

1933

„Коммунизм—есть советская власть
и любовь электрификации всей страны“
ЛЕНИН

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 6-7

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

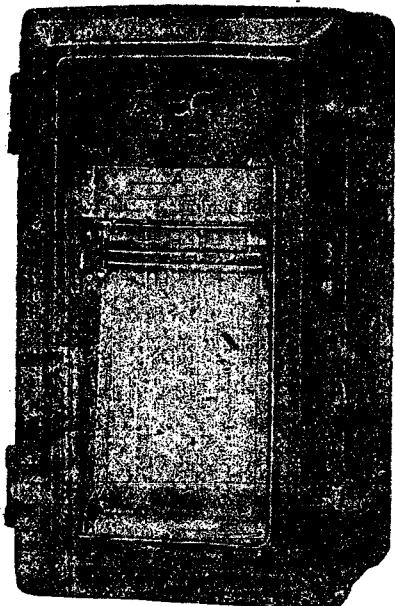
Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru



СКВА
НГРАД

Измерительные приборы

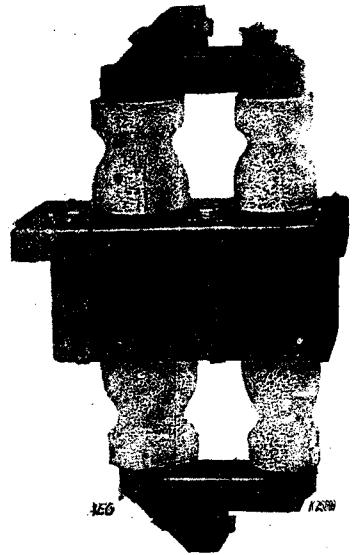
высшей точности для всех целей



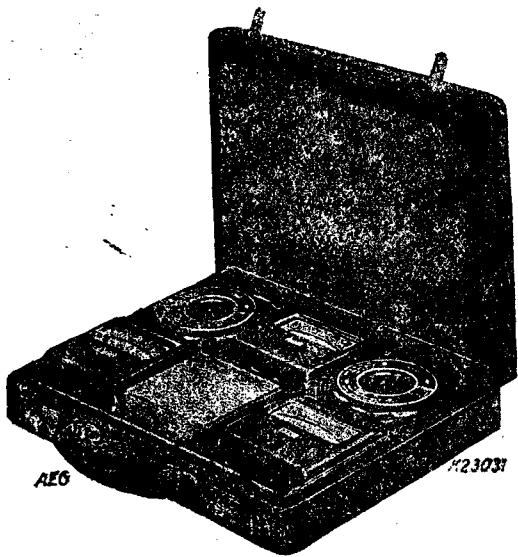
Регистрирующие приборы

AEG

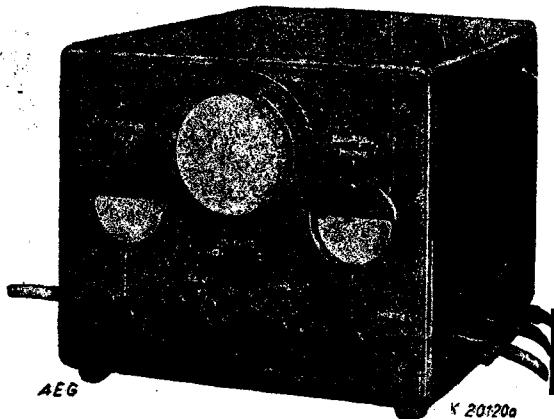
Электрич. измерения
контроль
температуры
контроль
эксплоатации
и т. д.



Трансформат. тока
для больших токов кор. зм.



