитных прокладок под дополнительными полюсами у статорной обмотки.



$$B_k = \left\{ B_{i1} \left[1 + \frac{R_j}{R_\sigma} (1 - k) \right] - B_{i2} \left(1 + \frac{R_j}{R_\sigma} \right) \right\} i_a^* - B_j; \quad (2)$$

$$B_\sigma = \left\{ B_{i1} \left[k \cdot \frac{R_\delta}{R_\sigma} - \frac{R_j}{R_\sigma} (1 - k) \right] - B_{i2} \frac{R_j}{R_\sigma} \right\} i_a^* - B_j \frac{R_\delta}{R_\sigma}; \quad (3)$$

$$B_m = \left[B_{i1} \left(1 + k \frac{R_\delta}{R_\sigma} \right) - B_{i2} \right] i_a^* - B_j \left(1 + \frac{R_\delta}{R_\sigma} \right), \quad (4)$$

где $B_k = \frac{\Phi_k}{2ab}$ — составляющая магнитной индукции в статоре от коммутирующего потока;

$B_\sigma = \frac{\Phi_\sigma}{2ab}$ — составляющая магнитной индукции от потока рассеяния дополнительных полюсов;

$B_m = \frac{\Phi_m}{2ab}$ — магнитная индукция в статоре от полного потока дополнительных полюсов;

$B_{i1} = \frac{F_a}{2abR_w}$; $B_{i2} = \frac{F_a}{2abR_w}$ — коэффициенты магнитной индукции;

$B_j = \frac{F_j}{2abR_w}$ — среднее значение магнитной индукции в статоре от н. с. вихревых токов;

$i_a^* = \frac{i_a}{I_n}$ — относительное значение тока нагрузки;

I_n — установившееся значение тока нагрузки.

Требуемая величина форсировки возбуждения дополнительных полюсов должна соответствовать следующему равенству:

$$\left\{ B_{i1} \left[1 + \frac{R_j}{R_\sigma} (1 - k) \right] - B_{i2} \left(1 + \frac{R_j}{R_\sigma} \right) \right\} i_a^* =$$

$$= \left\{ B_{i1} \left[1 + \frac{R_j}{R_\sigma} (1 - k) \right] - B_{i2} \left(1 + \frac{R_j}{R_\sigma} \right) \right\} i_a^* +$$

$$+ B_{i1} \left[1 + \frac{R_j}{R_\sigma} (1 - k) \right] i_\Phi^* - B_j \quad (5)$$

или

$$i_\Phi = \eta F i, \quad (6)$$

где $i^*_{\phi} = \frac{i_{\phi}}{I_y}$ — относительное значение тока форсировки;

$\eta = \frac{d_d}{\omega_d \left[\left(1 + \frac{R_j}{R_g}\right) (1 - k) \right]}$ — коэффициент пропорциональности;

ω_d — число витков обмотки дополнительных полюсов;

d_d — число параллельных ветвей цепи дополнительных полюсов.

При наличии форсировки возбуждения дополнительных полюсов н. с. вихревых токов имеет две составляющие:

F_{ja} — от тока нагрузки, изменяющегося по закону экспоненты [формула (1)];

$F_{j\phi}$ — от тока форсировки.

Вторая составляющая н. с. вихревых токов определяется по интегралу Дюамеля:

$$F_{j\phi} = F_{\phi} i^*(t) - \frac{F_{\phi}}{T} e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t \tau_{\phi}(\tau) e^{\frac{\tau}{T}} d\tau, \quad (7)$$

где

$$F_{\phi} \approx 0,66 \frac{I_y}{\eta}.$$

Необходимое значение тока форсировки определяется решением уравнений (6) и (7), т. е.

$$0,34 \frac{di^*_{\phi}}{dt} + i^*_{\phi} = \frac{\eta F_{\phi}}{I_y \cdot T_a} e^{-\frac{t}{T_a}};$$

откуда

$$i_{\phi}(t) \approx \eta F_{\phi} \frac{3T}{3T_a - T} (e^{t/T_a} - e^{-3t/T}). \quad (8)$$

При наличии в машине компенсационной обмотки расчеты усложняются, хотя качественная сторона рассматриваемых явлений не изменяется.

Закон изменения тока форсировки, обеспечиваемого дивертором ($i_{\phi,д}$), определяется по параметрам схемы включения дивертора (рис. 3).

Исходные уравнения для определения $i_{\phi,д}$ в операторной форме при нулевых начальных условиях имеют следующий вид:

$$(1 - \delta) pL_d i_a + r_d i_d = pL_{ш} \cdot i_{ш} + r_{ш} i_{ш}; \quad (9)$$

$$i_d = (1 - \delta) i_a + i_{\phi,д}; \quad (10)$$

$$i_{ш} = \delta i_a - i_{\phi,д}, \quad (11)$$

где $\delta = \frac{r_d}{r_{ш} + r_d} = \frac{I_{ш}}{I_a}$ — относительная величина тока, протекающего через дивертор в стационарном режиме.

Рис. 3. Схема замещения индуктивного шунта.

МП — машина постоянного тока; r_n — нагрузочное сопротивление; L_d — индуктивность обмотки добавочных полюсов; $L_{ш}$ — индуктивность обмотки индуктивного шунта; r_d — активное сопротивление обмотки добавочных полюсов; $r_{ш}$ — активное сопротивление обмотки индуктивного шунта.

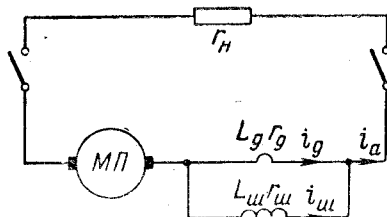
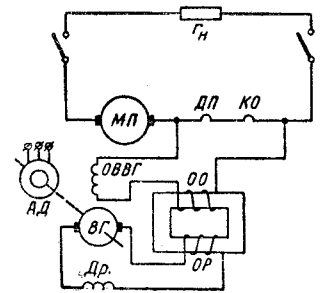


Рис. 4. Схема индуктивного шунта с переменной индуктивностью.

ОО — основная обмотка индуктивного шунта; ОР — размагничивающая обмотка индуктивного шунта; ВГ — вспомогательный генератор; ОБВГ — обмотка возбуждения вспомогательного генератора; Др — дроссель.



Решение уравнений (9) — (11) относительно тока форсировки имеет вид:

$$i_{\phi,д}(t) = \beta \frac{I_y T_0}{T_a - T_0} (e^{-t/T_a} - e^{-t/T_0}), \quad (12)$$

где

$$\beta = \delta - \frac{(1 - \delta)L_d}{L_{ш}}; \quad (13)$$

$$T_0 = \frac{L_{ш} + L_d}{r_{ш} + r_d}. \quad (14)$$

Для оценки эффективности дивертора сравним выражения (8) и (12):

$$i_{\phi,д} = i_{\phi}$$

или

$$\begin{aligned} \beta I_y \frac{T_0}{T_a - T_0} (e^{-\frac{t}{T_a}} - e^{-\frac{t}{T_0}}) &\approx \\ \approx \eta F_{\phi} \frac{T}{T_a - \frac{T}{3}} (e^{-\frac{t}{T_a}} - e^{-\frac{3t}{T}}), \end{aligned} \quad (15)$$

откуда следует:

$$T_{ш} = \frac{T}{3}; \quad (16)$$

$$\beta = 3\eta \frac{F_{\phi}}{I_y}. \quad (17)$$

Дивертор с параметрами, определенными из равенств (16) и (17), обычно невозможно применить. Например, для генератора МПТ99/47А имеем:

$$\delta = 0,97; \quad \frac{L_{ш}}{L_d} \approx \frac{1}{20}.$$

Практически величина δ не должна превышать 20%. При больших значениях δ заметно сказывается температурное состояние обмоток дивертора и дополнительных полюсов, что может привести к нарушению нормальных условий коммутации в стационарных режимах работы машины.

При $\delta \leq 20\%$ и $T_0 = \frac{T}{3}$ форсировка возбуждения всегда отрицательна ($\beta < 0$). Поэтому следует принимать $T_0 > \frac{T}{3}$ (увеличивать индуктивность дивертора), что, однако, приводит к затяжной форсировке и может отрицательно сказаться на качестве коммутации. Для обеспечения оптимальной величины и формы импульса тока форсировки индуктивность дивертора должна быть переменной.

Принципиальная схема дивертора, позволяющая обеспечить одинаковый характер изменения индуктивности как при нарастании, так и при

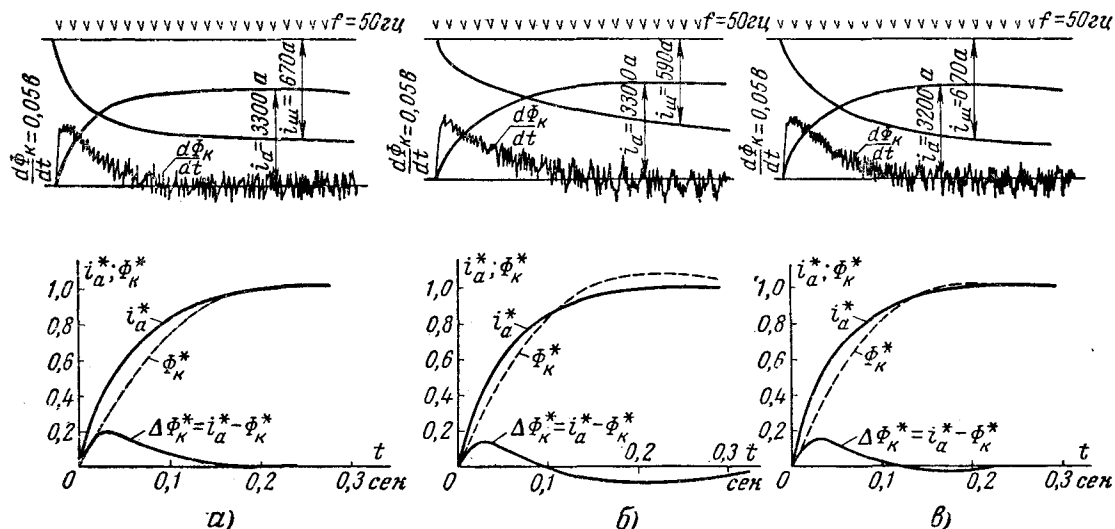


Рис. 5. Переходные процессы в генераторе МПТ99/47А при $L_m \approx 4$ и $L_d = \text{const}$ (а), $L_m \approx 8$ и $L_d \approx \text{const}$ (б) и $L_m \approx \text{var}$ (в).

уменьшении нагрузки, представлена на рис. 4. Дивертор с переменной индуктивностью имеет, кроме основной обмотки, размагничивающую обмотку, которая возвращает магнитную цепь дивертора в первоначальное ненасыщенное состояние по истечении переходного процесса в якорной цепи машины. Размагничивающая обмотка питается от вспомогательного генератора небольшой мощности.

Основным недостатком такой схемы дивертора является то, что оптимальные параметры дивертора могут быть подобраны только для определенного переходного процесса.

При изготовлении дивертора с достаточной форсирующей способностью требуется обеспечить начальное значение индуктивности дивертора возможно большим при всех режимах работы двигателя.

Для того чтобы дивертор обеспечивал положительную форсировку возбуждения дополнительных полюсов, начальное значение его индуктивности должно выбираться в зависимости от величины δ . Ниже приведены минимальные значения индуктивности дивертора в зависимости от δ , рассчитанные из условия $\beta = 0$:

$\delta, \%$	0	5	10	15	20	25
$\frac{L_m}{L_d}$	∞	19	9	6	4	3



Изложенные выше теоретические выводы проверены экспериментально.

Исследования проводились на некомпенсированном генераторе типа МПТ99/47А, ток через дивертор составлял 20%.

На рис. 5 приведены осциллограммы переходных процессов и результаты их обработки при постоянной индуктивности дивертора $\frac{L_m}{L_d} \approx 4$ ($\beta \approx 0$) и $\frac{L_m}{L_d} \approx 8$ ($\beta \approx 0,1$) и при переменной индуктивности дивертора

$$\frac{L_m}{L_d} \approx 10 \text{ при } t=0 \text{ (} \beta \approx 0,12 \text{) и } \frac{L_m}{L_d} \approx 4,5 \text{ при } t \rightarrow \infty \text{ (} \beta \approx 0,02 \text{).}$$

Экспериментальные данные подтверждают теоретические выводы.

Литература

1. Рюденберг Р., Переходные процессы в электроэнергетических системах, Издательство иностранной литературы, 1955.
2. Яковенко В. А., Влияние вихревых токов на коммутацию машин постоянного тока при толчкообразных нагрузках, «Вестник электропромышленности», 1958, № 4.

[2.10.1963]

Грозоупорность высоковольтных воздушных линий электропередач¹

Кандидат техн. наук А. С. МАЙКОПАР

Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики

Широкое развитие линий электропередач 220—500 кВ, а также подготовка к сооружению линий еще большего напряжения повышают требования к надежности их работы и, в частности, к высокой грозоупорности.

Опыт работ двухцепных линий 220 кВ и выше показал несовершенство существующих методик оценки (в том числе «Руководящих указаний по перенапряжениям» [Л. 1]) их грозоупорности и определил поиск уточненных решений.

Одно из наметившихся направлений, включающее большую группу американских работ и исследование Д. В. Разевига [Л. 2], исходит из предположения, что несоответствие действительной грозоупорности упомянутых линий существующей методике расчета является следствием недоучета замыканий на землю из-за ударов молнии в опору. При этом повышение точности методики осуществлялось за счет более полного учета индуктированных перенапряжений.

Другой подход оказался возможным благодаря работам В. В. Бургсдорфа [Л. 3] и М. В. Костенко, И. Ф. Полового и Д. В. Шишмана [Л. 4], определившим по эксплуатационным показателям линий 35—220 кВ зависимость вероятности прорыва молнии в функции защитного угла. Применительно к двухцепным линиям высших классов напряжения весьма важное значение прорывов молнии через тросовую защиту отметил В. В. Бургсдорф [Л. 5], причем по мере накопления эксплуатационных данных это было подтверждено зависимостью числа грозовых отключений от величины защитного угла [Л. 6]. М. В. Костенко, И. Ф. Половой и А. Н. Розенфельд [Л. 7], используя новые эксплуатационные данные [Л. 6], вывели эмпирическую зависимость вероятности прорыва молнии от угла защиты с учетом высоты опор, причем отключения за счет ударов молнии в опору оценивались при помощи старой методики [Л. 1]. Такой подход, как отметили И. С. Стекольников и Б. Н. Горин [Л. 8], неправилен, поскольку он ставит вероятность прорыва молнии в зависимость от методики оценки грозовых отключений при ударах молнии в опору, которая сама по себе является предметом дискуссии.

Некоторое представление об удельном весе прорывов молнии и обратных перекрытий линий рассматриваемого типа дает опыт эксплуатации линий электропередач 345 кВ [Л. 9]. При наличии двух цепей удельное число грозовых отключений в год составляет 14,5 на 100 км при 100 грозовых днях, а количество отключений лишь верхней фазы составляет 10,5; при одной цепи отключений верхней фазы было всего 6,6. Удвоенная разность этих значений представляет собой отключения двухцепной линии за счет прорывов молнии, так как большинство перекрытий изоляции обусловлено перенапря-

жениями, превышающими возможный разброс рядных характеристик гирлянд изоляторов (несколько процентов), и поэтому вероятности перекрытия при одной или при двух гирляндах верхней фазы близки друг другу. Полученная таким образом величина составляет 7,8 отключения, или 53,8% от общего числа отключений. Соответственно 46,2% отключений падает на обратные перекрытия при ударах молнии в опору.

Разработка методики расчета, правильно отражающей как абсолютные числа грозовых отключений, так и доли отключений за счет прорывов молнии и обратных перекрытий, особенно для линий высших классов напряжения, весьма важна, поскольку это предопределяет как конструктивные особенности линий, так и необходимые грозозащитные мероприятия.

Анализ прямого удара молнии в опору основывается на физических представлениях о механизме образования фронта тока молнии.

В настоящее время считается, что вокруг канала лидера молнии образуется коронный чехол, который образует зону предварительной ионизации. Превращение одной из нитей короны в высокопроводящую плазму создает ступень лидера, что сопровождается выделением значительной энергии и яркой вспышкой, свидетельствующей о газодинамическом характере расширения канала лидера; одновременно с этим усиливается свечение всего лидерного канала.

Ряд гипотез ступенчатого продвижения лидера не позволяет создать исчерпывающей картины явления; наиболее вероятной причиной образования ступени следует считать повышение градиента потенциала на конце лидера с увеличением размеров зоны предварительной ионизации и ростом доли напряжения, приходящейся на нити короны. При этом перед головкой лидера образуется переходная зона длиной примерно в 1 м с градиентами, превышающими ионизационный, что создает условия для сильной ионизации воздуха вдоль одной из нитей коронного чехла. Скорость распространения ионизации в соответствии с представлениями Краваса — Леба [Л. 10] тем меньше, чем больше соотношение ионизованных частиц до и после переходной зоны; если плотности ионизации в обеих зонах равны, то распространение электромагнитного возмущения по газовому проводнику происходит со скоростью, близкой к скорости света.

Распределенный вдоль лидера избыточный заряд вытесняется в зону ионизации, причем формирование избыточного заряда на участке канала только что образовавшейся ступени происходит постепенно по мере развития зоны ионизации. В первом приближении в момент окончания развития ступени зона ионизации может быть представлена клиновидной формой.

Последняя ступень при соприкосновении канала молнии с землей или заземленным объектом будет

¹ Статья печатается в порядке обсуждения.

отличаться лишь большей длиной из-за усиления поля вблизи земли. Последующий процесс нейтрализации избыточного заряда сопровождается перемещением зарядов с периферии чехла к стержню лидера или так называемым явлением «обратной короны». Попытки определить скорость этого процесса Вагнером и Хилменом [Л. 11] не дали результата из-за недостаточной разрешающей способности современной аппаратуры.

Это обстоятельство, а также то, что перемещение зарядов в режиме «обратной короны» происходит по уже ионизованному каналу, свидетельствует о большой скорости процесса, которая во всяком случае на порядок больше скорости развития «прямой короны» в неионизованном воздухе (больше или равна $5 \cdot 10^8$ см/сек). Вследствие этого развитие главного канала молнии определяется лишь ионизационным волновым процессом в переходной зоне собственно лидера и не лимитируется скоростью перемещения зарядов с периферии коронного чехла.

Фронт тока главного канала молнии, определяемый незначительной длиной переходной зоны, можно считать практически отвесным, а амплитуда тока определяется произведением плотности распределенного заряда и его скорости. В области последней ступени возрастание амплитуды тока в соответствии с изменением распределенного заряда будет происходить постепенно, а ток будет максимальным в момент, когда закончится нейтрализация избыточного заряда в области последней ступени.

Схематически образование фронта тока молнии изображено на рис. 1, откуда следует, что косугольная форма волны имеет место лишь в заземленном объекте. При наличии встречного лидера от земли аналогичная зона ионизации должна развиваться вверх от объекта; ее длина должна быть меньше, чем длина последней ступени ведущего лидера, а главноканальный процесс первоначально разовьется в виде взаимной нейтрализации встречного лидера и части основного лидера. В момент окончания нейтрализации встречного лидера на объект падает крутая волна (рис. 1) и лишь затем начнется увеличение тока молнии. Подобная картина наблюдается на некоторых осциллограммах прямого удара молнии [Л. 12] в виде своеобразной «ступеньки».

Длина ступени лидерного процесса и соответствующая ей длина фронта тока молнии подчинены статистической закономерности. Результаты измере-

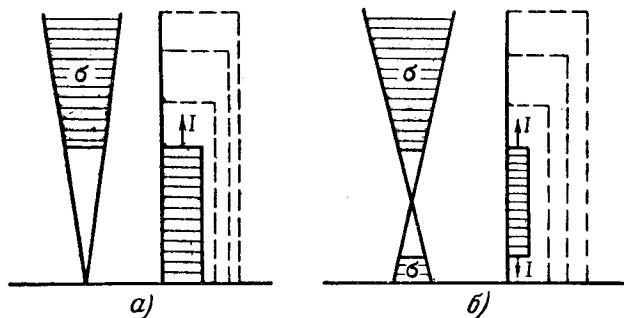


Рис. 1. Распределение заряда в последней ступени лидера и ток главноканальной стадии без встречного лидера (а) и с встречным лидером (б).

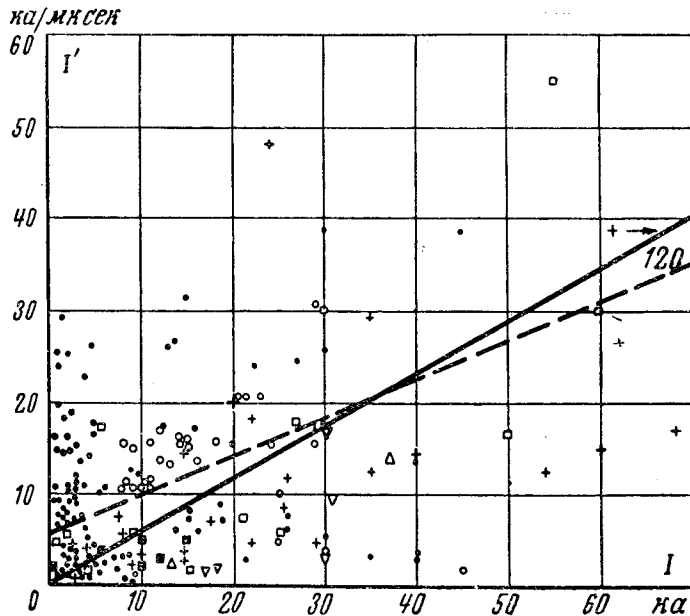


Рис. 2. Результаты совместных полевых регистраций амплитуды и крутизны тока молнии.
▽—[Л. 17]; ●—[Л. 13 и 14]; ○—[Л. 12]; □—[Л. 16]; +—[Л. 15]; ■—[Л. 18]; △—[Л. 32]; --- корреляция; ——— длина фронта волны 2,5 мксек.

ний токов и крутизны тока молнии [Л. 12—18 и 32] приведены на рис. 2. Разброс точек обнаруживает лишь слабую тенденцию к росту крутизны с увеличением амплитуды тока молнии; корреляция дает линейную зависимость при коэффициенте корреляции, равном 0,4. Если заменить ее прямой, проведенной из начала координат, то длина фронта тока молнии будет равна 2,5 мксек. При средней скорости главноканального процесса, составляющей 0,15с, средняя длина последней ступени канала молнии оказывается равной 112,5 м, что в общем не противоречит результатам полевых фоторегистратий.

При определении перенапряжений целесообразно воспользоваться теоремой о запаздывающих потенциалах и уравнениями электромагнитного поля. Основы такого подхода разработаны Вагнером [Л. 19], сформулировавшим основные положения, Шпором [Л. 20], который вывел расчетные формулы с учетом бегущих волн, и А. И. Долгиновым [Л. 21], указавшим на отсутствие бегущих волн при определении магнитной составляющей перенапряжения; последовательное изложение этой методики имеется у Д. В. Разеви́га [Л. 2]. Перенапряжение на изоляции из-за прохождения по опоре прямоугольной волны, обусловленной встречным лидером, происходит по схеме, изображенной на рис. 3, на котором опора замещена цилиндром с осевой волной тока I_0 . Перенапряжение на изоляции с учетом магнитной и электрической составляющих и размагничивающего действия троса равно (см. приложение I):

$$U_{из} = 30 \ln \frac{ct}{r} \cdot I_0 (1 - k_{св}), \quad (1)$$

где I_0 — прямоугольная волна тока;
 r — радиус цилиндра опоры;
 c — скорость света;
 $k_{св}$ — коэффициент связи.

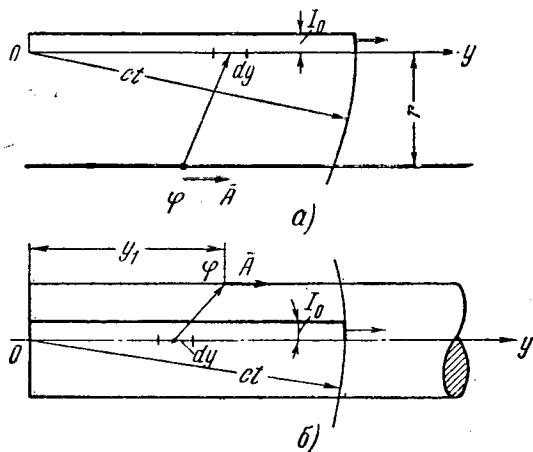


Рис. 3. Схема для определения потенциала на конце проводящего цилиндра с прямоугольной волной тока I_0 по его оси.

Эта формула справедлива до момента времени t — момента прихода отраженной от земли волны противоположного знака.

Множитель перед I_0 , аналогичный волновому сопротивлению для линии 345 кВ с опорой высотой 45 м и средним радиусом 2,5 м, составляет 107 Ом, что достаточно хорошо согласуется с результатами реальных измерений [Л. 22], когда было выяснено, что волновое сопротивление равно примерно 130 ± 70 Ом; в то же время при использовании уравнений электромагнитного поля [Л. 23 и 24] из-за пренебрежения запаздыванием получается значительно большая величина.

При разрядном напряжении изоляции в 4500 кВ для времени двойного пробега волны по опоре [Л. 22] I_0 составляет 55 кА, а защитный уровень в несколько раз больше; это свидетельствует о незначительной роли перенапряжений, обусловленных встречным лидером, при наличии высоких башенных опор и тем более опор порталного типа.

Формулы для вычисления магнитной и электрической составляющих перенапряжения имеют довольно громоздкий вид (см. приложение II). При практически встречающемся диапазоне $10 < h < 40$ м и $5 < h_0 - h < 7$ м и при средней длине фронта в 2,5 мксек суммарное значение индуктированного перенапряжения от канала приблизительно равно:

$$U_{\text{и}} \approx 0,5 I h, \quad (2)$$

где I — амплитудное значение тока молнии, кА;
 h — высота подвеса провода, м.

Сравнение индуктированного напряжения, вычисленного по выражению (2) и по данным «Руководящих указаний» [Л. 1], произведено на рис. 4. Результаты сравнения свидетельствуют о резком росте индуктированной составляющей перенапряжения в области больших токов молнии, характерных для защитного уровня линий высших классов напряжения.

Составляющие перенапряжения, обусловленные током, протекающим по опоре и заземлителю, определяются с учетом отсоса тока в тросы по схеме с сосредоточенными постоянными. Анализ показывает, что без большой погрешности этот отсос составляет в среднем 15%, так что ток опоры $I_{\text{оп}} \approx 0,85 I$

и $I'_{\text{оп}} = 0,85 I'$. По току опоры через векторный потенциал определяется индуктированное напряжение, которое приблизительно оценивается по выражению

$$U_{\text{оп}} = 0,85 L_{\text{оп}} I', \quad (3)$$

где I' — крутизна тока молнии;
 $L_{\text{оп}} = 0,7 h$ — для опор башенного типа;
 $L_{\text{оп}} = 0,55 h$ — для порталных опор.

При определении суммарного перенапряжения на изоляции размагничивающее действие троса учитывается при помощи коэффициента связи в соответствии с рекомендациями «Руководящих указаний» [Л. 1]:

$$\frac{U_{\text{из}}}{1 - k_{\text{св}}} = \left[0,5h + 0,85 \left(\frac{L_{\text{оп}}}{2,5} + R_s \right) \right] I. \quad (4)$$

Удельное число отключений при ударах молнии в опору $n_{\text{оп}}$ при известном защитном уровне определяется по выражению

$$n_{\text{оп}} = 0,5 N \eta v_1, \quad (5)$$

где v_1 — вероятность амплитудного значения тока молнии.

Коэффициент перехода импульсного перекрытия в силовую дугу η для линий 110—220 кВ на металлических опорах принимается равным 0,7 [Л. 3]. При большем напряжении повышаются градиенты рабочего напряжения вдоль гирлянд изоляторов, что способствует увеличению коэффициента перехода; однако скорость восстановления напряжения оказывается меньшей, а это препятствует формированию силовой дуги. Как показывает анализ этих факторов [Л. 25], суммарное их воздействие для линий электропередач 345—500 кВ позволяет считать коэффициент перехода и в данном случае равным 0,7.

Число ударов молнии в линию определяется на основе полевых измерений [Л. 26—29], результаты которых приведены на рис. 5. Около каждой точки указано число измерений. Пунктирная кривая представляет собой корреляцию, а сплошная кривая — приближенную аппроксимацию, характеризующуюся формулой

$$N = 8 h_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где N — число ударов молнии в течение года, проходящихся на 100 км линий при 100 грозовых днях;

$h_{\text{ср}}$ — средняя высота подвеса провода или троса, м.

Для распределения числа ударов молнии в опору и в грозозащитный трос приведенных данных недостаточно; здесь, как и ранее [Л. 1], приближенно считается, что доля ударов молнии в опору и трос одинакова.

Количество отключений линий за счет прямых ударов молнии в провода можно вычислить по формуле

$$n_{\text{пр}} = N \eta v_{\text{п}} v_{\text{л}}. \quad (7)$$

Для определения вероятности прорыва молнии $v_{\text{п}}$ можно воспользоваться данными А. П. Беякова [Л. 30] по максимальной вероятности прорыва

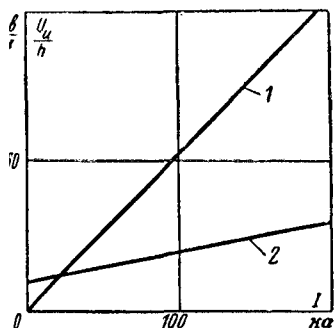


Рис. 4. Индуцированные перенапряжения, вычисленные по формуле (2) и на основании «Руководящих указаний» [Л. 1] (графики 1 и 2 соответственно).

$v_{п.макс}$, полученным в лабораторных условиях при вариации соотношения высоты ориентировки лидера H_0 к высоте опоры (троса) h_0 в диапазоне 5—20 и защитного угла α от 17 до 70°. При этом равновероятное положение лидера относительно объекта при $H = const$ учитывается постоянным коэффициентом k , а изменение вероятности высоты ориентировки считается пропорциональным вероятности амплитудного значения тока молнии:

$$v_{п} = k \int_0^{\infty} \frac{\partial v_I}{\partial I} v_{п.макс} dI = \frac{k v_{п.макс}}{1 + \frac{k_1}{k_2} \ln v_{п.макс}}, \quad (8)$$

где

$$v_{п.макс} = \exp \left[-\frac{k_1}{\text{tg}^{1,3} \alpha} \frac{H}{h_0} \right] \text{ по [Л. 30];}$$

$$v_I = \exp [-k_2 I] \text{ по [Л. 1];}$$

$$k = 0,4; \quad k_1 = 0,135; \quad k_2 = 0,0385.$$

Ввиду незначительного колебания защитного уровня линий электропередачи при ударе молнии в провод минимальную высоту ориентировки лидера молнии можно в среднем принять равной 200 м. Тогда в соответствии с выражением (8) можно получить семейство кривых (рис. 6) вероятности прорыва молнии в функции защитного угла при различной высоте опоры. Для $h_0 = 20$ м расчетные данные соответствуют эксплуатационным [Л. 3]. Довольно широкий диапазон эксплуатационных данных, помимо статистического разброса, объясняется некоторым различием защитного уровня линий электропередач.

Поскольку вероятность непосредственного перекрытия между тросом и проводом при небольших сопротивлениях заземления мала, полное удельное число отключений равно:

$$n = n_{обр} + n_{пр}. \quad (9)$$

При расчете грозоупорности линий электропередач с опорами башенного типа из-за различных условий пробоя изоляционных промежутков верхних, средних и нижних фаз, вообще говоря, нужно применять соответствующие коэффициенты связи и учитывать величину индуцированных напряжений

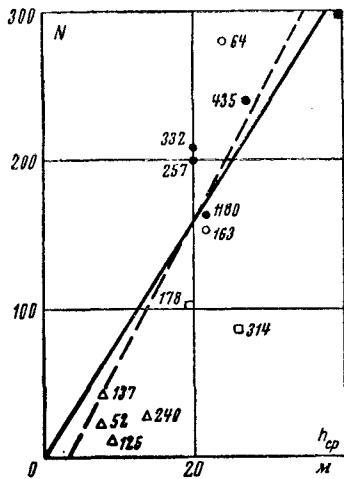


Рис. 5. Полевые регистрации числа ударов в линии.
● — [Л. 26]; ○ — [Л. 27]; □ — [Л. 28].
■ — [Л. 9]; △ — [Л. 29].

и рабочего напряжения. Результаты подобного расчета для линии 345 кВ приведены на рис. 7. На рис. 7,а изображены значения тока молнии, вызывающего пробой изоляционных промежутков в зависимости от фазы рабочего напряжения, а на рис. 7,б — соответствующее этому току удельное число отключений. Как следует из представленных на данном рисунке зависимостей, на долю верхних проводов приходится 2,7 отключения, а с учетом прорывов 8,2 отключения, или 77% от их общего числа, на средние провода — 1,4 отключения, или 14%, и на нижние 1 отключение, или 9%. По эксплуатационным данным 72,5% отключений происходит за счет верхних проводов и 27,5% — за счет других проводов. Однако абсолютное значение расчетного удельного числа отключений, равное 10,6, отличается от эксплуатационных данных, находящихся в пределах от 14,5 до 8,04.

Учитывая сложность приведенного расчета, а также изменения эксплуатационных данных, более подходящей оказывается методика, при которой напряжение промышленной частоты и его дифференциация по фазам не учитываются. Результаты таких расчетов для ряда линий, а также имеющийся опыт эксплуатации приведены в табл. 1, причем разрядные напряжения при времени 2,5 мксек получены интерполяцией экспериментальных данных.

Опыт эксплуатации зарубежных линий приведен главным образом на основе докладов СИГРЭ за 1960 и 1961 гг. [Л. 6 и 31]. Длительность наблюдения для большинства линий превышает 2000—3000 км·лет, что позволяет считать эти данные достаточно надежными.

Опыт эксплуатации отечественных линий 220—500 кВ получен на основе специального анализа грозовых отключений в течение 1959—1961 гг. Результаты данного анализа приведены в табл. 2, в которой имеются данные как по линиям с тросами, так по бестросовым линиям и линиям с частичной тросовой защитой. Хотя длительность наблюдения по бестросовым линиям невелика (менее 400 км·лет), их исключительно большая грозовая аварийность свидетельствует о необходимости в тросовой защите.

Одноцепные линии 220—500 кВ с двумя тросами имеют удовлетворительную грозоупорность.

Двухцепные линии 220—330 кВ, несмотря на наличие троса с углом защиты, равным примерно 30°, имеют от 5,25 до 6,1 отключения.

В ряде случаев удалось обнаружить места повреждения изоляции.

По двухцепным линиям 220 кВ зафиксированы перекрытия средних фаз, свидетельствующие об обратных перекрытиях при ударах молнии в опоры.

Перекрытия на одной и той же фазе на соседних опорах при удовлетворительных сопротивлениях заземления, обусловленные прорывами молнии через тросовую защиту, имели место как на двухцепных линиях 220 кВ, так и на электропередачах 500 кВ. Последнее обстоятельство показывает, что даже при малых защитных углах (~20°) прямые удары молнии в провода предотвратить нельзя.

На рис. 8 изображены зависимости удельного числа отключений в функции защитного угла для ряда линий по эксплуатационным данным, показы-

Основные параметры и грозозащитные

Напряже- ние, кв	Защитный угол, град	Тип и число элемен- тов в гирлянде	Опора		Удар молнии						
			h_0 , м	h , м	$k_{св}$	$\frac{U_{инд}}{I}$	$\frac{L_{оп}}{2,5}$	R_3 , ом	$U_{2,5}$, кв	I , ка	v_I , %
345	26	5''×21	41,2	33,65	0,434	16,82	9,45	5	2 040	123,5	0,851
345	34	5 ³ / ₄ ''×18	45	37,15	0,24	18,55	10,4	3	2 000	87,9	3,47
275	45	279,5×1 523×16	35,13	29,63	0,28	14,8	8,32	10*	1 370*	62,6	9,13
275	13	254×146×16	37,9	26,7	0,368	13,35	7,48	20*	1 850	79,5	4,74
220	30	13×Π-4,5	38,0	32,0	0,266	16	8,95	3,5	1 760	90,2	3,14
138 (A)	30	5 ³ / ₄ ''×9	28,4	25,6	0,42	12,8	7,16	7	1 150	80	4,68
110	16,5	7×Π-4,5	24,8	13,65	0,204	6,82	3,82	5	1 000	87,6	3,47
400	20	20×Π-8,5	29,9	22,0	0,266	11	4,88	7	2 750	172,4	0,109
380	24	280×170×20	26,46	18,5	0,28	9,25	4,08	25	2 460	101	2,09
380	31	280×170×20	28,7	18,8	0,285	9,4	4,14	25	2 460	101,5	2,04
287,5	13,4	5''×24	33,25	23,65	0,234	12,82	5,22	2	2 600	179	0,105
220	20	14×Π-4,5	22,8	17,55	0,3	8,77	3,86	7	1 870	148,2	0,33
1 000	20	30×ΠМ-16	34,4	22,5	0,3	11,25	4,96	7	3 400	226	0,0214
750	20	24×Π-11	34,4	23,5	0,278	11,75	5,16	7	3 150	197	0,0525
330	27,5	17×Π-4,5	41,4	32,25	0,24	16,12	9,05	7	2 180	96,5	2,46
220	23,5	13×Π-4,5	29,24	22,75	0,279	11,37	5,0	7	1 760	112	1,35
220	14	13×Π-4,5	38,0	32,0	0,357	16	8,96	3,5	1 760	103	1,905
220	20	14×ΠМ-4,5	22,8	17,55	0,3	8,78	3,86	7	1 580	125	0,832
110	16,5	7×ΠМ-4,5	24,8	13,65	0,204	6,83	3,83	5	820	77,4	5,14

* Цифры ориентировочные.
** За 1949—1954 гг. 5 627 км·лет.

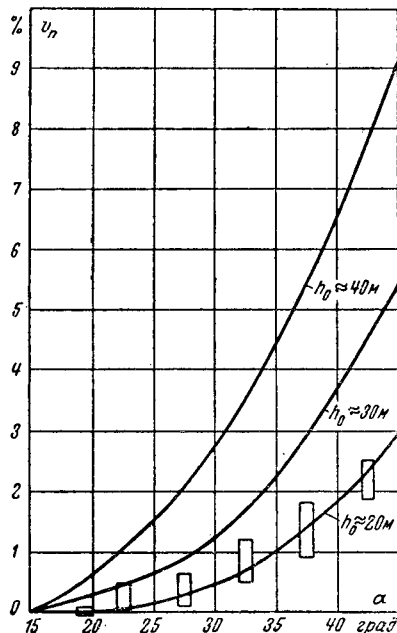


Рис. 6. Вероятность прорыва молнии в функции угла защиты при различной высоте опор линии. — расчет; □ — опыт эксплуатации [Л. 3].

вающие, что рост грозовых отключений происходит не только с увеличением угла защиты, но и при переходе от относительно низких порталных опор к двухцепным башенным опорам высотой 30—45 м. Причиной этого в соответствии с расчетами, приведенными в табл. 1, является как повышение вероятности прорыва молнии, так и рост обратных перекрытий с увеличением высоты опоры.

Результаты расчетов имеют отклонения от эксплуатационных данных в основном в диапазоне 10—15% и находятся в пределах возможных колебаний самих эксплуатационных показателей.

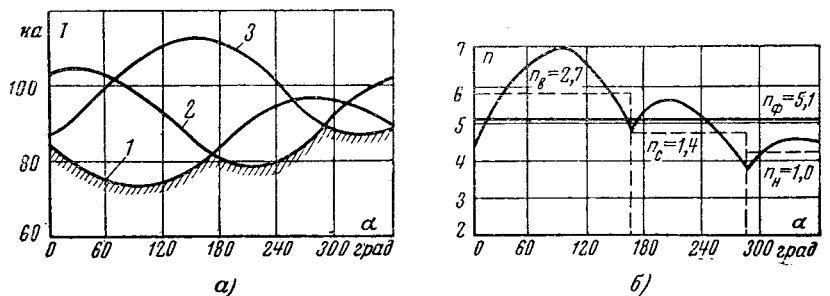


Рис. 7. Ток молнии (а) и удельное число отключений линий (б) в зависимости от защитного угла. 1 — верхние провода; 2 — средние провода; 3 — нижние провода.

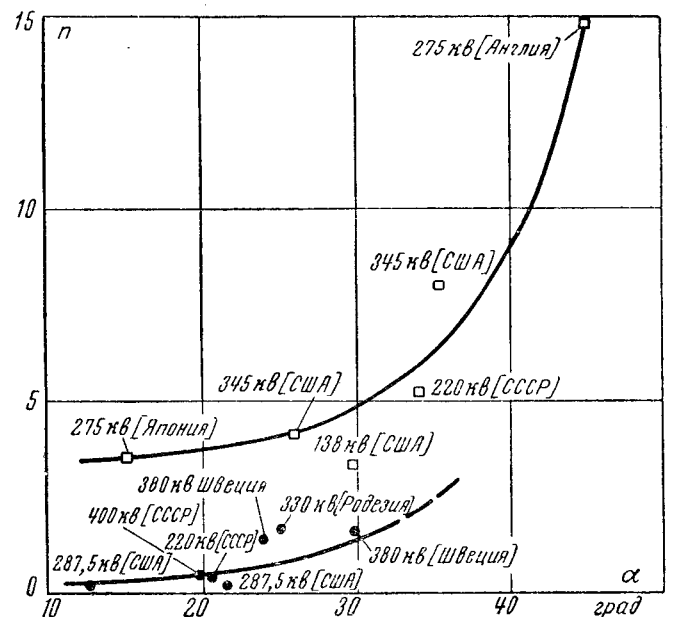


Рис. 8. Удельное число грозовых отключений линий электропередачи в зависимости от защитного угла по опыту эксплуатации. ○ — одноцепные линии; □ — двухцепные линии.

Таблица 1

характеристики линий электропередачи

в опору		Удар молнии в провод					$n = n_{оп} + n_{пр}$	Обратные перекрытия, %	Прорывы молнии, %	$n_{оп.эксп}$	$\frac{n}{n_{оп.эксп}}$
N	$n_{оп}$	$U_{мин}, кВ$	$I, ка$	$v_I, \%$	$v_{II}, \%$	$n_{пр}$					
281	0,836	1 570	15,7	54,7	1,8	1,94	2,776	30	70	4,28	0,648
320	3,88	1 525	15,25	55,6	4,4	5,5	9,38	41,4	58,6	8,04	1,165
241	7,69	1 050*	10,5	67,0	7,3	8,25	15,94	48,2	51,8	15,30	1,04
266	4,39	1 400	14	58,4	0,04	0,0435	4,43	99,0	1,0	3,50	1,26
264	2,91	1 300	13	60,8	2,3	2,58	5,49	47	53	5,25	1,045
178,2	2,92	897	8,97	70,9	0,7	0,535	3,45	84,5	15,5	3,44	1,001
158	1,92	770	7,7	74,0	0,05	0,041	1,96	98	2	2,10**	0,98
192	0,0736	2 160	21,6	40,0	0,30	0,176	0,249	29,2	70,8	0,275	0,905
172	1,26	1 900	19,0	48,2	0,4	0,232	1,492	84,5	15,5	1,50	0,995
181,5	1,295	1 900	19,0	48,2	1,2	0,735	2,03	63,8	36,2	1,54	1,315
213	0,078	2 060	20,6	45,2	0,05	0,034	0,102	66,6	33,4	0,10	1,02
135,7	0,157	1 420	14,2	58,0	0,05	0,027	0,184	85,3	14,7	0,25	0,737
222	0,0166	2 780	27,8	34,4	0,45	0,238	0,255	6,5	93,5		
211	0,0387	2 600	26,0	36,8	0,448	0,244	0,283	13,8	86,2		
296	2,55	1 670	16,7	52,6	1,65	1,8	4,35	58,6	41,4		
234	1,1	1 300	13,0	60,8	0,5	0,5	1,60	68,8	31,2		
264	1,76	1 300	13,0	60,8	0,02	0,022	1,78	98,8	1,2		
135,7	0,396	1 200	12,0	63,1	0,05	0,0298	0,426	93	7		
158	2,84	670	6,7	77,4	0,05	0,043	2,88	98,5	1,5		

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики грозоупорности линий электропередач высших классов напряжения СССР

Напряжение линии, кВ	Тип опоры	Высота опоры, м	Защитный угол, град	Среднее число грозодней в году	Длительность наблюдений, км·лет	Удельное число отключений в год на 100 км при 100 грозовых днях	Количество коротких замыканий при грозовых перекрытиях		Возможность АПВ при грозовых перекрытиях, %
							однофазные, %	двухфазные, %	
220	Одноцепная	25	Грозозащитного троса нет	34	4 776	13,2	97	3	99
220	"	25	20	26	4 020	9,5	99	11	98
220	"	25	20	25	23 701**	0,25	93	7	100
220	Двухцепная	38	Троса нет	33	337	18,0	100	0	100
220	"	38	30	29,7	2 517	5,25	100	0	97
330	Одноцепная	33	Троса нет	34	178	34,5	100	0	100
330	"	33	25	27,5	361	2,0	100	0	100
330	Двухцепная	37,5	32	26	316	6,1	100	0	100
400—500	Одноцепная	30	20	30	13 412	0,275*	100	0	100

* Не учтено семь случаев разрушения гирлянд при грозовых перекрытиях.
** Включено 11 370 км·лет и два отключения по первичным материалам [Л. 3].

Вытекающие из анализа грозозащитные мероприятия рассмотрены на примере отечественных линий 220 кВ.

Установка на двухцепных опорах линий 220 кВ двух тросов вместо одного в основном сказывается на уменьшении отключений за счет прорывов молнии. Суммарное число отключений при изменении угла защиты с 30° при одном тросе до 14° при двух тросах уменьшается с 5,5 до 1,8, т. е. в 3 раза. Примерно аналогичная картина имеет место для линий 345 кВ, когда с установкой второго троса число отключений уменьшилось с 8,04 до 4,22 [Л. 31]; последняя цифра получена при 780 км·лет наблюдений. Этот результат подтверждает первоначальную предпосылку о равноценном значении для двухцепных высококи линий прорывов молний и обратных перекрытий.

Дополнительным мероприятием для двухцепных линий 220 кВ является уменьшение сопротивления

заземления до 1 Ом, что при двух тросах позволяет уменьшить число отключений примерно до 1,5.

Применение малогабаритных изоляторов со сниженным на 18% разрядным напряжением гирлянд вдвое ухудшает грозозащитные характеристики линий 220 кВ.

Число отключений линий электропередачи с разработанными в Ленинградском отделении Гидроэнергопроекта двухцепными опорами порталного типа с двумя тросами будет равно 1,6, т. е. примерно столько же, сколько и при опорах башенного типа с двумя тросами, однако это все же в 6—7 раз хуже, чем для одноцепной линии 220 кВ (сравнение производилось при сопротивлении заземления в 7 Ом).

Электропередачи 750—1 000 кВ по ориентировочным расчетам Теплоэлектропроекта должны иметь опоры высотой 34,4 м и защитный угол около 20°; расчетное число отключений 0,25—0,28 говорит

о том, что такие линии будут достаточно грозоупорны.

В заключение следует отметить, что автоматическое повторное включение, как это следует из данных, приведенных в табл. 2, в подавляющем большинстве случаев при грозовых перекрытиях может быть успешным. Зафиксированные устойчивые повреждения главным образом возникали при разрушении дефектных изоляторов; случаев неуспешного автоматического повторного включения из-за отказа схем автоматики релейной защиты и приводов выключателей немного, и при должном уровне эксплуатации они не будут иметь места.

При оценке срока бесперебойной работы линий с грозозащитным тросом, когда грозовые повреждения относительно мало, можно считать, что практически все грозовые перекрытия могут быть ликвидированы автоматическим повторным включением.

Приложение I. Для цилиндра, изображенного на рис. 3, векторный потенциал на его поверхности в точке y_1 находится из выражения

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \int_0^{\frac{ct+y_1}{2}} \frac{dy}{\sqrt{(y-y_0)^2+r^2}} = \\ &= \frac{30I}{c} \left\{ \ln \left[\frac{ct-y_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{ct-y_1}{2}\right)^2+r^2} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \ln \left[-y + \sqrt{y_1^2+r^2} \right] \right\}, \end{aligned}$$

где μ_0 — магнитная проницаемость;
 I_0 — прямоугольная волна тока по оси цилиндра;
 r — радиус цилиндра;
 t — время;
 c — скорость света.

При помощи теоремы о запаздывающих потенциалах вычисляем магнитную составляющую индуктированного напряжения

$$U_M = c \int_{\frac{t}{2}}^t \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} [\tau; c(t-\tau)] d\tau = 15I_0 \ln \frac{ct}{r}.$$

Аналогично через скалярный потенциал электрического поля определим электрическую составляющую индуктированного напряжения U_0 . Сумма двух составляющих равна:

$$U = U_M + U_0 = 30I_0 \ln \frac{ct}{r}.$$

Приложение II. Векторный потенциал магнитного поля от канала молнии при ударе ее в опору равен:

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{h_0}^y \frac{dy}{y \pm h} = \frac{30I}{c} \ln \left(1 + \frac{vt}{h_0 \pm h} \right),$$

где h — высота подвеса провода;
 v — скорость главноканальной стадии.

Если принять во внимание лишь вертикальную компоненту поля, то формула для вычисления магнитной составляющей индуктированного напряжения примет следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{нм}} &= \int_0^h \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} dh = 30I \frac{v}{c} \frac{t}{t_\phi} \left[\left(\mp \frac{h_0 \mp h}{vt} + 2 \right) \times \right. \\ &\quad \times \ln \left(\frac{h_0 \mp h}{vt} + 1 \right) \pm \left(\frac{h_0}{vt} + 2 \ln \left(\frac{h_0}{vt} + 1 \right) \pm \right. \\ &\quad \left. \left. \pm \frac{h_0 \mp h}{vt} \times \ln \frac{h_0 \mp h}{vt} \mp \frac{h_0}{vt} \ln \frac{h_0}{vt} \right] , \end{aligned}$$

где t_ϕ — длина фронта тока молнии.

При определении электрической составляющей индуктированного напряжения сначала находится скалярный потенциал φ и затем

$$\begin{aligned} U_{\text{п.з}} &= \int_0^t \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} [\tau; c(t-\tau)] d\tau = \\ &= \pm \frac{30I}{1 + \frac{c^2}{v^2}} \frac{c}{v} \frac{t}{t_\phi} \left\{ 1 + \frac{h \mp h}{vt} + \frac{-\frac{h_0 \mp h}{vt} + \frac{c^2}{v^2}}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{v^2}}} \times \right. \\ &\quad \times \ln \frac{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{c^2}{v^2}} \right) \left(1 + \frac{h_0 \mp h}{vt} \right)}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{v^2}} \sqrt{\left(\frac{h_0 \mp h}{vt} \right)^2 + \frac{c^2}{v^2}} + \frac{c^2}{v^2} + \frac{h_0 \mp h}{vt} - \frac{c^2}{v^2}} - \\ &\quad \left. - \sqrt{\left(\frac{h_0 \mp h}{vt} \right)^2 + \frac{c^2}{v^2}} \right\}. \end{aligned}$$

Литература

1. Руководящие указания по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3—220 кВ, Госэнергоиздат, 1954.
2. Разевиг Д. В., Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи, Госэнергоиздат, 1959.
3. Бургсдорф В. В., Исследование грозозащиты энергосистем, «Электричество», 1949, № 2.
4. Костенко М. В., Сравнительные расчеты грозозащиты линий передачи. Труды научно-технической сессии по перенапряжениям, Госэнергоиздат, 1950.
5. Burgsdorf V., Discussion CIGRE, 1958, vol. 1, p. 751.
6. Casson W. The Performance of E. H. V. Lines Designed of Operate at Voltages above 255 kV, CIGRE, 1960, report № 416.
7. Костенко М. В., Половой И. Ф. и Розенфельд А. Н., Роль прорывов молний на провода мимо тросов для грозозащиты линий высших классов напряжения, «Электричество», 1961, № 4.
8. Стекольников И. С. и Горин Б. Н., Дискуссия, «Электричество», 1962, № 6.
9. Schlomann R., Price W., Jonson I., Anderson J., 1956 Lightning Field Investigation on the OVEC 345 kV System, «Power Apparatus and Systems», 1958, № 34.
10. Cravath A., Loeb L., The Mechanism of the High Velocity of Propagation of Lightning Discharges, «Phys. Rev.», 1935, № 6, p. 259.
11. Wagner S., Hileman A., The Lightning Stroke, «Power Apparatus and Systems», 1958, № 36.
12. Berger K., Resultate Blitzmessungen der Jahre 1947—1954 auf dem Monte san Salvatore, Bull. SEV, 1955, № 9.
13. Комельков В. С., Исследование максимальной крутизны фронта волн токов молнии, «Электричество», 1941, № 5.
14. Комельков В. С., Полевые регистрации максимальной крутизны фронта токов молнии, ЖТФ, 1942, № 6.
15. McCann G., The Measurement of Lightning Current in Direct Strokes, Trans. AIEE, 1944, p. 1157.
16. Hylten-Cavallius N., Stromberg A., The Amplitude, Timme to half Value and steepness of Lightning Currents, ASEA Journ., 1955, p. 129.
17. Stekolnikov I., Valeev H., L'étude de la foudre dans un laboratoire de campagne, CIGRE, 1937, rapport № 330.
18. McEchron K., Lightning to the ESB, Trans. AIEE, 1941, № 9.
19. Wagner C., McCann G., Inducted Voltages on Transmission Lines, Trans. AIEE, 1942, p. 916.
20. Szoor S., Nouvelle théorie des surtensions induites, CIGRE, 1948, rapport № 308.
21. Долгинов А. И., Индуктированные напряжения на линиях электропередачи, «Электричество», 1949, № 10.
22. Breuer G., Schultz A., Schioman R., Price W., Field Studies of the sur Response of a 345 kV Transmission. Tower and Ground Wire, «Power Apparatus and Systems», 1958, № 34.

Метод фиксированных параметров и метод базисных относительных приростов для расчета экономичного режима энергосистемы¹

Кандидат техн. наук К. А. СМЕРНОВ

Энергетический институт им. Кржижановского

В [Л. 1] приведен способ расчета оптимального режима энергосистемы, в котором в качестве переменных для выражения параметров режима приняты вещественные и мнимые составляющие узловых токов I_i . Дается метод балансирования режима и его оптимизации. Оптимизация производится с помощью подсчета частных производных расходов в энергосистеме по составляющим узловых токов, которые при соблюдении заданных ограничений режима могут рассматриваться как независимые переменные.

В этой статье приводится метод, названный методом фиксированных параметров, в котором балансирование режима производится так же, как указано в [Л. 1], однако дается другой способ оптимизации режима. Он нагляден и дает непосредственную связь с методами, основанными на принципе равенства относительных приростов.

Примем, что во всех узловых точках сети, число которых равняется n , могут иметься как генерирующие источники активной и реактивной мощностей, так и нагрузки потребителей и что заданы максимальные и минимальные пределы, ограничивающие допустимые значения напряжений в узловых точках и мощностей генерирующих источников. В узловой точке, принятой в качестве базисной, вектор напряжения U_6 направлен по вещественной оси.

В каждом данном режиме соответственно заданным условиям напряжения m узловых точек с индексами h , активные мощности m_1 источников с индексами a и реактивные мощности m_2 источников с индексами r будут иметь фиксированное значение, равное верхнему или нижнему пределу или заданной постоянной величине. Последнее, в частности, относится к мощностям узловых точек, в которых имеются только нагрузки.

Статические характеристики нагрузок и ущерб у потребителей, связанный с отклонением напряже-

ния в узловых точках от оптимального, будем учитывать по способу, изложенному в [Л. 2].

Представим активные и реактивные генерирующие мощности и напряжения любых узловых точек j в виде некоторых функций от $n' = 2n$ составляющих токов I_i и параметра U_6 :

$$\left. \begin{aligned} P_{rj} &= \varphi_{Pj}(U_6, I_i); \\ Q_{rj} &= \varphi_{Qj}(U_6, I_i); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$U_j = \varphi_{Uj}(U_6, I_i). \quad (2)$$

При этом должны соблюдаться уравнения, выражающие равенство нулю активных и реактивных нагрузок в базисной точке:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{6P} &= U_6 \sum_{j=1}^n I''_j = 0; \\ \varphi_{6Q} &= U_6 \sum_{j=1}^n I'''_j = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и уравнения, выражающие постоянство фиксированных напряжений и мощностей источников:

$$\varphi_{Uh}(U_6 I_i) = U^*_h; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a(U_6, I_i) &= P^*_r; \\ \varphi_r(U_6, I_i) &= Q^*_r, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где I''_j и I'''_j — вещественные и мнимые составляющие узловых токов, причем совокупность всех I''_j и I'''_j дает все токи I_i . Верхний индекс (*) в уравнениях (4) и (5) указывает, что это значение параметра задано фиксированным.

Чтобы каждый произвольный режим, находящийся в заданных пределах, мог быть сбалансирован и фиксированные напряжения и мощности имели заданную величину, в этом режиме могут быть приняты произвольно активные мощности $n-1-m_1$ источников и реактивные мощности $n-1-m-m_2$

23. Lundholt R., Finn R., Price W., Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concept, «Power Apparatus and Systems», 1958, № 34.

24. Wagner C., Hileman A., New Approach to Calculation of Lightning Performance of Transmission Lines, «Power Apparatus and Systems», 1956, № 27, 1959, № 45, 1960, № 50.

25. Майкопар А. С., Переход мощного импульсного перекрытия в силовую дугу на воздушных линиях электропередачи, Труды ЦНИЭЛ, 1956, вып. V.

26. Hasson E., Waldorf S., An Eight-Year Investigation of Lightning Currents and Preventive Lightning Protection on a Transmission System, «El. Eng.», 1944, № 5.

27. Waldorf S., Experience With Preventive Lightning Protection on Transmission Lines, «El. Eng.», 1941, № 6.

28. Lewis W., Foust C., Lightning Investigation on Transmission Lines VI, «El. Eng.», 1937, № 1.

29. Стекольников И. С. и Ламдон А. А., Измерение ферромагнитными регистраторами токов молнии в энергосистемах СССР, «Электричество», 1938, № 5.

30. Беляков А. П., Защищенность объекта при любом его расстоянии от тросового молниеотвода, «Электричество», 1940, № 7.

31. Casson W., Troisième rapport sur le comportement des lignes de tension supérieure à 225 kV, CIGRE, 1961, rapport № 9.

32. McCann G., Harder E., Direct Strokes and Lightning Surges on Transmission Lines, CIGRE, 1948, rapport № 9.



источников. Эти мощности будем называть свободными. Мощности остальных источников будут иметь либо заданную фиксированную величину, либо будут служить для балансирования активных и реактивных мощностей и соблюдения заданных напряжений. Последние будут определяться в процессе расчета режима.

Напряжение в базисной точке U_0 при балансировании режима будем считать постоянным и равным заданной величине.

Данный режим, т. е. значения всех n' токов I_i , будет определяться решением уравнений (3), (4) и (5), а также (1) для принятых значений свободных мощностей.

Для оптимизации режима в данном методе будем рассматривать $n'=2n$ уравнений связи $\varphi_s(U_0 I_i) = A_s^*$, которые являются теми же, что были приняты при балансировании режима, включая уравнения (1), выражающие постоянство принятых значений свободных мощностей, т. е. будем считать свободные мощности фиксированными в некоторых значениях. Здесь $s=1, 2, 3 \dots n'$, причем каждому s соответствует определенный индекс функций φ в уравнениях (1), (3), (4) и (5).

Составим следующие n' уравнений для всех i :

$$\frac{\partial G}{\partial I_i} + \sum_{s=1}^{n'} \lambda_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial I_i} = 0, \quad (6)$$

где G — суммарные расходы в энергосистеме, выраженные как функция от I_i ;

λ_s — некоторые множители.

Значения токов I_i исходного сбалансированного режима подставим в уравнения (6) и из полученной системы линейных уравнений определим все значения λ_s .

Поскольку число функций φ_s равно числу переменных I_i , задание величин φ_s определяет все I_i , причем в области возможных практических режимов эта система значений I_i будет единственной. Следовательно, функция G может считаться функцией от величин φ_s , как независимых переменных; величины φ_s в свою очередь являются функциями от переменных I_i .

Тогда, рассмотрев уравнение (6) как результат дифференцирования сложной функции, получаем, что величины λ_s представляют собой частные производные функции G по φ_s :

$$-\lambda_s = \frac{\partial G}{\partial \varphi_s} \quad (7)$$

и являются составляющими вектора градиента функции G в n' -мерном пространстве с координатами φ_s .

В соответствии с уравнением (7) полный дифференциал расходов будет равен:

$$dG = \sum_{s=1}^{n'} -\lambda_s d\varphi_s. \quad (8)$$

Следовательно, если мы примем некоторые небольшие приращения параметров φ_s , пропорциональные величинам λ_s , т. е. $\Delta\varphi_s = \theta \lambda_s$, где θ — некоторая малая положительная величина, одинаковая

для всех s , то в соответствии с уравнением (8) изменение режима пойдет в направлении убывания G по нормали к эквипотенциальной поверхности расходов в n' -мерном пространстве.

Принимая последовательно такие приращения для свободных параметров φ_s , балансируя каждый раз режим и определяя новые значения λ_s , мы будем все время приближаться к оптимуму, так как расходы будут все время уменьшаться. При этом, если изменение $\Delta\varphi_s$ какого-нибудь параметра φ_s будет иметь такой знак, что параметр φ_s должен будет выходить за установленные для него пределы, то значение этого параметра для следующего шага расчета необходимо оставлять равным его предельному значению. Напротив, если для какой-нибудь функции φ_s , которая имела максимальное или минимальное предельные значения, знак λ_s , а следовательно, $\Delta\varphi_s$ будет такой, что этот параметр должен отойти от предельного значения в допустимую для него зону, то для следующего шага расчета нужно принять это изменение $\Delta\varphi_s$. Таким образом, этот параметр уже не будет фиксирован в предельном значении и может считаться свободным.

В процессе выполнения расчета нужно следить за величинами генерирующих мощностей, выбранных для компенсации активных и реактивных потерь и поддержания фиксированных напряжений в узловых точках, а также за напряжениями в узловых точках, где они не фиксированы. Если некоторые мощности будут выходить за допустимые для них пределы, нужно взять их значения фиксированными в предельном значении и принять в качестве неизвестных мощностей какие-либо другие мощности из числа свободных. Если некоторые напряжения выйдут за допустимые пределы, то их также следует закрепить в предельном значении и принять неизвестными некоторые дополнительные реактивные мощности из числа тех, которые были свободными.

Величина θ должна выбираться достаточно малой, чтобы при каждом шаге не происходило слишком большого изменения величин λ_s и чтобы они по возможности не изменили своего знака. С другой стороны, она не должна быть слишком малой, чтобы процесс оптимизации не шел слишком медленно.

По мере приближения к оптимуму некоторые величины λ_s генерирующих мощностей будут сохранять абсолютные значения, отличные от нуля, и будут иметь знаки, отвечающие закреплению параметра в верхнем или нижнем пределе. Другие λ_s генерирующих источников будут все время уменьшаться, приближаясь к нулю. Эти λ_s будут соответствовать свободным мощностям. Когда все λ_s свободных мощностей будут равны нулю, мы будем иметь оптимальный режим, поскольку приращение расходов при любом изменении свободных мощностей будет равно нулю. При этом будут соблюдены уравнения (6), если в них λ_s относятся только к параметрам, фиксированным в заданном предельном значении, и будут соблюдены отвечающие этому уравнению связи. Таким образом, мы получаем соответствие с уравнениями, определяющими оптимум по методу множителей Лагранжа.

Знаки множителей λ_s для параметров, закрепленных в предельных значениях, будут соответство-

вать закреплению каждого данного параметра в максимальном или минимальном предельных значениях. Поэтому, как показано в [Л. 3], здесь будет оптимум также и для того случая, когда ограничивающие условия заданы максимальным и минимальными пределами возможного изменения параметров режима, т. е. когда ограничения переменных заданы неравенствами.

При этом в оптимальном режиме не имеет значения, какие из генерирующих источников из числа не фиксированных в предельном значении были выбраны для компенсации изменения потерь и поддержания напряжений и какие считались свободными. Если бы мы выбрали в качестве свободных другие мощности, то и для них в оптимальном режиме мы получили бы $\lambda_s = 0$.

Относительно большие абсолютные значения λ_s для некоторых фиксированных параметров, отвечающих заданным ограничениям режима, говорят о том, что ограничение этих параметров в предельном значении существенно ухудшает экономичность режима.

Выше мы считали напряжение базисной точки U_6 заданным и рассматривали его во всех уравнениях в качестве постоянного параметра. Но по условию задачи оно может быть неизвестным и необходимо найти его экономичное значение. Тогда надо ввести U_6 в число независимых переменных наравне с токами I_i и вычислить производную $\frac{dG}{dU_6}$ с учетом ограничений режима, которая определит необходимое направление изменения величины U_6 для приближения к оптимуму. Для этого необходимо составить дополнительное уравнение связи $\varphi_{U_6}(U_6) = U_6 = U^*_6$, и ввести дополнительный множитель λ_{U_6} , который и будет равен искомой производной с обратным знаком. Поскольку при этом все $\frac{\partial \varphi_{U_6}}{\partial I_i}$ будут равны нулю, уравнения (6), из которых определяются величины λ_s , не изменятся.

Теперь установим связь приведенного выше метода с методом расчета оптимального режима с использованием принципа равенства относительных приростов.

В настоящее время при расчетах оптимального режима с учетом потерь в сетях часто пользуются условием оптимума, которое выражается в том, что для всех электростанций должны быть равны величины $\mu = \frac{\epsilon_j}{1 - \frac{\partial \pi}{\partial P}}$ или величины μ и ν , определяемые

по формулам (6-5) и (6-6) [Л. 4]. Эти формулы получены, исходя из метода множителей Лагранжа при решении задачи экономического распределения мощностей без учета ограничений режима.

Указанным величинам дается физическая интерпретация как приростам расходов на отдельных электростанциях при изменении нагрузки базисной точки за счет загрузки этих электростанций.

Однако можно, наоборот, принять равенство этих относительных приростов в качестве исходного критерия оптимального режима, придать ему более

широкий смысл, введя учет всех заданных ограничений режима, и получить таким образом самостоятельный, достаточно простой метод расчета, не исходя из способа множителей Лагранжа.

Действительно, если эти приросты расходов на электростанциях будут равны, то, перебрасывая нагрузку с одной электростанции на базисную точку и затем с базисной точки на какую-нибудь другую электростанцию, мы в итоге получим, что приращение расходов в энергосистеме при перераспределении нагрузок между любыми электростанциями будет равно нулю. Это является признаком оптимального распределения мощностей.

Итак, в качестве критерия оптимального распределения мощностей принимается равенство относительных приростов расходов в энергосистеме при изменении только активной или только реактивной нагрузок базисной точки за счет изменения активной и реактивной мощностей отдельных электростанций, участвующих в регулировании режима, и при соблюдении заданных ограничений режима. Назовем их базисными относительными приростами и обозначим ϵ_{6P_i} и ϵ_{6Q} .

Такой критерий применяется в [Л. 5], где имеется в виду соблюдение постоянства заданных напряжений в нескольких узловых точках.

При решении некоторых задач по определению оптимального режима энергосистемы необходимо знать величину базисных относительных приростов системы в оптимальном режиме. Она может быть получена непосредственно при определении оптимального режима по методу фиксированных параметров. Величины $-\lambda_{6P}$ и $-\lambda_{6Q}$ в этом методе при оптимальном режиме согласно сказанному в [Л. 3] представляют собой изменение расхода в системе dG при бесконечно малом изменении активной или реактивной нагрузки базисной точки на dP_6 или dQ_6 при соблюдении заданных ограничений режима и, следовательно, равны интересующим нас относительным приростам:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_{6P} &= \frac{dG}{dP_6} = \epsilon_{6P}; \\ -\lambda_{6Q} &= \frac{dG}{dQ_6} = \epsilon_{6Q}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В отличие от условий, отвечающих уравнению (7), для режима оптимума согласно [Л. 3] функции φ_s для свободных мощностей могут принимать любые бесконечно малые приращения. При этом мощности, выбранные для балансирования потерь и поддержания напряжений, должны принимать некоторые приращения, отвечающие соблюдению заданных условий.

Приращение функции dG в данном случае не зависит от того, за счет изменения мощности какой из электростанций, участвующих в регулировании режима, при соблюдении заданных постоянных напряжений и мощностей получены приращения dP_6 или dQ_6 . Следовательно, в оптимальном режиме эти относительные приросты должны быть равны для всех электростанций, которые могут участвовать в регулировании режима, т. е. свободных и выделенных для балансирования потерь и поддержа-

ния напряжений. Это также является доказательством справедливости критерия равенства базисных относительных приростов отдельных электростанций.

С помощью метода фиксированных параметров можно определить базисные относительные приросты отдельных электростанций также для неоптимального режима при заданных электростанциях, балансирующих режим и поддерживающих фиксированные напряжения.

Как известно, принцип равенства относительных приростов расходов используется в методе определения оптимального режима с помощью расчета вариаций (малых приращений) активных и реактивных мощностей ΔP_j и ΔQ_j отдельных электростанций при балансировании режима через базисную точку [Л. 6 и 7].

Данное выше определение базисных относительных приростов позволяет уточнить расчетные формулы для этого метода.

При расчете по методу вариаций режима с учетом постоянства заданных напряжений в нескольких узловых точках, изменения нагрузок по статическим характеристикам и ущерба у потребителей должно быть соблюдено равенство базисных относительных приростов расходов свободных электростанций $\varepsilon_{\Delta P_j}$ и $\varepsilon_{\Delta Q_j}$. Они определяются по следующим формулам, относящимся соответственно к вариациям ΔP_j при $\Delta Q_0 = 0$ и ΔQ_j при $\Delta P_0 = 0$:

$$\varepsilon_{\Delta P_j} = \frac{\Delta G}{\Delta P_0} = \frac{\varepsilon_{Pj} + \sum_{l=1}^n \frac{\Delta V_l}{\Delta P_j} + \sum_{h=1}^m \varepsilon_{Qh} \frac{\Delta Q_h}{\Delta P_l} + \varepsilon_{Qz} \frac{\Delta Q_z}{\Delta P_j}}{1 - \frac{\Delta \pi}{\Delta P_j} - \sum_{l=1}^n \frac{\Delta P_{nl}}{\Delta P_j}}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\Delta Q_j} = \frac{\Delta G}{\Delta Q_0} = \frac{\varepsilon_{Qj} + \varepsilon_{Pz} \left(\frac{\Delta \pi}{\Delta Q_j} + \sum_{l=1}^n \frac{\Delta P_{nl}}{\Delta Q_j} \right) + \sum_{l=1}^n \frac{\Delta Y_l}{\Delta Q_j} + \sum_{h=1}^m \varepsilon_{Qh} \frac{l \Delta Q_h}{\Delta Q_j}}{1 - \frac{\Delta q}{\Delta Q_j} - \sum_{l=1}^n \frac{\Delta Q_{nl}}{\Delta Q_j} + \sum_{h=1}^m \frac{\Delta Q_h}{\Delta Q_j}}; \quad (11)$$

Где ε_{Pj} , ε_{Qj} , ε_{Pz} , ε_{Qz} и ε_{Qh} — относительные приросты расходов по активной и реактивной мощностям на электростанции j , на электростанции z , выделенной для балансированных активных или реактивных потерь, и на электростанциях h , выделенных для регулирования напряжения в m точках;

$\Delta \pi$ и Δq — приращения активных и реактивных потерь в сети;

ΔP_{nl} и ΔQ_{nl} — приращения нагрузки узловых точек в соответствии со статическими характеристиками;

ΔQ_h — приращения реактивных мощностей электростанций, выделенных для регулирования напряжения;

ΔY_b — приращения ущерба у потребителей, связанного с отклонением напряжения узловых точек от оптимального для потребителей.

Знаменатели в формулах (10) и (11) представляют собой относительные приращения активной и реактивной нагрузок базисной точки при вариациях активной или реактивной мощностей электростанций; они могут быть непосредственно получены при расчете баланса режима.

Эти формулы существенно расширяют те, по которым определялись величины \varkappa'_i , \varkappa_a и \varkappa_r в [Л. 6].

Литература

1. Смирнов К. А., Расчет экономичного распределения активных и реактивных мощностей в энергосистеме при заданных ограничениях режима, «Электричество», 1962, № 3.
2. Смирнов К. А., Расчет экономичного распределения активных и реактивных мощностей и оптимальных уровней напряжения в энергосистемах. Доклады на Всесоюзной конференции по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах. Издание Энергетического института им. Кржижановского, 1961.
3. Смирнов К. А., Определение относительного минимума функции в задачах оптимального распределения мощностей в энергетических системах при заданных пределах допустимого режима, «Электроэнергетика» (сборник статей), Издание Энергетического института им. Кржижановского, вып. 6, 1962.
4. Маркович И. М., Режимы энергетических систем, Госэнергоиздат, 1957.
5. Смирнов К. А., Выбор наиболее экономичного состава включенных агрегатов, «Электричество», 1962, № 1.
6. Шаханов В. С., Метод и алгоритм вычисления частных производных электрических потерь в сложных сетях энергосистем на электронных цифровых машинах, «Электричество», 1960, № 12.
7. Шаханов В. С., Общий алгоритм вычислительной и управляющей электронной цифровой машины для экономической оптимизации оперативных режимов сложных энергетических систем, «Электричество», 1962, № 4.

[8.2.1963]



Расчет динамических режимов электромагнитов

Доктор техн. наук, проф. В. А. КАРАСЕВ

Москва

Расчеты нестационарных процессов в электромагнитах приобретают особое значение в тех случаях, когда к электромагнитам предъявляются требования быстродействия. Такие требования в современных системах регулирования и управления являются доминирующими. Данная задача требует решения нелинейных дифференциальных уравнений, что сделать с достаточной для инженерных расчетов точностью затруднительно. Имеется много попыток применить те или иные методы приближенных вычислений или упростить уравнения за счет допущений в исходной физической картине. На практике, однако, эти методы не могут быть применены или в связи с их сложностью, или вследствие неточности получаемых результатов.

В настоящей работе составлены универсальные семейства кривых, полученные с помощью электронной счетной машины, которые позволяют находить время срабатывания электромагнита и его динамические характеристики. Эти кривые применимы для различных видов электромагнитов с поступательным движением якоря, начиная с миниатюрных реле и кончая тяжелыми крановыми электромагнитами постоянного тока.

В работе [Л. 1] показано, что в качестве схемы замещения электромагнита с учетом влияния вихревых токов и при пренебрежении рассеянием может быть принята схема, изображенная на рис. 1. Здесь L — коэффициент самоиндукции электромагнита, подсчитанный в предположении бесконечно большого удельного сопротивления магнитопровода и отсутствия вихревых токов; ω — число витков обмотки; $r_{\text{пр}}$ — сопротивление, отражающее влияние вихревых токов, подсчитываемое по специальным формулам [Л. 1]; r — сумма внутреннего омического сопротивления источника и сопротивления обмотки (все сопротивления в омах); E — э. д. с. источника (β).

Обозначим через x общий приведенный зазор:

$$x = \delta_x + \delta'_x + \frac{\lambda}{\mu_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где δ_x и δ'_x — текущие значения рабочих зазоров, см;

λ — длина силовой линии в магнитопроводе, см;

$\mu_{\text{ср}}$ — средняя магнитная проницаемость.

В случае одного рабочего зазора (второй зазор — скользятый) нужно полагать $\delta'_x = 0$.

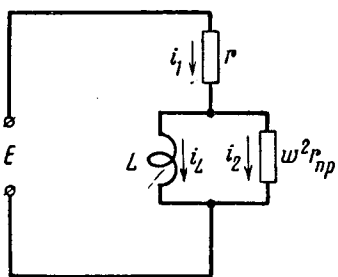


Рис. 1.

Так как на протяжении большей части процесса третье слагаемое в уравнении (1) мало по сравнению с двумя первыми, то для большинства инженерных расчетов можно принять магнитную проницаемость μ постоянной. К этому имеются основания также и

потому, что обычно в быстродействующих электромагнитах индукция не доходит до зоны насыщения во время процесса движения. К этому стремятся при конструировании электромагнита, поскольку возникновение насыщения влечет за собой возрастание тока, повышение мощности, а в то же время движение якоря не ускоряется, так как индукция не возрастает. Случай появления магнитного насыщения, когда изменение магнитной проницаемости во время движения существенно, будет разобран особо.

Начальное значение приведенного зазора равно:

$$x_0 = \delta + \delta' + \frac{\lambda}{\mu_{\text{ср}}}.$$

Самоиндукция при начальном зазоре

$$L_0 = \frac{1,25 \cdot 10^{-8} \omega^2 Q}{x_0} [\text{гн}], \quad (2)$$

где Q — площадь, сквозь которую проходит поток в зазоре.

При двух рабочих зазорах по кинематическим условиям $\delta_x = \delta'_x$, поэтому ускорение движения якоря должно определяться по формуле

$$\frac{d^2 \delta_x}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Переходные процессы в электромагните при движении якоря описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E = i_1 r + \omega \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}; \quad \Phi = BQ; \\ B = \frac{1,25 i_L \omega}{x}; \\ \omega \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} = i_2 r_{\text{пр}} \omega^2; \quad i_1 = i_L + i_2; \\ P_{\text{п}} = m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\frac{B}{5000} \right)^2 Q \zeta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где B — индукция в зазоре, гс;

$P_{\text{п}}$ — противодействующее усилие, кг (например, реакция пружины), которое считается постоянным;

$\zeta = 1$ или 2 (в зависимости от числа рабочих зазоров);

m — масса якоря, деленная на ζ , кг·сек²·см⁻¹;

t — время, сек.

Рассмотрим процесс включения электромагнита на постоянную э. д. с. Начальные условия для процесса движения следующие:

при $t = 0$

$$x = x_0; \quad \frac{dx}{dt} = 0; \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = 0.$$

Условие $\frac{dx}{dt} = 0$ вытекает из того, что в момент $t = 0$ скорость равна нулю. В этот момент, соответствующий началу движения, сила противодействия $P_{\text{п}}$ равна электромагнитной силе $\left(\frac{B}{5000} \right)^2 Q \zeta$

и отсюда вытекает условие, что также $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$ см. уравнения (3)]. Обозначив

$$\left. \begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{P_{\Pi}}{k}}; & h &= \frac{10^{-8}\omega Qc\rho_B}{E}; \\ g &= \frac{1,25E\omega}{rc}; \\ N &= \frac{mg}{h^2 P_{\Pi}}; & k &= \frac{Q\zeta}{5000^2}; \\ \rho_B &= 1 + \frac{r}{r_{\Pi P\omega^2}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

и введя новые переменные z, y, θ из условий

$$t = yh, \quad x = \theta g, \quad B = zc, \quad (5)$$

преобразуем уравнения (3) к виду:

$$N \frac{d^2\theta}{dy^2} = 1 - z^2, \quad (6a)$$

$$\frac{dz}{dy} = 1 - \theta z. \quad (6b)$$

Этим уравнениям соответствуют начальные условия: при $y=0$

$$\theta = \theta_0 = \frac{x_0}{g}; \quad \frac{d\theta}{dy} = 0; \quad \frac{d^2\theta}{dy^2} = 0. \quad (7)$$

Энергия, потребляемая электромагнитом, выражается значением $\int_0^t E(i_L + i_2) dt$ и является величиной конечной. Токи i_L и i_2 также конечны. Энергия поля $\frac{1}{8\pi} B^2 Qx$ согласно уравнению (3) равна $\frac{(1,25\omega)^2 i_L^2 Q}{8\pi x}$. Эта величина конечна на протяжении всего процесса. Отсюда при $x=0$ также и $i_L=0$. Можно доказать, что при этом индукция B , принимающая вид неопределенности $1,25\omega \cdot \frac{0}{0}$, конечна.

Втекающий ток i_1 при $x=0$ не становится равным нулю, а поддерживается за счет тока i_2 , обусловленного вихревыми токами. Однако при $x=0$ ток i_1 имеет характерный провал, хорошо видный на осциллограммах (см., например, рис. 8). Физически указанное явление объясняется тем, что от сокращения зазора происходит возрастание потока при снижении тока i_L , так что в конце процесса приложенная э. д. с. E уравновешивается соответствующим значением $\omega \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$. Кроме того, вследствие спадания тока ограничивается рост индукции. Размагничивающее действие вихревых токов влияет в том же направлении. Эти обстоятельства способствуют тому, что в обычных быстродействующих электромагнитах во время движения якоря индукция почти никогда не доходит до насыщения. Часто после остановки якоря на упорах индукция еще продолжает возрастать, и проходит некоторое время до установления полной силы тяжения.

Установим диапазоны изменения величин y, θ, z . Для этого введем условные максимальные значения тока, индукции и тяжения:

$$i_{\max} = \frac{E}{r};$$

$$B_{\max} = \frac{1,25\omega E}{x_0 r}; \quad (8)$$

$$P_{\max} = \frac{B_{\max}^2}{5000^2} Q\zeta = B_{\max}^2 k. \quad (9)$$

Значению B_{\max} соответствуют установившееся значение тока и максимальный зазор. Обычно форсирующая обмотка (т. е. обмотка, ускоряющая включения) в этом случае развивает расчетное усилие. Однако B_{\max} , являясь чисто расчетной величиной, может превышать индукцию насыщения.

Обозначим:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{\max}} = \psi. \quad (10)$$

Подставляя в выражения (4) значение ψ по формулам (10), (8) и (9), имеем:

$$c = B_{\max} \sqrt{\psi}; \quad g = \frac{x_0}{\sqrt{\psi}}. \quad (11)$$

Отсюда, учитывая условия (7), получим:

$$\theta_0 = \frac{x_0}{g} = \sqrt{\psi}; \quad \theta = \frac{x}{x_0} \sqrt{\psi}. \quad (12)$$

Значения $\frac{x}{x_0}$ и $\sqrt{\psi}$ для процесса включения электромагнита меньше единицы, поэтому $\theta < \theta_0 < 1$.

Свяжем коэффициент h с величиной T_{5000} — периодом синусоидального режима, который при индукции в зазоре 5000 гс обуславливает эффективное значение „вольт на виток“, равное $\frac{E}{\omega}$. Величина $0,25 \cdot T_{5000}$ характеризует среднюю электромагнитную постоянную времени, отнесенную к индукции 5000 гс. Очевидно, что

$$\frac{E}{\omega} = 4,44 \cdot 10^{-8} \frac{5000Q}{T_{5000}}. \quad (13)$$

Введем также величину

$$P_{5000} = Q\zeta, \quad (14)$$

соответствующую тяжению электромагнита при индукции в зазоре 5000 гс. Учитывая формулы (13) и (14), из соотношений (4) получаем:

$$h = \frac{\rho_B}{1,11} \sqrt{\frac{P_{\Pi}}{P_{5000}}} \cdot \frac{T_{5000}}{4}. \quad (15)$$

Время движения якоря t_d обычно того же порядка, что величина $0,25 \cdot T_{5000}$. Отсюда значения $y = \frac{t}{h}$ имеют порядок единиц, так как $t \leq t_d$, значение ρ_B не превышает пяти, а $\sqrt{\frac{P_{\Pi}}{P_{5000}}}$ обычно не более 1,5. Поскольку согласно формулам (5) и (11)

$$z = \frac{B}{c} = \frac{B}{B_{\max}} \frac{1}{\sqrt{\psi}},$$

то значение z не превышает нескольких единиц.

Раскроем выражение для коэффициента N в уравнении (6a). Для этого введем величину τ_{5000} , представляющую собой время пробега массой m расстояния x_0 при постоянном тяжении, равном P_{5000} ,

и начальной скорости, равной нулю. При этих условиях

$$mx_0 = \frac{1}{2} P_{5000} \tau_{5000}^2 \quad (16)$$

Подставляя в выражение (4) для N значения из формул (11), (15) и (16), получаем:

$$N = \frac{0,615}{\sqrt{\psi} \rho_B^2} \left(\frac{P_{5000}}{P_{II}} \right)^2 \left(\frac{\tau_{5000}}{0,25T_{5000}} \right)^2 \quad (17)$$

На основе анализа этой формулы с запасом принят диапазон $1 \leq N \leq 80$.

Рассмотрим влияние магнитного насыщения. Будем производить подсчет по методу кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания. Вообще говоря, электромагниты нужно проектировать так, чтобы во время движения индукция в сердечнике была достаточно далека от зоны насыщения (лишь увеличение индукции, а не тока может уменьшить время движения). По кривым для z можно определить значения индукции на протяжении всего процесса движения. Если окажется, что точка насыщения достигнута, то нужно переходить к другим уравнениям, соответствующим участку прямой $B = \text{const}$.

Обозначим через $B_{\text{нас}} = 18000 \frac{Q_M}{Q}$ условную индукцию в зазоре, при которой индукция в стали равна 18000 гс (Q_M — сечение магнитопровода). Выведенные выше соотношения можно считать справедливыми до значений $B < B_{\text{нас}}$. Этому соответствует неравенство $z < z_M = \frac{B_{\text{нас}}}{c}$. Учитывая выражения (4), (8), (9), (10), видим, что приведенные выше формулы можно применять, если

$$z < \sqrt{\frac{QB_{\text{нас}}^2 \zeta}{5000^2 P_{II}}} = \frac{B_{\text{нас}}}{B_{\text{макс}}} \frac{1}{\sqrt{\psi}} \quad (18)$$

Переменная z растет монотонно с ростом y , т. е. времени (см. ниже). Когда z достигает значения z_M , то нужно переходить на упрощенное уравнение $\frac{d^2\theta}{dy^2} = \text{const}$, вытекающее из условия $B = B_{\text{нас}} = \text{const}$ согласно уравнению (6а) и имеющее решение

$$\theta = \frac{H_M}{2} (y^2 - y_M^2) + \left[\left(\frac{d\theta}{dy} \right)_M - H_M y_M \right] (y - y_M) + \theta_M \quad (19)$$

где $H_M = \frac{1 - z_M^2}{N}$.

Здесь значения y_M , θ_M и $\left(\frac{d\theta}{dy} \right)_M$ находятся для точки $z = z_M$.

Если якорь электромагнита имеет скос, характеризуемый углом φ между направлением движения и нормалью к поверхности якоря, то последнее из уравнений (3) видоизменяется следующим образом:

$$P_{II} = \frac{m}{\cos \varphi} \frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{B}{5000} \right)^2 Q \zeta \cos \varphi.$$

Здесь, как и выше, Q — площадь, сквозь которую проходит поток в зазоре; B — индукция в за-

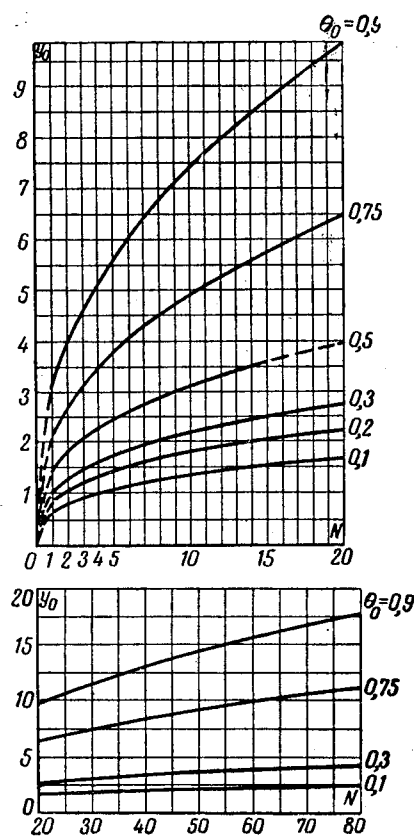


Рис. 2.

зоре. Остальные уравнения остаются неизменными. Таким образом, при использовании полученных формул достаточно m разделить, а ζ умножить на $\cos \varphi$.

Система уравнений (6) с указанными начальными условиями была решена на счетной машине „Урал“ по методу Рунге—Кутты с шагом интегрирования $\Delta y = 0,05$ и точностью до четвертого знака¹. Расчет производился для семи фиксированных значений θ_0 и одиннадцати значений N . В результате было получено по семи семействам кривых видов $\theta = f(y, N)$ и $z = f(y, N)$ для всех семи значений θ_0 . Все зависимости оказались монотонными. Для θ кривые, кроме того, не имеют перегибов.

Особый интерес представляют значения y и z , соответствующие пересечению θ с осью абсцисс. Обозначим их y_0 и z_0 . Величина $(\theta_0 - \theta)$ пропорциональна пути, пройденному якорем, а точка $\theta = 0$ соответствует окончанию его движения. Таким образом, время движения равно:

$$t_d = y_0 h \quad (20)$$

Семейства кривых $\theta = f(y, N)$ послужили для построения кривых $y_0 = f(N, \theta_0)$, показанных на рис. 2. Эти кривые дают возможность определить время движения для любого случая. Действительно, $\theta_0 = \frac{x_0}{g}$, где x_0 — полный зазор. С помощью рис. 2 определяем y_0 по заданным значениям θ_0 и N . Время

¹ Программирование и вычисления на машинах выполнены под руководством А. Т. Суркова.

движения находится по формуле (20). В [Л. 2] доказывается, что кривые на рис. 2 можно экстраполировать в начало координат. Приближенно они могут быть представлены зависимостью

$$y_0 \approx N^{0.36} (0,55 + 1,5\theta_0 + 1,55\theta_0^3),$$

которую возможно использовать при расчетах на минимум времени срабатывания электромагнита.

Движение якоря в действительности оканчивается при остановке на упорах, при этом сохраняется некоторый конечный расчетный зазор (в который входит также величина $\frac{\lambda}{\mu_{ср}}$). Однако, исходя из практических требований, время t_d определено, как соответствующее $x=0$ (или, что то же самое, $\theta=0$). Для отдельных случаев, когда требуется определить время движения якоря с учетом конечного зазора, нужно производить расчет с помощью кривых на рис. 3, описывающих процесс движения во всех стадиях.

Для представления промежуточных этапов движения якоря было проделано следующее построение: для всех 54 кривых $\theta=f(y)$ по оси ординат откладывались отношения θ/θ_0 , а по оси абсцисс — отношения y/y_0 . Оказалось, что полученные таким образом кривые весьма близки друг к другу. Для $0,1 \leq \theta_0 \leq 0,5$ кривые совпадают для всех значений N , а для остальных значений θ_0 расхождения незначительны. На рис. 3 показаны границы, в которых находятся все зависимости $\theta/\theta_0=f(y/y_0)$. С точностью до 5% справедлива интерполяционная формула

$$\frac{\theta}{\theta_0} = 1 - \left(\frac{y}{y_0}\right)^{2,8}. \quad (21)$$

Так как все зависимости z от y (т. е. от времени) монотонны, то индукция в момент времени, соответствующий окончанию движения якоря, оказывается наибольшей за все время движения. На рис. 4 даны значения z_0 для разных N и θ_0 . По ним можно, в частности, судить, перейден ли уровень насыщения магнитопровода, и в случае необходимости увеличить площадь сечения стали.

Были также получены разложения величин θ и z в ряд Маклорена по степеням y , доведенные до шестой степени [Л. 2]. По полученным кривым были определены значения y_0 . Однако, несмотря на трудоемкость вычислений, результаты оказались пригодными лишь в узких пределах. Это видно из приво-

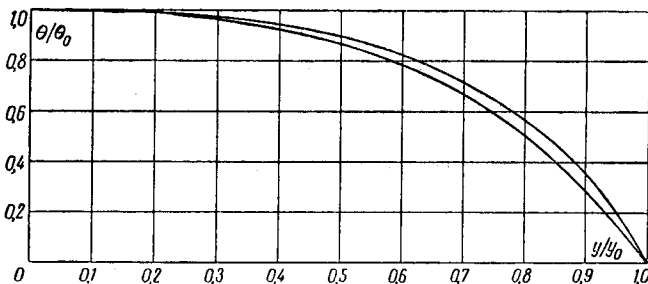


Рис. 3

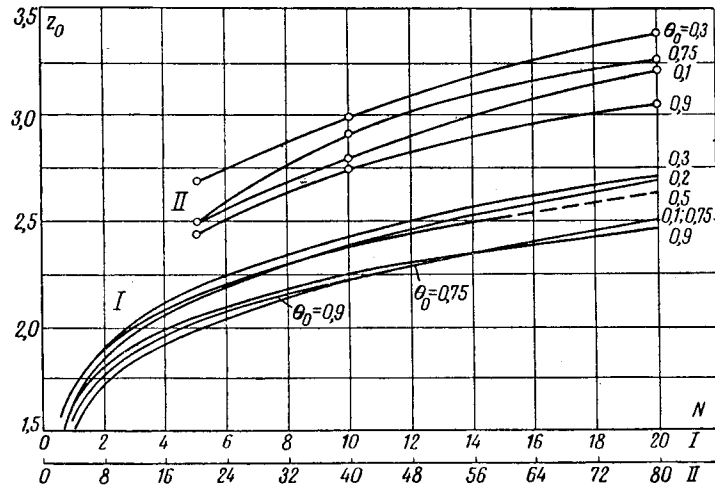


Рис. 4.

димой в качестве примера таблицы, где даны по два значения y_0 , причем левые значения соответствуют рис. 2, а правые — разложению в ряд.

Значения y_0				
N	$\theta_0 = 0,75$		$\theta_0 = 0,9$	
	10	4,95	3,8	7,4
20	6,45	4,85	9,8	5,5

Распространенным упрощением является допущение $r=0$. В этом случае получается простое решение, имеющее вид:

$$\xi = N\theta = \frac{m}{h^2 P_{II}} x = \xi_0 - \frac{1}{3} y^3 - \frac{1}{12} y^4;$$

$$z = y + 1,$$

где

$$\xi_0 = N\theta_0 = N\sqrt{\psi}.$$

Критерием его применимости является малость отношения $\frac{ri}{E}$, а также условие $\rho_b \approx 1$. Из равенства $i = \frac{Bx}{1,25\omega}$ можно вывести, что $\frac{ri}{E} = z\theta$. При этом получаем, что упрощение допустимо, если

$$(y + 1) \left(\xi_0 - \frac{1}{3} y^3 - \frac{1}{12} y^4 \right) \ll N.$$

Левая часть этого неравенства имеет максимум при значении $y = y_m$, определяемом из условия

$$y_m^2 \left(1 + \frac{5}{3} y_m + \frac{5}{12} y_m^2 \right) = \xi_0,$$

а при $y=0$ имеет величину, меньшую этого максимума. Следовательно, упрощенное требование $\xi_0 \ll N$, т. е. $\sqrt{\psi} \ll 1$, является недостаточным, в особенности при малых P_{II} . Но и оно показывает, что такое допущение в большинстве случаев неприемлемо и особенно для быстродействующих

электромагнитов, у которых стремятся повысить r для уменьшения электрической постоянной времени. При $P_{II} = 0$ (отсутствие пружины) получается $\theta_0 = 0$, $N = \infty$ и уравнения вырождаются. Однако этот случай также имеет практическое значение, поэтому рассмотрим соответствующий метод расчета.

Обозначив

$$\left. \begin{aligned} t &= yH; \quad x = \theta x_0; \quad B = zB_{\text{макс}}; \\ H &= \frac{1}{B_{\text{макс}}} \sqrt{\frac{mx_0}{k}}; \quad k = \frac{Q\zeta}{5000^2} s = \frac{a_1 B_{\text{макс}}}{EH}; \\ a_1 &= \omega Q \rho_B \cdot 10^{-8}; \quad B_{\text{макс}} = \frac{1,25\omega E}{x_0 r}, \end{aligned} \right\} (22)$$

получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} z\theta + s \frac{dz}{dy} &= 1; \\ z^2 &= -\frac{d^2\theta}{dy^2} \end{aligned} \right\} (23)$$

с начальными условиями

$$y = 0; \quad \theta = 1; \quad \frac{d\theta}{dy} = 0; \quad \frac{d^2\theta}{dy^2} = 0.$$

В этом случае согласно формулам (14), (16), (22) время движения якоря равно:

$$t_{\text{д}} = y_0 H = y_0 \frac{\tau_{5000}}{\sqrt{2}} \frac{5000}{B_{\text{макс}}}, \quad (24)$$

где y_0 — абсциссы кривых при $\theta = 0$ (рис. 5).

Кроме того, согласно формулам (22), (13), (24)

$$s = 1,28\rho_B \left(\frac{B_{\text{макс}}}{5000} \right)^2 \frac{0,25T_{5000}}{\tau_{5000}}.$$

Структура этой формулы показывает, что диапазон изменения s заключается в пределах единиц.

С тем же шагом интегрирования на счетной машине было получено решение системы уравнений (23). Результаты расчета показаны на рис. 5 и 6.

Значения y_0 в неявной форме охватываются интерполяционным уравнением

$$s \approx 0,485(y_0 - 1,1) + 0,203(y_0 - 1,1)^2 + 0,018(y_0 - 1,1)^3.$$

Геометрическое место z_0 показано на рис. 6.

Рассмотрим протекание процесса после прекращения движения якоря. В электромагнитах с форсирующей обмоткой, во фрикционных муфтах и т. п. может случиться, что якорь пройдет весь путь, но индукция B к этому времени возрастет еще сравнительно мало и будет продолжать возрастать после остановки на упорах. Часто необходимо знать

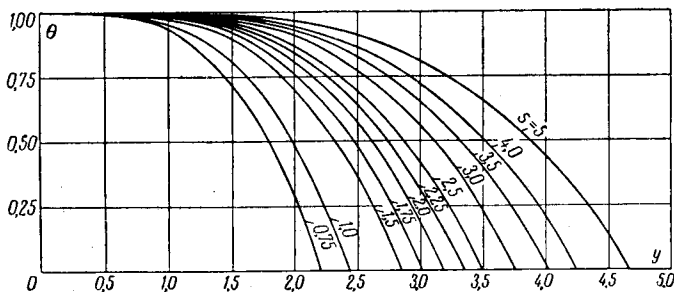


Рис. 5.

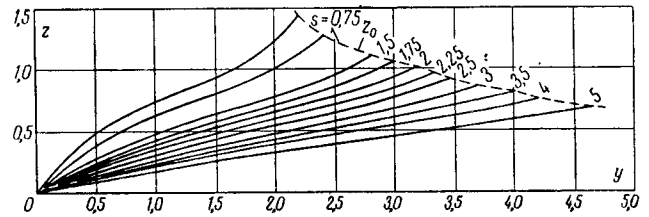


Рис. 6.

время до момента достаточного нарастания индукции, а следовательно, и тяжения (например, ранее этого момента не должны включаться удерживающая и отключаться форсирующая обмотки).

Процесс после остановки якоря характеризуется линейными уравнениями с начальными условиями: при $t = 0$

$$B = B_K; \quad i_L = i_K. \quad (25)$$

Здесь $i_K = \frac{B_K x_K}{1,25\omega}$, а индукция в момент остановки равна $B_K = z_0 c$ (при $P_{II} \neq 0$) или $B_K = z_0 B_{\text{макс}}$ (при $P_{II} = 0$). Эти значения могут быть вычислены по графикам на рис. 4 или 6.

Решение имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{1,25\omega E}{x_K} \frac{r}{r} \left[1 - (1 - \alpha'_K) e^{-\frac{t}{\theta_K}} \right]; \\ P &= \left(\frac{B}{5000} \right)^2 Q\zeta; \\ \alpha'_K &= \frac{r}{E} i_K = \frac{r x_K B_K}{1,25\omega E}; \\ \theta_K &= \frac{1,25 \cdot 10^{-8} \omega^2 Q \rho_B \cos \varphi}{r x_K}, \end{aligned} \right\} (26)$$

Неоднократная экспериментальная проверка полученных в статье зависимостей показала хорошее совпадение результатов расчета и опыта. Некоторые из этих результатов приведены в [Л. 2].

Приложение. Пример расчета. На рис. 7 дан разрез электромагнита фрикционной вибрационной муфты. Электромагнит кольцевого типа. Обозначения см. на рис. 1 в [Л. 1]. Размеры даны в сантиметрах. В начале расчета применяются некоторые формулы из [Л. 1].

Данные электромагнита следующие.

Ход $\Delta = 0,03$ см. Электромагнит плоский, $\varphi = 0$.