Переносн. точн. приборы



Электронный осциллограф

Печатный материал по первому требованию

Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft

Abt. Rußland

Berlin NW 40

Alexander-Ufer 34

6604

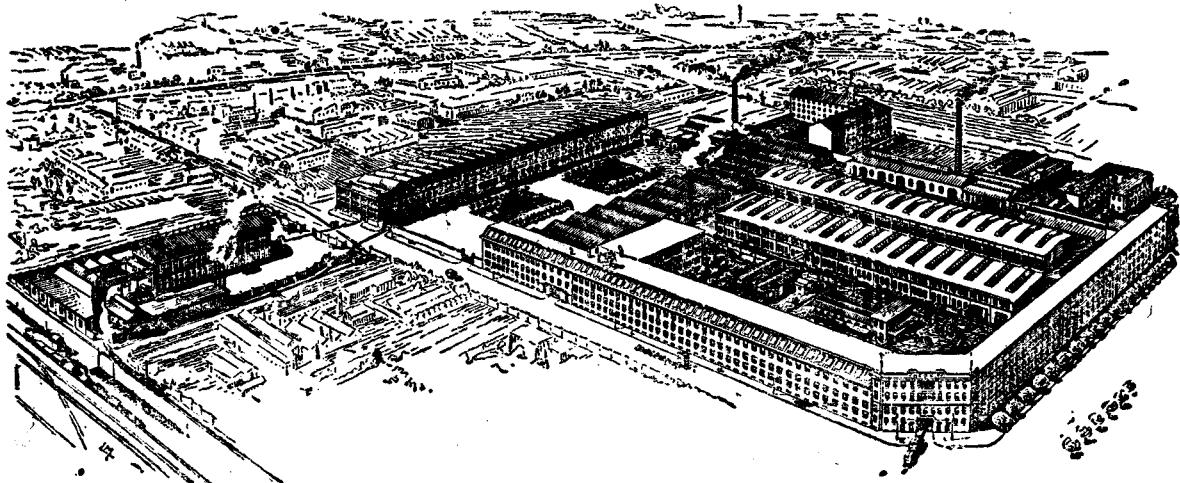
ЭЛЕКТРОВОЗЫ

Генераторы

Моторы

Трансформаторы

Электрооборудование



ЗАВОДЫ В МИЛАНЕ

**COMPAGNIA GENERALE
DI ELETTRICITA'**

VIA BORGOGNONE, 34 - MILANO

(ИТАЛИЯ)

Всюду, где приходится ввертывать шурупы одинаковых размеров при серийной и поточной работе, с успехом применяются механические

ОТВЕРТКИ ФЛЕКС



Ф
Л
Е
К
С

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОТВЕРТКА ФЛЕКС
на конвейере электротехнического завода

ACKERMANN & SCHMITT
SPEZIALMASCHINENFABRIK
Stuttgart 13, Postfach 28 35 (Германия)



„INREKLAMA“

AUSLÄNDISCHER REKLAME-UND
ANNONCEDIENST

Moskau, Roshdestvenka 19/10

Die Anzeigenwerbung für unsere
Zeitschrift in Deutschland, Österreich, Tschechoslowakei, Holland,
Schweden, Norwegen und Dänemark
besorgt ausschließlich
das Reklamebüro „INREKLAMA“
durch seine Vertretung Industrie-
und Handelsreklame

„TORGPROM“, G. m. b. H.

Berlin, W 35, Kurfürstenstrasse 33

Проспекты и пробные номера бесплатно.

СТАНКИ

для двойной и тройной обмотки
проводок

с 2, 4 и 6 ходами для проволоки
от 0,5 до 6 мм диам. и
от 0,5 до 2,5 мм диам.

Принудительный съем дает полную равномерность обмотки.

*

Машины

для свивания кабелей различных размеров

Лучшие отзывы. Умеренные цены

Jak. Ruegg

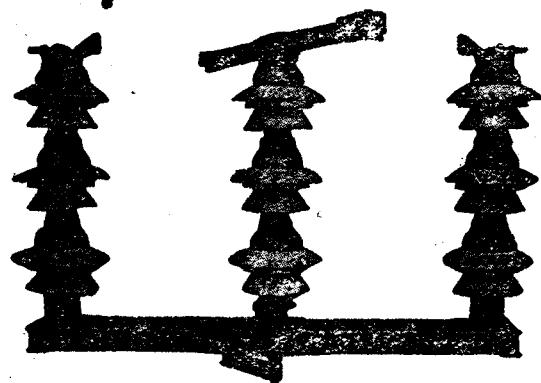
GIESSEREI UND MASCHINENFABRIK

Schwalbe Fahrradwerke
Uster (Швейцария)