Конечный и начальный приведенные зазоры: $x_K = 0,02$;

$$x_0 = \delta_0 = x_K + 2\Delta = 0,02 + 2 \cdot 0,03 = 0,08.$$

Удельное сопротивление $\rho = 0,15 \cdot 10^{-4}$ ом·см; $R = 1,25$; $R' = 2,65$; $\omega = 150$; $E = 24$ в; $r = 15$ ом (включая дополнительное последовательное сопротивление);

$$Q = Q_B = 2\pi \left(R + \frac{a}{2} \right) a = 6,28 \cdot (1,25 + 0,25) \cdot 0,5 = 4,7 \text{ см}^2.$$

Для „стакана“ (тороида)

$$a = \frac{0,5}{3} = 0,167; \quad a' = \frac{0,3}{3} = 0,1$$

(деление на 3 производится потому, что сердечник расслоен на три части [Л. 1],

$$\lambda = (19 - 2,5) 2 + (2,65 - 1,25) = 4,7.$$

Кольца „стакана“ имеют радиальные разрезы.

Для ярма

$$a = a' = 0,4; \quad \lambda = 1,8.$$

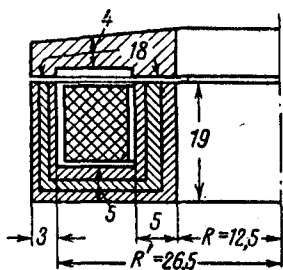


Рис. 7.

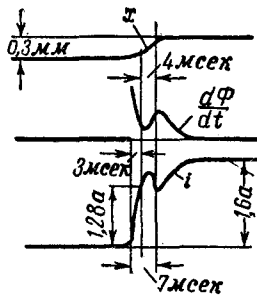


Рис. 8.

Можно принять

$$\gamma_{\text{в}} = \gamma'_{\text{в}} = 1; \sigma = 1 \text{ (см. [Л. 1])}.$$

Кольцо ярма не разрезано.

$$\text{Масса } m = 0,412 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{см}}.$$

Результаты измерений показаны на рис. 8, где через i обозначен втекающий ток, а через x — текущая координата якоря.

Расчет $\rho_{\text{в}}$. Вычислим постоянную времени при неизменном начальном зазоре.

Для „стакана“ по формуле (1) в [Л. 1]

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\frac{R}{R+a} + \left(\frac{a'}{a} \right)^2 \frac{R'+a'}{R'} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1,25}{1,25+0,167} + \left(\frac{0,100}{0,167} \right)^2 \frac{2,65+0,1}{2,65} \right] = 0,63.$$

По формуле (4) в [Л. 1]

$$\tau'_{\text{ic}} = \frac{0,51 \cdot 10^{-8} \lambda \sigma a^2}{3 \delta_0 \rho} = \frac{0,51 \cdot 10^{-8} \cdot 4,7 \cdot 0,63 \cdot 0,167^2}{3 \cdot 0,08 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4}} = 0,12 \cdot 10^{-3}.$$

В знаменателе стоит число 3, так как все три кольца имеют радиальные разрезы и поэтому постоянная времени снижается примерно в 3 раза [Л. 1].

Для ярма по формуле (4) в [Л. 1]

$$\tau'_{\text{я}} = \frac{0,51 \cdot 10^{-8} \cdot 1,8 \cdot 1 \cdot 0,4^2}{0,08 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4}} = 1,24 \cdot 10^{-3}.$$

Суммируя по правилу сложения постоянных времени [Л. 1 и 2], получаем:

$$\tau'_1 = \tau'_{\text{ic}} + \tau'_{\text{я}} = 1,36 \cdot 10^{-3}.$$

По уравнению (2) настоящей статьи

$$L_0 = \frac{1,25 \cdot 10^{-8} \cdot 150^2 \cdot 4,7}{0,08} = 1,64 \cdot 10^{-2}. \quad (\text{П.1})$$

По уравнению (9) в [Л. 1]

$$r_{\text{пр}} \omega^2 = \frac{1,25 \cdot 1,64 \cdot 10^{-2}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 11,5 \text{ ом}.$$

Подставляя это значение в формулу (4) данной статьи, получаем:

$$\rho_{\text{в}} = 1 + \frac{15}{11,5} = 2,3. \quad (\text{П.2})$$

Если расслоить и частично разрезать по радиусу также ярмо, то получается $\rho_{\text{в}} = 1,15$. Дальнейший расчет и данные опыта приводим по первому варианту.

Расчет времени действия. Сила противодействия $P_{\text{пр}} = 2 \text{ кг}$. По формуле (8)

$$P_{\text{макс}} = \frac{1,25 \cdot 150 \cdot 24}{0,08 \cdot 15} = 3750 \text{ гс}. \quad (\text{П.3})$$

По формуле (13)

$$T_{5000} = \frac{4,44 \cdot 10^{-8} \cdot 4,7 \cdot 5000 \cdot 150}{24} = 6,52 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{П.4})$$

По формулам (16) и (14) при $\zeta = 2$.

$$\tau_{5000} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,412 \cdot 10^{-4} \cdot 0,08}{4,7 \cdot 2}} = 0,84 \cdot 10^{-3} \quad (\text{П.5})$$

Определим время задержки движения t_0 .

По уравнениям (11) в [Л. 1]

$$\alpha_0 = \frac{5000 \delta_0 r}{1,25 E \omega} \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{\zeta Q_{\text{в}} \cos \varphi}} = \frac{5000 \cdot 0,08 \cdot 15}{1,25 \cdot 24 \cdot 150} \sqrt{\frac{2}{2,4 \cdot 1 \cdot 1}} = 0,615;$$

$$t_0 = \frac{L_0}{r} \rho_{\text{в}} \ln \frac{1}{1 - \alpha_0} = \frac{1,64 \cdot 10^{-2} \cdot 2,3}{15} \ln \frac{1}{0,385} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}.$$

[см. (П. 1), (П.2)]

Из осциллограммы на рис. 8 видно, что $t_0 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$.

Определим время движения $t_{\text{д}}$.

По формулам (9) и (П. 3)

$$P_{\text{макс}} = \frac{3750^2}{5000^2} \cdot 4,7 \cdot 2 = 5,3 \text{ кг};$$

по формуле (10)

$$\psi = \frac{2}{5,3} = 0,38; \quad (\text{П.6})$$

по формуле (12)

$$\theta_0 = \sqrt{0,38} = 0,616; \quad (\text{П.7})$$

по формуле (14)

$$P_{5000} = 4,7 \cdot 2 = 9,4. \quad (\text{П.8})$$

Из уравнения (17), а также значений (П.2), (П.4), (П.5) (П.6) и (П.8) следует:

$$N = \frac{0,615}{\sqrt{0,38 \cdot 2,3^2}} \left(\frac{9,4}{2} \right)^2 \left(\frac{0,84}{0,25 \cdot 6,52} \right)^2 = 1,15. \quad (\text{П.9})$$

По уравнению (15), а также значениям (П.2), (П.4) и (П.8) находим:

$$h = \frac{2,3}{1,11} \sqrt{\frac{2}{9,4}} \cdot \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{4} = 1,53 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{П.10})$$

Согласно рис. 2 при $\theta_0 = 0,616$ и $N = 1,15$ имеем $y_0 = 1,8$.

При этом в соответствии с выражением (20)

$$t_{\text{д}} = 1,8 \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} = 2,8 \cdot 10^{-3}.$$

Полное время срабатывания

$$t_0 + t_{\text{д}} = (2,5 + 2,8) \cdot 10^{-3} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}.$$

При опыте это время оказалось равным $(6-8) \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ (рис. 8). Это несоответствие можно объяснить тем, что при снятой пружине также было обнаружено начальное запаздывание порядка одной миллисекунды, хотя теоретически оно должно быть равно нулю.

Согласно рис. 4 при найденных значениях θ_0 и N получаем $z = 1,55$.

По уравнению (11) с учетом значений (П.3) и (П.6) находим:

$$c = 3750 \cdot \sqrt{0,38} = 2300.$$

Индукция в момент остановки якоря определяется по выражению (5):

$$B_{\text{к}} = z_0 c = 1,55 \cdot 2300 = 3580 \text{ гс}.$$

По формулам (26)

$$\alpha'_{\text{к}} = \frac{15 \cdot 0,02 \cdot 3780}{1,25 \cdot 150 \cdot 24} = 0,25;$$

$$\theta_{\text{к}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-8} \cdot 150^2 \cdot 4,7 \cdot 2,3 \cdot 1}{15 \cdot 0,02} = 10 \cdot 10^{-3}.$$

Индукция после остановки якоря

$$B = 14500 (1 - 0,75e^{-100t}).$$

Здесь начало счета времени соответствует выражению (25).

Литература

1. Карасев В. А., Влияние вихревых токов на переходные процессы в электромагнитах, «Электричество», 1963, № 9.
2. Карасев В. А., Расчет динамических режимов электромагнитов, Труды ЦНИИ, вып. 7, Оборонгиз, М., Дом техники, 1962.

Магнитоупругие датчики для измерения механических усилий

М. И. СТОЛБУН

«Гипронисэлектрощахт», Донецк

При механизации и автоматизации производственных процессов часто возникает необходимость в применении силоизмерительных элементов. В ряде случаев наиболее целесообразно применять магнитоупругие датчики трансформаторного типа. Магнитоупругий датчик состоит из пакета пластин электротехнической стали, снабженного двумя взаимно перпендикулярными обмотками. В центральной части пакета имеются четыре одинаковых отверстия, расположенных так, что их центры находятся в углах квадрата (рис. 1). В этих отверстиях помещены две обмотки, плоскости каждой из которых составляют угол 45° с направлением действия измеряемого механического усилия, сжимающего или растягивающего пакет. В первичную обмотку, занимающую отверстия 1 и 3, подается переменный ток, а с вторичной, расположенной в отверстиях 2 и 4, снимается выходное напряжение, зависящее от величины механических сил, действующих на магнитопровод.

При отсутствии внешних механических сил и изотропности пакета в целом магнитный поток распределяется равномерно по горизонтальным и вертикальным проходам между отверстиями и э. д. с. во вторичной обмотке равна нулю. При сжатии или растяжении пластин пакета значения магнитных восприимчивостей в горизонтальном и вертикальном направлениях становятся различными, что приводит к перераспределению магнитного потока и, следовательно, к возникновению напряжения на зажимах вторичной обмотки.

Холоднокатаная электротехническая сталь, применяемая для изготовления датчиков, имеет определенную текстуру: кристаллографические оси большинства кристаллов ориентированы в направлении прокатки. Для получения изотропности магнитных свойств пакета во взаимно перпендикулярных направлениях каждые две соседние пластины должны иметь взаимно перпендикулярные направления прокатки. При этом направление прокатки в половине пластин должно совпадать с направлением измеряемого усилия, приложенного к пакету.

При анализе будем отдельно рассматривать пластины, в которых направление прокатки совпадает с направлением внешнего механического усилия, и пластины, в которых направление прокатки перпендикулярно направлению этого усилия. На

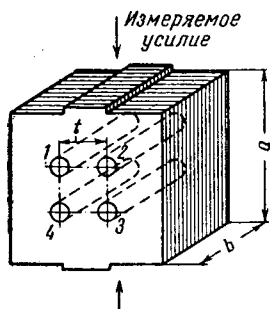


Рис. 1. Магнитопровод датчика.

рис. 2 показаны ориентации кристаллографических осей [100], направлений прокатки, векторов намагниченности \mathbf{J} и напряженности поля \mathbf{H} относительно координатных осей x и y для тех и других пластин. Направление действия сжимающих или растягивающих усилий, действующих на пластины принято параллельным оси y .

Устойчивое положение вектора намагниченности соответствует минимуму свободной энергии доменов, которую составляет сумма энергий магнитной анизотропии, магнитоупругой и энергии магнитного взаимодействия. Имеются следующие три уравнения, решив которые, можно определить устойчивое положение вектора намагниченности в плоскости листа:

$$E_h = k (\cos \alpha^2, \cos \alpha_2^2 + \cos \alpha_2^2 \cos \alpha_3^2 + \cos \alpha_3^2 \cos \alpha^2); \quad (1)$$

$$E_\sigma = -\frac{3}{2} \sigma \lambda_{100} (\cos \alpha^2, \cos \gamma^2, + \cos \alpha_2^2 \cos \gamma_2^2 + \cos \alpha_3^2 \cos \gamma_3^2); \quad (2)$$

$$E_H = -HJ \cos \theta. \quad (3)$$

где E_h ; E_σ ; E_H — плотности энергии магнитной анизотропии, магнитной упругости и магнитного взаимодействия;

k — постоянная магнитной анизотропии;

σ — механическое напряжение;

λ_{100} — коэффициент магнитоstriction в направлении [100];

$\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \alpha_3$ — направляющие косинусы вектора \mathbf{J} относительно направлений легкого намагничивания (кристаллографических осей);

$\cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \cos \gamma_3$ — направляющие косинусы оси, вдоль которой направлены сжимающие или растягивающие усилия, относительно направлений легкого намагничивания;

θ — угол между векторами \mathbf{H} и \mathbf{J} .

Для пластин пакета, у которых совпадают направления прокатки и внешнего усилия (рис. 2,а),

$$\cos \alpha_1 = \sin \beta; \cos \alpha_2 = \cos \alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \beta;$$

$$\cos \gamma_1 = 1; \cos \gamma_2 = \cos \gamma_3 = 0.$$

Для пластин со взаимно перпендикулярными направлениями прокатки и внешнего усилия (рис. 2,б)

$$\cos \alpha_1 = \cos \beta; \cos \alpha_2 = \cos \alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \beta;$$

$$\cos \gamma = 0; \cos \gamma_2 = \cos \gamma_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Подставляя эти значения в формулы (1) и (2), получаем следующие выражения для первых и вторых пластин:

$$E_{h1} = k \left(\frac{\sin^2 2\beta}{4} + \frac{\cos^2 2\beta}{16} + \frac{\cos 2\beta}{8} + \frac{1}{16} \right);$$

$$E_{h2} = k \left(-\frac{\sin^2 2\beta}{4} + \frac{\cos^2 2\beta}{16} - \frac{\cos 2\beta}{8} + \frac{1}{16} \right);$$

$$E_{\sigma 1} = -\frac{3}{2} \sigma_1 \lambda_{100} \sin^2 \beta;$$

$$E_{\sigma 2} = -\frac{3}{4} \sigma_2 \lambda_{100} \sin^2 \beta,$$

где σ_1 и σ_2 — механические напряжения, возникающие в первых и вторых пластинах; они не равны

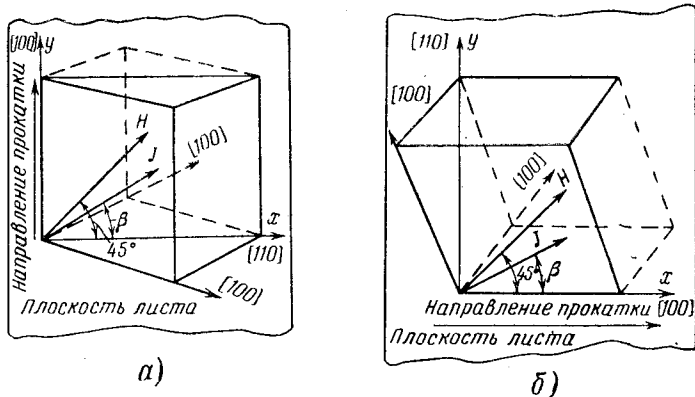


Рис. 2. Ориентации кристаллографических осей [100], направлений прокатки, векторов намагниченности и напряженности поля.

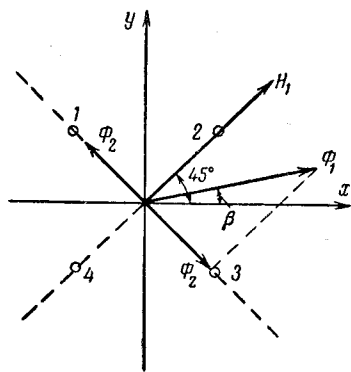


Рис. 3. Векторная диаграмма магнитоупругого датчика.

между собой, так как модули упругости для листов электромеханической стали, особенно холоднокатаной, в направлениях [100] и [110] существенно различны.

Вектор напряженности магнитного поля H , создаваемого первичной обмоткой, в обеих пластинах составляет с осями x и y углы, равные 45° . Поэтому уравнение (3) представляется в виде:
$$E_H = -HJ \cos(45^\circ - \beta).$$

Для упрощения выводов в дальнейшем будем рассматривать некоторый средний по положению в плоскости листа вектор намагниченности, который определяется магнитной анизотропией, механическими напряжениями и магнитным взаимодействием. Для получения зависимости между углом β , определяющим положение вектора намагниченности в плоскости листа, и остальными факторами необходимо приравнять нулю производную от суммы энергии магнитной анизотропии, магнитной упругости и магнитного взаимодействия по углу β :

$$\begin{aligned} \frac{dE_k}{d\beta} + \frac{dE_\sigma}{d\beta} + \frac{dE_H}{d\beta} = \\ = \frac{3}{4} k \sin 4\beta - \frac{3}{2} \lambda_{100} \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2}{2} \right) \sin 2\beta - \\ - 2HJ \sin(45^\circ - \beta) = 0. \end{aligned}$$

После несложных преобразований это выражение можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \sigma_1 + \frac{\sigma_2}{2} = \frac{k}{\lambda_{100}} (\cos \beta + \sin \beta) (\cos \beta - \sin \beta) - \\ - \frac{8HJ (\cos \beta - \sin \beta)}{3 \sqrt{2} [(\cos \beta + \sin \beta)^2 - (\cos \beta - \sin \beta)^2]}. \end{aligned}$$

Пренебрегая величиной $(\cos \beta - \sin \beta)^2$ по сравнению с $(\cos \beta + \sin \beta)^2$, получаем следующую зависимость:

$$\cos \beta - \sin \beta = \frac{\lambda_{100} \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2}{2} \right)}{k (\cos \beta + \sin \beta) - 1,89 \frac{HJ}{(\cos \beta + \sin \beta)}}.$$

Напряжение, возникающее во вторичной обмотке, пропорционально разности проекций вектора намагниченности на оси x и y , т. е. пропорционально $\cos \beta - \sin \beta$. Учитывая это, можно записать следующее выражение для выходного напряжения датчика при разомкнутой вторичной обмотке:

$$U_2 = e\omega_2 \frac{\left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2}{2} \right) \lambda_{100}}{k (\cos \beta + \sin \beta) - 1,89 \frac{HJ}{(\cos \beta + \sin \beta)^2}}, \quad (4)$$

где e — э. д. с., приходящаяся на один виток первичной обмотки;

ω_2 — число витков вторичной обмотки.

В областях между отверстиями пластин имеется некоторая концентрация механических напряжений. Можно показать, что при этом

$$\sigma_1 + \frac{\sigma_2}{2} = \frac{(2M_{100} + M_{110}) \nu}{M_{100} + M_{110}} \sigma_{ср},$$

где M_{100} — модуль упругости в направлении прокатки;

M_{110} — модуль упругости в направлении, перпендикулярном направлению прокатки;

ν — коэффициент, зависящий от геометрических размеров пластины;

$\sigma_{ср} = \frac{F}{S}$ — среднее механическое напряжение в пакете пластин (F — измеряемое усилие; S — поперечное сечение пакета).

Можно показать также, что для электротехнических сталей при изменении $\sigma_{ср}$ в пределах от 0 до 1000 кг/см^2 величина $\cos \beta + \sin \beta$ практически остается постоянной и равной $\sqrt{2}$.

Кроме того, для электротехнических сталей обычно $HJ \ll k$; учитывая все это, выражение (4) можно преобразовать к виду:

$$U_2 = \eta e\omega_2 \sigma_{ср},$$

где

$$\eta = \frac{\lambda_{100} (2M_{100} + M_{110}) \nu}{k \sqrt{2} (M_{100} + M_{110})}.$$

На рис. 3 приведена векторная диаграмма датчика. При сжатии датчика с ростом измеряемого усилия F вектор магнитного потока Φ_1 , создаваемого первичной обмоткой, отклоняется в сторону оси x . Напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода пропорционально магнитному потоку Φ_2 — проекции вектора Φ_1 на ось вторичной обмотки.

При замыкании вторичной обмотки датчика на нагрузочное сопротивление r_2 его выходная мощность будет иметь максимальное значение при $r_2 = x_2$, где x_2 — индуктивное сопротивление датчика. Поэтому при заданных значениях выходной мощности и сопротивления нагрузки датчик должен конструироваться таким образом, чтобы его индуктивное сопротивление оказалось равным сопротивлению нагрузки.

Определение спектра гармоник намагничивающей силы несимметричных обмоток

Е. Н. ГРИШИН, Н. Ф. ИЛЬИНСКИЙ и И. П. КОПЫЛОВ

Московский энергетический институт

При анализе работы машин переменного тока необходимо знать действительное пространственное распределение линейной нагрузки машины (A) и н. с. обмотки (F). Для машин с симметричными обмотками решение этой задачи труда не представляет, в то время как при несимметричных обмотках определение пространственного распределения линейной нагрузки и н. с. (вычисление обмоточных коэффициентов для гармоник) часто связано с весьма громоздкими построениями и сложными расчетами.

В последние годы в связи с разработкой таких специальных электрических машин, как шаговые двигатели, микромашины автоматических устройств, редукторные двигатели и т. п., несимметричные обмотки получают все более широкое распространение.

Одним из часто встречающихся видов несимметричных обмоток являются обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу (q), применяющиеся как в крупных многополюсных машинах, так и в машинах малой мощности с небольшим диаметром рашотки статора.

Для нахождения спектра гармоник обычно используются обмоточные коэффициенты для каждой гармоники. Наиболее полно вопросы, связанные с определением обмоточных коэффициентов дробных обмоток, рассмотрены в работах А. И. Адаменко и А. И. Молдавера [Л. 1 и 2]. Некоторые другие работы [Л. 3 и 4] посвящены анализу частных случаев применения дробных обмоток.

В настоящей статье предлагается общий метод определения пространственного распределения линейной нагрузки и н. с. любых несимметричных обмоток и вычисления обмоточных коэффициентов гармоник.

В основу метода положено разложение в ряд Фурье дискретной функции, представляющей линейную нагрузку обмотки.

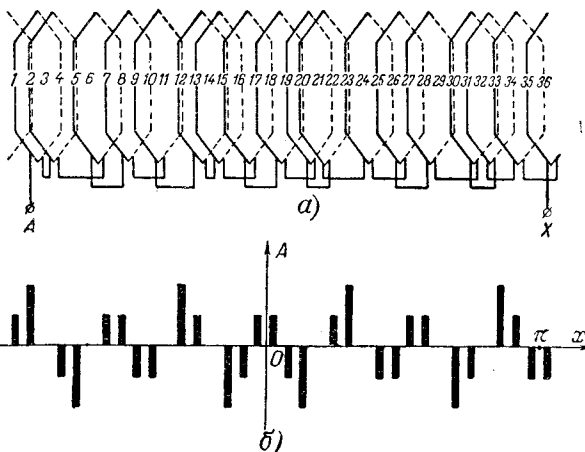


Рис. 1. Схема фазы обмотки (а) и график линейной нагрузки (б).

Рассмотрим построение такой функции на примере дробной обмотки с $m=2$, $q=1\frac{2}{7}$ и $p=7$ (рис. 1, а). Построение производится следующим образом:

условно подключаем фазу обмотки к источнику постоянного тока;

изображаем линейную нагрузку одного паза от одной секции прямоугольником с основанием $2d$ и высотой $\frac{i\omega_k}{2d}$, где i — ток в обмотке, ω_k — число витков в секции, $2d$ — ширина паза по линии, проведенной через середину высоты паза;

расположение прямоугольников соответствует расположению пазов и направлению тока в пазах.

На рис. 1, б приведен график дискретной функции, изображающей линейную нагрузку.

Такое представление линейной нагрузки основано на трех допущениях:

функция $A=f(x)$ изображена в прямоугольной системе координат, тогда как реальная обмотка выполняется на цилиндрической поверхности рашотки статора; этого допущения можно избежать, если использовать конформное отображение цилиндрической поверхности на плоскость;

реально существующий паз заменяется открытым пазом с параллельными стенками, благодаря чему линейная нагрузка паза выражается прямоугольником с основанием, равным $2d$;

при выводе формул не учитывается скос пазов.

Разложение в ряд Фурье линейной нагрузки дает возможность получить обмоточные коэффициенты любой гармоники для любой обмотки.

Для доказательства этого положения обратимся сначала к линейной нагрузке одной секции, график которой изображен на рис. 2, а. Здесь $\frac{i\omega_k}{2d}$ — максимальное значение линейной нагрузки на тех пазовых участках по длине рашотки статора, где расположена рассматриваемая секция; y — шаг обмотки.

Если функция $A_c=f(x)$ нечетная и не имеет постоянной составляющей, то разложение ее в ряд Фурье имеет следующий вид:

$$A_c = \sum_{\nu'=1}^{\infty} A_{\nu',c} \sin \nu' x, \quad (1)$$

где ν' — номера гармоник, первая из которых имеет полюсное деление, равное π ;

x — линейная координата;

$A_{\nu',c}$ — коэффициент ряда Фурье для ν' -й гармоники линейной нагрузки секции, равный для указанных выше условий:

$$A_{v,c} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin v'x dx = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{y}{2}-d}^{\frac{y}{2}+d} \frac{i\omega_h}{2d} \sin v'x dx = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2} \frac{\sin v'd}{v'd} \sin v' \frac{y}{2}. \quad (2)$$

Линейная нагрузка и н. с. связаны следующим соотношением:

$$F_a - F_b = \int_a^b Adx. \quad (3)$$

Проинтегрировав гармонический ряд линейной нагрузки секции от $\frac{\pi}{2v'}$ до $\frac{\pi}{v'}$, получим коэффициенты гармонического ряда намагничивающей силы секции:

$$F_{v,c} = \int_{\frac{\pi}{2v'}}^{\frac{\pi}{v'}} A_{v,c} \sin v'x dx = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2} \frac{\sin v'd}{v'd} \sin v' \frac{y}{2} \int_{\frac{\pi}{2v'}}^{\frac{\pi}{v'}} \sin v'x dx = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2v'} \frac{\sin v'd}{v'd} \sin v' \frac{y}{2}. \quad (4)$$

Тогда гармонический ряд н. с. можно представить как

$$F_c = \sum_{v'=1}^{\infty} F_{v,c} \cos v'x. \quad (5)$$

В уравнениях (2) и (4) выражение $\sin v' \frac{y}{2}$ есть коэффициент укорочения, а выражение $\frac{\sin v'd}{v'd}$ учитывает изменение н. с. в месте расположения секции (рис. 2, б).

От полученных формул для гармонических рядов линейной нагрузки и н. с. одной секции можно

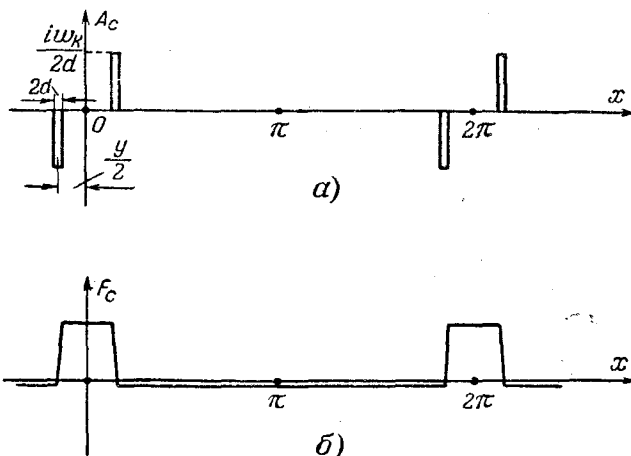


Рис. 2. График линейной нагрузки (а) и н. с. (б) одной секции обмотки.

перейти к соответствующим гармоническим рядам всей обмотки:

$$A_0 = \sum_{v'=1}^{\infty} A_{v,0} \sin v'x; \quad (6)$$

$$F_0 = \sum_{v'=1}^{\infty} F_{v,0} \cos v'x, \quad (7)$$

где $A_{v,0}$ — коэффициент ряда Фурье для v' -й гармоники линейной нагрузки обмотки;

$$A_{v,0} = A_{v,c} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{pv'} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{pv'} \frac{\sin v'd}{v'd} \sin v' \frac{y}{2} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{0v'} \frac{\sin v'd}{v'd}; \quad (8)$$

$$F_{v,0} = F_{v,c} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{pv'} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2v'} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{pv'} \frac{\sin v'd}{v'd} \sin v' \frac{y}{2} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2v'} \frac{a\omega}{\omega_h} k_{0v'} \frac{\sin v'd}{v'd}; \quad (9)$$

a — число параллельных ветвей;
 ω — число последовательно включенных витков;
 $a\omega$ — полное число витков обмотки;
 $\frac{a\omega}{\omega_h}$ — число секций;
 $k_{pv'}$ — коэффициент распределения для v' -й гармоники.

Полученные выражения характеризуют спектр пространственных гармоник линейной нагрузки и н. с. обмотки и позволяют довольно просто найти амплитуду гармоники с любым номером.

В случае, если обмотка состоит из m секций и из них n секций имеют шаг y_1 , а остальные ($m-n$) секций — шаг y_2 , то выражение для коэффициентов гармонического ряда будет иметь вид:

$$A_{v,0} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_h}{2} [nk_{y_1v'} + (m-n)k_{y_2v'}] k_{pv'} \frac{\sin v'd}{v'd}. \quad (10)$$

Сюда входит выражение

$$[nk_{y_1v'} + (m-n)k_{y_2v'}] k_{pv'}, \quad (11)$$

из которого можно определить значение $k_{pv'}$.

Подобным же образом можно получить выражение для обмоточных коэффициентов и в том случае, когда секции имеют различное число витков.

Приложение. Определение обмоточных коэффициентов и построение спектров гармоник дробной обмотки с $a=1$, $\omega_h=20$, $\omega=360$. Одна фаза обмотки изображена на рис. 1, а. График линейной нагрузки приведен на рис. 1, б. Начало координат выберем между 17-м и 18-м пазами. Функция $A=f(x)$ четная и, кроме того, обладает симметрией III рода. Общий коэффициент разложения такой функции в ряд Фурье имеет вид:

$$A_{v,0} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) \cos v'x dx = \frac{4}{\pi} \left[\int_{5^\circ-d}^{5^\circ+d} \frac{i\omega_h}{2d} \cos v'x dx - \int_{15^\circ-d}^{15^\circ+d} \frac{i\omega_h}{2d} \cos v'x dx - 2 \int_{25^\circ-d}^{25^\circ+d} \frac{i\omega_h}{2d} \cos v'x dx + \dots \right]$$

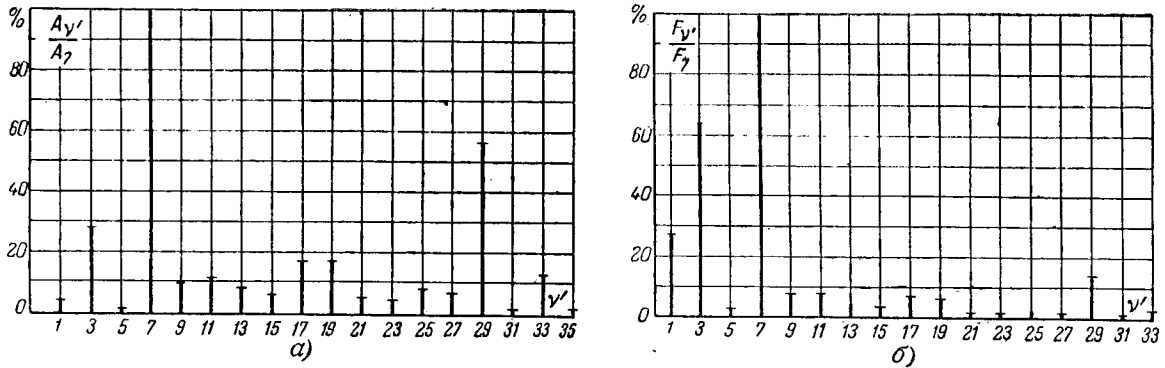


Рис. 3. Спектры гармоник линейной нагрузки (а) и н. с. (б) обмотки, показанной на рис. 1,а.

$$+ \int_{45^\circ-d}^{45^\circ+d} \frac{i\omega_k}{2d} \cos v'x dx + 2 \int_{55^\circ-d}^{55^\circ+d} \frac{i\omega_k}{2d} \cos v'x dx -$$

$$- \int_{75^\circ-d}^{75^\circ+d} \frac{i\omega_k}{2d} \cos v'x dx - \int_{85^\circ-d}^{85^\circ+d} \frac{i\omega_k}{2d} \cos v'x dx \Big].$$

Любой член этого выражения можно представить следующим образом:

$$\int_{c-d}^{c+d} m \cos v'x dx = \frac{m}{v'} [\sin(v'c + v'd) - \sin(v'c - v'd)] =$$

$$= \frac{m}{v'} \cdot 2 \cos v'c \cdot \sin v'd,$$

где $m = \frac{i\omega_k}{2d}$.

Общий коэффициент ряда запишется тогда в таком виде:

$$A_{v'0} = \frac{4}{\pi} \frac{i\omega_k}{2} \cdot 2 (\cos 5^\circ v' - \cos 15^\circ v' - 2 \cos 25^\circ v' + \cos 45^\circ v' +$$

$$+ 2 \cos 55^\circ v' - \cos 75^\circ v' - \cos 85^\circ v') \frac{\sin v'd}{v'd}.$$

Отсюда следует, что удвоенное выражение в скобках есть

$$\alpha = \frac{a\omega}{\omega_k} k_{0v'},$$

где

$$\frac{a\omega}{\omega_k} = \frac{1 \cdot 360}{20} = 18.$$

Так, для $v' = 3$

$$\alpha = 2 (\cos 15^\circ - \cos 45^\circ - 2 \cos 75^\circ + \cos 135^\circ + 2 \cos 165^\circ -$$

$$- \cos 225^\circ - \cos 255^\circ) = 3,86.$$

В этом случае обмоточный коэффициент, коэффициент укорочения и коэффициент распределения соответственно равны:

$$k_{03} = \frac{3,86}{18} = 0,215;$$

$$k_{y3} = \sin \frac{v'y}{2} = \sin \frac{3 \cdot 30^\circ}{2} = 0,707;$$

$$k_{p3} = \frac{k_{03}}{k_{y3}} = \frac{0,215}{0,707} = 0,305.$$

Спектр гармоник линейной нагрузки и н. с. для данной обмотки показан на рис. 3.

Литература

1. Адаменко А. И., Несимметричные асинхронные машины, Изд. АН УССР, 1962.
2. Молдавер А. И., Расчет обмоточных коэффициентов симметричных обмоток с равношаговыми катушками, «Вестник электропромышленности», 1962, № 6.
3. Лившиц-Гарик М., Обмотки машин переменного тока, Госэнергоиздат, 1959.
4. Лопухина Е. М. и Сомихина Г. С., Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока, Госэнергоиздат, 1961.

[18.9.1963]



Устранение самовозбуждения синхронных машин путем подмагничивания ярма статора

Кандидат техн. наук, доц. Н. Д. АНИСИМОВА, инж. В. И. СОКОЛОВ и инж. ХАМДИ ЭЛЬ-ШАИР

Московский энергетический институт

В настоящее время проектируются и эксплуатируются электрические системы, которые содержат емкостную компенсацию каких-либо элементов, что может обусловить возникновение самовозбуждения электрических машин. Токи и напряжения, появляющиеся в результате возникновения самовозбуждения синхронных машин, могут быть опасны для оборудования электрических систем. Таким образом, в схемах, потенциально подверженных самовозбуждению, необходимо предусматривать специальные мероприятия, устраняющие это явление.

В проблемной лаборатории электрических систем Московского энергетического института были проведены исследования возможности ликвидации емкостного самовозбуждения электрических машин путем подмагничивания статора постоянным током.

В настоящее время искусственное насыщение магнитопроводов различных электрических машин и аппаратов с целью регулирования их параметров находит все более широкое применение. Принципиальные вопросы влияния дополнительного магнитного потока постоянного направления на индуктивность машины переменного тока рассмотрены в ряде работ [Л. 1, 2 и др.], поэтому излагать их здесь нет необходимости.

В настоящей статье проанализированы результаты исследований влияния подмагничивания ста-

том, протекающим через специальную обмотку подмагничивания¹ кольцевого типа, проходящую вокруг ярма статора и в пазах, в которых уложена и основная обмотка статора.

При включении тока подмагничивания на основной магнитный поток в ярме статора накладывается дополнительный поток. Магнитное состояние ярма определяется суммарным потоком и поэтому, изменяя ток подмагничивания, можно регулировать насыщения машины и ее реактивное сопротивление. В известной мере увеличение подмагничивания статора влияет на реактивное сопротивление машины так же, как увеличение ее воздушного зазора.

На рис. 1 приведена зависимость сопротивлений x_d , x_q и x'_d генератора СГ-35/6 от тока подмагничивания. Значения x_d и x_q , полученные общеизвестными способами измерения, достаточно хорошо совпали с величинами, определенными при помощи частотных характеристик, что свидетельствует о их достоверности. С ростом тока подмагничивания значительно снижается не только x_d , но и x_q . Реактивное сопротивление в переходном процессе изменяется мало, так как величина x'_d зависит в основном от сопротивления рассеяния, которое в данном случае при подмагничивании статора оставалось постоянным.

Изменение реактивных сопротивлений машины в функции подмагничивающего тока необходимо учитывать при определении условий возникновения неустойчивости электромагнитной системы. Известно [Л. 3], что уравнения переходных процессов в осях d и q при $s=0$ системы, включающей в себя идеализированную синхронную машину, в цепь статора которой включена сосредоточенная емкость, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} &[(p^2 - 1)x_d(p) + pr + x_c]i_d + \\ &+ [2px_q(p) + r]i_q = 0; \\ &- [2px_d(p) + r]i_d + \\ &+ [(p^2 - 1)x_q(p) + pr + x_c]i_q = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$x_d(p) = \frac{x_{dп} + pT_{дон}x'_{dп}}{1 + pT_{дон}};$$

$$x_{dп} = x_{ос} + x_{адп};$$

$$x_q(p) = x_{qp} = x_{ос} + x_{аqp};$$

тора на переходный процесс при появлении неустойчивости электромагнитной системы, хотя можно показать, что указанное мероприятие оказывает значительное влияние и на другие режимы работы электрических систем.

При исследованиях влияния подмагничивания ярма статора на процесс самовозбуждения использовался синхронный генератор типа СГ-35/6 (35 кВА, 400 В) с шестью полюсами на роторе, без демферных обмоток. Подмагничивание магнитопровода статора осуществлялось постоянным то-

¹ Вес обмотки подмагничивания турбогенератора 100 Мвт, рассчитанной на снижение x_d на 25%, составляет приблизительно 300 кг алюминия. Потери мощности в обмотке — около 30 кВт.

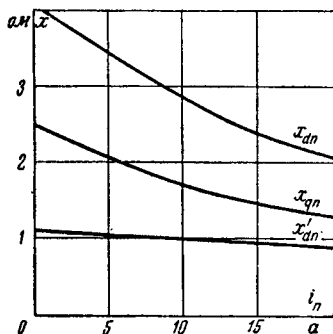


Рис. 1. Зависимость реактивных сопротивлений синхронного генератора СГ-35/6 от тока подмагничивания статора.

$$x'_{дп} = x_{ос} + \frac{1}{\frac{1}{x_{сг}} + \frac{1}{x_{адп}}};$$

$$T_{доп} = \frac{x_{fp}}{r_f} = \frac{x_{сг} + x_{адп}}{r_f};$$

$$x_{fp} = x_{сг} + x_{адп}.$$

Система уравнений (1) составлена для идеализированной подмагничиваемой машины: реальные характеристики холостого хода были заменены прямыми линиями, угол наклона которых к оси абсцисс уменьшается с увеличением степени подмагничивания. Естественное насыщение подмагничиваемой машины не учитывалось, как это принято при подобных исследованиях обычных машин. Поэтому все реактивные сопротивления, входящие в систему уравнений (1), зависят от тока подмагничивания, но при постоянстве последнего они неизменны.

Решение этих уравнений имеет следующий вид:

$$i_d = \frac{D_1(p)}{D_n(p)};$$

$$i_q = \frac{D_2(p)}{D_n(p)};$$

где $D_n(p)$ — определитель системы уравнений (1), учитывающий зависимость параметров схемы от подмагничивания.

Поскольку система уравнений (1) однородна относительно переменных i_d и i_q , то для ее решения необходимо приравнять характеристический определитель нулю.

Полученное при этом характеристическое уравнение имеет пятую степень относительно оператора p :

$$D_n(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0, \quad (2)$$

где

$$a_0 = T_{доп} x_{qp} x'_{дп};$$

$$a_1 = T_{доп} r (x_{qp} + x'_{дп}) + x_{дп} x_{qp};$$

$$a_2 = T_{доп} [2x_{qp} x'_{дп} + x_c (x'_{дп} + x_{qp}) + r^2] + r(x_{дп} + x_{qp});$$

$$a_3 = T_{доп} r (x'_{дп} + x_{qp} + 2x_c) + 2x_{дп} x_{qp} + x_c (x_{дп} + x_{qp}) + r^2;$$

$$a_4 = T_{доп} [(x'_{дп} - x_c)(x_{qp} - x_c) + r^2] + r(x_{дп} + x_{qp} + 2x_c);$$

$$a_5 = (x_{дп} - x_c)(x_{qp} - x_c) + r^2.$$

Исследование характеристического уравнения (2) при помощи критерия Гурвица позволяет найти два условия, при которых наступает нарушение устойчивости электромагнитной системы, а именно:

$$a_5 = 0;$$

$$\Delta_4 = 0,$$

где Δ_4 — предпоследний определитель Гурвица, составленный из коэффициентов выражения (2).

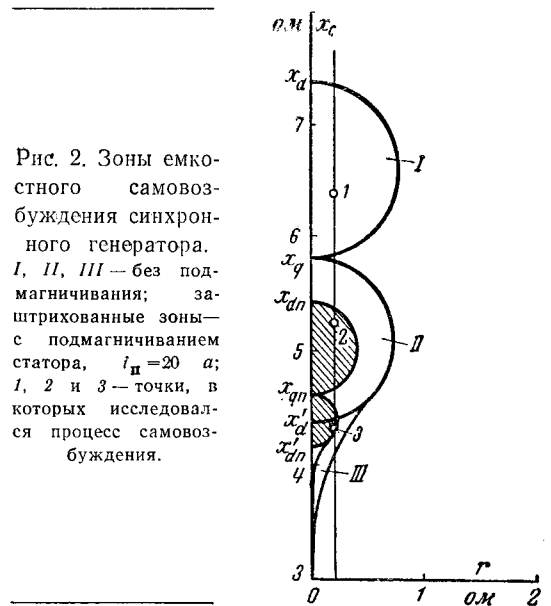


Рис. 2. Зоны емкостного самовозбуждения синхронного генератора. I, II, III — без подмагничивания; заштрихованные зоны — с подмагничиванием статора, $i_n = 20$ а; 1, 2 и 3 — точки, в которых исследовался процесс самовозбуждения.

Равенство a_5 нулю определяет зону синхронного самовозбуждения, которая в плоскости параметров r и x_c описывается полуокружностью радиусом $\frac{x_{дп} - x_{qp}}{2}$ с центром, расположенным на оси ординат на расстоянии от начала координат, равном $\frac{x_{дп} + x_{qp}}{2}$ (рис. 2). Этой зоне (I) синхронного самовозбуждения соответствует неравенство

$$x_{qp} < x_c < x_{дп}. \quad (3)$$

Соотношение $\Delta_4 = 0$ характеризует зоны II и III асинхронного самовозбуждения, которое возможно, если при $r = 0$ удовлетворяется неравенство

$$0 < x_c < x_{qp}. \quad (4)$$

В неравенства (3) и (4) входят параметры машины с учетом подмагничивания.

Так как параметры машины $x_{дп}$, x_{qp} , $x'_{дп}$ с учетом подмагничивания меньше соответствующих величин без подмагничивания, то зоны самовозбуж-

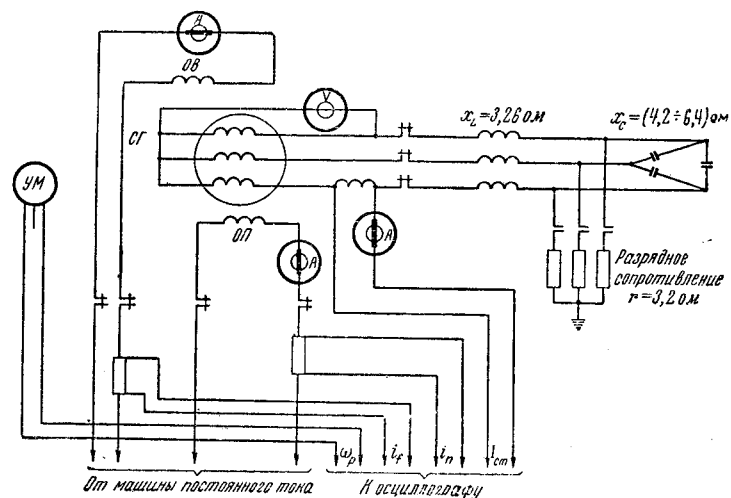


Рис. 3.

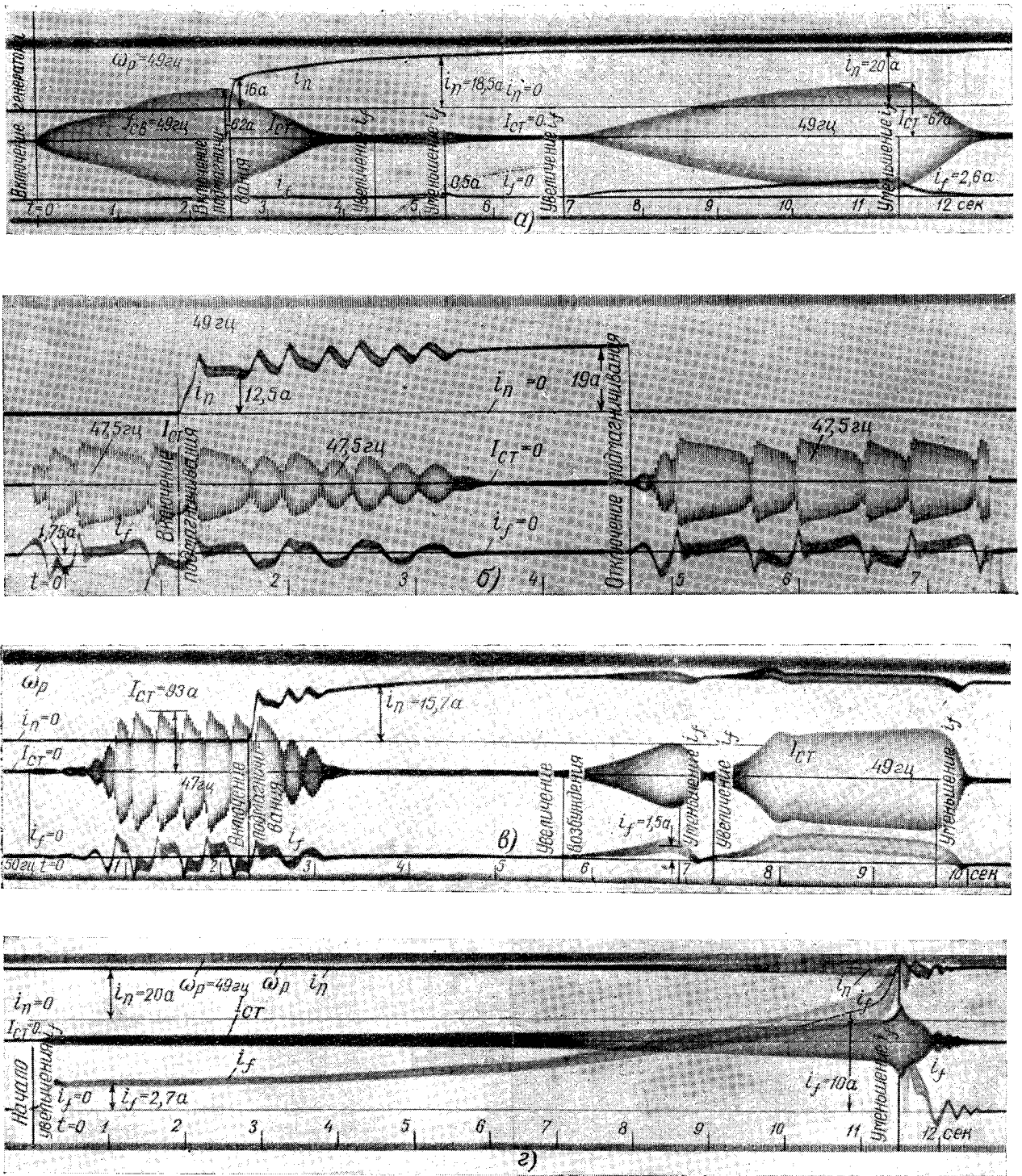


Рис. 4.

дения подмагничиваемой машины становятся более узкими, чем у обычной машины. Сужение зон будет тем больше, чем сильнее подмагничивание.

Рассмотрим процесс самовозбуждения машины, снабженной системой подмагничивания. Если к машине подключается емкостная нагрузка с параметрами r_1, x_{c1} (точка I, рис. 2), то при $i_n=0$ начинается явление самовозбуждения. При подмагничивании генератора реактивные сопротивления x_d и

x_q уменьшаются до величин $x_{dп}$ и $x_{qп}$. А это в свою очередь приводит к сокращению и к перемещению границ зон самовозбуждения в сторону меньших значений x_c . Самовозбуждение будет развиваться до тех пор, пока точка (r_1, x_{c1}) в результате изменения тока подмагничивания не попадет на границы зоны и не выйдет за ее пределы.

Аналогичный процесс протекает и в зонах самовозбуждения II и III. Теоретически для любой точ-

ки зон самовозбуждения существует определенное значение тока подмагничивания, которое обусловит прекращение самовозбуждения.

С целью проверки приведенного выше анализа было произведено экспериментальное исследование влияния подмагничивания на процессы самовозбуждения синхронного генератора (рис. 3).

Для регулирования x_C изменялась емкость батареи конденсаторов. Последовательно с обмотками генератора включались дроссели с $x_L = 3,26 \text{ ом}$. Активное сопротивление подключалось только на время разряда конденсаторов.

Процессы самовозбуждения синхронного генератора при включенном и отключенном токе подмагничивания изображены на рис. 4.

Процесс самовозбуждения при параметрах схемы, соответствующих точке 1 (рис. 2), приведен на рис. 4,а. При подключении к генератору с отключенным током подмагничивания ($i_{п}=0$) емкостной нагрузки начинается процесс синхронного самовозбуждения.

После включения тока подмагничивания процесс самовозбуждения затухает в течение примерно 1 сек.

На осциллограмме, представленной на рис. 4,а, видно, что при токе подмагничивания, равном примерно 20 а, самовозбуждение устранено, а ток статора можно регулировать в желаемых пределах путем обычного воздействия на ток возбуждения, что исключается при отсутствии подмагничивания машины.

Самовозбуждение в точке 2 (рис. 2) отражено на рис. 4,б. При включении емкостной нагрузки процесс самовозбуждения очень быстро развивается в зоне II. Частота свободных колебаний тока статора не совпадает со скоростью вращения ротора генератора, что и приводит к пульсациям тока и напряжения статора. Включение тока подмагничивания приводит к постепенному затуханию емкостного самовозбуждения до тех пор, пока оно полностью не устранится ($i_{п}=19 \text{ а}$). При отключении тока подмагничивания процесс самовозбуждения восстанавливается с прежней интенсивностью.

Из осциллограммы, изображенной на рис. 4,в, следует, что ток статора может быть отрегулирован так же, как и в зоне самовозбуждения I, путем изменения тока возбуждения i_f .

Опыт показывает, что для устранения самовозбуждения в зоне II требуется больший ток $i_{п}$, чем в зоне I. Минимально необходимый ток подмагничивания для устранения самовозбуждения в зоне I составил 6,5 а, в то время как в зоне II $i_{п}=10 \div 11 \text{ а}$.

На рис. 4,г показано регулирование тока статора путем увеличения тока возбуждения в точке 3 (рис. 2) при заранее включенном токе подмагничивания, равном 20 а. По осциллограмме можно судить, что и в этих условиях ток и напряжение статора поддаются регулировке.

При уменьшенной величине подмагничивающего тока предотвратить развитие асинхронного самовозбуждения не удается. Но установившиеся при этом значения напряжения и тока статора несколько снижаются в функции тока подмагничивания.

Таким образом, процесс асинхронного самовозбуждения, не управляемый автоматическим регулятором возбуждения любого типа, можно или устранить вообще, или, обеспечив заранее необходимое подмагничивание генератора, регулировать ток и напряжение статора.

Заметим, что в рассмотренных опытах ток и мощность подмагничивания не превышали номинальных значений тока и мощности системы возбуждения. Для более крупных синхронных машин мощность подмагничивания (как показали расчеты) значительно меньше мощности возбуждения.

Область полезного применения подмагничивания не исчерпывается ликвидацией самовозбуждения. Исследования показывают, что при помощи подмагничивания синхронного генератора можно расширить область устойчивости параллельной работы электростанцией системы при комплексном автоматическом регулировании возбуждения и подмагничивания.

Литература

1. Либкинд М. С., Управляемый реактор для линий передачи переменного тока, Изд. АН СССР, 1961.
2. Розенблат М. А., Магнитные усилители, Изд. «Советское радио», 1956.
3. Веников В. А., Жуков Л. А. и Анисимова Н. Д., Холостые режимы дальних электропередач, «Электричество», 1953, № 7.

[6.5.1963]



Ионный преобразователь повышенной частоты

Доктор техн. наук, проф. М. М. АКОДИС

Уральский политехнический институт им. Кирова

и инж. С. М. КАЦНЕЛЬСОН

Уральское отделение Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Применение токов повышенной частоты для термообработки металлов требует создания соответствующих экономичных генераторов. Используемые для этой цели машинные преобразователи имеют сравнительно низкий к. п. д., не превышающий 65% при частоте 8 000 гц. Ионные преобразователи повышенной частоты могут обеспечить к. п. д., превышающий 90% и мало зависящий от нагрузки.

Несмотря на ряд предложений по повышению предельной частоты и устойчивости в работе ионных преобразователей [Л. 1—5], для получения значительной частоты при использовании нормальных промышленных вентилях необходимо дальнейшее увеличение времени, в течение которого успевала бы восстанавливаться управляющая способность сеток.

На рис. 1 изображена схема разработанного авторами преобразователя частоты, позволяющего получить большие частоты, чем в известных преобразователях того же типа, при более простом и дешевом исполнении. В данном преобразователе, который далее именуется последовательным умножителем частоты, первичные обмотки трехобмоточного инверторного трансформатора T_u присоединены к источнику питания через емкостный фильтр C_Φ ; нагрузка подключается к вторичной обмотке. Средняя точка (0) первичных обмоток присоединяется через соответствующую коммутирующую емкость C_0 к средней точке двух последовательно соединенных вентилях данной ячейки (B1 и B3).

Указанная схема позволяет выполнить многоячейковый последовательный преобразователь, в котором в качестве индуктивностей колебательных контуров используется сам инверторный трансформатор, являющийся одновременно и нагрузочным, что существенно упрощает и удешевляет установку. В то же время предельная частота преобразователя выше, чем у обычного последовательного, при том же числе вентилях.

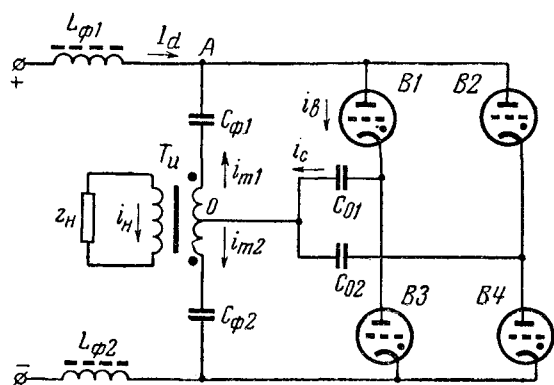


Рис. 1. Принципиальная схема двухъячейкового последовательного ионного умножителя частоты.

Рассмотрим работу двухъячейкового преобразователя, изображенного на рис. 1. Допустим, что к концу заряда емкости C_{01} через проводящий вентиль B1 к верхней фазе первичной обмотки инверторного трансформатора было приложено положительное (по отношению к средней точке) напряжение. В момент времени, когда вентиль B1 гаснет и открывается очередной вентиль B2, напряжение на этой фазе меняет свой знак и становится отрицательным по отношению к средней точке, так как емкость C_{02} при таком порядке чередования работы вентилях должна была быть заряжена отрицательно.

В процессе горения вентиля B2 напряжение на верхней фазе по мере перезаряда емкости C_{02} изменяется по величине и по знаку и в конце проводящего периода вентиля B2 снова будет положительным. Таким образом, в течение промежутка времени, пока был открыт один вентиль B2, напряжение на инверторном трансформаторе прошло полный цикл своего изменения.

При зажигании следующего очередного вентиля B3 к нижней фазе трансформатора окажется приложенным положительное (по отношению к средней точке) напряжение, так как емкость C_{01} после гашения вентиля B1 осталась заряженной положительно. Это равносильно приложению к верхней фазе отрицательного напряжения, которое в процессе перезаряда емкости C_{01} изменяется по величине и по знаку и к концу горения вентиля B3 снова будет положительным, т. е. снова получен полный период переменного напряжения.

В результате в течение полного цикла работы всех четырех вентилях на вторичной обмотке инверторного трансформатора получатся четыре периода переменного напряжения. Соответственно в трехъячейковой схеме при шести вентилях за один цикл будет иметь место шесть периодов и т. д.

На рис. 2,а приведены осциллограммы токов, протекающих через вентили, и напряжения между анодом и катодом вентиля в двухъячейковой схеме, изображенной на рис. 1, при выходной частоте инвертора 13,7 кГц. Испытание инвертора производилось на вентилях TP1-15/15. Как видно из осциллограммы, изображенной на рис. 2,а, после гашения каждого вентиля напряжение на его аноде сохраняет отрицательный потенциал, не переходя через нулевое значение во время горения вентилях других ячеек, и лишь при горении противофазного вентиля своей ячейки это напряжение снова получает положительное значение.

В режиме короткого замыкания и при сопротивлениях нагрузки, не превышающих определенной величины, преобразователь работает в колебательном режиме. В этом случае форма осциллограммы тока, протекающего через вентиль, приближается к синусоидальной (рис. 2,б). На рис. 2,в приведены

осциллограммы напряжения на нагрузке U_H и напряжения U_C на коммутирующей емкости, из которых следует, что выходная частота в двухъячейковой схеме в 4 раза выше, чем частота перезаряда коммутирующей емкости.

При больших сопротивлениях нагрузки преобразователь переходит в аperiodический режим работы, при этом осциллограмма тока, протекающего через вентили, принимает форму, близкую прямоугольной. В аperiodическом режиме выходная мощность преобразователя уменьшается по мере увеличения сопротивления нагрузки. Наибольшую мощность преобразователь имеет в колебательном режиме, когда осциллограмма тока, протекающего через вентили, близка к синусоидальной, а паузы между горением вентилях двух соседних ячеек достаточно малы.

Время воздействия обратного напряжения на вентиль, необходимое для восстановления управляющей способности сеток вентилях, в описываемом преобразователе при двухъячейковом исполнении примерно в 8, а при трехъячейковом исполнении в 14 раз больше, чем у параллельного с углом опережения зажигания 60° , и примерно в 2 раза больше, чем в трехъячейковом последовательном преобразователе. При этом следует учесть, что при многоячейковом исполнении преобразователя расходы на замену вентилях не увеличиваются, так как при поочередной работе вентилях срок работы возрастает пропорционально числу ячеек.

Возможность выполнения высокочастотного преобразователя с большим временем восстановления управляемости позволяет применять более дешевые вентили. В параллельном преобразователе лишь на тиратронах TP1-15/15 может быть получена частота 2 500 гц (при условии включения последовательно с вентилями насыщающихся реакторов). При двухъячейковом исполнении описываемого преобразователя для частот 2 500—5 000 гц могут быть применены тиратроны с большим временем восстановления управляемости типа TP1-40/15, которые обеспечивают в 2,5 раза большую мощность и в 4 раза больший срок службы преобразователя, чем тиратроны TP1-15/15. Стоимость обоих типов вентилях почти одинакова, поэтому годовые расходы на них, отнесенные к единице мощности, при TP1-40/15 почти в 10 раз меньше, чем при TP1-15/15. Последнее весьма существенно, так как при тиратронах TP1-15/15 большая часть экономии, получаемой от замены машинного преобразователя ионным, поглощается расходами на смену вентилях.

При трехъячейковом исполнении рассматриваемый преобразователь на тиратронах TP1-40/15 может быть выполнен на частоту 8 кгц и более; при использовании в нем тиратронов TP1-15/15, видимо, может быть получена значительно большая частота. Резкое снижение требований к времени восстановления управляемости вентилях позволяет выполнять высокочастотные преобразователи на вентилях с ртутным катодом, что даст возможность получить значительно большие мощности и ликвидировать расходы на замену вентилях.

Схема самоуправления преобразователем выполнена при помощи двух сеточных трансформато-

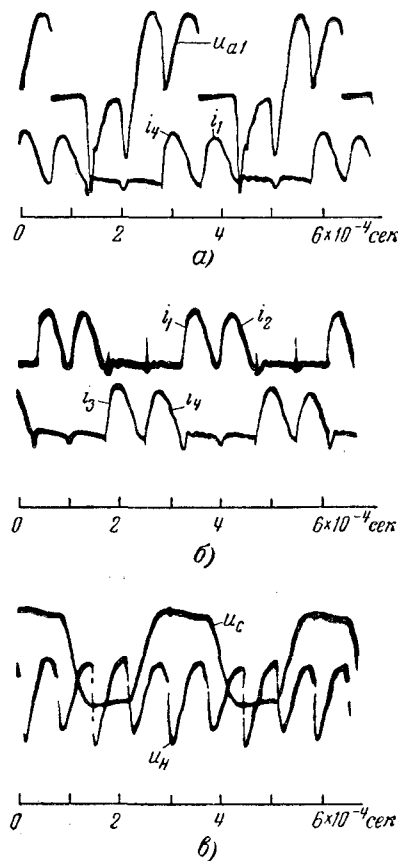


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений в умножителе частоты.

а — напряжение u_{a1} между анодом и катодом вентиля В1 и токи вентилях В1 и В4; б — токи вентилях В1, В2 и В3, В4 при работе преобразователя в колебательном режиме; в — напряжение u_c на коммутирующей емкости и напряжение u_H на выходе преобразователя.

ров T_{c1} и T_{c2} (рис. 3). Сеточный трансформатор T_{c1} нечетной группы вентилях подключен при помощи фазосдвигающей цепи $r_{m1} C_{m1}$ к конденсатору C_y управления, соединенному последовательно с коммутирующей емкостью C_{01} . Сеточный трансформатор четной группы вентилях T_{c2} питается от моста $r_{m2} C_{m2}$, подключенного также к конденсатору управления C_y первой ячейки; при этом фазы сеточных напряжений двух ячеек сдвигаются по отношению друг к другу на 90° полного цикла работы четырех вентилях. При такой системе подключения сеточных цепей первая ячейка инвертора будет ведущей, а вторая ведомой, так как конденсатор управления C_y включен в цепь коммутирующей емкости первой ячейки. Это позволяет обеспечить надежный пуск преобразователя и одинаковую частоту управления обеими ячейками.

Работа схемы самоуправления происходит следующим образом: при включении преобразователя замыкаются контакты промежуточного реле РП и подается положительный импульс на сетки вентилях запертого выпрямителя. Это осуществляется при помощи пусковой емкости C_p , предварительно заряженной через диод от сети переменного тока. При отпирании выпрямителя начинается заряд фильтровых емкостей $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$, и когда напряже-

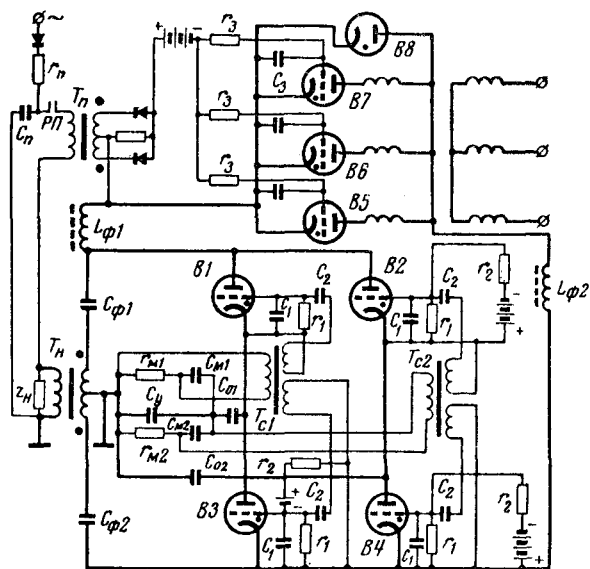


Рис. 3. Схема самоуправления двухъячейкового последовательного ионного умножителя частоты.

ние на них достигает определенной величины, которая значительно меньше номинальной, зажигается один из клапанов нечетной группы. Нечетная группа в зависимости от характеристик клапанов может не иметь предварительного отрицательного смещения на сетках или же это смещение выбирается очень малым. При зажигании одного из клапанов нечетной группы начинается процесс раскачки, и ведущая ячейка начинает работать с паузами между горением клапанов $B1$ и $B3$.

Ведомая ячейка с четной группой клапанов вступает в работу спустя несколько периодов, когда емкости фильтра $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ успеют достаточно зарядиться и напряжение на сеточном трансформаторе T_{c2} окажется достаточным для отпирания клапанов $B2$ и $B4$, запертых отрицательным напряжением, большим по величине напряжения смещения на сетках клапанов ведущей ячейки.

В процессе работы преобразователя смещение на сетках клапанов устанавливается автоматически путем заряда емкостей C_2 в сеточных цепях через промежутки сетка—катод горящих клапанов. Внешнее смещение во время работы преобразователя роли не играет, так как оно значительно меньше автоматического и служит только для обеспечения правильного порядка зажигания клапанов при пуске преобразователя.

При срыве колебаний инвертора снимается напряжение с трансформатора T_n , отпирającego клапаны выпрямителя, и последний запирается отрицательным напряжением смещения [Л. 6].

Определение тока нагрузки и потерь в обмотках трансформатора. Распределение токов и напряжений по элементам схемы удобно показать на расчете одноячейкового преобразователя. Очевидно, что в многоячейковом преобразователе все процессы будут аналогичны. Допустим, что индуктивности L_{ϕ} и емкости C_{ϕ} фильтра достаточно велики и что можно пренебречь переменной составляющей тока,

протекающего через индуктивности фильтра, и переменной составляющей напряжения на емкостях фильтра. Тогда зарядный ток i_C , протекающий через коммутирующую емкость во время горения клапана $B1$, будет разветвляться по обеим фазам первичной обмотки инверторного трансформатора:

$$i_C = i_{T_1} + i_{T_2}, \quad (1)$$

где i_{T_1} и i_{T_2} — токи, протекающие соответственно через первую и вторую фазы первичной обмотки трансформатора.

Ток i_{T_2} , очевидно, должен быть равен входному току инвертора I_d , так как благодаря большой индуктивности фильтра этот ток поддерживается постоянным:

$$i_{T_2} = I_d. \quad (2)$$

При любом числе ячеек инвертора входной ток I_d равен:

$$I_d = \frac{1}{2T} \int_0^T i_B dt, \quad (3)$$

где T — период выходного напряжения;

i_B — ток, протекающий через клапан, равный току i_C , протекающему через коммутирующую емкость.

Напряжение на коммутирующей емкости U_{C_0} после окончания ее перезаряда равно:

$$U_{C_0} = \frac{1}{2C_0} \int_0^T i_C dt. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) находим амплитуду напряжения на коммутирующей емкости:

$$U_{C_0} = \frac{2\pi I_d}{\omega C_0}, \quad (5)$$

где ω — круговая частота на выходе инвертора.

Из условия равновесия намагничивающих сил получим:

$$i_{T_1} = i_{T_2} - i_n, \quad (6)$$

где i_n — ток нагрузки, приведенный к первичной обмотке трансформатора.

Тогда из уравнений (1), (2) и (6) найдем:

$$i_B = 2I_d - i_n. \quad (7)$$

Ниже приводятся приближенный анализ и результаты экспериментального исследования данного инвертора. Поскольку наибольшая мощность последовательного инвертора с умножением выходной частоты наблюдается при его работе в колебательном режиме, то при анализе принято допущение, что осциллограмма тока, протекающего через клапан, имеет синусоидальную форму и пау-

зы между горением вентилях равны нулю. Тогда ток нагрузки выразится уравнением

$$i_n = I_m \sin \omega_1 t - 2I_d = I_m \sin \omega_1 t - \frac{2I_m}{\pi}, \quad (8)$$

где $\omega_1 = \frac{\omega}{2}$;

I_m — максимальное значение тока, протекающего через вентиль.

На рис. 4 приведены линейные диаграммы токов преобразователя. Токи, протекающие по обмоткам трансформатора, не имеют постоянных составляющих. При любом числе ячеек действующее значение тока нагрузки равно:

$$I_n = I_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}} = 0,312I_m. \quad (9)$$

Разложив кривую тока в ряд Фурье, получим:

$$i_n = \frac{4I_m}{\pi} \left(\frac{\cos \omega t}{1.3} + \frac{\cos 2\omega t}{3.5} + \frac{\cos 3\omega t}{5.7} + \dots \right). \quad (10)$$

Действующее значение первой гармоники тока нагрузки $I_{н1}$ равно:

$$I_{н1} = \frac{4I_m}{3\sqrt{2}\pi} = 0,301I_m. \quad (11)$$

Действующее значение тока, протекающего через одну фазу первичной обмотки инверторного трансформатора, характеризуется следующим уравнением:

$$I_1 = I_m \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}} = 0,388I_m. \quad (12)$$

Целесообразно сравнить использование вентилях по току в схеме с простым параллельным инвертором (рис. 1). В параллельном инверторе действующее значение первой гармоники тока нагрузки $I_{н.п}$ определяется по формуле

$$I_{н.п} = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} I_{дн} \cos \varphi_n, \quad (13)$$

где $I_{дн}$ — входной ток инвертора;

φ_n — угол сдвига фазы между первыми гармониками тока и напряжения.

Если зависимость между максимальным током, допускаемым для вентиля, I_m и входным током инвертора $I_{дн}$ можно выразить соотношением $I_{дн} = \frac{2}{\pi} I_m$, что обычно справедливо для тиратронов, и

принять угол опережения зажигания равным 45° — 60° , что имеет место при предельных частотах инвертирования, то первая гармоника тока нагрузки будет соответственно равна $I_{н.п} = (0,405 \div 0,285) I_m$. Как видно из этих соотношений, использование вентилях по току в параллельном инверторе при $\varphi_n = 45^\circ$ немногим больше, чем в рассматриваемом преобразователе, а при угле $\varphi_n = 60^\circ$ даже меньше.

Интересно сравнить потери в обмотках инверторного трансформатора параллельного преобразователя и последовательного преобразователя с умножением выходной частоты. Для удобства

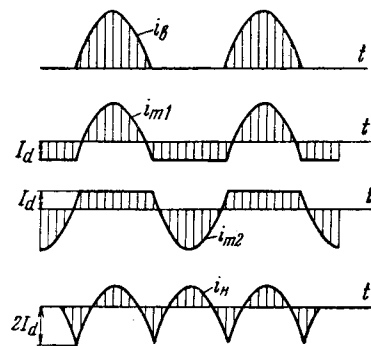


Рис. 4. Линейные диаграммы токов в последовательном умножителе частоты.

i_n — ток, протекающий через вентиль; $i_{т1}$ и $i_{т2}$ — токи, протекающие через фазы первичной обмотки трансформатора; i_n — ток во вторичной обмотке трансформатора.

сравнения инверторные трансформаторы обоих преобразователей приняты одинаковыми и сопротивление вторичной обмотки r_2 трансформатора принято равным сопротивлению одной фазы первичной обмотки $r_1 = r_2 = r$. Тогда потери в меди инверторного трансформатора последовательного инвертора с умножением выходной частоты будут равны:

$$P_M = I_m^2 r \left(1 - \frac{6}{\pi^2} \right) = 0,395 I_m^2 r. \quad (14)$$

В параллельном инверторе, у которого коммутирующая емкость подключена к вторичной обмотке инверторного трансформатора, потери в меди при принятых допущениях будут выше, чем в схеме, изображенной на рис. 1, в 2,05 раза. Таким образом, к. п. д. преобразователя, схема которого приведена на рис. 1, будет выше, чем у простого параллельного преобразователя, у которого коммутирующие емкости включены с вторичной стороны трансформатора. Наряду с этим последовательный инвертор с умножением выходной частоты в многоячейковом исполнении не требует увеличения числа силовых трансформаторов или дополнительных индуктивностей, что позволяет сохранить к. п. д. на высоком уровне, и это отличает его от многих других многоячейковых схем преобразователей.

Экспериментальные исследования преобразователя. На кафедре техники высоких напряжений Уральского политехнического института им. Кирова совместно с лабораторией энергоснабжения Уральского отделения Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта проводились исследования последовательного умножителя частоты в одноячейковом и двухъячейковом исполнениях. Преобразователь был собран на вентилях ТР1-15/15 по схеме, приведенной на рис. 1. Выходная мощность преобразователя на этих вентилях получилась около 60 кВт при работе в колебательном режиме. С уменьшением активной нагрузки выходная мощность инвертора уменьшается, причем преобразователь плавно переходит из колебательного режима работы в апериодический. Форма осциллограммы тока при этом также

изменяется от синусоидальной до близкой к прямоугольной.

Исследования преобразователя производились с воздушным инверторным трансформатором и с трансформатором со стальным сердечником, собранным из стали марки Э44 с толщиной листов 0,1 мм. При работе с воздушным трансформатором на частоте 16 кГц в восстанавливаемом напряжении высокочастотные составляющие имеют амплитуду, почти равную основной амплитуде обратного напряжения, поэтому во избежание значительного снижения мощности преобразователя были применены насыщающиеся реакторы, включаемые последовательно в цепь анодов вентилях [Л. 2]. Так как воздушный трансформатор имеет относительно большую индуктивность намагничивания, то при изменении нагрузки вплоть до режима холостого хода преобразователь не выходит из колебательного режима. В последнем случае колебательный процесс протекает между коммутирующей емкостью и индуктивностью намагничивания.

При работе с инверторным трансформатором со стальным сердечником высокочастотные составляющие в восстанавливаемом напряжении значительно меньше, но применение насыщающихся реакторов и здесь все же необходимо. В этом случае преобразователь тоже легко работает в режиме холостого хода, но при этом он обязательно переходит в аperiodический режим, а частота колебаний значительно снижается.

На рис. 5 приведены зависимости выходной мощности и напряжения последовательного умножителя частоты в двухъячейковом исполнении, собранного на вентилях ТР1-15/15 с инверторным трансформатором со стальным сердечником от нагрузки.

В режиме холостого хода напряжение повышается, при этом происходит снижение частоты и уменьшение входного тока. Так как преобразователь работает с самоуправлением, то при уменьшении нагрузки, когда изменяется частота колебательного процесса, одновременно автоматически изменяется и частота управления, поэтому повы-

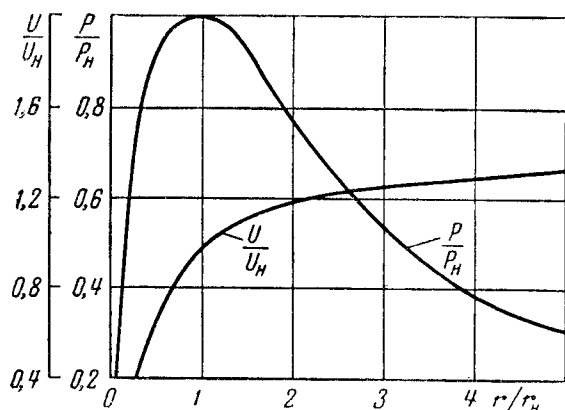


Рис. 5. Зависимости выходной мощности $\frac{P}{P_n}$ и выходного напряжения $\frac{U}{U_n}$ последовательного умножителя частоты от сопротивления нагрузки $\frac{r}{r_n}$.

шение напряжения в этом случае значительно меньше, чем при независимом управлении.

В параллельном преобразователе частоты по обмоткам инверторного трансформатора наряду с токами нагрузки протекают зарядные токи коммутирующей емкости, обеспечивающие необходимый угол запираания. Эти токи снижают к. п. д. преобразователя. То же самое, хотя и в меньшей степени, имеет место и в последовательном умножителе частоты.

Если использовать параллельную работу вентилях в последовательном умножителе частоты, то можно, повысив выходную мощность вдвое, устранить протекание зарядных токов по обмоткам инверторного трансформатора и тем самым значительно повысить его к. п. д. Для этой цели параллельную работу вентилях в последовательном умножителе частоты необходимо осуществить таким образом, чтобы одновременно горели два вентиля, один из которых принадлежит анодной, а другой катодной группам. Одна ячейка такого преобразователя состоит из четырех вентилях и имеет точно такую схему, как у двухъячейкового последовательного умножителя частоты (рис. 1). Но в отличие от двухъячейковой схемы здесь всегда одновременно горят два вентиля В1—В4 и В2—В3. Параллельная работа вентилях в другом сочетании В1—В2 и В3—В4, хотя и возможна, но не дает того экономического эффекта, о котором упоминалось выше.

При параллельной работе вентилях В1—В4 и В2—В3 происходит одновременный перезаряд коммутирующих емкостей C_{01} и C_{02} сразу через обе фазы инверторного трансформатора, которые оказываются включенными как бы параллельно. В результате ток, протекающий через вторичную обмотку трансформатора, увеличивается в 2 раза. Точно так же увеличивается в 2 раза и входной ток инвертора I''_d , который теперь будет равен:

$$I''_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_b dt. \quad (15)$$

Легко доказать, что зарядные токи коммутирующих емкостей теперь не протекают через обмотки инверторного трансформатора, так как они в обеих фазах направлены встречно друг к другу. Составим уравнение Кирхгофа для узла А (рис. 1):

$$i_b = i_{T1} + I''_d.$$

В данном случае входной ток инвертора $I''_d = \frac{2}{\pi} I_m$. Следовательно, ток i_{T1} , ответвляющийся в первичную обмотку трансформатора, не содержит постоянной составляющей, протекающей через вентили. То же самое получим и для второй фазы. Таким образом, зарядные токи коммутирующих емкостей протекают только через коммутирующие емкости и вентили и не протекают по обмоткам инверторного трансформатора. В результате резко снижаются потери в меди трансформатора и повышается к. п. д. преобразователя. В таком исполнении преобразователь дает возможность при уменьшении нагрузки ниже 50% от номинальной

производить бесконтактное отключение половины коммутирующей емкости путем прекращения подачи открывающих импульсов на сетку одного из вентиляей. Это можно использовать при автоматическом регулировании напряжения с изменением нагрузки.

Время, в течение которого восстанавливается управляющее действие сетки вентиля, в последовательном преобразователе с умножением частоты зависит от числа ячеек. Это время повышается по сравнению с аналогичным временем в обычном одноячейковом параллельном инверторе в $2\left[1 + (m-1) \frac{180}{\delta}\right]$ раз, где m — число ячеек, а δ — предельный угол восстановления управляющих свойств сетки вентиля. При $m=2$ и $\delta=50^\circ$ получим, что вышеуказанное время увеличивается в 9,2 раза, а при $m=3$ — в 16,5 раза. Это открывает возможность обеспечить при высоких частотах необходимое время для восстановления управляемости вентиляей при сравнительно небольшом числе ячеек.



Литература

1. Акодис М. М., Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в схемах с ионными вентилями, «Электричество», 1952, № 10.
2. Акодис М. М., Преобразователь переменного тока в переменный ток другой частоты или постоянного тока в переменный, Авторское свидетельство № 99555 от 9 октября 1950 г.
3. Hauffe F., Die Umformung von Gleichstrom in einphasigen Wechselstrom mittels selbsterregten Speicherwechsellrichter, Archiv für Elektrotechnik, 1935, Bd. XXIX, H. 6.
4. Самоделкина Т. Ф., Возможности повышения предельной частоты мощного ионного преобразователя, Труды Уральского политехнического института (Электротехника), 1960, № 77.
5. Самоделкина Т. Ф., Экспериментальное исследование многоячейкового ионного преобразователя частоты, Труды Уральского политехнического института (Электротехника), 1960, № 77.
6. Донской А. В. и Ивенский Г. В., Ионные преобразователи частоты для индукционного нагрева, «Электричество», 1959, № 7.

[25.6.1962]

УДК 62—838.004.12

Переходные процессы в вентильно-машинных каскадах

Доктор техн. наук, проф. А. С. САНДЛЕР и инж. Л. Я. ШАПИРО

Москва

В последнее время для некоторых производственных механизмов большой мощности (от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт), требующих плавного регулирования скорости вращения и работающих, как правило, в длительном режиме, применяются асинхронные двигатели с фазным ротором, включаемые в каскадные схемы.

Отличительной особенностью вентильно-машинных каскадов является преобразование энергии переменного тока (ротора асинхронного двигателя) при помощи вентиляей и затем реализация ее двигателем постоянного тока.

В одном случае двигатель постоянного тока механически связывается с главным асинхронным двигателем. Этот каскад называется электромеханическим [Л. 1], так как энергия скольжения преобразуется в механическую, возвращаясь на вал главного двигателя.

В другом случае машина постоянного тока соединяется с синхронным генератором, возвращающим энергию скольжения (за вычетом потерь) в сеть переменного тока. Такой каскад называется электрическим. К электрическим каскадам относятся и так называемый вентильный каскад, состоящий, как известно, из главного асинхронного двигателя, выпрямительного устройства, как и в ука-

занных выше случаях, и инвертора — управляемых ионных вентиляей.

Применение в каскадах неуправляемых полупроводниковых вентиляей способствует более широкому внедрению этих схем регулирования.

Проектирование и эксплуатация асинхронных каскадных приводов требуют расчета не только статических, но и динамических характеристик, позволяющих оценить как величины токов и моментов, так и интенсивность изменения скорости привода в процессе управления, что в свою очередь дает возможность рациональным образом построить систему автоматического управления.

В настоящей статье на примере двух типов вентильно-машинных и вентильного каскадов рассматривается упрощенная методика расчета переходного процесса при регулировании скорости вращения.

На рис. 1 и 2 изображены схемы электрического и электромеханического каскадов. В обоих каскадах регулирование скорости производится путем изменения тока возбуждения двигателя постоянного тока, которое может осуществляться как дистанционно, так и автоматически по заданному технологическому параметру.

Изменение тока возбуждения двигателя постоянного тока вызывает переходный режим в си-

стеме электропривода, определяемый параметрами асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока, а также механической инерцией. С целью примерной (приемлемой для инженерных расчетов) оценки переходных процессов можно не учитывать электромагнитные процессы, возникающие в асинхронном двигателе, а также пренебречь индуктивностью якорной цепи. Кроме того, можно не учитывать влияние высших гармонических составляющих в кривой тока, обусловленных несинусоидальной формой кривых тока и напряжения в роторной цепи асинхронного двигателя. Как показывают соответствующие расчеты, влияние высших гармонических незначительно.

Для системы электропривода, изображенной на рис. 1, справедливо следующее уравнение движения:

$$M - M_c = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (1)$$

где M — момент асинхронного двигателя;

M_c — статический момент на валу электропривода;

GD^2 — суммарный маховой момент, приведенный к валу асинхронного двигателя;

$\frac{dn}{dt}$ — ускорение электропривода.

Известна зависимость между моментом асинхронного двигателя и током выпрямленной цепи [Л. 2]:

$$M = \frac{I_d E_{d0}}{\omega_0} \left(1 - \frac{m x_d}{\pi E_{d0}} \cdot I_d \right), \quad (2)$$

где E_{d0} — напряжение с выпрямленной стороны при разомкнутой цепи постоянного тока;

$$E_{d0} = 2\sqrt{2} \cdot E_{2к} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}; \quad (3)$$

I_d — ток выпрямленной цепи;

x_d — приведенное к цепи выпрямленного тока индуктивное сопротивление фазы асинхронного двигателя;

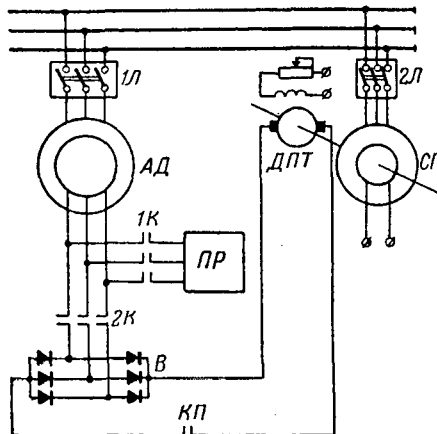


Рис. 1. Схема электрического вентильно-машинного каскада.

АД — асинхронный двигатель с фазным ротором; ДПТ — двигатель постоянного тока; СГ — синхронный генератор; В — выпрямители; ПР — пусковой реостат.

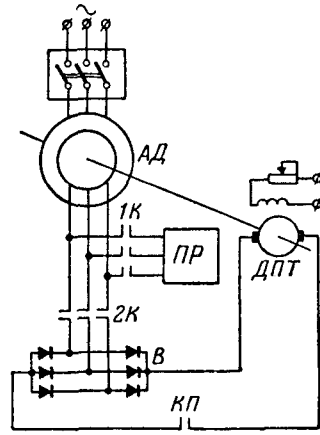


Рис. 2. Схема электромеханического вентильно-машинного каскада. Обозначения те же, что и на рис. 1.

m — число фаз ($m=3$);

ω_0 — угловая синхронная скорость асинхронного двигателя;

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}. \quad (4)$$

$E_{2к}$ — напряжение фазы ротора асинхронного двигателя при $n=0$;

n_0 — синхронная скорость асинхронного двигателя.

Ток выпрямленной цепи определяется, исходя из схемы замещения каскада [Л. 3], по формуле

$$I_d = \frac{E_{d0}s - 2\Delta U_B - E_{д.п.т.}}{2 \left(\frac{m x_d}{2\pi} s + r_d \right) + r_n}, \quad (5)$$

где ΔU_B — падение напряжения в одном вентиле при прохождении прямого тока;

$E_{д.п.т.}$ — э. д. с. двигателя постоянного тока;

r_d — приведенные к цепи выпрямленного тока активное сопротивление фазы асинхронного двигателя;

r_n — сопротивление якоря двигателя постоянного тока;

s — скольжение асинхронного двигателя.

Изменение тока возбуждения двигателя постоянного тока осуществляется в соответствии с выражением

$$\frac{U_B}{r_B} = i_B + T_\theta \frac{di_B}{dt}, \quad (6)$$

где U_B — напряжение, приложенное к обмотке возбуждения;

r_B — активное сопротивление обмотки возбуждения;

i_B — ток обмотки возбуждения;

$T_\theta = \frac{L_B}{r_B}$ — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения двигателя постоянного тока;

L_B — индуктивность обмотки возбуждения.

При подстановке уравнений (2) и (5) в формулу (1) получим:

$$\frac{E_{d0}s - 2\Delta U_B - k_e n_c \Phi_{д.п.т}}{2\left(\frac{m x_d}{2\pi} \cdot s + r_d\right) + r_n} \cdot \frac{E_{d0}}{\omega_0} \left(1 - \frac{m x_d}{\pi E_{d0}} \times \right. \\ \left. \times \frac{E_{d0} \cdot s - 2\Delta U_B - k_e n_c \Phi_{д.п.т}}{2\left(\frac{m x_d}{2\pi} \cdot s + r_d\right) + r_n}\right) - M_c = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (7)$$

где n_c — скорость двигателя постоянного тока и синхронного генератора ($n_c = \text{const}$);
 $\Phi_{д.п.т}$ — магнитный поток двигателя постоянного тока.

Для аналитического решения уравнения движения можно пренебречь падением напряжения в вентильях $2\Delta U_B$ (что вполне возможно для полупроводниковых вентилей) в выражении (5) и вычитаемым в скобках выражения (2), так как эти величины на порядок меньше остальных членов указанных выражений.

Так, например, для асинхронных электродвигателей мощностью от 1 000 до 4 500 кВт вычитаемое в скобках выражения (2) составляет $0,075 \div 0,1$ при номинальном значении тока выпрямленной цепи. Для машин меньшей мощности эта величина будет еще меньше. Таким образом, погрешность в определении момента при номинальном токе нагрузки не превышает 10%.

Кроме того, знаменатель выражения (5), представляющий собой сумму двух членов, не зависящих от скольжения, и одного, зависящего от скольжения, можно считать величиной постоянной, определенной для среднего значения скольжения (s_{cp}) на рассматриваемом участке переходного процесса. Очевидно, чем меньше разница между начальным и конечным значением тока возбуждения, тем меньше погрешность данного допущения. При этом следует заметить, что по мере снижения мощности машин роль первого члена, зависящего от скольжения, в знаменателе выражения (5) уменьшается.

Хотя сделанные допущения при решении уравнения движения электропривода могут несколько исказить искомый результат, однако они дают возможность легко и с достаточной степенью точности оценить порядок величин тока и скорости во время переходного процесса.

При сделанных допущениях уравнения (2) и (5) можно записать следующим образом:

$$M = \frac{I_d E_{d0}}{\omega_0}, \quad (2')$$

$$I_d = \frac{E_{d0}s - E_{л.п.т}}{r_0}, \quad (5')$$

где

$$r_0 = \frac{m x_d}{\pi} \cdot s_{cp} + 2r_d + r_n. \quad (8)$$

Подставив выражение тока из формулы (5') в равенство (2'), а затем выражение момента из

равенства (2') в формулу (1) и заменив $E_{д.п.т} = k_e n_c \Phi_{д.п.т}$ и $\frac{dn}{dt} = -n_0 \frac{ds}{dt}$, получим:

$$\frac{E_{d0}^2 \cdot s - k_e E_{d0} n_c \Phi_{д.п.т}}{\omega_0 r_0} - M_c = -\frac{GD^2}{375} n_0 \frac{ds}{dt}. \quad (9)$$

Магнитный поток двигателя постоянного тока согласно дифференциальному уравнению (6) изменяется по следующему закону:

$$\Phi_{д.п.т} = k \left[(i_{B1} - i_{B2}) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + i_{B2} \right], \quad (10)$$

где i_{B1} и i_{B2} — соответственно начальное и конечное значения тока возбуждения двигателя постоянного тока;

$k = \frac{\Phi_{д.п.т}}{i_B}$ — (на линейной части кривой намагничивания).

Подставив выражение (10) для магнитного потока в уравнение (9) и полагая для простоты $M_c = \text{const}$, получим:

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = D \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + F, \quad (11)$$

где A , B , D и F — постоянные, определяемые следующими выражениями:

$$A = \frac{GD^2}{375} n_0;$$

$$B = \frac{E_{d0}^2}{\omega_0 r_0};$$

$$D = \frac{k_e E_{d0} n_c k}{\omega_0 r_0} \cdot (i_{B1} - i_{B2});$$

$$F = \frac{k_e E_{d0} n_c k}{\omega_0 r_0} i_{B2} + M_c.$$

Решение уравнения (11) имеет следующий вид:

$$s = C_1 e^{-\frac{B}{A} t} + \frac{D e^{-\frac{t}{T_a}}}{B - \frac{A}{T_a}} + \frac{F}{B}. \quad (12)$$

Постоянная интегрирования C_1 определяется из начального условия: $s = s_{нач}$ при $t = 0$.

Тогда

$$s_{нач} = C_1 + \frac{D}{B - \frac{A}{T_a}} + \frac{F}{B},$$

откуда

$$C_1 = s_{нач} - \left(\frac{D}{B - \frac{A}{T_a}} + \frac{F}{B} \right). \quad (13)$$

Окончательно получим:

$$s = \left(s_{нач} - \frac{D}{B} \cdot \frac{T_a}{T_a - T_m} - \frac{F}{B} \right) e^{-\frac{t}{T_m}} + \\ + \frac{D}{B} \cdot \frac{T_a}{T_a - T_m} e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{F}{B}, \quad (14)$$

где $T_m = \frac{A}{B}$ — электромеханическая постоянная времени электропривода в каскадной схеме, сек.

Если ускорение электропривода до максимальной скорости ($i_{в2}=0$) происходит при отсутствии статического момента на валу, то уравнение (14) упрощается и принимает вид:

$$s = s_{нач} \left[\frac{T_0}{T_0 - T_M} e^{-\frac{t}{T_0}} - \frac{T_M}{T_0 - T_M} e^{-\frac{t}{T_M}} \right]. \quad (15)$$

В формуле (15)

$$s_{нач} = \frac{D}{B} = \frac{E_{д.п.т1}}{E_{d0}}. \quad (16)$$

Аналогичный вид имеет аналитическое решение переходного процесса для двухдвигательного вентильно-машинного каскада [Л. 3], описываемого теми же исходными уравнениями (1), (2), (5) и (6).

На рис. 3 изображены кривые $s=f_1(t)$ и $I_d=f_2(t)$ при снятии напряжения с обмотки возбуждения двигателя постоянного тока в электрическом каскаде по схеме, приведенной на рис. 1. В качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель типа АФЗ-4500-1500 мощностью 4 500 кВт.

Расчет переходного процесса произведен аналитически на основании следующих данных:

$$E_{d0} = 2040 \text{ в}, n_0 = 1500 \text{ об/мин}, M_c = 0,$$

$$E_{д.п.т1} = 612 \text{ в}, s_{нач} = 0,3, E_{д.п.т2} = 0,$$

$$r_n = 0,0085 \text{ ом}, T_0 = 2,5 \text{ сек}, GD^2 = 4,500 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$r_d = 0,0038 \text{ ом}, x_d = 0,097 \text{ ом}, s_{ср} = 0,15,$$

$$r_0 \approx 0,03 \text{ ом}.$$

При подстановке указанных величин в выражение (15) оно примет следующий вид:

$$s = 0,326 \cdot e^{-0,4t} - 0,026 \cdot e^{-5t}. \quad (17)$$

Подставив это равенство в уравнение (5') и заменив $E_{д.п.т} = E_{д.п.т1} \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}$, получим:

$$I_d = \frac{2040 \cdot 0,326 \cdot e^{-0,4t} - 2040 \cdot 0,26 \cdot e^{-5t} - 612e^{-0,4t}}{0,03}$$

или

$$I_d = 1770(e^{-0,4t} - e^{-5t}). \quad (18)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Для определения максимального значения тока следует продифференцировать выражение (18) по времени и производную приравнять нулю

$$\frac{dI_d}{dt} = -0,4 \cdot 1770 \cdot e^{-0,4t} + 5 \cdot 1770 \cdot e^{-5t} = 0, \quad (19)$$

откуда

$$t_m = 0,55 \text{ сек}.$$

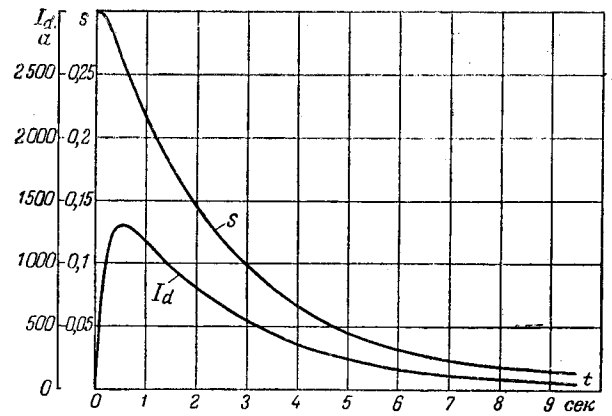


Рис. 3. Графики $s=f_1(t)$ и $I_d=f_2(t)$ в электрическом каскаде.

Подставив t_m в уравнение (18), получим:

$$I_{d \text{ макс}} = 1310 \text{ а}.$$

Таким образом, максимальное значение выпрямленного тока меньше номинального тока двигателя постоянного тока (2300 а). При регулировании скорости под нагрузкой наибольшее значение выпрямленного тока будет выше, однако оно не превысит двукратного номинального значения тока.

На рис. 4 представлены осциллограммы токов и напряжений в двухдвигательном вентильно-машинном каскаде во время переходного процесса регулирования скорости асинхронных двигателей при вентиляторном характере статического момента на валу электропривода.

Осциллограммы были сняты в лаборатории электрооборудования промышленных предприятий Московского энергетического института на экспериментальной установке, включающей в себя асинхронные двигатели АК-61-6: $P_n = 7 \text{ кВт}$, $U_{нн} = 220/380 \text{ в}$, $I_{нн} = 28,5/16,5 \text{ а}$, $n_n = 940 \text{ об/мин}$, $E_{2к} = 175 \text{ в}$, $I_{2к} = 26 \text{ а}$; двигатель постоянного тока параллельного возбуждения ПН-45: $P_n = 5,2 \text{ кВт}$, $U_n = 115 \text{ в}$, $I_n = 45,2 \text{ а}$, $n_n = 2000 \text{ об/мин}$; синхронный генератор СГС-4,5: $S_n = 4,5 \text{ ква}$, $U_n = 230 \text{ в}$, $I_n = 11,3 \text{ а}$, $n_c = 1500 \text{ об/мин}$, $i_{в.н} = 6,7 \text{ а}$; кремниевые выпрямители ВК-25: $I_n = 25 \text{ а}$, $U_{обр.макс} = 150 \text{ в}$.

В процессе экспериментов была получена осциллограмма при снятии и подаче возбуждения на двигатель постоянного тока, что соответствует увеличению и уменьшению скорости вращения электропривода. Из осциллограммы видно, что при снятии возбуждения двигателя постоянного тока имеет место значительное увеличение тока в выпрямленной цепи.

Для электромеханического каскада (рис. 2) также справедливы уравнения (1), (2), (5) и (6), однако под моментом электропривода в формуле (1)

Таблица 1

$t, \text{сек}$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	10
$e^{-0,4t}$	1,0	0,9802	0,9608	0,9231	0,8869	0,8521	0,8187	0,7866	0,7558	0,7261	0,6703	0,5488	0,4493	0,3012	0,1353	0,0608	0,01832
e^{-5t}	1,0	0,7788	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498	0,0302	0,0183	0,0067	0,0005					
s	0,3	0,2998	0,2972	0,295	0,285	0,2745	0,265	0,255	0,246	0,236	0,218	0,179	0,146	0,0980	0,044	0,0198	0,0059
$I_d, \text{а}$	0	356	627	983	1175	1270	1305	1306	1285	1250	1175	970	795	535	239	108	32

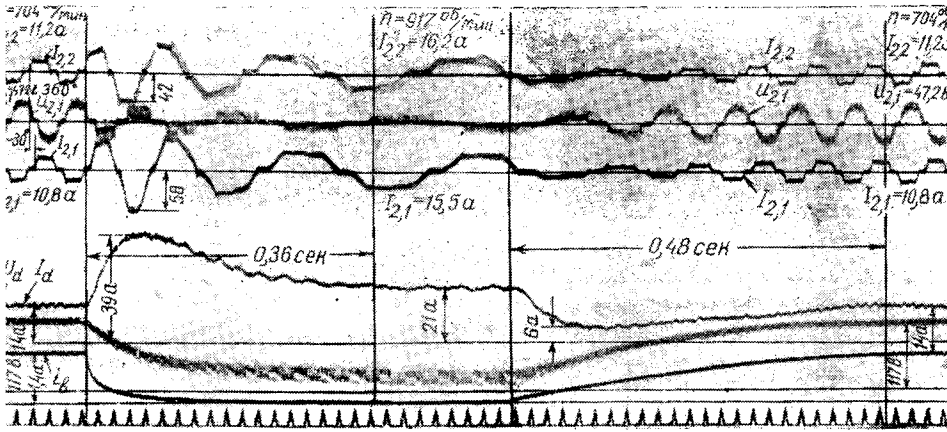


Рис. 4. Осциллограммы переходного процесса в электрическом двухдвигательном вентильно-машинном каскаде.

$I_{2,1}$ — ток ротора асинхронного двигателя 1; $I_{2,2}$ — ток ротора асинхронного двигателя 2; $U_{2,1}$ — напряжение на кольцах ротора асинхронного двигателя 1; I_d — ток выпрямительной цепи; U_d — напряжение на клеммах якоря двигателя постоянного тока; i_b — ток возбуждения двигателя постоянного тока.

нужно иметь в виду суммарный момент асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока, т. е.

$$M = M_{a,d} + M_{д.п.т.} \quad (20)$$

Момент асинхронного двигателя связан с током выпрямленной цепи соотношением (2), а момент двигателя постоянного тока определяется по известной формуле

$$M_{д.п.т.} = k_M \Phi_{д.п.т.} I_d \quad (21)$$

Магнитный поток и э. д. с. двигателя постоянного тока связаны соотношением

$$E_{д.п.т.} = k_M \Phi_{д.п.т.} n, \quad (22)$$

где n — скорость вращения электропривода, изменяющаяся во время переходного процесса.