6679

I.F.I

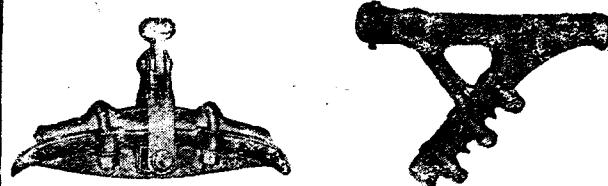
МИЛАН Муссолини №5 ИТАЛИЯ



Трехполюсные измерительные выключатели до 230 кВ.

Более 2000 наборов на заводе

Арматуры высокого напряжения



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

6-7

1933

Орган ВЭО и ГЛАВЭНЕРГО НКТП, Энергетического института Академии наук СССР и Всесоюзного энергетического научного инженерно-технического общества (ВЭНИТО)

Адрес редакции: МОСКВА, Ильинка, Ильинский п., 2, 1-й эт. Тел. 72-46 и 1-57-19

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.	Стр.		
М. П. Бронштейн—Физика атомного ядра	1	Инж. Л. Е. Машкиллейсон и проф. Г. Т. Третьяк—	40
Н. А. Черданцев—Основные принципы конформных преобразований и их применения в электротехнике	10	Выбор типа мощного выключателя на 380 кВ	40
Е. Чернышева—Пропускная способность линии передачи с трансформаторами по концам и настройка линии на $1/2$ волны напряжения	19	Инж. П. Г. Седов—Базисные сопротивления в расчетах токов коротких замыканий	45
Б. И. Певзнер—Электрический расчет сложных систем	24	Инж. Л. Е. Машкиллейсон—Замечания к статье т. Буйлова „К исследованию высоковольтных выключателей на разрыв тока короткого замыкания“	48
А. А. Воронов—Влияние высших гармоник кривой напряжения на работу статических конденсаторов, устанавливаемых для исправления коэффициента мощности	30	Инж. А. Я. Буйлов—Еще об установке для испытания мощных выключателей	50
К. С. Архангельский, инж. П. И. Войденов и инж. А. И. Хмельницкий—Разряд в воздухе и в масле при промышленной частоте и при импульсах	33	Инж. Е. Н. Приклонский—Допустимые падения напряжения в низковольтных осветительных сетях	54
		Инж. Е. К. Попов—Необходим ли для промышленного предприятия отдельный световой трансформатор	57
		Библиография	63
		Хроника	63
		Аннотации	65

ТЮРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Физика атомного ядра

М. П. Бронштейн

Ленинградский физико-технический институт

От редакции.

Развитие физики атомного ядра сделало громадные шаги за последние годы. В результате глубокого проникновения человеческой мысли в тайну строения первичной клеточки материи практически поставлен и частично разрешен вопрос о разрушении атомного ядра. Мечты лучших умов науки о подчинении человеку неисчислимых запасов энергии, сокрытой в недрах этого ядра, на наших глазах превращаются в реальную задачу ближайшего будущего.

Но в то время как в капиталистическом мире решение этой проблемы не принесет и не может принести улучшения материального положения колоссального большинства трудящегося населения, а будет использовано лишь кучкой эксплоататоров в целях наживы и еще большего закабаления трудящихся, в СССР, стране строящегося социализма, практическое осуществление этой задачи послужит толчком к необычайному прогрессу материальной и духовной культуры всех трудящихся.

С особой гордостью мы отмечаем, что советская наука в этой области, несмотря на ее молодость, уже достигла лучших мировых показателей (работы Харьковского и Ленинградского институтов).

Ниже мы помещаем статью т. М. П. Бронштейна „Физика атомного ядра“, содержащую интересный физический материал и дающую очерк развития физики атомного ядра за последние годы.

Вместе с этим отмечаем, что в отношении принципиальных установок и методологического подхода в статье имеется ряд весьма спорных положений и формулировок. В частности, приводимая автором трактовка о несостоительности закона сохранения энергии не является обоснованной.