Магнитный поток двигателя постоянного тока $\Phi_{д.п.т.}$ изменяется в соответствии с выражением (10).

При допущениях, сделанных для электрического каскада, переходный процесс в электромеханическом каскаде можно также решить аналитически, однако решение получается более сложным.

Дифференциальное уравнение переходного процесса, полученное после ряда преобразований, имеет следующий вид:

$$A \frac{ds}{dt} + \left(B + De^{-\frac{t}{T_a}} + Ke^{-\frac{2t}{T_a}} \right) \cdot s = F \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + L \cdot e^{-\frac{2t}{T_a}} + N, \quad (23)$$

где

$$A = \frac{GD^2}{375} n_0;$$

$$B = \frac{E_{d0}^2}{n_0 r_0} + \frac{2E_{d0} k_M k}{r_0} i_{B2} + \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} i_{B2}^2;$$

$$D = 2 \frac{E_{d0} k_M k}{r_0} (i_{B1} - i_{B2}) + 2 \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} (i_{B1} - i_{B2}) i_{B2};$$

$$F = 2 \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} (i_{B1} - i_{B2}) i_{B2} + \frac{k_M E_{d0} k}{r_0} (i_{B1} - i_{B2});$$

$$K = \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} (i_{B1} - i_{B2})^2;$$

$$L = \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} (i_{B1} - i_{B2})^2;$$

$$N = \frac{k_M^2 n_0 k^2}{r_0} i_{B2}^2 + \frac{k_M E_{d0} k}{r_0} i_{B2} + M_c.$$

Решение уравнения (23) дает:

$$s = C_1 e^{-\frac{B}{A} t + \frac{D}{A} T_a e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{K}{2A} T_a e^{-\frac{2t}{T_a}}} + P e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{(R - K P e^{-\frac{t}{T_a}}) e^{-\frac{2t}{T_a}}}{B - \frac{2A}{T_a} + D e^{-\frac{t}{T_a}} + K e^{-\frac{2t}{T_a}}} + \frac{N}{B}, \quad (24)$$

где

$$P = \frac{BF - DN}{BT_a - A} \cdot \frac{T_a}{B};$$

$$R = L - DP - \frac{KN}{B}.$$

Постоянная интегрирования C_1 определяется из начального условия ($s = s_{нач}$ при $t = 0$) и равна:

$$C_1 = \frac{s_{нач} - \left(P + \frac{R - KP}{B - \frac{2A}{T_a} + D + K} + \frac{N}{B} \right)}{e^{\left(\frac{D}{A} + \frac{K}{2A} \right) T_a}}. \quad (25)$$

Подставив выражение (25) в равенство (24), окончательно получим:

$$s = \frac{s_{нач} - \left(P + \frac{R - KP}{B - \frac{2A}{T_a} + D + K} + \frac{N}{B} \right)}{e^{\left(\frac{D}{A} + \frac{K}{2A} \right) T_a}} \times e^{-\frac{B}{A} t + \frac{D}{A} T_a e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{K}{2A} T_a e^{-\frac{2t}{T_a}}} + P e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{(R - K P e^{-\frac{t}{T_a}}) e^{-\frac{2t}{T_a}}}{B - \frac{2A}{T_a} + D e^{-\frac{t}{T_a}} + K e^{-\frac{2t}{T_a}}} + \frac{N}{B}. \quad (26)$$

На рис. 5 изображены полученные аналитическим методом графики изменения скольжения s и тока выпрямленной цепи I_d во время переходного процесса для электромеханического каскада. Рас-

чет производился для лабораторной установки, состоящей из следующего основного электрооборудования:

асинхронный двигатель $P_H=5,5$ кВт, $U_{1H}=220/127$ в, $I_{1H}=20/35$ а, $n_H=1420$ об/мин, $E_{2K}=210$ в;

двигатель постоянного тока параллельного возбуждения $P_H=1,2$ кВт, $U_H=60$ в, $I_H=20$ а, $n_H=1430$ об/мин;

кремниевые выпрямители ВК-10: $I_H=10$ а, $U_{обр.макс}=300$ в.

Для сравнения результатов расчета с осциллограммами напряжение статора асинхронного двигателя принято равным 127 в (при соединении в звезду). Исходные данные для расчета: $E_{d0}=162$ в, $r_d=0,49$ ом, $r_n=0,3$ ом, $n_0=1500$ об/мин, $n_{нач}=1050$ об/мин, $s_{нач}=0,3$, $T_s=0,15$ сек, $GD^2=2$ кг·м², $s_{ср}=0,15$, $r_0 \approx 1,5$ ом, $E_{д.п.т1}=48,6$ в, $M_c=0$. Результаты расчета сведены в табл. 2.

На рис. 6 представлены осциллограммы переходного процесса для той же установки, снятые при холостом ходе (ток выпрямленной цепи обусловлен потерями), а также приблизительно при постоянной нагрузке. Величина тока $I_{dмакс}=18$ а на осциллограмме (рис. 6,а) несколько больше расчетного 14,7 а (рис. 5) за счет тока, обусловленного потерями. Этим же объясняется несколько большее время переходного процесса. Сопоставление результатов расчета и эксперимента для одной и той же установки позволяет сделать вывод о возможности применения аналитического способа расчета при сделанных допущениях.

В связи с тем, что, как показали расчеты, величина $I_{dмакс}$ значительно меньше двукратного номинального тока якоря двигателя постоянного тока, возможно форсирование переходного процесса. При этом $I_{dмакс}$ окажется большим и его ограничение может быть выполнено за счет применения токовой отсечки.

Следует отметить отсутствие резкого увеличения тока выпрямленной цепи при подаче возбуждения на двигатель постоянного тока и снижении скорости электропривода, что происходит по причине запирающего действия вентилей.

Аналитический расчет переходного процесса для вентильного каскада оказывается подобным решению для вентильно-машинного электрического каскада. Для вентильного каскада справедливы уравнения (1) и (2); выражение же для тока выпрямленной цепи запишется так:

$$I_d = \frac{E_{d0}s - 3\Delta U_B - E_H}{2 \left(\frac{mX_d}{2\pi} s + r_d \right) + \left(\frac{x_{\tau m}}{2\pi} + r_{\tau} \right)}, \quad (27)$$

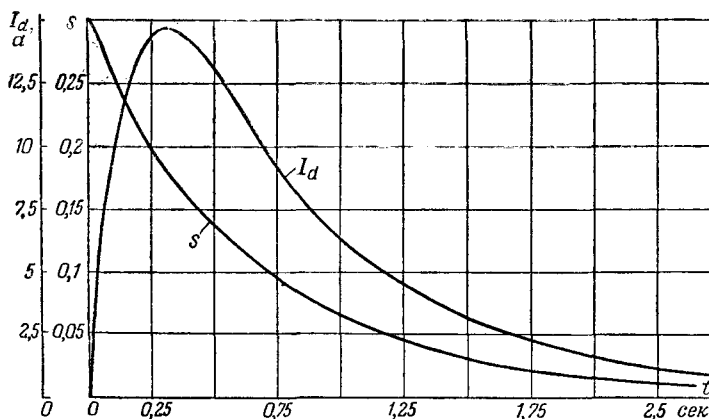


Рис. 5. Графики $s=f_1(t)$ и $I_d=f_2(t)$ в электромеханическом каскаде.

где $E_H = \sqrt{2} \cdot E_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \beta$ — напряжение инвертора;

x_{τ} — приведенное к вторичной стороне индуктивное сопротивление фазы трансформатора;

r_{τ} — приведенное к вторичной стороне активное сопротивление фазы трансформатора;

E_2 — действующее значение напряжения фазы вторичной обмотки силового трансформатора;

β — угол опережения зажигания инвертора.

Имея в виду практически безынерционность инвертора, можно считать, что напряжение E_H устанавливается мгновенно при изменении угла β , что может привести к резкому увеличению тока выпрямленной цепи. Во избежание этого следует ввести в цепь управления инвертором специальное формирующее инерционное звено для удлинения процесса изменения напряжения инвертора подобно тому, как это имеет место для э. д. с. двигателя постоянного тока электрического вентильно-машинного каскада.

Поэтому зависимость $s=f(t)$ для вентильного каскада может быть построена также по уравнению (15).

В случае изменения момента сопротивления по более сложному закону, а также при учете нелинейности кривой намагничивания машины постоянного тока, учете индуктивности ее якоря и т. п. задача аналитического расчета переходных режимов окажется невозможной. В этом случае целесообразно воспользоваться графоаналитическим методом или электронной вычислительной машиной. Ниже

Таблица 2

t, сек	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
s	0,295	0,29	0,278	0,253	0,213	0,184	0,157	0,136	0,101	0,065	0,03	0,015	0,0073
$I_d, а$	1,1	3,4	6,3	9,7	13,5	14,7	14,2	13,1	9,9	6,3	3,2	1,6	0,8

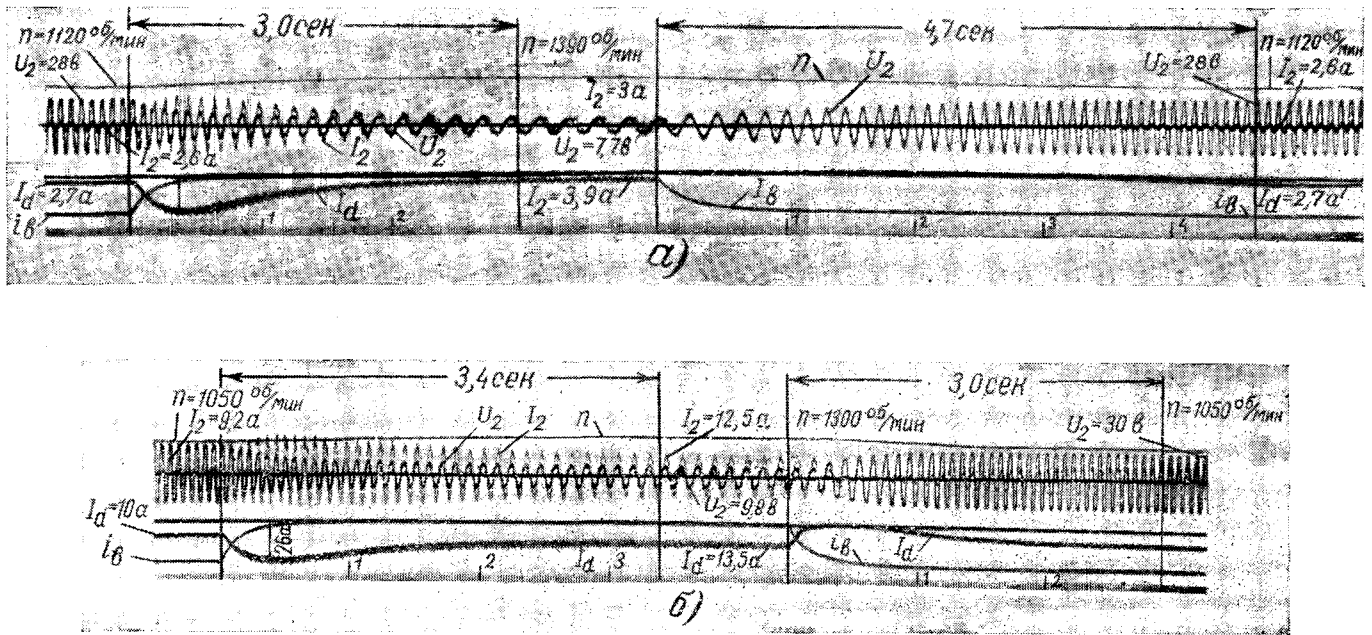


Рис. 6. Осциллограммы переходного процесса в электромеханическом вентильно-машинном каскаде.

а — холостой ход; б — постоянная нагрузка; n — скорость электрпривода; I_2 — ток ротора асинхронного двигателя; I_d — ток выпрямительной цепи; U_2 — напряжение на кольцах ротора асинхронного двигателя; i_B — ток возбуждения двигателя постоянного тока.

вкратце излагается графоаналитический метод расчета.

Допустим, что ток возбуждения двигателя постоянного тока изменился от одного установившегося значения $i_{B,нач}$ до другого установившегося значения $i_{B,кон}$, меньшего $i_{B,нач}$.

Изменение тока возбуждения во времени в соответствии с решением дифференциального уравнения (6) будет происходить так, как показано на рис. 7.

Аппроксимируем полученную кривую тока возбуждения, считая, что на каждом промежутке времени Δt ток возбуждения остается неизменным и равным среднему его значению за этот промежуток времени, т. е. непрерывную кривую тока заменяем ступенчатой линией. Следовательно, ток возбуждения двигателя постоянного тока на каждом промежутке времени равен полусумме токов в начале и конце данного участка ($i_{B1}, i_{B2} \dots$).

По характеристике $\Phi_{д.п.т} = f(i_B)$ определяем средние значения магнитного потока для каждого интервала.

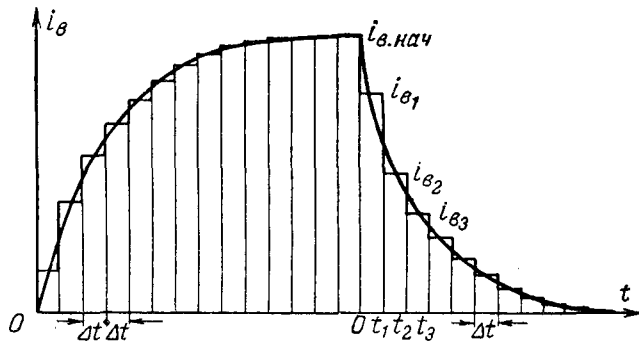


Рис. 7. Аппроксимация кривой $i_B(t)$.

Заменяем производную скорости по времени отношением конечных приращений, т. е.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t}.$$

Решение производим следующим образом. По формулам (22), (5), (21) и (2) находим э. д. с. двигателя постоянного тока $E_{д.п.т}$, ток выпрямленной цепи I_d и вращающие моменты асинхронного двигателя $M_{а.д}$ и двигателя постоянного тока $M_{д.п.т}$ в момент времени $t_1 = \Delta t$, имея в виду, что ток возбуждения двигателя постоянного тока на предыдущем участке $0 \div t_1$ равен i_{B1} . При этом в формулы (21) и (5) подставляется значение скорости при $t=0$. Полученные из формул (21) и (2) моменты складываются, и их сумма $M = M_{а.д} + M_{д.п.т}$ подставляется в уравнение движения (1).

Решив уравнение (1), определим приращение скорости Δn_1 за время t_1 . После этого следует внести необходимую коррекцию в равенства (5) и (22), подставив вместо значения скорости в начале интервала среднюю величину скорости $n_{1ср}$ на данном интервале $\Delta t = t_1$:

$$n_{1ср} = n_{нач} + \frac{\Delta n_1}{2}.$$

В результате такой коррекции значения выпрямленного тока I_d и приращения скорости Δn_1 будут определены более точно. Значение скорости в момент времени t_1 составит

$$n_1 = n_{нач} + \Delta n_1.$$

Затем переходим к второму интервалу $\Delta t = t_2 - t_1$. Для момента времени t_2 находим I_{d2} и Δn_2 , приняв в качестве тока возбуждения его сред-

О применении математических методов при нормировании потребления электроэнергии в промышленности

Кандидат техн. наук Б. А. КОНСТАНТИНОВ

Ленинград

При проведении мероприятий по рациональному использованию электроэнергии в промышленности важную роль играет нормирование потребления электроэнергии.

В соответствии с действующими положениями весь расход электроэнергии на промышленные нужды предприятий должен нормироваться, причем предприятия с установленной мощностью трансформаторов 100 *кв*а и выше имеют общезаводские нормы удельных расходов электроэнергии, а при установленной мощности 1 000 *кв*а и выше, кроме того, технологические и цеховые нормы.

В общезаводскую норму включается весь расход электроэнергии на промышленные нужды предприятия, в технологические — на проведение отдельных энергоемких процессов и операций, а в цеховые — на основные технологические процессы и вспомогательные и подсобные нужды цеха.

Технологическая норма охватывает расход электроэнергии, вызываемый как проведением самого технологического процесса, так и потерями электроэнергии, связанными с осуществлением этого процесса.

Под вспомогательными и подсобными нуждами цеха понимаются подъемно-транспортные установки, цеховая вентиляция, освещение, вспомогательные механизмы, потери во внутрицеховых электросетях и т. п.

Таким образом, нормирование должно охватывать все участки промышленного предприятия как производственные, так и вспомогательные.

Наиболее целесообразным с технико-экономической точки зрения измерителем нормирования, достаточно полно отражающим электроемкость промышленного производства, является единица натуральной годной продукции, например тонна годного литья, проката, поковок, бумаги, цемента и различных выпускаемых изделий. Измеритель в виде 100 руб. валовой продукции применяется только на предприятиях с разнородной номенклатурой продукции, но и на таких предприятиях для отдельных энергоемких процессов, как например, плавка стали, термическая обработка, выработка сжатого воздуха, тепла, газа, кислорода, передача

воды, в качестве измерителя принимается единица продукции.

Нормы удельных расходов электроэнергии должны иметь технико-экономическое обоснование. Наилучшим обоснованием для выбора норм являются результаты соответствующих технических испытаний.

При выборе норм учитываются результаты испытаний и установленная производственная программа для данного оборудования на планируемый период с учетом нормальных энергетических характеристик производственных процессов, выражающих в графическом или аналитическом виде зависимость нормы от производственных факторов.

Большое значение имеет также анализ фактических удельных расходов электроэнергии на основе статистической обработки материалов за возможно больший период времени. При этом необходимо принять во внимание намеченные организационно-технические мероприятия по снижению удельных расходов электроэнергии.

Перечисленные мероприятия необходимо проводить с тем, чтобы устранить имеющиеся недостатки в нормировании потребления электроэнергии в промышленности. На ряде предприятий велико ненормированное потребление электроэнергии, достигающее 12—13% общего потребления. На ряде предприятий устанавливаются завышенные нормы удельных расходов электроэнергии. Об этом говорит чрезмерно большая экономия электроэнергии по сравнению с расходом, подсчитанным на основании установленных норм. Например, в 1962 г. по ряду ленинградских предприятий экономия электроэнергии достигала: по машиностроительному заводу имени Карла Маркса — 17%, по заводу «Знамя труда» — 18,9%, по заводу станкопринадлежностей — 16,2%, по механическому заводу — 13%.

Для проведения анализа и оценки на дальнейший период действенности установленных норм следует при сопоставлении их с фактическими удельными расходами электроэнергии применять современные математические методы, основанные на использовании теории вероятностей и математической статистики.

нее значение на участке $t_1 \div t_2$, т. е. $i_{в2}$, и в качестве скорости — значение $n_1 + \frac{\Delta n_2}{2}$. Получаем $n_2 = n_1 + \Delta n_2$ и т. п.

Этот способ расчета, как и всякий графоаналитический метод, предполагает аккуратность вычислений, так как ошибка, допущенная в одной точке, может исказить последующие результаты.

Литература

1. Барский С. З., Асинхронно-машинный каскад с ионным преобразователем, «Электричество», 1951, № 6.
2. Бутаев Ф. И. и Эттингер Е. Л., Вентильный электропривод, Госэнергоиздат, 1951.
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. и Шапиро Л. Я., Двухдвигательный вентильно-машинный каскад с полупроводниковыми выпрямителями, «Электричество», 1961, № 8.

[7.9.1963]



Фактические удельные расходы электроэнергии при проведении различных технологических процессов зависят от ряда производственных и организационных факторов, и их можно с полным основанием считать случайными величинами. Практические исследования показывают, что для многих производственных процессов (плавка стали в электропечах и другие электротермические процессы, прокат металла, производство карбида кальция, различные химические процессы и др.), у которых удельные расходы электроэнергии относятся к единице выпускаемой продукции, значения этих расходов распределяются по нормальному закону; кривые распределения их с достаточной степенью точности могут быть отнесены к кривым нормального закона.

При проведении отдельных процессов, например, в металлообрабатывающих цехах получаемые кривые распределения удельных расходов электроэнергии отличаются от кривых нормального закона. Но и в ряде таких случаев могут быть использованы кривые нормального закона с введением поправок на асимметрию и эксцесс. В качестве примера распределения удельного расхода электроэнергии (случайной величины) по нормальному закону приведем данные об изменении удельных расходов электроэнергии по 5-тонной электротечи для плавки стали на одном из ленинградских заводов, полученные путем систематического наблюдения за работой электропечи в течение 1962 г. Ниже сопоставлены на основании построенной гистограммы удельные расходы электроэнергии ω и частоты их значений m . Для наглядности приведены значения аргумента ω , соответствующие неравным интервалам частоты m по полученной кривой (вместо обычного ряда распределения с равными интервалами аргумента).

ω , квт·ч/т	m	ω , квт·ч/т	m	ω , квт·ч/т	m
665	0,01	685	0,07	714	0,07
661	0,02	689	0,08	720	0,06
664	0,03	694	0,09	724	0,05
671	0,04	700	0,1	729	0,04
676	0,05	705	0,09	735	0,03
681	0,06	709	0,08	743	0,02
				749	0,01

Для исследования вопроса о реальности устанавливаемых норм удельных расходов электроэнергии для производственных процессов необходимо определить ряд величин. Пусть установленная норма удельного расхода электроэнергии по данному производственному процессу ω_n , а удельный расход электроэнергии за цикл с выпуском продукции g — $\omega(g)$. Считаем удельный расход $\omega(g)$ случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Тогда отклонение удельного расхода $\omega(g)$ от нормы удельного расхода ω_n , представленное в виде

$$v(g) = \omega(g) - \omega_n, \quad (1)$$

также можно считать случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения.

Среднее отклонение от нормы удельного расхода электроэнергии при выпуске продукции G может быть изображено как

$$\bar{v} = \frac{1}{G} \int_0^G v(g) dg. \quad (2)$$

Дисперсия кривой распределения для данного производственного процесса с выпуском продукции G

$$\sigma^2 = \frac{1}{G} \int_0^G [v(g) - \bar{v}]^2 dg, \quad (3)$$

где σ — стандартное отклонение удельного расхода электроэнергии вокруг среднего отклонения.

Квадрат среднеквадратичного отклонения удельного расхода электроэнергии от нормы

$$\bar{v}_{\text{ср.кв}}^2 = \frac{1}{G} \int_0^G [v(g)]^2 dg, \quad (4)$$

где $\bar{v}_{\text{ср.кв}}$ является среднеквадратичным отклонением удельного расхода от нормы.

Как известно

$$\bar{v}_{\text{ср.кв}}^2 = \sigma^2 + \bar{v}^2. \quad (5)$$

Обозначив в общем виде текущее отклонение удельного расхода электроэнергии через x , представим уравнение кривой распределения как

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{v})^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Заменив

$$\frac{x - \bar{v}}{\sigma} = t \quad (7)$$

и

$$y = \frac{z}{\sigma}, \quad (8)$$

получим уравнение кривой распределения:

$$z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (9)$$

Исходя из выражения (7), задаемся тем, что отклонение $x - \bar{v}$ не превзойдет некоторого предела $a\sigma$, т. е.

$$x - \bar{v} \leq a\sigma. \quad (10)$$

На основании теоремы Ляпунова находим вероятность того, что отклонение $x - \bar{v}$ не превзойдет значения $a\sigma$, для чего определяем по таблицам интеграла вероятностей

$$\Phi(a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (11)$$

Выражение (11) дает возможность определить в числовом выражении продукцию, выпускаемую

при удельных расходах электроэнергии, отклонения которых не превзойдут установленных пределов, а также ту часть продукции, которая будет произведена при больших удельных затратах электроэнергии.

Сравнение значений среднеквадратичного отклонения удельного расхода электроэнергии от нормы $v_{\text{ср.кв}}$ и стандартного отклонения удельного расхода электроэнергии σ в сочетании с предыдущим анализом помогает судить о реальности установленной нормы.

Если значения $v_{\text{ср.кв}}$ и σ находятся в допустимых пределах и близки, то установленная норма удельного расхода электроэнергии отвечает реальным условиям рассматриваемого технологического процесса.

Пример. Рассмотрим ту же 5-тонную электропечь для плавки стали, о которой сказано выше. Норма удельного расхода электроэнергии для этой печи была установлена на 1962 г. в размере 700 квт·ч/т.

В соответствии с отчетностью за год были определены:

а) средневзвешенное значение удельного расхода электроэнергии на выплавку стали за год

$$\bar{w} = \frac{1}{G} \int_0^G w dg = 699,8 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т},$$

где G — вес выплавленной стали за год;

w — удельные расходы электроэнергии за отдельные циклы плавки с выпуском продукции g ;

б) среднее отклонение от нормы удельного расхода электроэнергии

$$\bar{v} = \frac{1}{G} \int_0^G v dg = -0,2 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т},$$

где v — отклонения от нормы удельных расходов за отдельные циклы плавки;

в) дисперсия

$$\sigma^2 = \frac{1}{G} \int_0^G (v - \bar{v})^2 dg = 409;$$

г) стандартное отклонение удельного расхода

$$\sigma = \sqrt{409} = 20,2 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т};$$

д) квадрат среднеквадратичного отклонения удельного расхода электроэнергии от нормы

$$\bar{v}_{\text{ср.кв}}^2 = \bar{v}^2 + \sigma^2 = (-0,2)^2 + 409 \approx 409;$$

е) среднеквадратичное отклонение удельного расхода от нормы

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{409} = 20,2 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т}.$$

Мы видим, что значения σ и $v_{\text{ср.кв}}$ совпадают.

С помощью таблицы интегралов вероятностей была определена вероятность того, что значения $v - \bar{v}$ не превзойдут пределов

$$a\sigma = 1,5 \cdot 20,2 = 30,3 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т}$$

и

$$a\sigma = 2 \cdot 20,2 = 40,4 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т}.$$

Для $a=1,5$ было найдено значение $\Phi(a)=0,866$. Это означает, что отклонения удельных расходов электроэнергии от нормы более чем на 30,3 квт·ч/т, или более чем на 4,3% имеют место лишь в 13,4% случаев ($100-86,6=13,4$) или иначе говоря, 13,4% количества выплавленной стали производится при более высоких отклонениях.

При $a=2$ значение $\Phi(a)=0,955$, т. е. отклонения удельных расходов от нормы превышают в этом случае принятый предел 40,4 квт·ч/т, или 5,8% нормы, лишь для 4,5% выпущенной продукции.

Такие результаты можно считать вполне удовлетворительными, и следует признать установленную норму удельного расхода электроэнергии 700 квт·ч/т вполне реальной.

Иная картина имела место на другом заводе, где для аналогичной электропечи при таких же сортах выплаваемой стали и вполне идентичных условиях производства была установлена завышенная норма удельного расхода электроэнергии 800 квт·ч/т.

В этом случае были определены следующие показатели:

$$\bar{v} = -100,2 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т};$$

$$\sigma^2 = 409;$$

$$\sigma = \sqrt{409} = 20,2 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т};$$

$$\bar{v}_{\text{ср.кв}}^2 = 10\,449;$$

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{10\,449} = 102 \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т}.$$

Значительное расхождение между значениями σ и $v_{\text{ср.кв}}$ указывает на явную нереальность установленной нормы.

Вывод. Изложенный метод, основанный на применении теории вероятностей и математической статистики, дает возможность более правильно подходить к установлению норм удельных расходов электроэнергии и корректированию их в процессе эксплуатации.

[26.8.1963



О зависимости сопротивления заземления от размеров заземлителя

Инж. А. Б. ОСЛОН

Тула

В настоящее время широко распространен метод расчета сопротивлений заземления, разработанный в основном еще в 1930—1940 гг. целым рядом исследователей, опиравшихся на известные положения Оллендорфа. Как известно, Оллендорф заложил основы расчета заземлителей, приведя в своей книге «Токи в земле» [Л. 1] выражения для сопротивления заземления простых заземлителей (горизонтальный луч, вертикальный электрод, круглая пластина и т. д.). Однако в его работе не получили достаточного развития вопросы расчета сложных заземлителей, состоящих из сочетания полюсов и стержней.

Основой расчета таких заземлителей [Л. 2 и 3] является применение найденных экспериментально коэффициентов использования, которые вводятся в формулы параллельного соединения сопротивлений простых элементов сложного заземлителя и учитывают увеличение общего сопротивления вследствие взаимного экранирования этих элементов.

При рассмотрении таблиц и кривых, по которым определяются коэффициенты использования, видно, что увеличение количества заземляющих проводников на ограниченной площади сильно снижает величину соответствующего коэффициента. Однако в отечественной литературе не был достаточно ясно поставлен вопрос о принципиальной связи между площадью, занимаемой заземлителем, и его сопротивлением заземления, т. е. осталось невыясненным, можно ли путем увеличения количества заземляющих проводников, расположенных на ограниченной площади, добиться необходимого снижения сопротивления заземления или же уменьшение величины коэффициента использования кладет предел этой возможности.

В статье делается попытка выяснить этот вопрос.

Применяемая в настоящее время методика мало пригодна для этой цели, так как она не дает возможности вычислять необходимые коэффициенты использования, что ограничивает рассмотрение

только такими заземлителями, для которых эти коэффициенты известны. Поэтому воспользуемся аналитическим методом расчета заземлителей, опубликованными нами ранее [Л. 4 и 5].

Как было показано в [Л. 4], сопротивление заземления любого заземлителя, состоящего из горизонтальных проводников диаметра d , заложённых в землю с удельным сопротивлением ρ на глубину t , равно:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{d \cdot t} + A \right),$$

где L — общая длина проводников заземлителя, а A — величина, зависящая только от конфигурации заземлителя, но не от его размеров. На рис. 1 приводятся величины A для некоторых типов заземлителей.

На рис. 2 приведены кривые зависимости сопротивления заземления R от корня квадратного из площади S , занимаемой заземлителем. Из кривых видно, что эта зависимость весьма близка к обратной пропорциональности. Такой вид кривых объясняется тем, что в пределе при бесконечном увеличении густоты сетки заземляющих проводников мы приходим к сплошной пластине, для которой Оллендорф нашел выражение

$$R = \frac{\rho}{4r}.$$

Это выражение относится к круглой пластине радиуса r , положенной на поверхность земли, но, подставив $r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$, получим:

$$R = 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{S}},$$

что с достаточной точностью применимо и к прямоугольным пластинам (разумеется, лишь в том случае, когда $t \ll \sqrt{S}$, ибо при заглублении пластины ее сопротивление уменьшается и стремится к значению $\frac{\rho}{8r}$).

Расчет реальных заземлителей дает, однако, более высокие значения сопротивлений заземления. В большинстве случаев

$$R = (0,5 \div 0,7) \frac{\rho}{\sqrt{S}}.$$

Коэффициент 0,5 может применяться к заземлителям, имеющим густую сеть внутренних перемычек, а коэффициент 0,7 — к заземлителям, лишенным этих перемычек. Этот же коэффициент 0,7 дает хорошие результаты для лучевых заземлителей

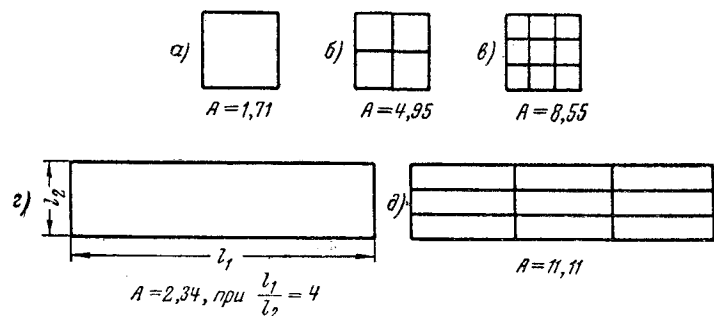


Рис. 1. Значения коэффициента A для некоторых типов заземлителей.

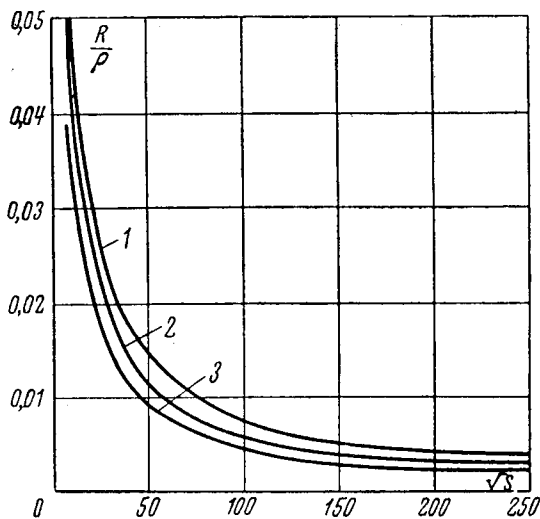


Рис. 2. Зависимость сопротивления заземления от площади, занимаемой заземлителем.

1 — для заземлителя рис. 1,а; 2 — для заземлителя рис. 1,б; 3 — для заземлителя рис. 1,д.

в виде трех восьмилучевых звезд. В этом случае под величиной S следует понимать площадь многоугольника с вершинами в концах лучей.

При неизменной форме заземлителя этот коэффициент растет с увеличением S , что определяет собой некоторое отступление от закона обратной пропорциональности между R и \sqrt{S} .

Приведенная формула вряд ли может служить для точного определения сопротивления заземления. Однако она позволяет сделать следующий важный вывод. Из нее видно, что в самом благоприятном случае можно достичь сопротивления заземления, равного $0,5 \text{ ом}$, если имеет место соотношение

$$\sqrt{S} = \rho$$

или для квадратного заземлителя

$$l = \rho.$$

Для часто встречающихся грунтов, имеющих $\rho = 100 \text{ ом}\cdot\text{м}$, это означает, что сторона квадратного заземлителя должна быть не менее 100 м , чтобы его сопротивление могло достичь $0,5 \text{ ом}$. Выполненные некоторыми проектными организациями расчеты заземлителей, в которых достигнуто сопротивление заземления $0,5 \text{ ом}$ на меньшей площадке (или 1 ом на площади $S < \frac{\rho^2}{4}$), являются ошибочными.

Большей частью ошибки проистекают из-за отсутствия в литературе соответствующих коэффициентов использования, что вынуждает принимать их интуитивно в зависимости от опыта лица, ведущего расчет. Часто при параллельном сложении сопротивлений заземления отдельных частей заземли-

теля вообще не вводят никаких снижающих коэффициентов, даже когда эти части расположены одна внутри другой.

Указанной выше зависимостью сопротивления заземления от площади заземлителя объясняются трудности, встретившиеся при устройстве заземлителей комплектных малогабаритных подстанций в сети с большим током замыкания на землю. В ряде случаев они приводят к необходимости применения глубоких заземлителей или контуров, значительно превышающих размеры территории подстанции.

Весьма удачную формулу для определения сопротивления заземления предложил Лоран [Л. 6]

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L},$$

где r — радиус круга, площадь которого равна S , а L — общая длина проводников заземлителя. Эта формула в настоящее время широко применяется в Америке [Л. 7].

Следует учитывать, что применение вертикальных электродов длиной $2,5\text{—}3 \text{ м}$ не может сколько-нибудь значительно снизить сопротивление заземлителя, размеры которого в $10\text{—}20$ и более раз превышают длину электрода. Так, например, сопротивление заземлителя размерами $100 \times 50 \text{ м}$ уменьшается всего лишь на 13% , если по его периметру располагается 100 электродов длиной 3 м каждый.

Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Сопротивление заземления заземлителя определенных геометрических размеров в грунте с данным удельным сопротивлением имеет свой нижний предел. Сколько-нибудь значительное снижение этого сопротивления требует увеличения размеров заземлителя или применения глубоких элементов (что также является увеличением размеров).

2. Поэтому нельзя предъявлять к сопротивлению заземления электроустановок требований, устанавливающих их максимальное значение, безотносительно к удельному сопротивлению грунта и конструктивным размерам заземлителя, определяемым в большинстве случаев размерами территории электроустановки. Соответствующее требование Правил устройства электроустановок должно быть изменено.

Литература

1. Оллендорф Ф., Токи в земле, ГНТИ, 1932.
2. Вайнер А. Л., Заземления, ДНТВУ, Харьков, 1938.
3. Беляков А. П., Основания для проектирования заземлений электрических установок, ГОНТИ, 1938.
4. Ослон А. Б., Расчет некоторых видов сложных заземлителей, «Электричество», 1958, № 4.
5. Ослон А. Б., Расчет прямоугольных заземляющих контуров, «Электричество», 1959, № 7.
6. Laurent P. G., Les bases générales de la technique des mises à la terre dans les installations électriques, Bulletin de la Société Française des Electriciens, Paris, 1951, Juillet.
7. Guide to safety in alternating-current substations groundings, AIEE, March 15, 1961.

[20.2.1963]



Диаграммы потерь и к. п. д. линий электропередачи переменного тока

Кандидат техн. наук, доц. И. П. СИУДА

Новочеркасск

Для анализа работы высоковольтных линий электропередачи в различных режимах целесообразно пользоваться круговыми диаграммами с геометрическими местами потерь и к. п. д. Линия электропередачи может быть представлена четырехполюсником с обобщенными постоянными $ABCD$. Величина потерь активной мощности в нагруженной линии [Л. 1]

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left[\overset{*}{D} C U_1^2 + \overset{*}{B} A \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} - (\overset{*}{B} C + \overset{*}{D} A - 1) P_1 - j(\overset{*}{B} C - \overset{*}{D} A) Q_1 \right]; \quad (1)$$

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left[\overset{*}{A} C U_2^2 + \overset{*}{B} D \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} + (\overset{*}{B} C + \overset{*}{A} D - 1) P_2 + j(\overset{*}{B} C - \overset{*}{A} D) Q_2 \right]. \quad (2)$$

Если считать переменными мощности P и Q , то уравнения (1) и (2) в прямоугольных осях P, Q представляют геометрические места точек, отвечающих режиму $\Delta P = \text{пост.}$

Для выяснения характера геометрических мест изменим форму записи уравнений (1) и (2), приведя ее к каноническому виду, соответствующему данной системе координат. Например, уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$(P_1 - P_{1mo})^2 + (Q_1 - Q_{1m})^2 = R_p^2, \quad (3)$$

где

$$R_p^2 = \frac{\Delta P U_1^2}{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)} - U_1^4 \frac{\operatorname{Re}(\overset{*}{D} C)}{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)} + P_{1mo}^2 + Q_{1m}^2; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{1mo} &= U_1^2 \frac{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} C + \overset{*}{D} A - 1)}{2 \operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)}; \\ Q_{1m} &= U_1^2 \frac{\operatorname{Im}(\overset{*}{B} C - \overset{*}{D} A)}{2 \operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выражение (3) — уравнение окружности. Величина потерь ΔP , а следовательно, и радиуса R_p окружности потерь зависит от нагрузки. Окружности $\Delta P = \text{пост.}$ строят на обычной круговой диаграмме напряжений — мощности линии (рис. 1). Диаграмма с окружностями $\Delta P = \text{пост.}$ позволяет определить все вариации величин мощностей P_1, Q_1 при заданной величине потерь с учетом ограничения уровня напряжения U_2 . Кроме того, диаграмма по-

зволяет найти величину потерь по заданным мощностям P_1, Q_1 . Из уравнения (4) с учетом выражений (5) легко получить простую формулу потерь:

$$\Delta P = P_{1mo} + \frac{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)}{U_1^2} R_p^2. \quad (6)$$

Величина потерь ΔP линии пропорциональна квадрату радиуса R_p [Л. 2]. Аналогично можно построить окружности $\Delta P = \text{пост.}$ на круговой диаграмме конца линии — в осях P_2, Q_2 .

Геометрические места к. п. д. линии так же, как и потерь, представляют собой окружности. Потери ΔP в уравнениях (1) и (2) можно выразить через к. п. д. η :

$$\Delta P = P_1 \cdot (1 - \eta); \quad \Delta P = P_2 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right). \quad (7)$$

Подставляя $\Delta P = P_1(1 - \eta)$ в уравнение (1) и приводя его к канонической форме, получаем:

$$(P_1 - P_{1\eta})^2 + (Q_1 - Q_{1\eta})^2 = R_\eta^2, \quad (8)$$

где

$$(R_\eta^2 = P_{1\eta}^2 + Q_{1\eta}^2 - U_1^4 \frac{\operatorname{Re}(\overset{*}{D} C)}{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)} = P_{1\eta}^2 - P_{1\eta}^2); \quad (9)$$

$$P_{1\eta} = U_1^2 \frac{\operatorname{Re}(\overset{*}{B} C + \overset{*}{D} A) - \eta}{2 \operatorname{Re}(\overset{*}{B} A)}. \quad (10)$$

При $\eta = \text{пост.}$ уравнение (8) — окружность. Величина $P_{1\eta}$ в уравнении (9) представляет собой ак-

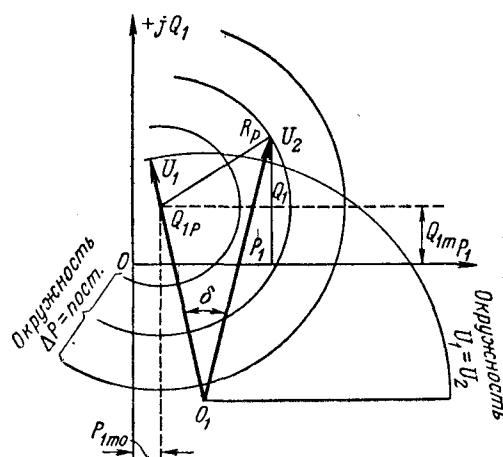


Рис. 1. Окружности $\Delta P = \text{пост.}$ на круговой диаграмме начала линии.

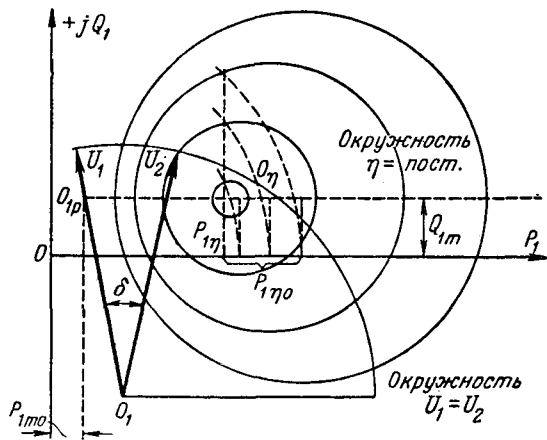


Рис. 2. Окружности $\eta = \text{пост.}$ на круговой диаграмме начала линии.

тивную мощность, которая соответствует максимальному значению к. п. д. передачи. В этом нетрудно убедиться, если исследовать выражение удельных потерь $\frac{\Delta P}{P}$ на минимум [Л. 3]. Заметим,

что одна из координат центра окружности $\eta = \text{пост.}$ является функцией не только постоянных $ABCD$, но и к. п. д. Центры окружностей к. п. д. размещаются вдоль горизонтального луча, выходящего из точки O_p . Уравнение (9) показывает, что $P_{1\eta}$ можно рассматривать, как гипотенузу прямоугольного треугольника со сторонами $P_{1\eta}$ и R_η . Отсюда вытекает следующий порядок построения отдельных окружностей $\eta = \text{пост.}$ (рис. 2). Откладываем

на горизонтальной оси P_1 мощность $P_{1\eta}$ и из конца вектора $P_{1\eta}$ восстанавливаем перпендикуляр, обозначающий направление R_η . Затем, произведя радиусом $P_{1\eta}$ из центра O засечку перпендикуляра, получим величину радиуса R_η . С увеличением к. п. д. мощность $P_{1\eta}$ уменьшается, приближаясь в пределе к $P_{1\eta}$. Радиус окружности $\eta = \text{пост.}$ также уменьшается, приближаясь в пределе к нулю. При $R_\eta = 0$ к. п. д. достигает своего максимального значения [Л. 4]. Из равенства $P_{1\eta} = P_{1\eta}$ найдем:

$$\eta_{\text{макс}} = \text{Re}(\check{B}\check{C} + \check{D}\check{A}) - \sqrt{4\text{Re}(\check{D}\check{C})\text{Re}(\check{B}\check{A}) - [I_m(\check{B}\check{C} - \check{D}\check{A})]^2} \quad (11)$$

Аналогично можно построить окружности $\eta = \text{пост.}$ на круговой диаграмме конца линии — в осях P_2, Q_2 . Окружности $\eta = \text{пост.}$ позволяют определить все вариации величин мощностей P_1, Q_1 (или P_2, Q_2) при заданной величине к. п. д. с учетом ограничения уровня напряжения концов передачи.

Литература

1. Веников В. А., Дальние электропередачи, Госэнергоиздат, 1960.
2. Вульф А. А., Некоторые характерные режимы работы длинной электропередачи, Сборник ГЭП, № 5, Л., 1938.
3. Сиуда И. П., Регулирование напряжения четырехполосника по условию минимума потерь мощности, «Изв. вузов», Электромеханика, 1960, № 12.
4. Ханов Б. А., О максимальном к. п. д. четырехполосника, «Электричество», 1955, № 10.

[2.1.1963]



К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

С 1 июля 1963 г. введен в действие ГОСТ 7624-62 «Обозначения условные графические для электрических схем». В связи с этим весь графический материал, направляемый в редакцию журнала «Электричество», должен соответствовать этому ГОСТ.

Статьи, содержащие рисунки, выполненные с отступлением от указанного ГОСТ, будут возвращаться авторам.

РЕДАКЦИЯ

К ВОПРОСУ О МЕЖГОСУДАРСТВЕННОМ ОБМЕНЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ В ЗАПАДНОЕВРОПЕЙСКИХ СТРАНАХ

(Об «Электрической восьмерке» западноевропейских стран)

23 мая 1951 г. восемь западноевропейских стран создали «Объединение по координации выработки и транспорта электроэнергии». В него вошли: Бельгия, Федеративная Республика Германия, Франция, Италия, Люксембург, Нидерланды (Голландия), Австрия и Швейцария, т. е. шесть стран «общего рынка» и два нейтральных государства — Австрия и Швейцария.

В задачу объединения входит организация международного сотрудничества и координация в области выработки и транспорта электроэнергии в этих странах. Его исполнительный орган находится в Париже и состоит из представителей энергетических предприятий или их объединений, а также представителей правительств указанных стран.

Председатель Исполнительного органа объединения «электрической восьмерки» и его заместитель избираются на 2 года. Руководит секретариатом представитель той страны, от которой избран председатель исполкома.

Оценивая роль этого объединения, специальная западноевропейская энергетическая пресса неоднократно указывала, что по своему характеру оно является «объединением руководителей лиц», а не предприятий. Эти заявления еще раз подчеркивают, что частнокапиталистическая система хозяйства не позволяет решить такие острые проблемы западноевропейской энергетики, как рациональное использование энергетических ресурсов и перспективное планирование развития энергетических систем, а ставит лишь ограниченные задачи по международному обмену электроэнергией. Последний осуществляется энергетическими объединениями и отдельными электростанциями, имеющими электрическую связь с энергетическими предприятиями соседних государств; они же разрабатывают и согласовывают режимы этого обмена. В некоторых из них вопросами международного обмена электроэнергией занимаются объединения электрических станций в национальном масштабе.

Если рассмотреть географическое размещение распределительных (диспетчерских) пунктов в странах «электрической восьмерки», по которым осуществляется межгосударственный обмен электроэнергией, то, по опубликованным данным, число их довольно велико и достигло 21 (рис. 1).

В конце 1958 г. страны, входящие в «Электрическую восьмерку», насчитывали 178 млн. жителей при установленной мощности всех электростанций около 69 млн. кВт и общей выработке электроэнергии 255 млрд. кВт·ч.

Обмен электроэнергией между странами, входящими в это объединение, в 1958 г. составил свыше 8 млрд. кВт·ч, или 86% общего внутреннего западноевропейского обмена электроэнергией, а в 1959 г. этот обмен превысил 9 млрд. кВт·ч.

В 1960 г. выработка электроэнергии в странах «электрической восьмерки» достигла 403,5 млрд. кВт·ч, а располагаемая мощность — 74,3 млн. кВт.

На рис. 2 показан рост обмена электроэнергией между восемью западноевропейскими странами за последние 10 лет — с 1950 по 1959 г.

Левая и правая ординаты графика, изображенного на рис. 2, приведены в различных масштабах. Левая показывает рост обмена электроэнергией между странами, а правая — рост потребности в электроэнергии восьми стран.

Из кривой *a* видно, что потребность в электроэнергии по восьми странам за указанное время выросла со 140 до 280 млрд. кВт·ч, т. е. в 2 раза, а обмен электроэнергией с 3 до более 9 млрд. кВт·ч, больше чем в 3 раза.

Хотя абсолютные масштабы обмена электроэнергией малы и составили лишь 3% от годовой потребности стран, входящих в это объединение, но представляет интерес общая тенденция увеличения международного обмена электроэнергией.

Чтобы правильно оценить перспективы развития международного обмена электроэнергией стран, входящих в «электрическую восьмерку», следует ознакомиться с табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в это объединение входят две группы стран: одна — с преобладанием использования гидроресурсов, а другая — топливных ресурсов. Например, в северной части Западной Европы — во Франции, Бельгии, Федеративной Республике Германии — размещены тепловые электростанции на местном топливе. В южной части — в Швейцарии,

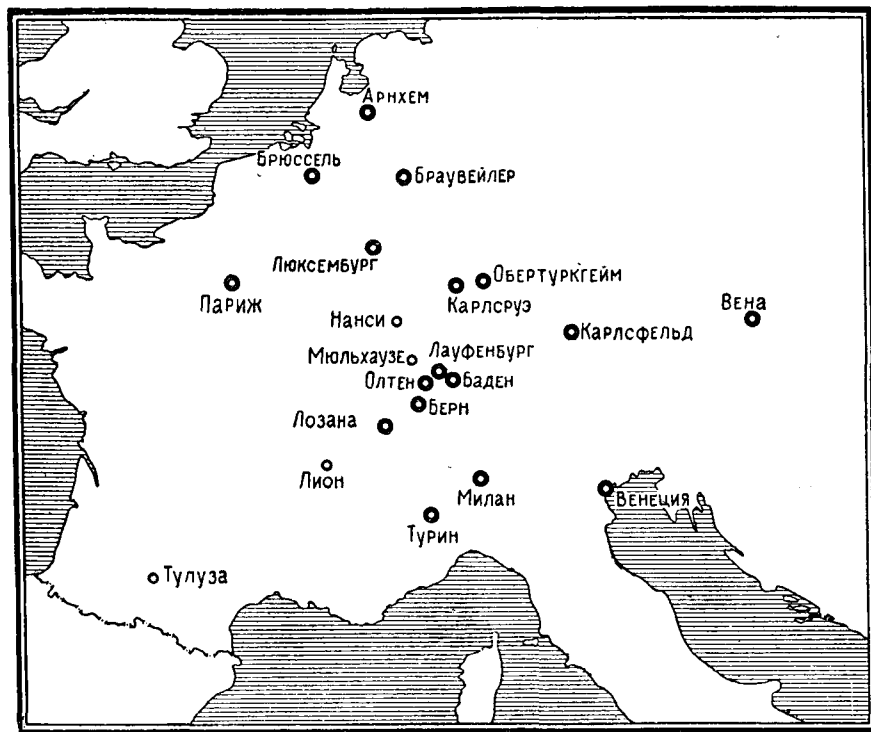


Рис. 1.

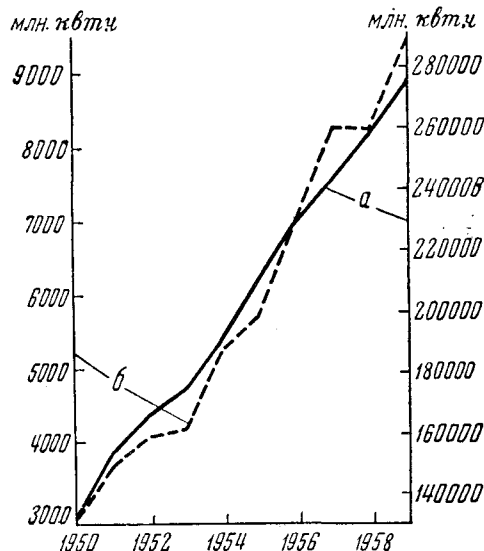


Рис. 2.

Таблица 1

Установленная мощность электростанций стран, входящих в Европейское объединение по координации выработки и транспорта электроэнергии, мвт

Наименование стран	На 31/ХІІ—1959 г.					На 31/ХІІ—1960 г.				
	Тепло- вые	В % к об- щей мощ- ности	Гидро- станции	В % к об- щей мощ- ности	Всего	Тепло- вые	В % к об- щей мощ- ности	Гидро- станции	В % к об- щей мощ- ности	Всего
Бельгия	3 598	98,8	47	1,2	3 645	3 772	98,8	47	1,2	3 819
Федеративная Республика Гер- мания	15 861	85,0	2 850	15,0	18 711	17 399	85,5	2 956	14,5	20 355
Франция	9 806	50,0	9 503	50,0	19 309	10 340	50,0	10 180	50,0	20 520
Италия	4 218	28,2	10 728	71,8	14 946	4 691	29,5	11 402	70,5	16 093
Люксембург	252	100	—	—	252	252	100	—	—	252
Нидерланды	3 260	100	—	—	3 260	3 585	100	—	—	3 585
Австрия	1 117	27,0	2 923	73,0	4 040	1 142	27,0	2 946	73,0	4 083
Швейцария*	—	—	5 149	100	5 149	—	—	5 601	—	5 601
Итого	38 112	54,5	31 200	45,5	69 312	41 181	55,5	33 132	44,5	74 313

* В Швейцарии имеется несколько заводских теплоэлектроцентралей и тепловых коммунальных электростанций по мусоросжиганию, но они не учтены в таблице, так как не имеют сколько-нибудь существенного значения в электроснабжении страны.

Италии и отчасти в Австрии — расположены гидростанции.

Установленная мощность тепловых электростанций по сравнению с общей установленной мощностью электростанций в указанных странах составила: в Голландии и Люксембурге — 100%, в Бельгии — 98,8%, в Федеративной Республике Германии — 85,5% и во Франции — 50%.

В другой группе стран установленная мощность на гидро-станциях по сравнению с общей мощностью электростанций составила в Швейцарии — 100%, в Австрии — 73% и в Италии — 70—71%.

Однако для развития межгосударственного обмена электроэнергией западноевропейских стран важно не только географическое размещение различных типов электростанций, но и режим их работы и в особенности работа гидро-станций по так называемому «ледниковому» режиму.

Это видно на примере Швейцарии. Известно, что одной из наиболее острых проблем экономики Швейцарии является ограниченность ее энергетической базы. Страна не обладает сколько-нибудь существенными топливными ресурсами, имеет лишь скудные запасы низкосортных углей и торфа, которые не разрабатываются из-за явной нерентабельности их добычи.

Единственными энергетическими ресурсами Швейцарии являются ее гидро-ресурсы. Потенциальные возможности выработки электроэнергии при полном использовании гидро-ресурсов Швейцарии оцениваются в 145 млрд. квт·ч в год, но в соответствии с принятой схемой использования гидро-ресурсов признано экономически целесообразным строительство гидро-станций, которые смогут обеспечить увеличение ежегодной выработки электроэнергии Швейцарии до 32—35 млрд. квт·ч.

В 1960—1961 гг. выработка электроэнергии на всех электростанциях Швейцарии достигла 22 302 млн. квт·ч, из них 99,5% на гидро-станциях и 0,5% на тепловых станциях,

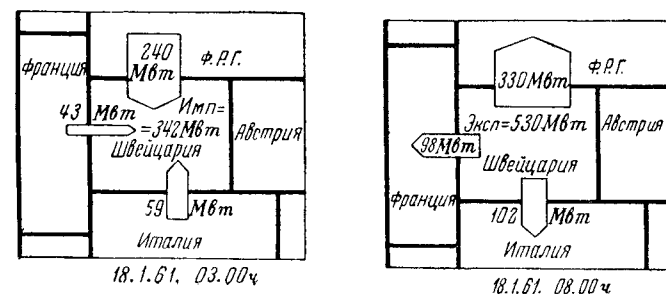


Рис. 3.

а в 1961—1962 гг. удельный вес электроэнергии тепловых станций составил 0,8% от общей выработки.

Таким образом, общая выработка электроэнергии на гидро-станциях Швейцарии достигла примерно 63% экономиче-ского оптимума использования гидро-ресурсов.

Если по опыту последних лет принять ежегодный прирост выработки электроэнергии на вновь вводимых гидро-станциях Швейцарии лишь 5%, т. е. 900—1 000 млн. квт·ч в год, то уже через 10—12 лет использование гидро-энергетических ре-сурсов по принятой схеме будет закончено.

Для Швейцарии с ее «ледниковым» режимом работы гидро-станций будет иметь все возрастающее значение разви-тие международных электрических связей для обеспечения надежности электроснабжения потребителей зимой и для экспорта избыточной электроэнергии летом.

Существенное значение для развития межгосударственных электрических связей имеют пограничные гидро-станции, по-строенные вблизи или непосредственно на границе западно-европейских стран, на реках Рейне, Роне и Дубсе, причем, как правило, они управляются представителями двух соседних государств. Мощность действующих и строящихся погранич-ных гидро-станций достигает 918 мвт с годовой выработкой около 6 млрд. квт·ч.

Опыт показал экономическую целесообразность сооруже-ния и эксплуатации пограничных гидро-станций.

На рис. 3 приведены изменения направления обмена элек-троэнергией между Швейцарией, ФРГ, Францией и Италией за 19 января 1961 г. Этот обмен имеет маневренное значение для электрических систем и локальное для электроснабжения пограничных районов указанных стран. В целом удельный вес его невелик и достигал лишь 1—2% годовой выработки электроэнергии ФРГ, Франции и Италии. Прогресс в области техники электропередачи за последние десятилетия содейство-вал развитию национальных и межгосударственных электри-ческих сетей в Западной Европе. Этому содействует также гео-графическое размещение энергетических ресурсов и различных типов электростанций западноевропейских стран.

Если в 1920—1930 гг. высоковольтные линии сооружались на напряжение 110 и 150 кв, а передача электроэнергии про-водилась на относительно небольшие расстояния, то уже в конце этого периода появились линии передач более высо-кого напряжения.

На рис. 4 показано развитие высоковольтных линий пе-редач напряжением 220 кв в странах Западной Европы и электрические связи между ними по состоянию на 1959 г.

Однако за последнее время отмечается стремление к уси-лению электрических связей между западноевропейскими стра-нами, входящими в «электрическую восьмерку».

На рис. 5 показан проект развития линий передач 380 кв стран «электрической восьмерки».

Электрические связи западноевропейских стран пока слабы: введены в эксплуатацию лишь две линии 380 кв. Но после реализации схемы развития электрических сетей 380 кв пропускная способность линий и надежность обмена электроэнергией будут увеличены.

Из табл. 2 видно, что сумма максимумов, передаваемая за семилетие с 1953 по 1959 гг., увеличилась с 1605 до

3 685 мвт, т. е. в 2,2 раза, а пропускная способность линий передач за тот же срок соответственно с 2 850 до 5 982 мвт — в 2,1 раза. Однако уровень использования межгосударственных линий в среднем составляет 60—61% их пропускной способности, снижаясь в 1958 г. до 51,8%.

Наряду с ростом международного обмена электроэнергией внутри «электрической восьмерки» наблюдается, пока в небольшом масштабе, обмен электроэнергией со странами, не входящими в это объединение.

Опыт работы «электрической восьмерки» показал, что объединение большого числа электростанций позволило более эффективно использовать различные их типы с учетом изменения гидрологических и климатических условий в Западной Европе.

В этом отношении показательны два гидрологических года — 1959/60 — с малыми осадками и низкой среднегодовой температурой и 1960/61 — с наибольшими осадками и более высокой среднегодовой температурой.

Если воспользоваться относительными показателями и принять за единицу (100%) возможность выработки электроэнергии гидростанциями «электрической восьмерки», то кривые, изображенные на рис. 6, могут графически показать различия возможности выработки электроэнергии гидростанциями за 1959/60 и 1960/61 гидрологические годы.

Из сопоставления этих кривых видно, что в июне 1959 г. относительный показатель был ниже единицы и в дальнейшем, в сентябре — октябре, существенно уменьшился. Это привело к тому, что Швейцария была вынуждена импортировать значительное количество электроэнергии.

Напротив, в 1960 г. этот показатель уже в апреле был выше единицы, имел тенденцию к увеличению, достигнув максимума в октябре, и составил в среднем за 1960 г. 1,23, а в октябре — 1,73.

При нормальной среднемноголетней водности специальные водохранилища, которые обеспечивают водой группу европейских гидростанций в маловодный период, обычно заполняются с апреля по август, а в сентябре завершается наполнение водохранилищ. Заполнение альпийских водохранилищ в октябре 1960 г. достигло 93% их емкости против 77% за этот же период 1959 г.

Обилие осадков в 1960/61 гидрологическом году позволило в странах «электрической восьмерки» существенно увеличить роль гидростанций в годовой выработке электроэнергии. В октябре 1960 г. выработка электроэнергии на гидростанциях Франции увеличилась на 205% по сравнению со среднемесячной выработкой электроэнергии за ряд предшествующих лет.

Следует напомнить, что во Франции примерно половина установленной мощности приходится на долю гидростанций.

В Италии, где удельный вес гидростанций достигал 70,5% общей установленной мощно-

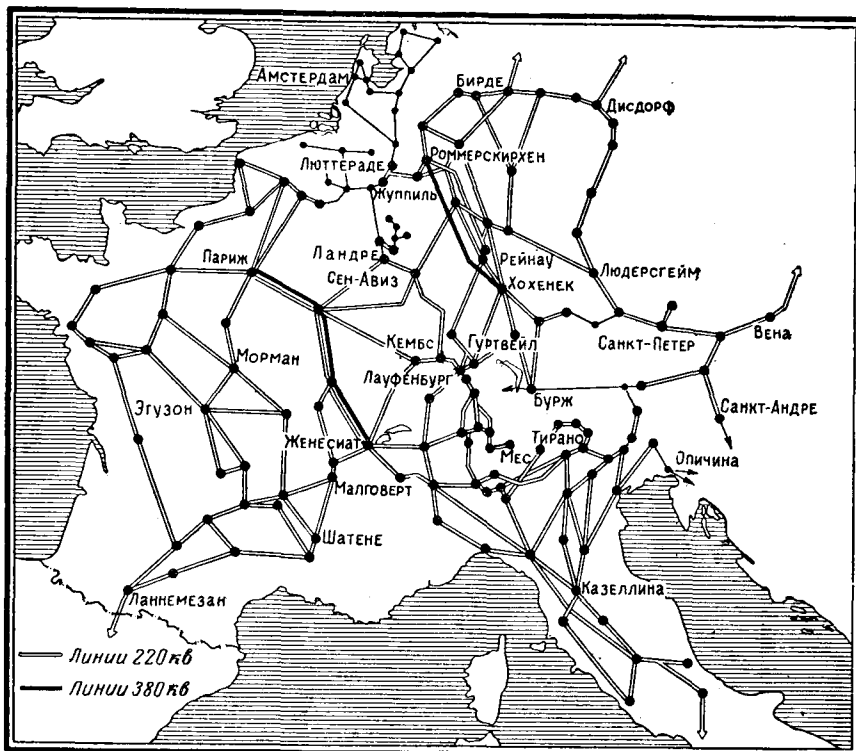


Рис. 4.

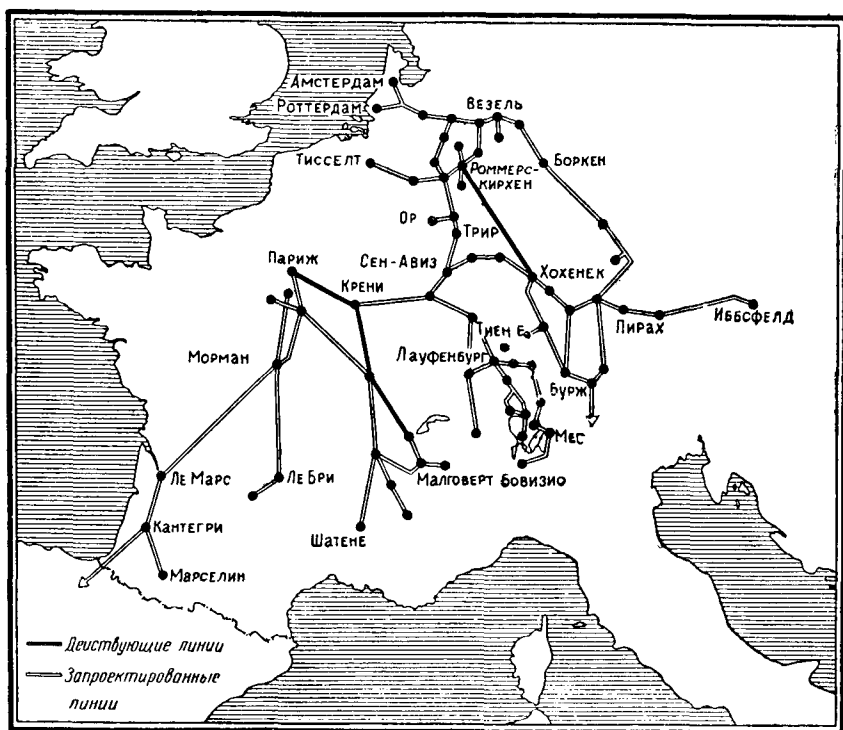


Рис. 5.

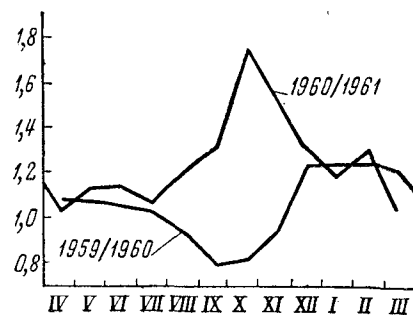


Рис. 6.

Таблица 2

Рост максимальной мощности передач и пропускной способности межгосударственных линий электропередач западноевропейских стран, входящих в «электрическую восьмерку»

Годы	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
Сумма максимумов, передаваемых по межгосударственным линиям, <i>мгвт</i>	1 605	1 935	1 965	2 330	2 630	2 980	3 685
Пропускная способность межгосударственных передач, <i>мгвт</i>	2 850	3 140	3 245	3 877	4 347	5 757	5 982
Использование пропускной способности линии, %	56,3	61,6	60,5	60,1	60,5	51,8	61,8

Примечание. При определении суммы максимумов были учтены минимальные данные за 4 дня из двух недельных отчетов Объединения по координации выработки и транспорта электроэнергии.

сти электростанций, осадки в октябре 1960 г. были наибольшими за последние 30 лет, что позволило увеличить выработку электроэнергии на гидростанциях на 82% по сравнению с октябрём предшествующего года.

Общая выработка электрической энергии на гидростанциях стран «электрической восьмерки» в октябре 1960 г. достигла 12 млрд. *квт·ч* и превысила выработку за тот же месяц предшествующего года на 68%, удовлетворив более 50% потребности в электроэнергии этих стран, что обычно бывает в летний многоводный период.

Такая необычно большая выработка электроэнергии на гидростанциях привела к увеличению запасов топлива на тепловых электростанциях Австрии, Италии, Франции.

Выводы. 1. Объединение восьми западноевропейских стран по координации выработки и транспорта электроэнергии — «электрическая восьмерка» — за 10-летний период своей работы накопило известный опыт межгосударственного обмена электроэнергией.

2. Основное направление состоит в обмене электроэнергией между тепловыми электростанциями на местном топ-

ливе, расположенными на севере западноевропейских стран, и гидростанциями, находящимися в южной части западноевропейских стран, вблизи Альп. Большое значение для международного обмена электроэнергией имеет различие режимов работы электростанций, в частности так называемый «ледниковый режим» работы ряда европейских гидроэлектростанций.

3. Межгосударственный обмен электроэнергией стран «электрической восьмерки» до последнего времени осуществлялся по линиям напряжением 220 *кв*. Лишь две линии электропередачи имеют напряжение 380 *кв*. Однако имеющийся проект развития электрических сетей напряжением 380 *кв*, учитывая относительно небольшие расстояния передачи электроэнергии в Западной Европе, приведет к увеличению возможностей для межгосударственного обмена электроэнергией.

4. За последние годы была увеличена пропускная способность линий электропередач стран «электрической восьмерки», обеспечивающих межгосударственный обмен электроэнергией.

5. В развитии межгосударственного обмена электроэнергией восьми стран Западной Европы существенное значение имеет строительство и совместная эксплуатация пограничных гидроэлектростанций.

6. Хотя абсолютные масштабы международного обмена электроэнергией стран «электрической восьмерки» относительно невелики и достигли лишь 3% их общего электропотребления, но для Швейцарии, Австрии, Бельгии и Голландии этот обмен имеет значение не только как маневренная электрическая связь, но также обеспечивает надежность электроснабжения. Из указанных стран наибольшее значение международного обмена электрической энергии имеет для Швейцарии.

7. Изложенное подтверждает технико-экономическую целесообразность межгосударственного обмена электроэнергией.

Однако частнокапиталистическая система хозяйства не позволяет «электрической восьмерке» поставить и решить такие острые проблемы развития западноевропейской энергетики, как рациональное использование энергетических ресурсов Западной Европы, перспективное планирование развития энергетических систем, более полное использование технико-экономических преимуществ параллельной работы электростанций западноевропейских стран и другие. Поэтому объединение восьми западноевропейских стран решает лишь частные, ограниченные задачи по межгосударственному обмену электроэнергией.

Кандидат техн. наук доц.
Н. С. Афонин



ПРАВИЛА ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Инж. Б. Л. КАНЕР

Москва

По заданию Государственного комитета химической и нефтяной промышленности при Госплане СССР разработаны новые «Правила защиты от статического электричества в химической промышленности», Госхимиздат, М., 1963. Они вводятся в действие взамен «Правил защиты от статического электричества и вторичных проявлений молнии в химической промышленности», изданных Госхимиздатом в 1958 г.

Новые Правила, как и Правила, изданные в 1958 г., составлены под редакцией д. т. н. Н. Г. Дроздова и И. С. Ройзена, рассмотрены специальной комиссией Государственного комитета химической и нефтяной промышленности. При составлении новых Правил учтены пожелания многих научно-исследовательских институтов, кафедр техники безопасности и пожарной профилактики, межотраслевой лаборатории по нейтрализации статического электричества НИИ пластмасс, многих проектных институтов Государственного комитета и химических заводов. В ряде документов, в частности в заключении Всесоюзного центрального научно-исследовательского института охраны труда ВЦСПС, предлагается на основе Правил защиты от статического электричества в химической промышленности разработать общие правила для всех отраслей промышленности.

Надо сказать, что такие общие правила в настоящее время есть только в ЧССР и ФРГ. В других странах имеются лишь указания в этой области в инструкциях по технике безопасности для отдельных производств. Так, в ГДР указания по борьбе со статическим электричеством встречаются в инструкциях по технике безопасности при производстве порошкообразного алюминия, клеенки и искусственной кожи, графита, обезжиривании кожи бензином и т. д. В Советском Союзе разработаны специальные Правила защиты от статического электричества для таких важнейших отраслей промышленности, как химическая, нефте- и газоперерабатывающая.

На основе этих Правил необходимо в ближайшие 2—3 года разработать общие Правила защиты от статического электричества в промышленности. К этой работе следует привлечь работников таких заинтересованных отраслей промышленности, как текстильная, синтетических жиров и др.

«Правила защиты от статического электричества в химической промышленности» разработаны на основе исследований природы статического электричества, проявлений его в различного рода производственных процессах и защиты от него, проведенных у нас в Советском Союзе и за рубежом и нашедших отражение в известных работах Н. Г. Дроздова, Х. Нитка, И. Староба, Х. Тецнера, А. Клингенберга, Ф. Десте и ряда других исследователей.

Правила содержат следующие разделы:

1. Назначение, область применения и порядок осуществления Правил.

2. Мероприятия по защите от статического электричества: а) общие требования и оценка защиты путем заземления оборудования; б) другие способы защиты; в) требования к защите путем заземления оборудования; г) защита от электрических зарядов жидких, газообразных и твердых веществ; д) вращающиеся части оборудования и ременные передачи; е) защита от электрических зарядов, возникающих на передвижных аппаратах и людях. Покрытие полов.

3. Заземляющие устройства.

4. Эксплуатация устройств по защите от статического электричества.

В приложениях к Правилам даны примеры устройств защиты путем заземления и в порядке информации приводятся примеры возникновения электрических напряжений в различного рода процессах, удельные сопротивления некоторых веществ и минимальная энергия, необходимая для воспламенения некоторых, газо-, паро- и пылевоздушных смесей.

Правила распространяются на проектируемые, реконструируемые и действующие производства, в том числе на опытные, в которых применяются или получают вещества; способные при перемещении и переработке их подвергаться электризации с образованием опасных потенциалов. Для производств, где применяются или получают вещества, удельное электрическое сопротивление которых не превышает $10^6 \text{ ом} \cdot \text{см}$ и которые практически не электризуются или электризуются незначительно, специальные мероприятия по защите от статического электричества не требуются.

Меры по защите от статического электричества должны приниматься во взрыво- и пожароопасных производствах, которые по классификации «Противопожарных норм строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест» (Н102-54) относятся к категориям А и Б. В производствах, которые не относятся к указанным категориям, защита должна осуществляться, когда статическое электричество представляет опасность для обслуживающих производство людей или оказывает отрицательное влияние на технологический процесс и качество продукции. В этих случаях меры по защите должны выполняться непосредственно у аппарата, машины, одним словом, у тех рабочих мест, где возникает опасность.

Характеристика производственного процесса с точки зрения опасности накопления зарядов статического электричества (наличие веществ диэлектриков, условия транспорта и переработки их), а также меры по защите от него, разработанные с учетом особенностей каждого производства, обязательно должны быть указаны в объяснительной записке к технологической части проекта. Там же приводится перечень аппаратов, емкостей, машин и транспортных устройств, подлежащих заземлению с целью отвода зарядов статического электричества.

Что касается электрической части проекта, то в объяснительной записке, в разделе «Молниезащита и защита от статического электричества» указываются меры по защите от статического электричества в сочетании с мерами по защите от вторичных проявлений молнии. В этом же разделе должны быть указаны материалы и способы присоединения технологического оборудования к цеховым контурам заземления электросилового оборудования или к отдельным заземляющим устройствам. Все это необходимо отразить в спецификациях и сметах проекта.

При составлении проектов расширения или реконструкции производств проверяются наличие и достаточность действующих устройств по защите от статического электричества и при необходимости следует предусматривать соответствующие меры защиты для всего производства или только для расширяемой или реконструируемой части его.

Выполнение устройств по защите от статического электричества может осуществляться без рабочих чертежей, но в строгом соответствии с проектом и требованиями этих Правил, а также других, утвержденных в установленном порядке документов (технических условий, инструкций, альбомов).

Устройства защиты от статического электричества сдаются в эксплуатацию по окончании монтажа всего технологического и энергетического оборудования. Передача в эксплуатацию устройства защиты от статического электричества производится приемочной комиссией в составе представителей монтажной организации, отделов главного энергетика и техники безопасности завода, начальника цеха и цехового электрика и должна быть оформлена актом. Приемочной комиссией должны быть предъявлены: а) проект устройства защиты от статического электричества; б) акты на скрытые работы; в) исполнительные схемы защиты; г) протоколы замеров сопротивлений заземляющих устройств; д) инструкция по эксплуатации защитных устройств.

Правила не допускают применения во взрывоопасных производственных помещениях оборудования и устройств, работа которых сопровождается выработкой зарядов статического электричества и искровыми разрядами (ременные передачи из непроводящих материалов, вальцы для обработки веществ — диэлектриков и т. п.).

Меры по защите от статического электричества назначаются с учетом особенностей производства; они должны обеспечивать надежное предупреждение возможности накопления зарядов этого электричества на оборудовании и на человеке. К числу этих мер относятся: а) отвод зарядов статического электричества посредством заземления оборудования, коммуникаций и емкостей, в которых оно возникает и может накапливаться; б) применение материалов, увеличивающих электропроводность плохо проводящей среды (графит, сажа, олеиновокислый магний и др.); в) общее и местное увлажнение воздуха в опасных местах помещений до 70% относительной влажности и выше или увлажнение поверхности электризуемого материала; г) ионизацию воздуха или среды, в частности, внутри аппарата, емкости, закрытого транспортного сооружения путем использования радиоактивных веществ, индукционных высоковольтных, высокочастотных и термоионизаторов.

В качестве мер, снижающих электризацию веществ-диэлектриков, следует предусматривать: а) осушку и очистку газов от взвешенных жидких и твердых частиц; б) очистку жидкостей от загрязнения коллоидными частицами.

В качестве меры, обеспечивающей безопасность искровых разрядов статического электричества внутри оборудования (если по каким-либо причинам нельзя предупредить возможность образования их), следует предусматривать заполнение аппаратов, емкостей, закрытых транспортных устройств и другого оборудования инертным газом — преимущественно азотом.

В Правилах указывается, что во взрывоопасных производствах, где применяются опасные по накоплению зарядов статического электричества вещества, все технологическое и транспортное оборудование (аппараты, емкости, машины, коммуникации и пр.) следует по возможности изготовлять полностью из токопроводящих материалов и что во всех случаях, когда заземление является достаточным средством защиты от статического электричества, к нему необходимо прибегать как наиболее простому и надежному способу защиты. При этом электростатически заземленным следует считать оборудование, сопротивление утечки которого в любой точке при самых неблагоприятных условиях (повышенная сухость воздуха и пр.) не превышает 10^6 ом.

Во взрывоопасных цехах категорий А и Б устройства для ионизации воздуха путем использования индукционных, высоковольтных, высокочастотных и других ионизаторов должны отвечать требованиям взрывобезопасного исполнения. Применение радиоактивных веществ для местной или объемной ионизации воздуха допускается во всех, в том числе во взрыво- и пожароопасных цехах, при соблюдении требований действующих «Санитарных правил работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений».

В случаях, когда нельзя избежать применения наряду с токопроводящими нетокопроводящими материалов, а также когда на внутренних стенках металлических аппаратов образуются отложения из непроводящих веществ (смолы, пленки пластикутов, осадки), или применяются аппараты с эмальрованными и тому подобными непроводящими поверхностями, необходимо заземлять все токопроводящие части и применять в зависимости от условий технологического процесса другие, указанные выше средства защиты.

Для ионизации воздуха путем использования радиоактивных веществ могут применяться α -источники (плутоний-239 и др.) и β -источники (проекти-147, тритий и др.).

В тех случаях, когда проводимость поверхности достигается повышением влажности воздуха, необходимо обеспечить: а) постоянство относительной влажности воздуха, принятой для данного случая, путем кондиционирования, применения разбрызгивающих устройств или развешенных влажных суконных полотен; б) контроль влажности воздуха психрометрами и подобными приборами.

Следует иметь в виду, что адсорбированный слой влаги, обеспечивающий в ряде случаев достаточную электропроводность веществ и материалов, не образуется на гидрофобных поверхностях и не успевает образоваться на движущихся ма-

териалах и при высоких температурах материала. В этих случаях увлажнение воздуха не эффективно.

Когда для уменьшения поверхностного сопротивления непроводящих или плохо проводящих изделий на их поверхность наносится проводящие пленки (например, путем разбрызгивания, распыления или испарения металла или путем покраски оборудования и изделий специальными красками и лаками, содержащими углерод), проводимость изделий и оборудования следует считать достаточной, если удельное сопротивление их менее 10^7 ом·см.

В Правилах указывается, что системы оборудования и трубопроводов, расположенные в цехе и в установках, на эстакадах и в каналах вне помещений, должны представлять собой на всем протяжении непрерывную электрическую цепь, причем фланцевые соединения трубопроводов и аппаратов, соединения корпусов аппаратов с крышкой и соединения на разбортовке образуют достаточные по электрической проводимости соединения, не требующие установки специальных шунтирующих перемычек. В отдельных случаях (при повышенной агрессивности среды) для обеспечения непрерывности электрической цепи рекомендуются тщательная зачистка не менее двух болтов и прокладка луженых шайб под головками и гайками болтов с зачисткой мест соприкосновения.

Каждая система аппаратов и трубопроводов, отвечающая указанному выше требованию, должна быть в пределах цеха заземлена не менее чем в двух местах.

Из системы аппаратов, находящихся в цепи, следует выделять и заземлять (независимо от заземления всей цепи) смесители, вальцы, каландры, газовые и воздушные компрессоры, насосы, фильтры, аэро- и пневмосушилки, сублиматоры, абсорберы, реакторы (особенно если процесс осуществляется в кипящем слое), мельницы, сита, закрытые транспортеры, сливо-наливные устройства и тому подобные аппараты, машины и устройства, в которых по характеру осуществляемого в них процесса интенсивно и быстро возникают опасные потенциалы статического электричества. Единично установленные емкости, аппараты и агрегаты (газгольеры, резервуары, компрессоры, насосы, фильтры, сливо-наливные устройства и др.) должны иметь самостоятельные заземлители или присоединяться к общей заземляющей магистрали близ находящегося сооружения при помощи отдельного ответвления. Последовательное включение в заземляющую шину (провод) нескольких заземляемых аппаратов, агрегатов или трубопроводов не допускается.

Все трубопроводы, проложенные в цехах и в каналах и расположенные параллельно на расстоянии до 10 см, для выравнивания потенциалов и предотвращения искрения следует соединять между собой перемычками через 20—25 м. В местах пересечения и сближения между собой и металлическими лестницами и конструкциями, при расстоянии менее 10 см, они также должны соединяться перемычками.

Устройство перемычек необходимо осуществлять после окончания монтажа оборудования и коммуникаций. Трубопроводы, расположенные вне цеха, на эстакадах, при расстоянии между ними менее 10 см специальными перемычками не соединяются, так как они в целях молниезащиты присоединяются к стойкам мачт через 20—30 м. В цехах и каналах вместо перемычек между параллельно идущими трубопроводами допускается присоединение их через 20—25 м к металлическим конструкциям, близ которых они проходят. Сближающиеся и пересекающиеся трубопроводы могут быть также вместо перемычек между ними присоединены к металлическим конструкциям около мест пересечения и сближения. Перемычки между трубопроводами и присоединение трубопроводов к неподвижным конструкциям должны осуществляться стальными проводниками сечением не менее 6 мм² с обеспечением компенсации на температурные изменения трубопроводов.

Резервуары емкостью более 50 м³ должны быть заземлены не менее чем в двух диаметрально противоположных местах. Для вертикальных резервуаров с диаметром до 2,5 м допускается устройство одного заземления.

В Правилах подчеркивается, что нельзя допускать, чтобы на поверхности пожароопасных жидкостей в резервуарах плавали какие-либо предметы. Измерители уровня для таких жидкостей рекомендуется выбирать по возможности не поплавкового типа. Если все же необходимо применение поплавковых измерителей уровня, поплавки необходимо укрепить на металлических струнах таким образом, чтобы исключалась возможность отрыва их во время передвижения по струнам и приближение к стенкам резервуара, в резуль-

гате чего может возникнуть искровой разряд статического электричества, накопившегося на поплавке. При выполнении поплавковых измерителей уровня и тому подобных устройств недопустимы острые углы, кромки и заусеницы на их поверхности, так как они способствуют искровому разряду.

Наливные стояки эстакад для налива железнодорожных цистерн тоже должны быть заземлены. Рельсы железнодорожных путей в пределах сливо-наливного фронта требуется электрически соединять между собой и надежно присоединять к заземляющему устройству.

Автоцистерны, а также наливные суда, находящиеся под наливом и сливом сжиженных горючих газов и пожароопасных жидкостей, на время заполнения необходимо присоединять к заземлителю. Металлические проводники следует присоединять к корпусам автоцистерн и наливных судов при помощи болтов, обеспечив надежный контакт.

На причалах (пристанях) требуется устраивать приспособления для присоединения на время слива и налива наконечников шлангов наливных судов к береговому заземляющему устройству. На наливных судах также должны предусматриваться приспособления для присоединения металлических проводников, соединенных с наконечником другого конца шланга. Если нарушается заземление, следует прекратить налив или слив до того, пока оно не будет восстановлено.

Резиновые шланги с металлическими наконечниками, предназначенные для налива в вагоны-цистерны, автоцистерны, наливные суда, бочки, бутылки и т. п., рекомендуются заземлять медной проволокой, обвитой по шлангу с шагом в 10 см снаружи или внутри, с припайкой одного конца ее к металлическим частям продуктопровода, а другого — к наконечнику шланга. Наконечники шлангов изготавливаются из металла, не дающего при ударе искры (бронза и т. п.).

Величина заряда, возникающего при протекании электропроводящих жидкостей, зависит преимущественно от загрязненности их коллоидными примесями, от характера поверхности стенок, скорости протекания и диаметра труб. Она возрастает с увеличением загрязненности жидкостей, шероховатости поверхности стенок, скорости протекания и диаметра труб, если при этом не изменяется скорость движения жидкостей. Вместе с тем максимальные напряжения между поверхностью жидкости и землей становятся меньше, если скорости потока уменьшаются вследствие увеличения диаметров труб.

Для этилового эфира при диаметре трубопровода до 12 мм и для сероуглерода при диаметре трубопровода до 24 мм максимально допустимые скорости истечения принимаются 1—1,5 м/сек; при больших диаметрах скорости движения этих жидкостей, как правило, не должны превышать 1,0 м/сек. Что касается сложных эфиров, кетонов и спиртов, то для них максимальные скорости истечения принимаются 9—10 м/сек.

Чтобы уменьшить опасность накопления зарядов статического электричества, жидкости надо поддерживать в чистом виде. Особенно следует избегать загрязнения их коллоидными частицами непроводящих веществ (резина, асфальт и др.). Стенки трубопроводов и аппаратов, с которыми соприкасаются протекающие по ним жидкости, должны иметь гладкую и чистую поверхность.

Подачу в резервуары и цистерны жидкостей рекомендуется производить таким образом, чтобы исключалось бурное перемешивание, распыление или разбрызгивание их. Налив жидкостей в резервуары, цистерны и тару свободно падающей струей не допускается. Для этого сливная труба удлиняется почти до дна приемного сосуда с направлением струи вдоль стенки его. Жидкости должны поступать в резервуары, как правило, ниже уровня, имеющегося в них остатка жидкости. При первоначальном заполнении резервуаров, когда нет остатка жидкости, подача ее производится замедленно, со скоростью, не превышающей 0,5—0,7 м/сек.

Отбор проб жидкостей из резервуаров и других емкостей во время заполнения или опорожнения их запрещается. Это следует производить лишь после прекращения движения жидкости, когда в резервуаре или другой емкости установилось ее спокойное состояние.

При разливе жидкостей-диэлектриков в стеклянные и другие сосуды из изолирующих материалов необходимо применять воронки из электропроводящего материала и заземлять их. При этом воронка соединяется медным или другим проводящим канатиком с подводящим шлангом. Воронка должна достигать дна сосуда. В противном случае конец зазем-

ленного канатика требуется пропустить через воронку до дна сосуда и сливать жидкость в сосуд по этому канатику.

В газовом потоке электризуются твердые или жидкие частицы (ржавчина, твердая углекислота, распыленные капли конденсата и т. п.). Электрические заряды в газах или парах могут возникать при быстром испарении или конденсации, расширении или сжатии, кипении сжиженных газов, истечении сжатых, сжиженных и растворенных газов или паров из сопел, вентиляей, свищей и плохо уплотненных мест. Мерами защиты в этих случаях являются: а) предотвращение возможности образования взрывоопасных смесей горючих газов и паров с воздухом; б) предотвращение возможности загрязнения газа твердыми и жидкими частицами; в) герметизация оборудования; г) снижение скорости потока; д) увеличение площади сечения выпускных отверстий; е) заземление выпускных сопел и прочей аппаратуры.

Если невозможно применить эти меры защиты, то следует ионизировать газ в тех местах, где он истекает.

Отвод зарядов из газового потока путем введения в него заземленных металлических сеток не рекомендуется, так как при этом могут быть повышены турбулентность и электризация потока. Не допускается размещение в газовом потоке или вблизи него каких-либо изолированных проводников.

При применении во взрывоопасных средах углекислого газа из баллонов и других сосудов под давлением сосуд, шланг и выпускные сопла должны быть заземлены.

Твердые вещества, особенно пылевоздушные смеси, электризуются преимущественно в результате отрыва и столкновения частиц пыли между собой или со стенками аппаратов, трубопроводов или транспортных устройств. Заряды возникают при прохождении пылевоздушных смесей через фильтры из текстильных и других материалов, при выпуске из узких отверстий, при завихрении и вскручивании пыли, в пескоструйных и тому подобных процессах. При этом, чем тоньше пыль, тем меньше величина импульса, необходимого для ее воспламенения.

Очень сильно могут заряжаться пластмассовая пыль, а также окись железа, шеллак, карбидная пыль, кварцевый песок и др. Чтобы не было воспламенений и взрывов пылевоздушных смесей, необходимо следующее:

1. Избегать образования такого рода смесей в диапазоне их взрываемости. В случаях, когда не исключается возможность образования пылевоздушных взрывчатых смесей вести процесс с добавлением или в токе инертного газа, преимущественно азота (например, при пуске или остановке пневмотранспорта горючих пылей).

2. Избегать, где это возможно, образования тонкой пыли.
3. Повышать относительную влажность воздуха (в некоторых случаях с последующей подсушкой продукта).

4. Технологическое и транспортное оборудование, фильтры, бункеры, а также тару (бараны и пр.) делать из токопроводящих материалов. На непроводящие материалы, если нельзя избежать их применения, следует наносить проводящие покрытия, а фильтры прошивать медным тросиком и заземлять. Фильтры следует устанавливать вне помещений или в изолированной части их.

5. Заземлять токопроводящее оборудование, особенно выпускные сопла и тому подобные части его.

6. Не допускать падения или сброса пыли с большой высоты, ее вскручивания и завихрения, особенно над твердым основанием.

7. Систематически в сроки, устанавливаемые отраслевыми правилами или местными инструкциями, очищать от пыли все части оборудования, а также конструкции здания, в котором процесс осуществляется с выделением пыли.

8. Соблюдать особую осторожность при взятии проб и извлечении пылесодержащих веществ и пылей, особенно тонкого помола, не допуская образования клубов пыли и искрового разряда на пробоотборники. Для этой цели пробоотборники и аппараты из электропроводящих материалов должны быть тщательно соединены между собой и заземлены. При применении электропроводящих приборов (деревянных, пластмассовых и т. п.) наличие каких-либо металлических частей и обшивок этих приборов не допускается. В случаях, когда отбор проб представляет особую опасность, следует производить его через промежуточную камеру (шлюз), заполняемую инертной средой, преимущественно азотом.

Вращающиеся и другие части машин и аппаратов, изолированные от заземленных частей непроводящими смазками, обеспечиваются специальными заземляющими устройствами.

ми или устройствами по нейтрализации, накапливающихся на них во время движения, зарядов статического электричества. При наличии электропроводящих смазок дополнительные меры защиты вращающихся и двигающихся частей не требуются.

Во взрывоопасных цехах следует, как сказано выше, применять непосредственное соединение электродвигателя с исполнительным механизмом.

В тех случаях, когда необходимо применение ременных передач, эти передачи и все части установки надо выполнять из электропроводящих материалов, а всю установку (шкивы и все металлические предметы вблизи ремня) тщательно заземлять. Электропроводящими материалами для ременных передач считаются материалы, удельное электрическое сопротивление которых не превышает 10^5 ом·см.

При применении ременных передач следует пользоваться преимущественно клиновидными (текстурными) передачами. Применение плоскоремных передач из материалов с большим электрическим сопротивлением допускается лишь в особых случаях, когда все указанные выше требования по какой-либо причине неосуществимы. В случаях применения ременных передач, не отвечающих указанному выше требованию по электропроводности, необходимо, кроме заземления установки, осуществлять в зависимости от конкретных условий производства одно из следующих средств защиты:

- а) обеспечить достаточную поверхностную проводимость путем применения специальных гигроскопических или иных электропроводящих покрытий (смазки) ремней;
- б) обеспечить достаточную проводимость окружающей среды, увеличивая относительную влажность воздуха, а в особых случаях — путем применения ионизирующих приборов, расположенных на внутренней стороне ременной передачи вблизи от шкива.

В качестве электропроводящих покрытий рекомендуются смазки следующего состава: для кожаных ремней 100 см³ жидкого рыбьего клея, 80 м³ глицерина, 82 г сажи и 20 см³ 2-процентной гидроперекиси аммония; для кожаных и резиновых ремней на 100 весовых частей глицерина 40 частей сажи. Смесь должна наноситься на наружную поверхность ремня при помощи щетки во время остановки передачи. Периодичность нанесения покрытия (смазки) зависит от ряда местных особенностей работы передачи. Обычно достаточным является смазка ремней 1 раз в неделю. Применение воска, а также канифоли и тому подобных веществ, повышающих сопротивление их, не допускается. Ремни надо содержать в чистоте, защищать их от грязи, масла, воды и тому подобных веществ, которые могут изменить характеристику электропроводящего покрытия. Ограждения ременных передач следует устанавливать на расстоянии не менее 20 см от ремней и содержать в исправном состоянии.

Передвижные аппараты, сосуды и конструкции, в которых могут возникать заряды статического электричества, рекомендуются выполнять из электропроводящих материалов. Чтобы заряды стекали с этого оборудования, следует применять электропроводящие полы или, если это не обеспечивает желаемых результатов, заземлять их с помощью гибкого медного канатика.

Для отвода статического электричества, накапливающегося на людях, особенно когда они выполняют операции вручную (промывают, чистят, протирают, проклеивают, прорезинивают), применяя этиловый эфир, бензин, ацетон, непроводящий резиновый клей и тому подобные вещества, необходимо:

- а) предусматривать устройство проводящих полов или заземленных зон, помостов и рабочих площадок, заземление ручек дверей, поручней лестниц или рукояток приборов, машин и аппаратов;
- б) обеспечивать работающих в этих помещениях токопроводящую обувь (ботинки с кожаной подошвой, подошвой из токопроводящей резины или пробитой токопроводящими и не искрящими при ударах и трении заклепками);
- в) избегать ношения одежды из синтетических материалов (нейлон, перлон и т. п.) и шелка, способствующих электризации, а также колец и браслетов, на которых аккумулируются заряды статического электричества.

Покрытие пола следует считать электропроводящим, если сопротивление утечки между установленным на полу электродом и землей не превышает 10^6 ом·см.

К непроводящим покрытиям относятся: асфальт, резиновый настил из обычной резины, линолеум, обычные терра-

цевые плиты. К проводящим покрытиям относятся: бетон толщиной 3 см, специальные бетон и пенобетон, ксилолит, резиновый настил из резины с пониженным сопротивлением, специальные террацевые плиты и другие покрытия с удельным сопротивлением не выше 10^6 ом·см. Все вновь применяемые покрытия из синтетических и других материалов должны иметь характеристику по удельному электрическому сопротивлению их.

Следует избегать загрязнения специально выполненного пола маслами, смолами и тому подобными веществами, повышающими их удельное сопротивление. Удельное сопротивление увлажненных покрытий пола снижается.

Заземляющие устройства для защиты от статического электричества и вторичных проявлений молнии следует, как правило, объединять с заземляющими устройствами для электрооборудования. При этом сопротивление заземляющего устройства, предназначенного для защиты от статического электричества, учитывая малые величины разрядных токов (микроамперы), допускается до 100 ом.

В тех случаях, когда заземляющие устройства предназначены одновременно и для защиты от электростатической и электромагнитной индукции, возникающей в результате грозового разряда (вторичные проявления молнии), величина сопротивления заземлителя должна быть не более допускаемой для защиты от этих явлений (см. действующие «Указания по молниезащите промышленных и других зданий и сооружений»). Для дополнительного снижения сопротивления заземления допускается использование заземленных металлических конструкций, расположенных в земле водопроводов, металлических трубопроводов канализации и других трубопроводов с нормальными, невзрывоопасными средами.

Для защиты от статического электричества заземляющие устройства следует осуществлять в виде общего, внутрицехового контура. Заземлители необходимо располагать по возможности в местах с высоким уровнем грунтовых вод или с большой среднегодовой влажностью почвы.

Заземляющие устройства, в частности, заземляющие проводники, должны выбираться, как указано в гл. 1-7 первого раздела «Правил устройства электроустановок», при этом должна быть обеспечена их прочность. Заземляющие линии и контур заземления должны прокладываться открыто и таким образом, чтобы исключалась возможность случайных обрывов и других повреждений.

Все соединения кокоотвода заземляющих устройств следует выполнять путем сварки. Болтовое соединение частей заземляющих устройств допускается лишь в виде исключения в наземных частях устройства, в тех случаях, когда сварка не может быть выполнена или она крайне затруднена. Надземную часть заземляющих устройств защиты от статического электричества надо окрашивать масляной краской, как указано в действующих «Правилах устройства электроустановок» (см. 1-7-68).

В первые 2 года эксплуатации необходимо следить за состоянием грунта над заземляющим устройством. При осадке его необходимо досыпать и тщательно утрамбовывать.

Осмотр и текущий ремонт защитных устройств производятся одновременно с осмотром и текущим ремонтом всего технологического оборудования, электрооборудования и электропроводки, а проверка наличия заземления с помощью приборов типа тестера или меггера — в зависимости от условий производства, но не реже одного раза в 6 мес. и после каждого ремонта оборудования.

При текущем осмотре и ремонте защитных устройств необходимо:

- а) проверить надежность электрической связи между токоведущими элементами; б) выявить элементы в защитных устройствах, подлежащие замене или усилению вследствие механических повреждений; в) определить объем мероприятий по защите элементов этих устройств от коррозии.

Наряду с текущим осмотром и ремонтом защитных устройств периодически, не реже 1 раза в год, должны производиться измерения величины сопротивления растеканию заземлителя и предупредительный ремонт этих устройств. Если при контрольном замере обнаружено резкое возрастание сопротивления (в 2 раза против первоначального значения), необходимо произвести ревизию заземляющих устройств путем раскопки и осмотра состояния соединений под землей, проверки степени коррозии металла и принять меры для снижения сопротивления до нормы.

Отдельные быстро изнашивающиеся узлы защиты от ста-

О содержании и преподавании курса „Теоретические основы электротехники“¹

УДК 621.3.01

ОБ УЛУЧШЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ВЫСШИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ

Доктор техн. наук, проф. П. А. ИОНКИН

Московский энергетический институт

Основным электротехническим предметом в подготовке инженеров-электриков, как известно, является «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ). Поэтому обсуждение содержания и преподавания этой дисциплины на страницах журнала «Электричество» надо считать своевременным. Однако для правильного представления об электротехническом образовании целесообразно одновременно с обсуждением вопроса о содержании и методике преподавания курса ТОЭ остановиться на его связи с предметами, на которых он базируется (физика, математика), и с дисциплинами, которые основываются на курсе ТОЭ.

В Московском энергетическом институте изложение всех вопросов в курсе физики, необходимых для изучения курса теоретических основ электротехники, полностью согласовано с требованиями кафедры ТОЭ. К сожалению, большая, многолетняя и плодотворная работа, проведенная в этом направлении кафедрой физики, не получила своего завершения в форме учебника или хотя бы учебного пособия. Поэтому студенты не могут изучать курс физики по соответствующему учебнику. Особенно существен этот недостаток для студентов заочных вузов.

С целью приблизить содержание курса математики к другим дисциплинам и, в частности, к курсу ТОЭ в МЭИ создана кафедра специальных математических курсов. Эта кафедра читает специальные математические разделы по запросам факультетов и тем самым в известной мере профилирует курс высшей математики.

Однако для изложения дополнительных математических вопросов, крайне необходимых, в частности, для построения учебного процесса на специальностях новой техники, требуется дополнительное время. В связи с этим еще в 1961/62 учебном году в МЭИ были утверждены новые учебные планы для трех факультетов института (автоматики и вычислительной техники, электронной техники и радиотехнического), в которых вместо трех дисциплин механического цикла (теоретическая механика, сопротивление материалов и основы конструирования машин и механизмов) был введен один предмет — техническая механика с сокращенным (примерно в 2 раза) числом часов. К сожалению, и это мероприятие не дало возможности удовлетворить требования других кафедр в отношении увеличения числа часов.

Чтобы изучаемый в вузах базовый курс теоретических основ электротехники соответствовал современным требованиям, необходимо, кроме других мер, в максимально возможной степени применять машинную технику при изучении курса. Простейшие вычислительные машины должны стать обычными средствами, применяемыми при решении задач на практических занятиях и при выполнении типовых расчетов. Различные типы простейших моделирующих машин необходи-

мо изучать и применять в лабораторном практикуме на разных уровнях подготовки студентов. Например, исследования распределения токов и мощностей в цепи с изменяющимися сопротивлениями, а также аналогичные задачи по моделированию тепловых, гидравлических и других важных физических процессов вполне доступны на начальных этапах изучения теории электрических цепей. В программу курса ТОЭ необходимо включить решение на моделях дифференциальных уравнений переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях.

Большой недостаток подготовки инженеров-электриков состоит в том, что синтез электрических цепей совершенно не читается даже студентам электротехнических специальностей, о чем совершенно правильно отмечено в [Л. 1]. Такой материал по существу не содержится и в большинстве учебников по электротехнике. В курсе теоретических основ электротехники студенты не знакомятся с приближенными методами расчета цепей и полей. Однако неизбежно возникает вопрос: где взять время на изложение нового материала при уже существующей перегрузке учебных планов?

Нам представляется, что ответ на этот вопрос надо искать главным образом в пересмотре содержания самого курса ТОЭ и специальных дисциплин путем известного профилирования курса теоретических основ электротехники и дальнейшего его углубления при изучении специальных дисциплин. Содержание курса ТОЭ должно быть несколько различным, например, для специализирующихся по электрическим сетям и системам и по электронным приборам. Если в первом случае следует более подробно излагать вопросы анализа и синтеза линейных цепей, то во втором случае надо отдать предпочтение вопросам анализа и синтеза цепей с электронными приборами, нелинейным цепям и теории электромагнитного поля. Конечно, указанная специализация не должна нарушать логического построения курса теоретических основ электротехники.

Другими словами, общие закономерности и основные методы расчета, изучаемые в курсе ТОЭ, должны быть по возможности одинаковыми для всех электротехнических специальностей, а специальные вопросы и примеры, иллюстрирующие эти закономерности и методы, следует давать из специальных областей.

Такая специализация в известной мере уже давно проводится в Московском энергетическом институте. Например, на специальностях электроэнергетического факультета более подробно излагается расчет сложных цепей, трехфазные цепи и метод симметричных составляющих, переходные процессы в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами, определение параметров линий и явление поверхностного эффекта, а на факультете электронной техники уделяется больше внимания изложению переходных и установившихся процессов в цепях при воздействии импульсов и в нелинейных цепях, а также теории электромагнитного поля и, в частности, волноводам и резонаторам.

Здесь, по-видимому, уместно также предложить, чтобы не только изложение на лекциях, но и учебники по курсу теоретических основ электротехники были в разумной мере

¹ См. «Электричество», 1963, № 5, 8, 10.

тического электричества (защитное оборудование сливоналивных шлангов и т. п.) должны подвергаться капитальному ремонту и обновляться в сроки, устанавливаемые на местах, но не реже 1 раза в год. Результаты поверочных испытаний, а также ревизий и ремонтов заземляющих устройств должны заноситься в журнал «эксплуатации устройств по защите от статического электричества».

Руководители предприятий, цехов, пользуясь «Правилами защиты от статического электричества в химической промыш-

ленности», обязаны составить краткую инструкцию по эксплуатации систем защиты от статического электричества, учитывая особенности данного предприятия и цеха. Правила, а также заводские и цеховые инструкции по защите от статического электричества, обязаны знать все инженерно-технические работники и рабочие химических предприятий. Они должны быть изучены в порядке общего технического обучения и при обязательном обучении и инструктаже безопасным методам работы.

[4.3.1963]



профилированы для различных групп электротехнических специальностей.

В статье проф. Л. А. Бессонова (Л. 2) говорится о необходимости изучения курса ТОЭ в два этапа. При этом на первом этапе должна читаться общая часть курса, а на втором — его специальная часть, профилированная в зависимости от специальности. Это предложение является неприемлемым главным образом из-за отсутствия необходимого числа часов. Вместе с тем нельзя не возразить по существу такого предложения и по другим причинам.

Для того чтобы специальные главы курса ТОЭ приблизить к соответствующим спецдисциплинам, надо, чтобы преподаватели кафедр ТОЭ достаточно серьезно изучили эти дисциплины и все время следили за их развитием. Только при этих условиях может быть положительный результат. Однако такая задача может оказаться под силу только отдельным преподавателям, поскольку и существующий объем материала по курсу ТОЭ требует большой работы по постоянному совершенствованию учебного процесса.

Кроме того, и это, пожалуй, является главным, нельзя освобождать специальные дисциплины от изложения теоретических вопросов, связанных, в частности, с вопросами новейшей техники. Почему, например, «дополнительные сведения о свойствах новых полупроводниковых, магнитных и диэлектрических нелинейных элементов (триистор, туннельный диод, трансфлюксор, леддик, биакс, магнистор и др.)» должны или могут, как это предлагается в [Л. 2], читаться в специальном курсе ТОЭ, а не в курсе электромагнитной и полупроводниковой техники? Если основы теории графов необходимы, например, для электроэнергетических специальностей, то почему нельзя читать эти вопросы в курсе «Энергетические системы»?

Нам кажется, что настало время для создания основных специальных теоретических курсов, базирующихся как на общих, так и на специальных вопросах математики и физики и являющихся своеобразным продолжением и дальнейшим развитием курса ТОЭ в области той или иной специальности.

Здесь в качестве примера можно привести краткое содержание проекта программы и построение курса «Основы инженерной электрофизики», являющегося базовой дисциплиной для новой специальности того же названия, создаваемой в МЭИ. Основные задачи этого курса: изучение электрофизических процессов, методов их экспериментального и теоретического исследования, разработка основ анализа, расчета, проектирования (синтеза) элементов и электротехнических средств кибернетики (автоматики, вычислительной и измерительной техники и др.). Базовыми дисциплинами служат математика, включая специальные главы, физика (включая физику твердого тела, элементы статистической физики и элементы квантовой механики) и теоретические основы электротехники. При изучении курса основными методами являются методы макроскопической электродинамики, теории цепей, статистики и теории информации, учитывающие характеристики материалов и изделий, обусловленные как макроскопическими, так и микроскопическими причинами.

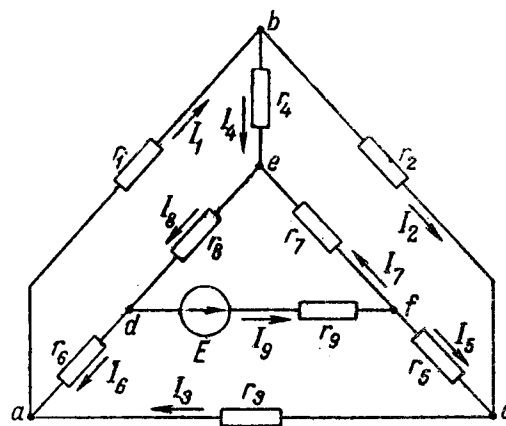
Курс «Основы инженерной электрофизики» состоит из следующих разделов:

I. Электродинамика микро- и макроскопических сред (изложение материала начинается на основе известных уравнений Максвелла); II. Общая топологическая теория линейных цепей и теория графов; III. Анализ и синтез линейных и нелинейных цепей; IV. Прохождение сигналов через линейные и нелинейные цепи; V. Цепи передачи информации и логических преобразований.

Первый раздел курса служит основой для всех последующих разделов. Весь курс рассчитан на 300 ч и будет изучаться студентами после теоретических основ электротехники в течение трех семестров и сопровождаться лабораторными и практическими занятиями и типовыми расчетами. Ограниченный объем статьи не позволяет привести всю программу этого курса, поэтому для иллюстрации приведем краткое содержание только второго ее раздела.

Общая топологическая теория линейных цепей и теория графов

1. Матричный анализ цепей. Входной передающий и выходной иммитансы. Дуальные цепи. Операции с детерминантами при постоянных условиях на зажимах и при изменении уровня полного сопротивления.



2. Топологический анализ цепей. Основные понятия. Топологический определитель. Путь и его величина. Минор пути. Разложение топологического определителя на множители, на пути, на узловые пары, на ветви.

3. Топологический закон передачи. Унисторная эквивалентная схема. Топологический закон передачи общей линейной цепи. Примеры расчета активных схем. Гиристор и гиратор.

4. Графы сигналов. Влияние петли и ликвидация узлов.

5. Определитель графа. Разложение определителя по контурам. Разложение по узлу и по ветви. Общее выражение передачи.

6. Анализ схем с помощью графов. Основной граф контурной схемы. Матричный граф. Планарные схемы. Граф узловых напряжений для унисторных схем. Схемы с электронными приборами.

Аналогичные дисциплины имеются (а там, где их нет, нужно создать) и на других специальностях и факультетах, при этом в ряде случаев следует расширить и углубить их теоретическую основу. Например, наличие курса теоретических основ радиотехники наряду с курсом электротехники на радиотехнических специальностях, по нашему мнению, полностью оправдано.

В этой связи рассмотрим предложения проф. А. М. Кугушева [Л. 3] применительно к радиотехническим специальностям.

Проф. А. М. Кугушев пишет: «В настоящее время, как нам кажется, появилась настоятельная необходимость объединить дисциплины «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и «Теоретические основы радиотехники» (ТОР), преподаваемые в высших учебных заведениях». Подобное объединение по предложению акад. В. А. Котельникова около 10 лет назад было проведено на радиотехническом факультете МЭИ. На основе ранее существовавших четырех предметов (теоретические основы электротехники, электрические измерения, электрические машины и теоретические основы радиотехники) были созданы два курса: «Электротехника» и «Основы радиотехники», причем основной материал из курса ТОЭ был перенесен в курс основ радиотехники.

Несмотря на прогрессивный характер этого предложения, оно не получило надлежащего признания за пределами института по той простой причине, что кафедра основ радиотехники МЭИ не создала по этому новому курсу хотя бы учебного пособия. По нашему мнению, такое объединение вполне правильно. Необходимо только обязательно написать учебник по объединенному курсу основ радиотехники.

Относительно предложения проф. А. М. Кугушева о создании новой дисциплины «Основы радиоэлектроники» можно сказать следующее. После ознакомления с перечнем предложенных вопросов для изложения в новом курсе создается впечатление, что для изучения этого курса от студентов потребуются знания по физике и математике в объеме университетской программы физических факультетов, что связано с увеличением числа часов по этим дисциплинам примерно на 40—50%. Такое увеличение числа часов, не говоря о трудностях их размещения по семестрам, в настоящее время невозможно. Вряд ли возможно и объединение в одном курсе пока очень далеких вопросов электросигнализации и электроэнергетики, так как при современном состоянии теории, темпов ее развития и практического применения, по-видимому, даже

не найдется такого человека, который смог бы создать, а затем читать такой курс и следить за его научной основой.

В заключение хочется сделать некоторые замечания по поводу статьи проф. Д. А. Городского [Л. 4].

Нельзя не согласиться с мнением, высказанным автором статьи: «Общее построение курса должно быть таким, чтобы материал в нем излагался последовательно с постепенным введением все новых и новых положений... Каждое положение должно вытекать из другого, а все вместе — составлять неразрывное целое. Тогда будут ясно выражены внутренние связи между отдельными частями курса, и изучение его из формального превратится в творчески сознательное». Однако затем проф. Д. А. Городский по существу довольно резко возражает против выделения в курсе ТОЭ основ теории цепей. Так он пишет: «В действительности электротехника это не «цепи», а совокупность законов, теоретических положений и вытекающих из них методов расчета электрических и магнитных явлений» (курсив наш). Здесь слово «цепи» взято автором в кавычки и тщательно обойдено даже в таком обороте, как «... методов расчета электрических и магнитных явлений». В то же время в конце своей статьи, совершенно правильно рекомендуя авторам учебников обращать внимание студентов на постепенное изменение их представлений о электрических явлениях и процессах, автор пишет: «Условие раздел о цепях постоянного тока, они могли думать, что уже получили полное представление о характере протекания явления. Но потом они видят, что в тех же цепях действительные токи определяются лишь с учетом переходных процессов. В дальнейшем оказывается, что и это неверно, так как необходимо еще учесть явление распространения электромагнитной волны по проводам, хотя с большой, но с конечной скоростью, т. е. рассматривать цепи как линии с распределенными постоянными». Из этих рассуждений следует, что проф. Д. А. Городский, критикуя существующее деление курса на «цепи постоянного тока, магнитные цепи, цепи синусоидального тока, цепи несинусоидального тока и т. д.», сам пользуется таким делением.

Кроме того, нельзя забывать, что учебник пишется главным образом для студентов. Поэтому отбор соответствующего материала, правильная его систематизация и расположение как внутри отдельных глав, так и в учебнике в значительной степени облегчают изучение материала учащимися и целиком относятся к тем «внутренним связям», о которых пишет проф. Д. А. Городский.

Поскольку большинство других замечаний, приведенных в указанной статье, относятся преимущественно к физическому толкованию того или иного явления или к методике изложения конкретных вопросов, то это не позволяет выявить из статьи точку зрения проф. Д. А. Городского на построение всего курса теоретических основ электротехники.

В заключение остановимся на двух частных положениях. Вызывает некоторое удивление замечание проф. Д. А. Городского о выборе «независимых» контуров при решении задач методом контурных токов. По этому вопросу автор статьи пишет: «В курсе все формулировки должны быть ясными и четкими и охватывать все возможные случаи. Так, например, при изложении метода контурных токов оказывается еще недостаточно рекомендовать выбирать контуры так, чтобы каждый из них включал хотя бы одну новую ветвь». Затем автор статьи, рассматривая контурную схему и допуская при этом ошибку в рассуждениях, приходит к своему правилу: «... по методу контурных токов должно быть выбрано необходимое число контуров *при условии лишь, чтобы были охвачены все ветви схемы*» (курсив наш). Поскольку в рекомендации о выборе контуров, приведенной проф. Д. А. Городским из других учебников, ничего не говорится о числе необходимых уравнений, а идет речь лишь об их независимости и методике составления¹, то эту рекомендацию можно сравнивать только с выделенной курсивом второй половиной правила, предложенного проф. Д. А. Городским.

Покажем ошибочность рассуждений автора и предложенного им правила с помощью той же самой схемы (см. рисунок).

На основании второго закона Кирхгофа для данной схемы необходимо составить четыре контурных уравнения.

Напишем сначала три уравнения:

контур $a-b-e-d-a$

$$r_1 I_1 + r_4 I_4 + r_8 I_8 + r_6 I_6 = 0; \quad (1)$$

контур $b-c-f-e-b$

$$r_2 I_2 - r_5 I_5 + r_7 I_7 - r_4 I_4 = 0; \quad (2)$$

контур $c-a-d-f-c$

$$r_3 I_3 - r_6 I_6 + r_9 I_9 + r_5 I_5 = E. \quad (3)$$

Если принять такую *последовательность записи уравнений*, как это делает проф. Д. А. Городский, то сначала создается впечатление, будто уравнения для всех остальных контуров будут уже зависимыми. Это, конечно, не так. При указанной последовательности записи уравнений независимое четвертое уравнение может быть получено только либо для внутреннего контура $d-f-e-d$, либо для внешнего контура $a-b-c-a$. Действительно, просуммировав уравнения (1), (2), (3), получим:

$$r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3 + r_7 I_7 + r_8 I_8 + r_9 I_9 = E.$$

Это уравнение распадается на два:

$$r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3 = 0; \quad (4) \quad r_7 I_7 + r_8 I_8 + r_9 I_9 = E. \quad (5)$$

Любое из уравнений (4) или (5) может быть получено в качестве четвертого независимого уравнения с помощью того самого правила, против которого возражает проф. Д. А. Городский, при другой последовательности в записи уравнений, например (1), (2), (5), (3). Поэтому его утверждение, что кроме трех контуров [уравнения (1), (2), (3)] «... необходимо взять еще какой-нибудь *любой* четвертый...» — совершенно неправильно. Например, ведь нельзя взять в качестве четвертого контура $a-b-c-f-e-d-a$, так как уравнение для этого контура получается путем суммирования уравнений (1) и (2). Таким образом, предложенное проф. Д. А. Городским правило для составления контурных уравнений неприменимо даже к рассмотренному им примеру.

Нельзя согласиться с замечанием проф. Д. А. Городского о том, что «... при формулировании первого закона Кирхгофа совершенно не требуется уточнять, что «узлом называется точка, в которой сходится не менее трех ветвей», потому что этот закон является справедливым вообще «для любой точки схемы». Справедливость первого закона Кирхгофа «для любой точки схемы» не нарушается и не ограничивается тем, что вводится понятие узла в виде точки схемы с тремя и более присоединенными к ней ветвями. Указанное понятие узла вводится для расчета разветвленных цепей и к таким узлам применяется первый закон Кирхгофа. При отсутствии такого понятия придется писать дополнительные уравнения для ветвей, состоящих из последовательно соединенных элементов, что приведет к значительному усложнению методов расчета электрических цепей. Тем более, что в теории электромагнитного поля, как известно, первый закон Кирхгофа записывается действительно в такой форме, которая относится только к точке, что всегда подчеркивается на лекциях и в учебниках.

Выводы. 1. Целесообразно профилировать курс теоретических основ электротехники (хотя бы по группам специальностей), не нарушая его логического построения.

2. Желательно создать на специальных кафедрах базовые теоретические специальные дисциплины, являющиеся естественным продолжением и дальнейшим развитием курса ТОЭ.

3. Кафедры ТОЭ совместно с соответствующими специальными кафедрами (или группами кафедр) должны составить учебные программы по обоим дисциплинам.

4. Целесообразно создать при методическом управлении МВ и ССО СССР постоянно действующую методическую комиссию по теоретическим основам электротехники из представителей кафедр ТОЭ и групп специальных кафедр ведущих вузов СССР.

5. Необходимо, чтобы МВ и ССО СССР в первой половине 1964 г. созвало всесоюзное методическое совещание по электротехническому и радиотехническому образованию, предварительно разослав вузам проекты программ по ТОЭ и специальным базовым дисциплинам.

Литература

1. Сисоян Г. А., Построение курса «Теоретические основы электротехники», «Электричество», 1963, № 5.
2. Бессонов Л. А., О необходимых мероприятиях для улучшения подготовки студентов по теоретическим основам электротехники, «Электричество», 1963, № 8.
3. Кугушев А. М., О преподавании электро- и радиотехнических дисциплин, «Электричество», 1963, № 8.
4. Городский Д. А., О недостатках преподавания теоретических основ электротехники, «Электричество», 1963, № 5.

¹ Число контурных уравнений всегда равно числу уравнений, составленных на основании второго закона Кирхгофа, о чем обычно говорится в учебниках отдельно.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ КУРСА ТОЭ

Доктор техн. наук, проф. А. А. ЯНКО-ТРИНИЦКИЙ

Уральский политехнический институт

МВ и ССО СССР и РСФСР неоднократно ставили вопрос о повышении уровня общетеоретической подготовки инженеров. Усиление теоретической подготовки инженеров-электриков требует в первую очередь углубления и расширения курса теоретических основ электротехники (ТОЭ), который, как правильно отмечает редакция журнала «Электричество», является «центральной дисциплиной в учебных планах подготовки инженеров-электриков...», а потому необходимо резко увеличить удельный вес этого курса в учебном плане.

Некоторые части курса ТОЭ должны предшествовать специальным курсам, в то время как другие его части могут излагаться параллельно со специальными электротехническими предметами. Подобное построение курса дало бы возможность непрерывно повышать теоретический уровень подготовки инженеров-электриков. В некоторых высших учебных заведениях избрали именно этот путь. Так, например, в Высшем электротехническом училище в Ильменау (ГДР) курс ТОЭ изучается в течение шести семестров, причем число часов, отводимых на курс, достигает 600.

Рассмотрение содержания курса ТОЭ приводит к выводу о необходимости расширения ряда новых его разделов, что определяется бурным развитием электротехники. В то же время в курсе ТОЭ почти нет материала, который можно было бы удалить без ущерба для подготовки инженера-электрика. В электротехнических вузах Москвы и Ленинграда подобное расширение курса ТОЭ, видимо, может быть выполнено без увеличения общего срока подготовки инженеров-электриков. В остальных электротехнических вузах страны необходимо довести общие сроки обучения до сроков, принятых в вузах Москвы и Ленинграда.

Другой путь усиления теоретической подготовки инженера-электрика — это изменение преподавания курса ТОЭ. Развитие и углубление курса ТОЭ требует резкого усиления разделов, в которых излагаются нелинейные цепи. Однако не следует в этих разделах подменять специальные курсы и рассматривать различные нелинейные элементы цепей, их изготовление и т. п. Необходимо сосредоточить внимание на классификации нелинейных элементов по их основным свойствам, на тех новых явлениях, которые возникают только в нелинейных цепях, и главным образом на общих методах расчета нелинейных цепей. Следует показывать, что в нелинейном элементе зависимость между напряжением и его производными по времени, с одной стороны, и током с его производными — с другой, является обычно весьма сложной и лишь в простейших случаях нелинейный элемент может быть описан той или иной упрощенной зависимостью. Более того, один и тот же элемент в разных задачах описывается различным образом.

Следует подробно останавливаться на новых явлениях, специфических для нелинейных цепей, как, например, на появлении субгармоник, на так называемых «триггерных эффектах» и т. п. Необходимо обстоятельно рассматривать общие методы анализа нелинейных цепей, как, например, метод кусочно-линейной аппроксимации и тесно связанный с ним по идее метод последовательных интервалов, метод других интегрируемых аппроксимаций, асимптотические методы, в частности, метод гармонической линеаризации в нелинейных цепях и т. п. Все эти методы следует проиллюстрировать на ярких примерах цепей с конкретными нелинейными элементами. Весьма поучительно поставить в лаборатории работы, показывающие специфические для нелинейных цепей явления, например возникновение субгармоник.

* * *

Наряду с анализом процессов в электрических цепях следует уделять некоторое внимание также синтезу цепей, имеющему большое практическое значение, но еще не нашедшему отражения в курсе ТОЭ.

При изложении курса ТОЭ вряд ли целесообразен строгий, дедуктивный путь изложения. Скорее наоборот — при изложении этого курса следует идти индуктивным путем, т. е. начинать с наиболее простых проявлений электромагнитного поля и постепенно переходить к более общим случаям, включающим в себя предыдущие как частные. При таком пути изложения вряд ли возможно «строгое» изложение, так как общее не может быть «выведено» из частного. Однако в последней части курса после получения законов электромагнитного поля в наиболее общем виде можно и следует «строгое выведение» из них излагавшиеся ранее в курсе основные положения, как это сделано, например, в третьей части учебника Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова. Такое обобщение будет, несомненно, полезным, но положить подобный путь в основу курса нецелесообразно.

С этой точки зрения целесообразно сначала рассматривать статические и стационарные поля и цепи, затем переходить к медленно меняющимся во времени электромагнитным полям и цепям, после чего рассмотреть наиболее общий случай быстро меняющихся во времени электромагнитных полей.

При таком порядке изложения векторы магнитного поля, как и поля электрического, целесообразно определять, исходя из сил, действующих на токи и на заряды, не прибегая к таким законам, как закон электромагнитной индукции. Переходя к медленно меняющимся электромагнитным процессам, следует рассмотреть токи смещения, обобщенную формулировку закона полного тока, а также закон электромагнитной индукции, что даст возможность достаточно обоснованно с физической точки зрения излагать цепи переменного тока.

При переходе к быстро меняющимся электромагнитным полям следует ввести уравнения Максвелла, дать их физическое истолкование, на основе их решений показать, что в предыдущих разделах давались лишь приближенные решения, и установить область применимости этих упрощенных решений.

Какие же вопросы могут быть опущены при изложении курса? Курс ТОЭ уже подвергался неоднократным сокращениям в связи с введением в него новых разделов, а поэтому весьма затруднительно указать крупные вопросы, которые можно было бы опустить без ущерба для подготовки инженеров-электриков, но некоторые сокращения все-таки можно порекомендовать. Так, например, из раздела «геометрические места» можно исключить метод инверсий и сопряжений, ограничившись методом векторных уравнений, что, кстати, уже давно принято при анализе отдельных режимов и является тем более целесообразным при анализе совокупности режимов.

Неоднократно поднимался вопрос о том, может ли быть сокращено изложение ряда вопросов в курсе ТОЭ при освещении их в курсе физики. Опыт показывает, что значительного сокращения курса таким путем добиться не удастся, как не удается это сделать и в других предметах. Так, например, в физике элементарно излагаются законы механики, но это не дает возможности удалить эти положения из курса теоретической механики, где они трактуются вторично, более строго. Однако некоторые вопросы, изложенные в курсе физики, могут не повторяться в курсе ТОЭ, как, например, вывод закона Ома из электронной теории металлов и т. п.

При изучении курса ТОЭ особо важное значение имеют практические занятия: упражнения, домашние задания. Необходимо, чтобы все узловые вопросы курса были хорошо освоены студентами с практической стороны и могли применяться ими в дальнейшем.

УДК 621.316.13

О РЕЖИМЕ НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

(Статья В. К. Плюгачева, «Электричество», 1963, № 2)

Кандидат техн. наук И. М. СИРОТА

Киев

В. К. Плюгачев считает основным преимуществом сетей с заземленной нейтралью уменьшение перенапряжений на неповрежденных фазах при замыканиях на землю и возмож-

ность перевода сетей, работающих в настоящее время с изолированной нейтралью или компенсированных, на повышенное (приблизительно в $\sqrt{3}$ раз) напряжение без существенного усиления изоляции сетей.

Вместе с тем он считает возможным ограничить ток замыкания на землю величинами, достаточными для срабаты-

вания простой защиты (несколько сотен ампер), для чего, по его мнению, нужно заземлять нейтрали лишь части из общего числа потребительских трансформаторов, работающих в сети. При этом предполагается, что такой способ заземления «с точки зрения изоляции высоковольтной сети и появления кратковременных перенапряжений совершенно идентичен заземлению нейтрали питающего трансформатора» [Л. 1], т. е. глухому заземлению нейтрали.

Однако известно, что при заданных токах междуфазных коротких замыканий любое уменьшение тока однофазного замыкания на землю — это следствие увеличения сопротивления нулевой последовательности системы z_0 , приводящее к повышению напряжений неповрежденных фаз.

Приняв эквивалентное сопротивление $z_2 = z_1$ и учтя известные уравнения токов однофазного и трехфазного коротких замыканий, мы получим формулу для определения относительного напряжения неповрежденных фаз в точке повреждения при устойчивом замыкании на землю

$$\frac{U_\phi}{U_{\phi.норм}} = \left| 1 + e^{\pm j\pi/3} \left(1 - \frac{I_{к.з}^{(1)}}{I_{к.з}^{(3)}} \right) \right|.$$

Как показывают расчеты, возможное уменьшение сопротивления z_2 мало влияет на напряжение U_ϕ .

Расчеты по этой формуле дают следующие значения $\frac{U_\phi}{U_{\phi.норм}}$ в зависимости от соотношения токов однофазного и трехфазного повреждений, полагая их фазные углы одинаковыми:

$I_{к.з}^{(1)} / I_{к.з}^{(3)}$	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0
$U_\phi / U_{\phi.норм}$	1	1,32	1,56	1,64	1,68	1,73

Отсюда видно, что даже при сравнительно большом отношении $I_{к.з}^{(1)} / I_{к.з}^{(3)} = 0,1$ напряжение на неповрежденных фазах сети повышается на 64%. Если принять, как в примере, приведенном в статье В. К. Плюгачева,

$$I_{к.з}^{(1)} = 200 - 300 \text{ а},$$

то при возможном токе междуфазного короткого замыкания порядка 5 000—10 000 а наличие в сети трансформаторов с заземленной нейтралью почти не повлияет на напряжение фаз.

Сеть с частично заземленными трансформаторами не равноценна глухозаземленной. По существу она эквивалентна сети с малым током замыкания на землю, нейтраль которой заземлена через высокоомное (ненастроенное) индуктивное сопротивление. Как известно, такие сети эксплуатируются за рубежом, но являются менее совершенными, чем компенсированные [Л. 2].

Предлагаемый В. К. Плюгачевым способ заземления нейтрали устраняет возможность внутренних перенапряжений, связанных с перезарядкой фазных емкостей в сетях с изолированной нейтралью в случае перемежающегося замыкания на землю. Однако перенапряжения этого вида надежно предотвращаются путем заземления нейтралей через дугогасящие катушки.

Впрочем, в настоящее время основным назначением катушек следует считать не ограничение перенапряжений, поскольку при нормальном уровне изоляции сети с изолированной нейтралью они не представляют опасности для изоляции, а ликвидацию неустойчивых замыканий и уменьшение токов в месте повреждения. Обычно для сетей с изолированной нейтралью принимают тот же уровень изоляции, что и для компенсированных.

Автор обсуждаемой статьи отмечает возможность работы двигателей при отключении одной из фаз линии, питающей трансформатор с заземленной нейтралью. Однако в рассматриваемых сетях это не может считаться преимуществом, так как имеющаяся в них в настоящее время возможность работы в течение 1—2 ч с заземленной фазой более эффективно способствует надежности электроснабжения потребителей.

Заземление нейтралей части трансформаторов приводит к следующим существенным недостаткам:

1. Обязательное автоматическое отключение поврежденных участков сети при устойчивых замыканиях на землю нарушает нормальное электроснабжение потребителей. Нельзя согласиться с В. К. Плюгачевым, что этот недостаток не имеет большого значения при наличии на линиях устройств АПВ. Несмотря на неустойчивый характер большинства замыканий па землю, следует считаться и с возможностью устойчивых повреждений, в особенности в кабелях. Согласно имеющемуся опыту эксплуатации, даже при неустойчивых замыканиях на землю и удачных АПВ, технологический процесс некоторых промышленных предприятий нарушается, что приводит к существенным убыткам.

2. При токе замыкания на землю порядка 200—300 а даже кратковременное его протекание нередко приводит к развитию неустойчивого однофазного повреждения в устойчивое, а также и в короткое замыкание между фазами. Аварии именно такого характера имели место в кабельных сетях генераторных напряжений, когда нейтрали генераторов заземлялись через активные сопротивления, причем ток замыкания на землю достигал 100—150 а и защита в сети срабатывала на отключение.

3. При заземлении нейтралей потребительских трансформаторов с соединением обмоток по схеме «звезда — звезда» с выведенными нулевыми точками их сопротивление нулевой последовательности изменяется в широких пределах в зависимости от состояния вторичной цепи. Наибольшее сопротивление (порядка 0,3 относительных единиц) будет при отсутствии на стороне низкого напряжения путей для токов нулевой последовательности (отключение однофазных нагрузок), а наименьшее — в случае предлагаемого В. К. Плюгачевым соединения нейтралей вторичных обмоток трансформаторов и двигателей, работающих в сети. В последнем случае замыкание на землю в любой точке сети будет сопровождаться протеканием больших токов нулевой последовательности через все заземленные трансформаторы и двигатели.

Число электрически соединенных трансформаторов с заземленными нейтральями будет зависеть от возможных изменений конфигурации сети в нормальных и аварийных условиях. Обусловленная этими причинами нестабильность сопротивления z_0 заставит выбирать ток замыкания на землю с достаточным запасом для обеспечения во всех случаях надежной работы защиты, что приведет к повышению вероятности развития повреждений.

Единственное преимущество предлагаемого В. К. Плюгачевым режима нейтрали по сравнению с общепринятыми в распределительных сетях — это возможность осуществления простой селективной защиты. По существу его предложение сводится к увеличению тока замыкания на землю с целью облегчения выполнения защиты. Однако, как известно [Л. 3], за последние годы был разработан ряд принтипов выполнения защиты от замыканий на землю в компенсированных сетях, на основе которых данная защита уже практически осуществляется. В протяженных распределительных сетях с изолированной нейтралью успешно эксплуатируются достаточно простые защиты направленного действия, работающие на емкостном токе замыкания на землю. Селективность всех этих защит не зависит от их действия на сигнал или на отключение.

Из всего изложенного вытекает, что для широкого применения предложения В. К. Плюгачева нет оснований. Заземление нейтралей части потребительских трансформаторов может быть оправдано лишь в качестве временного решения, например, если слишком низок уровень изоляции сети или отсутствует возможность осуществить селективную защиту другими способами.

В. К. Плюгачев решительно отстаивает преимущества глухого заземления по сравнению с изолированной или компенсированной нейтралью. Но, по нашему мнению, ни в обсуждаемой статье, ни в [Л. 1] не приводится каких-либо существенно новых данных, которые могли бы служить основанием для пересмотра давно принятых и оправдавших себя на практике решений.

Напомним, что независимо от способа осуществления режима большого тока замыкания на землю путем заземления нейтралей потребительских или питающих трансформаторов, обычно сопротивление z_0 больше z_1 , причем оно зависит от точки замыкания на землю и других условий. Соответственно $I_{к.з}^{(1)} < I_{к.з}^{(3)}$ и напряжение при замыкании на землю U_ϕ может быть значительно больше $U_{\phi.норм}$ (хотя и меньше, чем в случае изолированной нейтрали).

Вместе с тем, как показали многочисленные исследования [Л. 2 и 4], коммутационные и атмосферные перенапряжения превышают перенапряжения, связанные с однофазными замыканиями на землю. На основании многолетнего опыта эксплуатации нормированные уровни изоляции, испытательные напряжения промышленной частоты, а также напряжения пробоя разрядников были установлены, исходя из амплитуд коммутационных перенапряжений. Снижение этих перенапряжений и соответственно допустимое понижение уровня изоляции при глухом заземлении нейтрали по сравнению с изолированной независимо от длительности однофазных замыканий на землю составляет относительно небольшую величину, порядка 20% [Л. 2].

Следовательно, нет никаких оснований полагать, что, осуществив в распределительной сети глухое заземление нейтрали, можно без ущерба для запаса электрической прочности понизить уровень изоляции или повысить рабочее напряжение в $\sqrt{3}$ раз. Указанное выше снижение уровня изоляции воздушных линий на 20% дает существенную экономию средств при сооружении линий напряжением 110 кВ и выше, для которых и было принято глухое заземление нейтрали. Однако оно не может иметь решающего значения применительно к распределительным сетям 6—35 кВ.

Возможность повышения рабочего напряжения эксплуатируемых воздушных сетей без усиления их изоляции должна определяться главным образом имеющимися запасами электрической прочности по отношению к коммутационным перенапряжениям [Л. 5], а не режимом нейтрали. Глухое заземление может быть оправдано технико-экономически лишь в отдельных случаях, например при переводе на повышенное напряжение воздушных линий 35 кВ или при необходимости питания сети 35 кВ от автотрансформатора.

В кабельных сетях переход на глухое заземление нейтрали позволил бы несколько уменьшить стоимость кабелей за счет ослабления их поясной изоляции. Однако и эта относительно небольшая экономия, по-видимому, исчезает ввиду повышенной стоимости заземлений и сокращения сроков службы кабелей (как известно, каждый случай протекания больших токов короткого замыкания сопровождается необратимыми тепловыми и механическими деформациями диэлектриков и оболочек кабелей, образованием в изоляции пустот и ослаблением ее электрической прочности). Следует также иметь в виду трудности устройства заземлений, значительные электромагнитные влияния больших токов замыкания на землю на линии связи и повышенную их опасность для людей, находящихся вблизи от места повреждения в кабеле.

В связи с этими недостатками переход на глухое заземление нейтрали в воздушных и кабельных сетях 6—35 кВ, за исключением некоторых особых случаев, был бы неоправданным мероприятием.

Многочисленные исследования и опыт эксплуатации в СССР и других странах показали, что наиболее целесообразным режимом нейтрали в этих сетях является компенсация или некоторая перекомпенсация емкости тока замыкания на землю. Однако дугогасящие катушки выпускаются пока промышленностью в недостаточном количестве и несовершенной конструкции — без регулирования индуктивности во включенном состоянии. Подлинная важность «проблемы режима нейтрали», подчеркиваемая в статье В. К. Плюгачева, заключается не в переводе распределительных сетей на работу с заземленной нейтралью, а в достаточном оснащении их дугогасящими катушками с автоматической настройкой компенсации.

Литература

1. Плюгачев В. К., О переходе на заземленную нейтраль в сельских электрических сетях, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1961, № 1.
2. Сиротинский Л. И., Техника высоких напряжений, ч. III, вып. I, Госэнергоиздат, 1959.
3. Сигнализация замыкания на землю в компенсированных сетях, Госэнергоиздат, 1962.
4. Вильгейм Р. и Уотерс М., Заземление нейтрали в высоковольтных системах, Госэнергоиздат, 1959.
5. Перевод линий электропередач на повышенное напряжение, Материалы научно-технического совещания (доклады А. Н. Шеренциса и М. Е. Иерусалимова), Киев, 1963.

Инж. Л. Д. НАУМОВСКИЙ, инж. Я. А. ЦИРЕЛЬ

Ленинград

В статье В. К. Плюгачева поднята очень важная и серьезная проблема. Переход к заземлению нейтрали в распределительных сетях 6—35 кВ, как справедливо указывает автор, сулит значительные экономические выгоды. В статье отмечаются некоторые недостатки схемы с глухим заземлением нейтрали. Однако нельзя согласиться с утверждением В. К. Плюгачева, что широкое применение АПВ якобы обеспечивает примерно одинаковую степень надежности схем сетей с компенсированной и заземленной нейтралью.

Практика эксплуатации распределительных сетей, работающих с глухой заземленной нейтралью, подтверждает, что их надежность при 100%-ном обеспечении АПВ на линиях электропередачи значительно ниже, чем в сетях с компенсированной нейтралью.

В таблице приведены данные, полученные на основе пятилетнего периода эксплуатации линий и подстанций 35 кВ ленинградской сети, часть которой работает заземленной нейтралью, а часть — с изолированной или компенсированной.

Из таблицы следует вывод, что с переводом сетей 35 кВ в режим работы с глухим заземлением нейтрали аварийность сети, определяемая количеством отключений линий с неуспешным АПВ, возрастет в 2,5 раза, аварийность на подстанциях — в 4 раза.

Удельные показатели работы сети с заземленной нейтралью несколько занижены, так как приведенная в таблице статистика относится к сети, имеющей полную изоляцию, но работающей с глухо-заземленной нейтралью, т. е. с неполным ее использованием.

В 1942—1944 гг. в целях увеличения пропускной способности электропередачи Волховская ГЭС — Ленинград через Ладожское озеро часть сетей 35 кВ была переведена на напряжение 60 кВ с глухозаземленной нейтралью. Эксплуатационная надежность работы этой сети была низкой.

Другой пример. В течение 36 лет у нас находится в эксплуатации очень ответственная и протяженная кабельная сеть 35 кВ с глухозаземленной нейтралью. Любое повреждение этой сети приводит к ее отключению и выходу из строя на время ремонта. Здесь надежное и бесперебойное электроснабжение крупных и ответственных потребителей достигается за счет наличия нескольких параллельно работающих кабелей, когда выход из строя одного кабеля не приводит к потере питания. Эта сеть работает в кольце с наличием АВР. Одиночное или тупиковое питание в ней отсутствует.

На снижение надежности распределительной сети при заземлении ее нейтрали указано в [Л. 1].

Дополнительному повышению надежности сетей с компенсированной нейтралью будет способствовать намечившаяся в последнее время возможность применения дугогасящих катушек с автоматической настройкой [Л. 2].

Обеспечение бесперебойности электроснабжения потребителей в сетях с заземленной нейтралью потребует, очевидно, проведения дополнительных мероприятий, например применения неполнофазного режима работы в аварийных режимах. Однако большого эффекта это не дает, так как пропускная способность линий в неполнофазном режиме ограничена. И, кроме того, для этих режимов потребуются дополнительные затраты на оборудование релейных защит избирателями фаз и т. п., а также на устройство тофазных приводов у выключателей и разъединителей.

Другой путь повышения надежности сети с глухим заземлением нейтрали — это обеспечение двустороннего питания всех подстанций (кольцевание). Этот путь также потребует значительных капиталовложений, связанных как со строительством дополнительных линий, так и с усложнением релейной защиты и автоматики, вызываемым переходом от радиальных к замкнутым сетям.

Как уже отмечалось, переход к глухому заземлению нейтралей вызывает значительное увеличение тока однофазного короткого замыкания. В ряде случаев это может привести к необходимости установки выключателей большей разрывной мощности, более дорогих и более сложных в эксплуатации, а также к усилению остального оборудования. В сельских распределительных сетях, трансформаторные подстанции которых обычно имеют совмещенные заземляющие устройства для высокого и низкого напряжений, из-за увеличения тока за-

	Сеть с заземленной нейтралью						Сеть с изолированной нейтралью					
	1958	1959	1960	1961	1962	Среднее за 5 лет	1958	1959	1960	1961	1962	Среднее за 5 лет
Количество отключений ЛЭП	12	19	25	17	16	18,2	13	23	19	54	27	29,8
Протяженность ЛЭП, км	214	214	357	357	370	303	628	721	828	1 080	1 095	870
Удельное количество отключений на 100 км в год	5,6	8,9	7,0	4,8	4,3	6,0	2,1	3,2	2,3	5,0	2,5	3,4
Доля неуспешных действий АПВ (в процентах к общему числу случаев работы АПВ)	50	37	54	50	44	47	42	45	10,5	24	44	31,2
Удельное количество отключений с неуспешным АПВ на 100 км в год	2,8	3,3	3,8	2,4	1,9	2,8	0,9	1,4	0,2	1,2	1,1	1,06
Количество повреждений оборудования подстанций	0	7	1	6	11	5,16	1	2	0	3	4	2,17
Общее количество подстанций (распределительных устройств)	30	31	34	35	36	33,2	61	68	76	91	94	78,0
Удельное количество повреждений на 10 распределительных устройств	0	2,36	0,30	1,72	3,05	1,55	0,16	0,29	0	0,33	0,43	0,28
Доля неуспешных действий АПВ	—	100	0	50	25	41,7	100	100	—	75	0	55,6
Удельное количество повреждений с неуспешным АПВ на 10 распределительных устройств	0	2,36	0	0,86	0,76	0,65	0,16	0,29	0	0,25	0	0,16

мыкания на землю возникает опасность заноса высоких потенциалов в сеть низкого напряжения: потенциал, появляющийся на заземлении подстанции и на соединенном с ним нулевым проводом сети низкого напряжения, при замыкании на землю в сети высокого напряжения может достигнуть нескольких сотен вольт (вместо 60—100 в при изолированной нейтрали сети высокого напряжения). Для обеспечения безопасности потребителей потребуется устройство многократного заземления нейтрального провода, а также снижение сопротивления заземляющих устройств подстанций, что вызовет значительное (примерно в 10 раз) увеличение фазового металла на заземлители.

В статье В. К. Плюгачева указано на проблему ограничения тока замыкания на землю. Автором предложена схема рассредоточенного заземления нейтралей, при котором нейтральные точки заземляются только у части распределительных трансформаторов, а у всех питающих остаются изолированными. При этом действительно появляется возможность ослабить мешающие и опасные влияния на линии связи, снизить величину потенциала на заземляющих устройствах, уменьшить необходимую разрывную мощность выключателей, термическую и динамическую устойчивость аппаратуры и т. п. Вместе с тем такая схема имеет свои слабые стороны. Прежде всего отказ от заземления нейтрали на питающих трансформаторах исключает применение для последних автотрансформаторных схем, т. е. лишает нас возможности использовать одно из основных преимуществ глухого заземления нейтрали в сети 35 кв. Далее рассредоточенное, множественное заземление нейтралей существенно усложняет устройство селективной земляной защиты. Опыт эксплуатации распределительных сетей 110 кв с большим количеством заземленных нейтральных точек трансформаторов (заземление нейтралей вызвано наличием ослабленной изоляции устройств регулирования напряжения на трансформаторах под нагрузкой) указывает на необходимость отказа от простых земляных защит. В настоящее время обсуждается вопрос о целесообразности добавления к земляным защитах органа тока обратной последовательности с реле мощности нулевой последовательности.

С другой стороны, если при заземлении нейтрали задача отыскания устойчивых повреждений в протяженных разветвленных сетях решается относительно просто путем селективной настройки земляной защиты, то в сети с изолированной нейтралью эта проблема до последнего времени не имела удовлетворительного решения. В настоящее время для сетей с компенсированной нейтралью разработаны селективные защиты, основанные на использовании особенностей переходных процессов [Л. 4 и 5].

Предложение В. К. Плюгачева использовать для повышения напряжения существующих распределительных сетей ме-

тод пересоединения обмотки низкого напряжения у трансформаторов районных (питающих) подстанций с треугольника на звезду является спорным. В отечественной практике трансформаторостроения считается, что для мощного трансформатора совершенно недопустима работа по схеме, когда ни одна из его обмоток не соединена в треугольник. Действующий ГОСТ 401-41 предусматривает соединение обмоток по схеме звезда с нулем-звезда лишь для трансформаторов мощностью не выше 500—1 800 кВА при напряжении обмотки низкого напряжения соответственно 230—400 в. Для всех остальных трансформаторов должна применяться схема звезда-треугольник. Примерно те же границы применимости схемы звезда с нулем-звезда устанавливает и проект нового ГОСТ на трансформаторы.

Поэтому, видимо, двухобмоточные трансформаторы, предназначенные, как это предлагает В. К. Плюгачев, для использования как в схеме звезда-треугольник, так и в схеме звезда-звезда, должны иметь специальную компенсационную обмотку, соединенную в треугольник. Эта обмотка может выполняться без отводов, т. е. не рассчитываться на устойчивость к внешним коротким замыканиям, и в силу этого может быть сделана относительно маломощной. Правда, в настоящее время поднимается вопрос об отказе от компенсационных обмоток и для мощных трансформаторов, однако это должно быть обосновано расчетами или специальными испытаниями.

Литература

1. Коршунов А. П., Некоторые недостатки заземления нейтрали сельских распределительных сетей, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», 1962, № 4.
2. Лихачев Ф. А., Автоматическое регулирование тока дугогасящих катушек при замыканиях на землю в сетях, «Электрические станции», 1961, № 11.
3. Попов И. Н., О принципах выполнения защиты от замыканий на землю, основанной на использовании переходных процессов, «Электричество», 1962, № 2.
4. Воскресенский А. А., Наладка сигнализации замыканий на землю в компенсированной сети, «Электрические станции», 1962, № 9.
5. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, ч. I, Госэнергоиздат, 1957.

УДК 621.316.13

З. И. КЛЕБАНОВ, А. Ф. КАМЕНСКИЙ, С. И. БОЙЧУК*Бобруйск*

Рассмотренный в статье В. К. Плюгачева новый способ глухого заземления нейтрали распределительных сетей прошел первую эксплуатационную проверку в кабельных сетях 6 кв Бобруйского сетевого района. Ниже приводятся основные результаты испытаний.

Программой их проведения предусматривалось выявление особенностей работы сетей в режиме глухого заземления нейтрали, эксплуатации в нормальных условиях, исследование аварийных режимов, связанных с однофазными замыканиями на землю. Для получения сравнительных данных в программу испытаний были включены аварийные режимы, вызываемые однофазными замыканиями, при работе сети с изолированной нейтралью. Аварийные токи двойного замыкания на землю (бобруйская сеть работает сейчас по замкнутой схеме, и поэтому необходимо искусственно создавать двойное замыкание на землю для отключения поврежденного участка) по опытным данным находятся в пределах 2—4 тыс. а. Они обеспечивают надежную работу предохранителей ПК-6 с номинальным током плавких вставок 150 а. Величина тока

с другой стороны линии, и замыкание было ликвидировано через 0,56 сек. Фактическое значение тока короткого замыкания (1920 а) примерно в 2 раза превысило расчетное (1000 а) вследствие подпитки точки короткого замыкания со стороны замкнутых сетей 380/220 в.

Протекание значительных аварийных токов через контур заземления подстанции вызывает опасность появления на этом контуре больших потенциалов, а также напряжений прикосновения и шага. Сопротивление растекания контуров заземления на подстанции с кабельными линиями 6 кв составляет около 0,2 ом. Столь малое значение объясняется взаимной электрической связью контуров через заземленные металлические оболочки кабелей.

Замеры напряжения прикосновения на контуре заземления проводились и в опыте двойного замыкания на землю (сеть 6 кв находилась в режиме изолированной нейтрали). Вначале было осуществлено однофазное замыкание на заземляющий контур одной из подстанций. При этом емкостный ток замыкания составил 90 а. Затем однофазное замыкание было переведено в двойное на землю. Ток короткого замыкания вызвал срабатывание предохранителей поврежденной фазы с обеих сторон аварийного участка линии. Продолжительность замыкания составила 0,123 сек, а величина тока — 3390 а (осциллограмма на рис. 2). Напряжение прикосновения было 48 в, а полное напряжение на контуре заземления — 76 в (эффективное значение).

В ходе испытаний был проведен опыт работы трансформатора мощностью 180 кВа при питании его со стороны напряжения 6 кв по двум фазам. Вследствие заземления нейтрали трансформатор оказался в двухфазном режиме питания. При этом на стороне низкого напряжения в поврежденной фазе также индуцировалось напряжение. В результате фазные напряжения в низковольтной обмотке составили:

При холостом ходе	210	212	190 в
или в %	100	100	90
При нагруженном трансформаторе*	210	212	160 а
или в %	100	100	75

(процентные значения взяты по отношению к напряжению фазы при нормальной трехфазной схеме питания).

Коэффициент несимметрии, определяемый отношением составляющей обратной последовательности системы напряжений к составляющей прямой последовательности, при нагруженном трансформаторе составил 8,9%. По условиям нагрева рассмотренный неполюсфазный режим обеспечивает длительную работу двигателей с нагрузкой 81% от номинальной.

Известно, что в сетях с изолированной нейтралью потеря одной фазы делает невозможным запуск трехфазных двигателей. В сетях с глухим заземлением нейтрали такой запуск возможен, причем пусковой, критический и номинальный моменты здесь составляют около 80—90% соответствующих моментов в трехфазном номинальном режиме, что вполне приемлемо на время ликвидации аварии. Во время испытаний в питаемой от подстанции незаэксплуатированной низковольтной сети производилась проверка на запуск и работу электродвигателя центробежного насоса, которая прошла успешно.

Вывод. Испытания и опытная эксплуатация сетей 6 кв Бобруйского сетевого района в режиме глухого заземления нейтрали показали пригодность этого способа. Подтвердилось возможность селективного действия защиты при однофазных замыканиях на землю и более высокая по сравнению с режимом изолированной нейтрали бесперебойность электроснабжения.

* Величина загрузки трансформатора в опыте составляла 60% от номинальной.

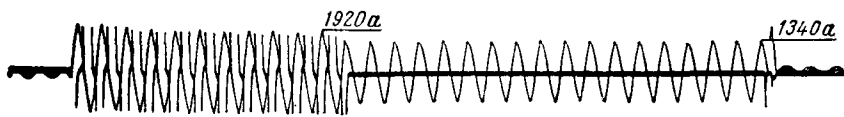


Рис. 1.

однофазного короткого замыкания в режиме заземленной нейтрали была принята 1000 а, как наименьшая, обеспечивающая селективное срабатывание предохранителей. Для получения такого тока необходимо заземлить 1800 кВа суммарной установленной мощности потребительских трансформаторов (расчеты сделаны для трансформаторов 100, 180 и 320 кВа). Местонахождение заземленных трансформаторов в пределах замкнутого участка кабельных сетей, как показали расчеты, практически не влияет на величину тока замыкания.

Перевод сетей в режим глухого заземления нейтрали был осуществлен в январе 1963 г. У всех подготовленных к заземлению трансформаторов нейтрали обмоток 6 кв были соединены с контурами заземления подстанций. При заземлении первого трансформатора мощностью 180 кВа напряжение смещения его нейтрали было около 10 в, ток в заземляющем проводе при холостом ходе трансформатора — 0,8 а, а при включении нагрузки — 2,25 а. Заземление остальных трансформаторов проводилось без измерения токов в нейтральных и в произвольном порядке.

Перевод сетей 6 кв в режим рассредоточенного заземления нейтрали не вызвал каких-либо отрицательных явлений, а их эксплуатация в течение всего времени испытаний (трое суток) протекала нормально.

Однофазное замыкание на землю в сетях с глухим заземлением нейтрали приводит к тому, что все заземленные трансформаторы в течение времени работы защиты отбекаются токами нулевой последовательности. В фазах трансформаторов эти токи составляют около 2, а в нейтральных — 5—6-кратные значения номинального тока трансформатора. Полный ток однофазного замыкания состоит из суммы токов в нейтральных заземленных трансформаторов.

В ходе испытаний было проведено несколько искусственных однофазных замыканий с целью определения величины тока замыкания и проверки селективности работы защиты. Запись тока замыкания осуществлялась осциллографом МПО-2. Включение цепи короткого замыкания проводилось выключателем ВМГ-133. Одна фаза соединялась металлически с контуром заземления подстанции. При замыкании на линии, имевшей двустороннее питание, произошло перегорание предохранителей на аварийной фазе с обеих сторон поврежденного участка.

Как видно из осциллограммы (рис. 1), полный ток замыкания был 1920 а (эффективное установившееся значение). Через 0,22 сек после начала замыкания перегорел предохранитель, защищающий линию с одной стороны. Ток замыкания снизился до 1340 а. Затем перегорел предохранитель

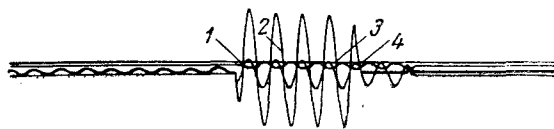


Рис. 2.

УДК 621.316.13

Инж. Д. И. ИОЗЕФАВИЧУС

Калининград

Статья В. К. Плюгачева, по нашему мнению, содержит ряд существенных погрешностей. Возможность повышения рабочего напряжения сети в $\sqrt{3}$ раз за счет заземления нейтрали преувеличена, так как уровень изоляции сети определяется в конечном итоге по уровню коммутационных и атмосферных перенапряжений, а не величиной длительного напряжения фазы относительно земли. Кратность коммутационных перенапряжений при заземлении нейтрали вряд ли может быть снижена более чем в 1,5 раза и то при условии достаточно малых значений x_0/x_1 и R_0/R_1 .

В распределительных сетях среднего напряжения (до 35 кВ включительно) достижение последнего условия крайне затруднительно, тем более при предлагаемом В. К. Плюгачевым рассредоточенном заземлении нейтрали с током замыкания до 500 А. Еще меньший эффект дает заземление нейтрали в таких сетях с точки зрения ограничения атмосферных перенапряжений.

Очевидно, именно поэтому для сетей с номинальным напряжением до 60 кВ МЭК рекомендует лишь один уровень изоляции для данного напряжения независимо от характера заземления нейтрали [Л. 1].

Нельзя согласиться с утверждением автора обсужденной статьи о возможности выполнения заземления трансформаторных подстанций 35/0,4 и 10/0,4 кВ с установленной трансформаторной мощностью 320 и 100 кВА соответственно, исходя из условия заземления низковольтной стороны, т. е. приняв сопротивление заземления 4—10 Ом.

В соответствии с ПУЭ сопротивление заземления должно быть

$$R \leq \frac{125}{I} [\text{Ом}].$$

Для трансформатора 100 кВА, 10/0,4 кВ номинальный ток предохранителей со стороны обмотки высокого напряжения равен 15 А [Л. 2]. Приняв в качестве расчетного тока I трехкратный номинальный ток предохранителя, получим:

$$R \leq \frac{125}{45}, \text{ т. е. } R \leq 2,8 \text{ Ом},$$

а по условиям заземления низковольтной стороны можно было бы принять для данной подстанции всего 10 Ом. Сомнительно утверждение В. К. Плюгачева о невозможности отыскания места замыкания в замкнутых сетях с изолированной нейтралью. Кратковременным отключением выключателей транзитных подстанций вполне можно отыскать, на каком именно присоединении имеется «земля». Как показывает опыт, в самом худшем случае на отыскание «земли» не затрачивается более 2—3 ч.

Некоторые недостатки в работе сетей с изолированной нейтралью хорошо устраняются при компенсации емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящих аппаратов. Устройство компенсации в сетях среднего напряжения не является сложным и получило широкое распространение в особенности за рубежом.

В сетях с глухозаземленной нейтралью каждое замыкание на землю переходит в короткое замыкание, что требует немедленного отключения поврежденного участка, даже при условии потери питания потребителей. В противоположность этому в компенсированных сетях неустойчивые замыкания ликвидируются автоматически дугогасящим аппаратом, а сравнительно более редкие устойчивые замыкания могут продолжаться длительное время, по крайней мере до окончания прохождения максимума напругок.

Наличие большого тока при однофазных замыканиях в сети с глухозаземленной нейтралью может вызвать тяжелые повреждения оборудования как в месте замыкания, так и в других точках сети за счет термических и динамических воздействий.

Кроме того, частые отключения выключателей потребуют существенного увеличения числа их ремонтов; надежность работы выключателей будет снижена.

Внедрение в распределительных сетях среднего напряжения пофазного ремонта и отключения (в том числе ОАПВ) нецелесообразно из-за необходимости значительного усложнения приводов коммутационных аппаратов и релейной защиты.

Еще один недостаток сетей с глухозаземленной нейтралью — это повышение опасности поражения электрическим током людей и животных, находящихся вблизи места замыкания. В компенсированных сетях эта опасность незначительна. Особенно это важно для распределительных сетей сельскохозяйственного назначения.

Многолетний опыт эксплуатации компенсированных сетей среднего напряжения (в частности, в нашей энергосистеме) подтверждает их высокую надежность и гибкость в работе.

Считаю, что положения, высказанные автором обсуждаемой статьи, не доказывают необходимости перехода в распределительных сетях среднего напряжения на работу с глухозаземленной нейтралью.

Литература

1. Атмосферные перенапряжения и координация изоляции под ред. Д. В. Разеви́га, Госэнергоиздат, 1956.
2. Сборник директивных материалов автором обсуждаемой статьи, не доказывают необходимости перехода в распределительных сетях среднего напряжения на работу с глухозаземленной нейтралью. (Электрическая часть), Союзглавэнерго, Госэнергоиздат, 1961.

УДК 621.316.13

Инж. Б. С. ШУЛОВ

Рига

Вопросы, поднятые в статье В. К. Плюгачева, по нашему мнению, актуальны и заслуживают внимания.

При повышении номинального напряжения распределительной сети с 10 до 20 кВ, а также при увеличении длин электрических линий эксплуатация сети с изолированной нейтралью становится недопустимой по условиям безопасности обслуживающего персонала, населения, животных и т. д. Следовательно, можно говорить лишь о способе заземления нейтрали, а не о том, заземлять ее или нет.

Условия работы изоляции линии в зависимости от способов заземления нейтрали для распределительной сети 6—35 кВ изучены совершенно недостаточно. Имеющиеся в литературе данные о перенапряжениях однофазного замыкания на землю относятся к сетям, у которых активное сопротивление принимается равным нулю, что совершенно недопустимо для распределительных сетей 6—35 кВ, у которых, как известно, активное сопротивление обычно превосходит по своей величине реактивное сопротивление проводов. Как показали расчеты, перенапряжения однофазного замыкания на землю на неповрежденных фазах в значительной степени зависят от схемы соединения обмоток питающего трансформатора и электрической удаленности точки короткого замыкания. При осуществлении схемы, приведенной на рис. 2 статьи В. К. Плюгачева, при любом однофазном замыкании на землю фазовая изоляция окажется под линейным напряжением. Это недостаток схемы.

Кривые изменения перенапряжений однофазного замыкания на землю Δ — в зависимости от схемы соединения питающего трансформатора и от активного сопротивления проводов приведены на рис. 1.

При заземлении нейтрали наглухо или через активное сопротивление исключаются дуговые перенапряжения, имеющие опасный и длительный характер. Как известно, при резонансном заземлении нейтрали возможность появления дуговых перенапряжений не исключается.

В связи с тем, что при конструировании выключателей 6—35 кВ, как правило, устройство шунтирующих сопротивлений не предусматривается, коммутационные перенапряжения при отключении ненагруженных линий, АПВ и т. д. достигают значительных величин. Однако при заземлении нейтрали наглухо или через активное сопротивление кратность коммутационных перенапряжений по сравнению с таковыми в сети с изолированной нейтралью снижается в 2—2,5 раза, а по сравнению с сетью с резонансным заземлением — в 1,5—1,73 раза.

При увеличении номинального напряжения линий и росте емкостных токов увеличивается вероятность возникновения резонансных перенапряжений.

Оценивая условия работы изоляции линии, переведенной на более высокое номинальное напряжение, следует учитывать, что импульсный характер наиболее опасных перенапряжений по своей физической природе не совпадает с испытательным напряжением, которым проверяются изоляторы (плавный подъем напряжения). Как показали работы ЛПИ

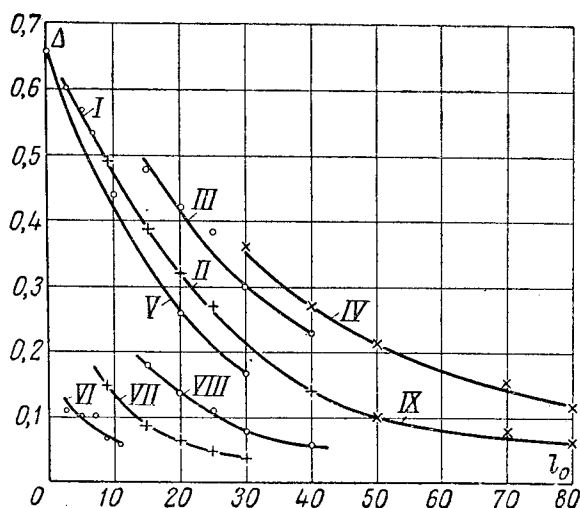


Рис. 1.

Примечание. Питающий трансформатор соединен по схеме «звезда—звезда с выведенной нулевой точкой». Значения x_0/x_1 для кривых I, II, III, IV, V: 6,1; 5,5; 5; 4,4; 1. По схеме «треугольник—звезда с выведенной нулевой точкой». Значения x_0/x_1 для кривых VI, VII, VIII, IX: 1,6; 2; 2,4; 2,8.

им. Калинина, благодаря этому возникает дополнительный запас электрической прочности в размере примерно 30%.

Предложенный В. К. Плюгачевым способ ограничения тока однофазного замыкания на землю выборочным (рассредоточенным) заземлением нейтрали имеет ряд существенных недостатков. Для осуществления этого способа необходимо иметь некоторое количество трансформаторов разной мощности с четвертым выводом высокого напряжения. При кольцевании и взаимном резервировании электросети любое оперативное переключение для ремонта или ревизии линии приведет к расстройке настроенной схемы токораспределения и к необходимости перестройки защиты сети.

По нашему мнению, наиболее перспективно заземление нейтрали через активное сопротивление. При этом ток однофазного короткого замыкания уменьшается до желаемых пределов (3—3,5 $I_{ном}$) и стабилизируется по всей длине линии. Благодаря этому устройство защитных заземлений трансформаторных и переключательных пунктов упрощается, а сопротивление этих заземлений остается в обычных пределах. Конструктивное выполнение активного сопротивления в нейтрали трансформатора на питающей трансформаторной подстанции не вызывает затруднений, так как ток однофазного замыкания на землю протекает через сопротивление в течение короткого времени, определяемого собственным временем срабатывания защиты. Для заземления нейтрали могут быть использованы стандартные сопротивления типа ЯС-190.

При сравнении заземления нейтрали через индуктивное сопротивление (резонансное заземление) с заземлением через активное сопротивление следует учитывать, что затраты на установку заземляющей катушки и устройств для автоматического управления ею по ориентировочным подсчетам в 15—20 раз превышают затраты по установке активного сопротивления в нейтрали. Кроме того, при изменении длины линий и емкостного тока замыкания на землю потребуются периодическая перестройка заземляющей катушки. С другой стороны, при заземлении нейтрали через активное сопротивление несколько увеличится аварийный недоотпуск электроэнергии потребителям в связи с тем, что устойчивые однофазные замыкания на землю приводят к неудачному АПВ и отключению линии. Технико-экономические расчеты, произведенные по данным аварийной статистики Чехословацкой Народной Республики,

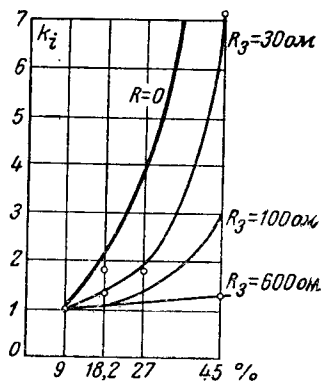


Рис. 2.

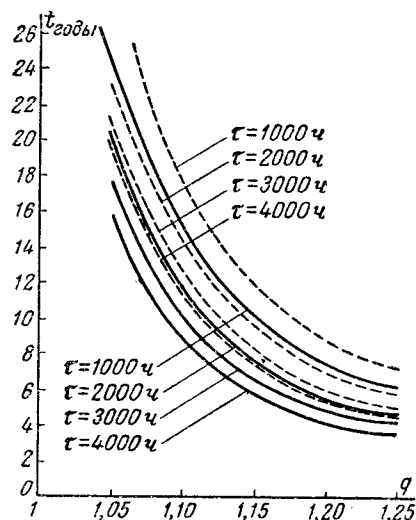


Рис. 3.

Примечание. Сплошные кривые — при реконструкции линий 35 кВ в 110 кВ. Пунктирные — при строительстве новых линий 110 кВ вместо 35 кВ.

показывают, что расчетные затраты для устройства заземления через активное сопротивление на 30% меньше расчетных затрат в сети при устройстве резонансного заземления.

Произведенные технико-экономические расчеты показывают, что реконструкция сети 35/10 кВ будет наиболее экономична при заземлении нейтрали сети 10 кВ и при переводе этой сети на номинальное напряжение 20 кВ без замены линейной изоляции.

Если расчетные затраты на реконструкцию сети устройством глубоких вводов 35 кВ и увеличением количества районных трансформаторных подстанций 35/10 кВ принять за 100%, то расчетные затраты по другим вариантам реконструкции составят:

- При реконструкции подстанций 35/10 кВ в подстанции 35/20 кВ и сети 10 кВ в 20 кВ с заменой линейных изоляторов 92%
- То же с заземлением нейтрали сети 20 кВ (без замены линейной изоляции) 88%
- Одновременная реконструкция сети 35 кВ в сеть 110 кВ и 10 кВ в 20 кВ с реконструкцией районных подстанций и заменой линейных изоляторов 10 кВ на 20 кВ 86%
- То же с заземлением нейтрали сети 20 кВ (без замены линейной изоляции) 82%

Указанные результаты получены на теоретическом макете сети при равномерном распределении электрических нагрузок. В отдельных случаях могут быть более рациональными другие решения. Например, при размещении нагрузок вдоль рек, дорог и т. д. и при наличии линии 35 кВ, проходящей вдоль этой магистрали, увеличение количества подстанций 35/10 кВ или строительство ряда новых подстанций 35/0,4 кВ для сосредоточенных нагрузок окажется более выгодным и легко осуществимым.

Для правильного перспективного планирования и проектирования электрических сетей желательно определять расчетные сроки, в которые необходимо производить их реконструкцию переводом на высшее номинальное напряжение с целью увеличения пропускной способности линий. Решению этой задачи может способствовать предлагаемая ниже формула, выведенная из условия равенства расчетных затрат до и после реконструкции сети:

$$t_r = \frac{\lg M - \lg N}{2 \lg q}$$

где $M = D(P_{II} + K_a) - \Delta A_{x,x} + A_{к.з.}^{II}$;

$$N = (1 - 1/m^2) \frac{3I_0^2 \cdot B \cdot z}{1000} + A_{к.з.}^0$$

НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ КАТУШКИ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ (КОНИЧЕСКАЯ И ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ КАТУШКИ)

Для получения больших напряженностей магнитного поля обычно применяют катушки со стальным магнитопроводом. Однако при повышенных частотах или при весьма сильных полях применение сердечников практически исключается из-за потерь на гистерезис и вихревые токи или из-за ограниченной величины индукции насыщения магнитного материала. В этих случаях источником магнитного поля может служить катушка конусообразной формы.

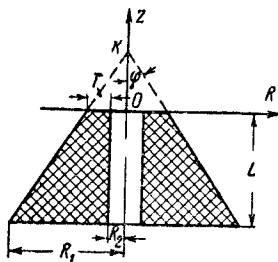


Рис. 1.

В настоящей заметке приведены формулы для расчета напряженности магнитного поля на оси конусообразной катушки при внутренней цилиндрической или конической поверхности. Формулы получены в результате интегрирования дифференциального уравнения магнитного поля элементарного витка. Рассматривается также вытекающий из этих формул частный случай — поле цилиндрической катушки конечной толщины.

Напряженность магнитного поля на оси конусообразной катушки с внутренней цилиндрической поверхностью (рис. 1).

Обозначим:

$$R_{cp} = \frac{R_1 + R_2}{2}; \quad l = \frac{L}{R_{cp}}; \quad t = \frac{T}{R_{cp}};$$

$$m = \frac{l \operatorname{tg} \varphi + t}{2} \quad (m \leq 1); \quad n = \frac{l \operatorname{tg} \varphi - t}{2}.$$

Напряженность магнитного поля в произвольной точке a на оси катушки можно представить в виде:

$$H = \frac{I\omega}{2R_{cp}} \cdot \frac{1}{l \left(m + \frac{t}{2} \right)} A, \quad (1)$$

где $I\omega$ — п. с. катушки.

Значение A определяется по формуле

$$\begin{aligned} A = & (z_a + l) \times \\ & \times \operatorname{Arsh} \frac{(1+m)\sqrt{(z_a+l)^2+(1-m)^2} - (1-m)\sqrt{(z_a+l)^2+(1+m)^2}}{(z_a+l)^2} - \\ & - z_a \operatorname{Arsh} \frac{(1-n)\sqrt{z_a^2+(1-m)^2} - (1-m)\sqrt{z_a^2+(1-n)^2}}{z_a^2} + \\ & + \sin \varphi \cos \varphi \left\{ (1-n - z_a \operatorname{tg} \varphi) \sin \varphi \times \right. \\ & \times \operatorname{Arsh} \frac{[z_a+l + (1+m) \operatorname{tg} \varphi] \sqrt{z_a^2+(1-n)^2} -}{(1-n -} \\ & \rightarrow \frac{-[z_a + (1-n) \operatorname{tg} \varphi] \sqrt{(z_a+l)^2+(1+m)^2}}{-z_a \operatorname{tg} \varphi)^2 \cos \varphi} \\ & \left. - \sqrt{(z_a+l)^2+(1+m)^2} + \sqrt{z_a^2+(1-n)^2} \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Это уравнение имеет особые точки, в которых A принимает следующие значения:

$$\begin{aligned} A_{z_a=0} = & l \times \\ & \times \operatorname{Arsh} \frac{(1+m)\sqrt{l^2+(1-m)^2} - (1-m)\sqrt{l^2+(1+m)^2}}{l^2} + \\ & + \sin \varphi \cos \varphi \left\{ (1-n) \sin \varphi \times \right. \\ & \times \operatorname{Arsh} \frac{l + (1+m) \operatorname{tg} \varphi - \sqrt{l^2+(1+m)^2} \operatorname{tg} \varphi}{(1-n) \cos \varphi} \\ & \left. - \sqrt{l^2+(1+m)^2} + 1 - n \right\}; \quad (2a) \end{aligned}$$

D — затраты на реконструкцию сети;

R_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

q — коэффициент, учитывающий ежегодный прирост нагрузки;

K_a — отчисления от основных средств на амортизацию, обслуживание, управление и текущий ремонт;

$\Delta A_{x,x}$ — изменение стоимости потерь холостого хода до и после реконструкции;

$A_{к.з.}^{\text{II}}$ — стоимость потерь короткого замыкания в силовых трансформаторах после реконструкции;

$A_{к.з.}^0$ — то же, в начальный период (т. е. в момент, от которого ведется отсчет времени);

$m = \frac{U_{\text{II}}}{U_{\text{I}}}$ — соотношение номинальных напряжений линий до и после реконструкции сети;

I_0 — среднеквадратичный ток в линиях в начальный период реконструкции сети;

r — средневзвешенное сопротивление проводов;

B — стоимость 1 квт·ч электроэнергии с учетом стоимости генерирования потерь.

В качестве примера на рис. 3 приведены кривые для определения расчетного срока реконструкции сети 110/35/10 кв в сеть 110/20 кв с заземленной нейтралью в зависимости от темпов роста электрических нагрузок и интенсивности потребления электроэнергии.

Выводы. 1. Заземление нейтрали распределительных сетей при повышении их номинального напряжения требуется по условиям безопасности, которые не могут быть соблюдены в ряде случаев при работе с изолированной нейтралью.

2. При заземлении нейтрали сети в связи со снижением уровней коммутационных и прочих перенапряжений представляется возможным использовать запасы изоляции линии и не менять линейные изоляторы на опорах линий при переводе их на высшее номинальное напряжение.

В последующем, в случае надобности, с целью повышения надежности работы сети и уменьшения аварийного недоотпуска электроэнергии, может быть произведена смена изоляторов 10 кв на 15 или 20 кв в ходе ежегодных ремонтов линий.

3. Для целей реконструкции сети 10 кв наиболее просто и выгодно заземлять нейтраль через активное сопротивление, а не через индуктивность.

4. Заземление нейтрали сети через активное сопротивление уменьшает ток однофазного замыкания на землю до желаемых пределов, чем достигается простота устройства заземлений и надежность защиты линий.

5. Технико-экономические расчеты показывают, что наиболее целесообразно при реконструкции сети одновременно переводить сеть с 10 кв на 20 кв и с 35 кв на 110 кв. Сроки реконструкции могут быть достаточно точно определены по предлагаемой методике.



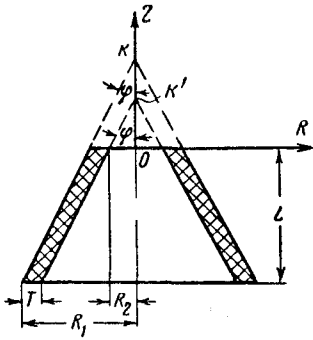


Рис. 2.

в точке $z_a = -l$

$$A_{z_a=-l} = l \times \times \text{Arsh} \frac{(1-n) \sqrt{l^2 + (1-m)^2} - (1-m) \sqrt{l^2 + (1-n)^2}}{l^2} + + \sin \varphi \cos \varphi \left\{ (1+m) \sin \varphi \times \times \text{Arsh} \frac{l - (1-n) \text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi \sqrt{l^2 + (1-n)^2}}{(1+m) \cos \varphi} + + \sqrt{l^2 + (1-n)^2} - (1+m) \right\}; \quad (26)$$

в точке пересечения образующих внешней поверхности (точка k)

$$A_{z_k} = \frac{1-n}{\text{tg } \varphi} \text{Arsh} \left(\frac{1-m}{1-n} \text{tg } \varphi \right) - \frac{1+m}{\text{tg } \varphi} \text{Arsh} \left(\frac{1-m}{1+m} \text{tg } \varphi \right) + + l \text{Arsh} (\text{tg } \varphi) - l \sin \varphi. \quad (2в) \text{ где}$$

$$A^* = (z_a + l) \text{Arsh} \frac{\left(1 + \frac{t}{2}\right) \sqrt{(z_a + l)^2 + \left(1 - \frac{t}{2}\right)^2} - \left(1 - \frac{t}{2}\right) \sqrt{(z_a + l)^2 + \left(1 + \frac{t}{2}\right)^2}}{(z_a + l)^2} - - z_a \text{Arsh} \frac{\left(1 + \frac{t}{2}\right) \sqrt{z_a^2 + \left(1 - \frac{t}{2}\right)^2} - \left(1 - \frac{t}{2}\right) \sqrt{z_a^2 + \left(1 + \frac{t}{2}\right)^2}}{z_a^2}. \quad (6)$$

Напряженность магнитного поля на оси конусообразной катушки с внутренней конусообразной поверхностью (рис. 2). При тех же обозначениях, что и в предыдущем случае, представим напряженность поля в произвольной точке на оси катушки в следующем виде:

$$H = \frac{I\omega}{2R_{cp}} \cdot \frac{1}{lt} \cdot (A - B). \quad (3)$$

Здесь A определяется так же, как и для катушки с внутренней цилиндрической поверхностью, и имеет те же особые точки. Значение B определяется по формуле

$$B = (z_a + l) \times \times \text{Arsh} \frac{(1+n) \sqrt{(z_a + l)^2 + (1-m)^2} - - (1-m) \sqrt{(z_a + l)^2 + (1+n)^2}}{(z_a + l)^2} + + \sin \varphi \cos \varphi \left[(1-m - z_a \text{tg } \varphi) \sin \varphi \times \right.$$

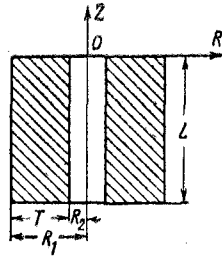


Рис. 3

$$\times \text{Arsh} \frac{[z_a + l + (1+n) \text{tg } \varphi] \sqrt{z_a^2 + (1-m)^2} - - [z_a + (1-m) \text{tg } \varphi] \sqrt{(z_a + l)^2 + (1+n)^2} - - z_a \text{tg } \varphi)^2 \cos \varphi}{(1-m - - \sqrt{(z_a + l)^2 + (1+n)^2} + \sqrt{z_a^2 + (1-m)^2}}]. \quad (4)$$

В особых точках B принимает следующие значения: в точке $z_a = -l$

$$B_{z_a=-l} = \sin \varphi \cos \varphi \left[(1+n) \sin \varphi \times \times \text{Arsh} \frac{l - (1-m) \text{tg } \varphi + \text{tg } \varphi \sqrt{l^2 + (1-m)^2}}{(1+n) \cos \varphi} + + \sqrt{l^2 + (1-m)^2} - (1+n) \right]; \quad (4а)$$

в точке пересечения образующих внутренней поверхности (точка k')

$$B_{z_{k'}} = \frac{1+n}{\text{tg } \varphi} \left[\text{Arsh} (\text{tg } \varphi) - \text{Arsh} \left(\frac{1-m}{1+n} \text{tg } \varphi \right) \right] - l \sin \varphi. \quad (4б)$$

Напряженность магнитного поля на оси цилиндрической катушки (рис. 3). Расчет магнитного поля цилиндрических катушек подробно освещен в литературе (см., например, [Л. 1-3]). Представляют, однако, интерес условия, при которых расчет напряженности поля на оси цилиндрической катушки может быть выполнен по простейшей формуле для однослойного соленоида.

Цилиндрическая катушка является частным случаем поля конусообразной катушки. При этом формулу (1) можно представить в виде:

$$H = \frac{I\omega}{2R_{cp}} \cdot \frac{1}{lt} \cdot A^* \quad \left(\frac{t}{2} \ll 1 \right), \quad (5)$$

Известно, что поле на оси однослойного соленоида рассчитывают по формуле

$$H^0 = \frac{I\omega}{2R_{cp}} \cdot \frac{1}{lt} \cdot A_0^*, \quad (7)$$

где

$$A_0^* = t \left[\frac{z_a + l}{\sqrt{1 + (z_a + l)^2}} - \frac{z_a}{\sqrt{1 + z_a^2}} \right]. \quad (8)$$

Анализ показывает, что формулы (6) и (8) практически совпадают при $t_2 \ll 12$.

Литература

1. Страховский Г. М. и Кравцов Н. В., Сильные магнитные поля, Успехи физических наук, т. 70, вып. 4, 1960, апрель.
2. Акользина Л. А., Поле многослойного цилиндрического соленоида, «Электричество», 1953, № 7.
3. Marother D. E., Snyder J. N., Axial variation of magnetic field in solenoids of finite thickness, «University of Illinois Bulletin», v. 52, 1955, April.

Инж Г. Р. СОЛОВЬЕВА

К ИЗМЕРЕНИЮ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ АРОНА

Общезвестно, что мощность в трехфазной системе без нулевого провода измеряется методом Арона с помощью двух ваттметров (рис. 1). Если векторные диаграммы напряжений и токов симметричны, то показания ваттметров определяются уравнениями

$$\begin{cases} P_1 = UI \cos(\varphi + 30^\circ); \\ P_2 = UI \cos(\varphi - 30^\circ); \end{cases} \quad (1)$$

из которых следует выражение, определяющее сдвиг по фазе:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{-P_1 + P_2}{P_1 + P_2}. \quad (2)$$

По показаниям обоих ваттметров можно быстро определять реактивную мощность Q , полную мощность S , ток I и угол φ . Для этого через начало координат комплексной плоскости проведем две прямые под углами $+60^\circ$ и -60°

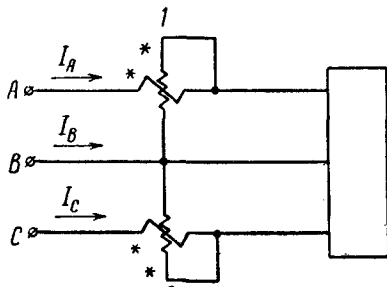


Рис. 1.

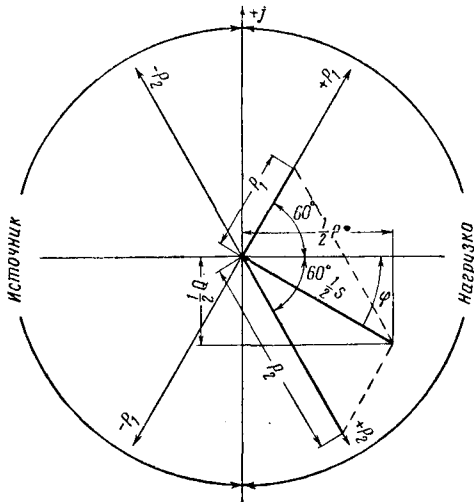


Рис. 2.

к оси действительных величин. На первой прямой в некотором масштабе будем откладывать показания ваттметра 1, а на второй — в том же масштабе показания ваттметра 2 (рис. 2). Далее построим параллелограмм со сторонами P_1 и P_2 , для которого справедливо соотношение

$$P_1 e^{+j60^\circ} + P_2 e^{-j60^\circ} = \frac{1}{2} S e^{j\varphi}. \quad (3)$$

Действительно, разделив действительные и мнимые части, получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} -P_1 + P_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} S \sin \varphi; \\ P_1 + P_2 &= S \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Поделив первое уравнение на второе, получим выражение (2), т. е. видим, что угол φ в уравнении (3) соответствует сдвигу по фазе.

Возведя в квадрат уравнения (4), получим выражения

$$S^2 \cos^2 \varphi = (P_1 + P_2)^2; \quad S^2 \sin^2 \varphi = 3(P_1 - P_2)^2,$$

сложив которые, определим длину диагонали параллелограмма

$$\frac{1}{2} S = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_1 P_2}. \quad (5)$$

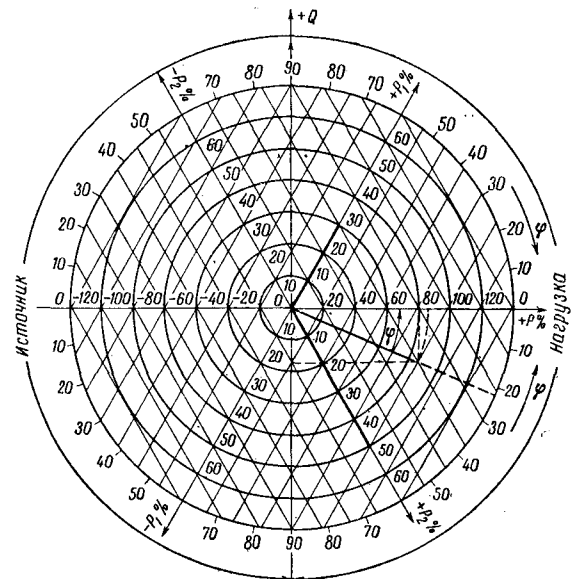


Рис. 3.

Сравнивая уравнения (1) с уравнением (5), нетрудно установить, что величина S в уравнении (3) равна полной мощности $S = \sqrt{3} UI$. Очевидно, наконец, что для рис. 2 справедливы соотношения $P = S \cos \varphi$ и $Q = S \sin \varphi$, а диагональ S в некотором масштабе дает вектор тока.

На рис. 3 дана диаграмма для расчета по показаниям ваттметров полной и реактивной мощностей и угла сдвига по фазе. Все мощности на диаграмме откладываются в процентах, где за 100% принята наибольшая измеряемая данными ваттметрами активная мощность. Ясно, что при необходимости сетка, образуемая прямыми и окружностями, может быть сделана более мелкой, чем показано на рис. 3.

Пример. Измерения производятся с помощью ваттметров 220 в, 10 а, т. е. 100% активной мощности равны $\sqrt{3} \times 0,220 \cdot 10 = 3,82$ квт. Показания ваттметров: $P_1 = 30\%$, $P_2 = 50\%$.

По диаграмме на рис. 3 находится $\varphi = 23^\circ$ (индуктивный), $S = 87\%$ (3,32 квт); $P = 80\%$ (3,06 квт); $Q = 34,4\%$ (1,32 квар).

Проф. Р. ДРЕХСЛЕР

Чешское высшее техническое училище, Прага



Профессор С. А. УЛЬЯНОВ

(К 60-летию со дня рождения)

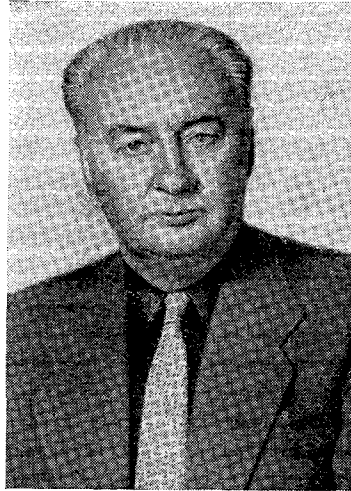
Профессору Сергею Александровичу Ульянову, заведующему кафедрой «Электрические станции» Московского энергетического института в октябре минувшего года исполнилось 60 лет.

Трудовая жизнь С. А. Ульянова началась рано, когда ему было 17 лет. Учился в средней школе и в высшем техническом учебном заведении, он работал чертежником и техником на предприятиях, а за 2 года до окончания МВТУ, в 1925 г., пришел в МОГЭС (Мосэнерго), где занимал ряд инженерных должностей. В МОГЭС С. А. Ульянов проработал до 1934 г., преимущественно в диспетчерской службе, — дежурным диспетчером и заместителем главного диспетчера.

В то время энергосистемы только создавались, и С. А. Ульянов уделил много сил разработке методики управления ими, оснащению диспетчерских пунктов, особенно методике расчета переходных процессов. По его проектам и под его руководством были спроектированы и созданы полуавтоматический диспетчерский щит и один из первых расчетных столов для определения токов и напряжений при коротких замыканиях.

Результаты, достигнутые С. А. Ульяновым, широко использовались в других энергосистемах страны, а также при подготовке специалистов в наших высших учебных заведениях.

Этому благоприятствовало то обстоятельство, что сразу же после окончания МВТУ в 1927 г. С. А. Ульянов остался в аспирантуре училища, а в 1929 г. — здесь же был зачислен ассистентом. В 1931 г. ему было присвоено звание доцента в МЭИ, а в 1937 г. — ученая степень кандидата технических наук. В 1946 г. С. А. Ульянов назначается заместителем заведующего кафедрой, а в 1950 — заведующим кафедрой «Элек-



трические станции». В 1962 г. ему присвоено ученое звание профессора.

Сергей Александрович много труда и любви вложил в методику преподавания дисциплин кафедры, в организацию учебного процесса и лабораторий кафедры. Им созданы курсы «Токи короткого замыкания» и «Переходные процессы в энергетических системах». Написанные им учебники выдержали пять изданий.

Педагогическая работа С. А. Ульянова тесно сочеталась с научно-исследовательской. Результаты его исследований внедрялись в практику и широко использовались в учебном процессе. Сергей Александрович принимал активное участие в составлении «Правил устройства электроустановок» и «Руководящих указаний по расчету коротких замыканий».

К научно-исследовательским работам С. А. Ульянов широко привлекает своих учеников. Многие его аспиранты успешно защитили диссертации, стали видными научными работниками. Свои знания и результаты научных поисков он охотно передает также инженерам, занятым на производстве, — им прочитан ряд систематических циклов лекций для работников энергетических систем. Долгое время С. А. Ульянов занимался и заочным обучением, руководя по совместительству кафедрой «Электрические станции» Всесоюзного заочного политехнического института.

Сергеем Александровичем Ульяновым опубликовано свыше 30 печатных работ — книг, учебников, статей в журналах и сборниках. Его педагогическая и научная работа отмечена орденом Трудового Красного Знамени, тремя медалями. Он неоднократно награждался также значком Отличника социалистического соревнования.

**Г. С. БОРЧАНИНОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ,
В. А. ВЕНИКОВ, П. Г. ГРУДИНСКИЙ,
Д. В. РАЗЕВИГ, Н. И. СОКОЛОВ,
Н. И. СОЛОВЬЕВ, А. М. ФЕДОСЕЕВ**

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА „ЭНЕРГИЯ“

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Публикуя список книг по теоретическим вопросам электротехники, автоматике, вычислительной и измерительной технике, намеченных к выпуску в Издательстве «Энергия», в 1964 г., Издательство просит Вас сообщить ваши замечания и предложения по нему.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч. I. Линейные электрические цепи. Изд. 2-е. 28 л.

Золотарев Т. Л. и Штейнгауз Е. О. Энергетика и электрификация СССР. 18 л.

Левинштейн М. Л. Операционное исчисление и его применение в задачах электротехники. 25 л.

Леонов А. П. Задачник по электротехнике. 8 л.

Рабинович Э. А. и Сургучев В. Д. Сборник задач по общей электротехнике. Изд. 3-е. 13 л.

Сверхпроводимость и ее применение в электротехнике. Сборник переводов статей под ред. Б. М. Тареева. 10 л.

Том А. и Эйпелт С. Числовые расчеты полей в технике и физике. Пер. с англ. 12 л.

Энергетика мира и перспективы ее развития. Сборник переводов под ред. К. Д. Лаврененко. 27 л.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Кремниевые управляемые вентили. Технический справочник. Пер. с англ. 20 л.

Лившиц М. Н. и Моисеев В. М. Электрические явления в аэрозолях и их применение. 20 л.

Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Пер. с нем. 30 л.

АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА

Власов И. П. Теория следящих систем, работающих на переменном токе. 18 л.

Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования. Т. I. Линейные системы регулирования одной величины. 20 л.

Горяинов О. А. и Райнес Р. Л. Телеуправление. Изд. 2-е. 30 л.

Ицкович Э. Л. Применение статистического метода при автоматизации технологических процессов. 9 л.

Кениг Г. и Блякуэлл. Теория электромеханических систем. Пер. с англ. 30 л.

Робишо Л., Буазвер М. и Робер Ж. Направленные графы. Пер. с франц. 16 л.

Романов В. А. Введение в автоматизацию производственных процессов (Автоматизация типовых производственных процессов). 25 л.

Ротач В. Я. Импульсные системы автоматического регулирования. 10 л.

Теллер Дж. и Пестель М. Анализ и расчет нелинейной системы автоматического управления. Пер. с англ. 28 л.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Белостоцкий А. А., Вальденберг Ю. С. и др. Применение вычислительных машин для автоматизации производственных процессов. 12 л.

Васильев В. Г. и др. Электронное моделирование промышленных электроприводов. 10 л.

Вычислительная техника. Т. I. Аналоговые вычислительные машины. Пер. с англ. Под ред. Г. Хаски и Г. Корн. 65 л.

Вычислительная техника. Т. II. Цифровые вычислительные машины. Пер. с англ. Под ред. Г. Хаски и Г. Корн. 65 л.

Догановский С. А. Вычислительные устройства в автоматических системах управления по возмущению. 20 л.

Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтез схем. 15 л.

Сучилин А. М. Основы счетно-решающей техники (Моделирование и вычислительная техника). 25 л.

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Будейко В. Б. Резонансные четырехполосники и их применение в вычислительной технике. 10 л.

Коссов О. А. Усилители мощности на переключающих транзисторах. 15 л.

Крайзмер Л. П. Запоминающие устройства на ферромагнитных материалах. 25 л.

Миловзоров В. П. Электромагнитная техника. 25 л.

Пирогов А. И. и Шемаев Ю. М. Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. 12 л.

Тищенко Н. М. Стабильность магнитных усилителей. 10 л.

Электрические контакты (Труды совещания, декабрь, 1962). 25 л.

Юревич Е. И. Электромагнитные и электромеханические устройства автоматики (Элементы автоматических телемеханических устройств). 25 л.

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Апокин И. А. и Кипаренко Г. Ф. Тонкие магнитные пленки в электронной технике. 4 л.

Бергштейн С. Г. Устройства для импульсного управления электроприводом. 5 л.

Бондаренко П. С. Автоматизация систем поточного транспорта. 5,5 л.

Бровман Я. С., Каган В. Г. и Кочубиевский Ф. Д. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы с электромашинными преобразователями. Под ред. М. Г. Чиликина. 5 л.

Бровман Я. С., Каган В. Г., Кочубиевский Ф. Д. и Найдис В. А. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы постоянного тока с электромашинными усилителями. Под ред. М. Г. Чиликина. 5 л.

Бруфман С. С. Цифровые индикаторы. 4 л.

Глаговский Б. А. и Пивен Н. И. Электрогензомеры сопротивления. 4,5 л.

Иванчук Б. Н., Липман Р. А. и Рувимов Б. Я. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Усилители постоянного тока на полупроводниковых управляемых вентилях. Под ред. М. Г. Чиликина. 5 л.

Искандарян А. А. Пробоотборники жидкостей и газов. 5 л.

Конев Ю. И. Транзисторные импульсные устройства управления электродвигателей и электромагнитных механизмов. 8 л.

Левин Г. М. и Гольденталь М. Э. Реверсивный ионный электропривод. 5 л.

Миллер Е. В. Бесконтактные логические элементы на полупроводниках и их применение. 5 л.

Минскер Э. И. Электрическое управление в машиностроительных автоматических линиях. 5 л.

Могилевский В. Г. Электромагнитные порошковые муфты и тормоза. 6 л.

Перов В. И. Электрические микромашины автоматических устройств с применением магнитно-твердых и полупроводниковых материалов. 5 л.

Петровский А. Я. и Розман Я. Б. Нереверсивный регулируемый электропривод с магнитными усилителями. 5 л.

Разумихин М. А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. 5 л.

Разыграев А. М. Структурный синтез электросхем металлорежущих станков. 5 л.

Ратмиров В. А. и др. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы с шаговыми двигателями. Под ред. М. Г. Чиликина. 8 л.

Ступель Ф. А. Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин. 6 л.

Татур О. Н. и др. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы с электромагнитными муфтами. Под ред. М. Г. Чиликина. 5 л.

Тун А. Я. Наладка бесконтактной аппаратуры автоматического управления. 5 л.

Тун А. Я. и Иванов А. О. Наладка контактно-релейной аппаратуры и тормозов. 7 л.

Федин В. В. Электрохимические и электрокинетические преобразователи. 4 л.

Черевычник Ю. К. Приборы тлеющего разряда в вычислительной технике. 5 л.

Шумиловский Н. Н., Мельцер Л. В. и Каламаков А. А. Радиоизотопные методы автоматического контроля состава сложных сред. 5 л.

Электроприводы с полупроводниковым управлением. Полупроводниковые управляемые вентили. Под ред. М. Г. Чиликина. 5 л.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Полупроводниковые приборы в измерительной технике. Пер. с нем. 12 л.

Серия «Электроизмерительные приборы»

Векслер М. С. Электростатические приборы. 5 л.

Илюкович А. М. Счетчики постоянного тока. 4 л.

Митников А. И. Омметры и мегомметры. 5 л.

Нижний С. М. и Будницкая Е. А. Меры и магазины емкости индуктивности и взаимной индуктивности. 5 л.

Нижний С. М. и Кабальчик Н. В. Мосты переменного тока. 5 л.

Рабинович С. Г. Фотогальванометрические усилители. 5 л.

Ходеев И. К. Переносные амперметры, вольтметры и ваттметры переменного тока. 5 л.

Книги по электроснабжению и электротермии — см. журнал «Промышленная энергетика», 1964, № 1; по электроэнергетике — «Электрические станции»,

1964, № 1; по электрическим машинам, трансформаторам, аппаратам, электроприводу и электротехническим материалам — «Электротехника», 1964, № 1; по светотехнике — «Светотехника», 1964, № 1.

Пишите нам по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, д. 10, Издательство «Энергия».

Своевременно заказывайте необходимую вам книгу до выхода ее в свет.

Предварительные заказы принимаются во всех книжных магазинах, имеющих отделы технической книги.

Издательство никаких заказов не принимает.



ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

В моей статье «Общая формула потерь мощи и вычисление удельных приростов потерь», опубликованной в журнале «Электричество» № 7 за 1962 г., допущена ошибка в уравнениях (29)—(34) (стр. 4), которая исправлена в 3-м издании моей книги «Режимы работы систем» (на стр. 258—259).

И. М. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л. А. Бессонов, Н. И. Борисенко, Г. В. Бутневич, Т. П. Губенко, А. Д. Дроздов, Н. Г. Дроздов (главный редактор), Л. А. Дубинский, Л. А. Жекулин, А. М. Залесский, М. П. Костенко, В. С. Кулебакин, Л. Г. Мамиконянц, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, И. М. Постников, С. И. Рабинович, Б. С. Сотсков, И. А. Сыромятников, Ю. Г. Толстов, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2. Телефон: К 4-24-80.

Почтовый адрес: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Сдано в пр-во 19/XI 1963 г.
Формат бумаги 60×92¹/₈
Т-17422

12 п. л.
Тираж 11 170

Подписано к печати 28/XII 1963 г.
Уч.-изд. л. 14,8
Заказ 615

Московская типография № 10 «Главполиграфпрома» Государственного комитета Совета Министров СССР по печати
Шлюзовая наб., 10.

СТЕКЛЯННЫЕ ТРУБКИ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Мы изготавливаем трубки из стекла с очень малыми допусками самыми современными и эффективными методами. Они изготавливаются поточным способом, чтобы обеспечить потребности производителей флуоресцентных ламп.

Мы изготавливаем также с той же высокой точностью трубки диаметром от 1,30 до 38,00 мм из стекла с примесью свинца. Это стекло используется как в флуоресцентных лампах, так и в лампах накаливания. Указанные трубки применяются в то же время в качестве важных частей малых электронных приборов, для которых точность размера очень важна.

Кроме указанных изделий, мы изготавливаем:

**СДВИЖНЫЕ КРЫШКИ И ПРЕДМЕТНЫЕ СТЕКЛА
ДЛЯ МИКРОСКОПОВ**

ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМЫЕ ПОДКОЖНЫЕ ШПРИЦЫ ИЗ СТЕКЛА

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ШТАМПОВКИ
СТЕКЛО ДЛЯ ФАР АВТОМОБИЛЕЙ**

**За дальнейшей информацией просим
обращаться по адресу:**

THE SALES MANAGER,
CHANCE BROTHERS LIMITED,
GLASSWORKS, SMETHWICK 40,
BIRMINGHAM, ENGLAND, АНГЛИЯ



РУЧНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРЕССЫ

Типа РН-3. Сила пресса 5 т.

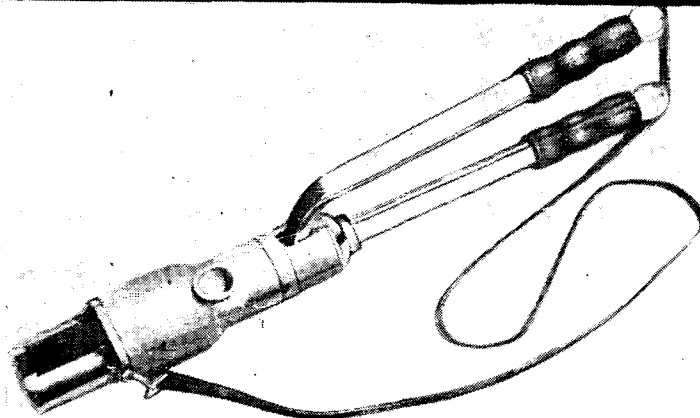
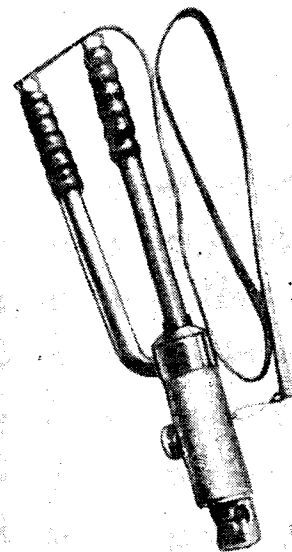
Вес пресса 2,8 кг.

Типа РН-4. Сила пресса 10 т.

Вес пресса 3,65 кг.

Ручные гидравлические прессы просто и надежно соединяют методом холодной спрессовки провода и наконечники из алюминия и меди диаметром от 6 до 120 мм.

В 1963 г. пресс типа РН-4 был отмечен дипломом на Международной ярмарке в Лейпциге.



Импортер В/О «Машиноимпорт». Москва, Г-200, Смоленская — Сенная 32/34

Экспорт только через «METALEXPORT». Warszawa, Mokotowska, 49, Польша.

 **METALEXPORT**
WARSAWA