§ 1. Основные понятия

Исследование атомного ядра было открыто Резерфордом, когда он предпринял свои знаменитые исследования строения атома. Основная идея Резерфорда заключалась в том, что воспользоваться в качестве „зонда“ для

исследования атомных глубин α -частицами, испускаемыми радиоактивными веществами и летящими с огромной скоростью (в несколько раз меньше скорости света). Каждая α -частица обладает массой, равной учетверенной массе атома водорода, и положительным зарядом, равным удвоенному элементарному заряду (масса водородного атома

равна $1,66 \cdot 10^{-24}$, а элементарный заряд равен $4,77 \cdot 10^{-10}$ абсолютных единиц заряда; абсолютная единица заряда в 3 млрд. раз меньше кулона). Вследствие своей огромной скорости α -частицы глубоко проникают внутрь атома; благодаря своему электрическому заряду они чувствительны к присутствию электрических полей: когда α -частица попадает в электрическое поле, она испытывает действие сил, которые сбивают ее с первоначального пути. Поэтому α -частица и может служить зондом для исследования глубины атома. Опыты Резерфорда показали, что в общем пучок α -частиц, падающих на атомы (например, на какой-нибудь металлический листок), испытывает небольшое рассеяние в различные стороны, соответствующее каким-то сравнительно небольшим электрическим полям. Но среди большого числа α -частиц всегда есть несколько таких, которые отклоняются от своего первоначального направления пути не на маленький, а на очень большой угол, вплоть до 180° . Это значит, что некоторые α -частицы попадают в электрические поля чудовищной силы, вплоть до таких, которые своим отталкиванием заставляют α -частицу повернуть назад и уйти обратно в направлении, прямо противоположном направлению ее прихода.

Откуда могут взяться в атоме, который в це-

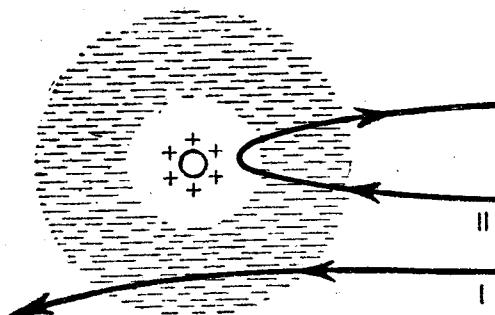


Рис. 1

лом электрически нейтрален, такие чудовищные отталкивания? Единственный возможный ответ на этот вопрос заключается в том, что атом устроен так, как показано на рис. 1, а именно, что он состоит из положительно заряженного ядра, окруженного облаком отрицательного заряда. Если α -частица падает на атом по траектории I, то она не может попасть в очень сильные электрические поля, так как ядро ее отталкивает, а отрицательное облако притягивает, и оба эти действия почти компенсируются, так что в результате α -частица испытывает действие очень маленькой силы и „рассеивается“ на очень небольшой угол. Однако среди α -частиц есть некоторое (очень маленькое) число таких, которым посчастливится налететь на атом лобовым ударом (по траектории II) и проникнуть в атом на небольшое расстояние от ядра. Вот тут-то и скажутся чудовищные силы отталкивания, так как, когда α -частица подошла к самому ядру, электроны будут ее тянуть к себе в противоположные стороны, и их действие практически будет равно нулю, в то время как отталкивание от ядра, очень большое вследствие малого расстояния между ядром и проникнувшей вглубь атома α -частицей, останется нескомпенсированным ничем. Если мы хотим рас- считать то расстояние, до которого может при-

близиться к ядру α -частица, то мы можем пред- беречь действием отрицательного облака.

Если у α -частицы первоначально была кине- ческая энергия E , то по мере приближения к ядру эта кинетическая энергия будет все время уменьшаться, переходя в потенциальную энергию отталкивания от ядра. Если заряд ядра равен e , где e — элементарный заряд, то на расстоянии r от α -частицы, обладающей зарядом $2e$, энергия отталкивания будет по закону Кулона равна

Ясно, что α -частица, налетающая на ядро лобовым ударом, будет продвигаться вперед, пока кинетическая энергия не исчерпается и не превратится в потенциальную полностью. Это случится на расстоянии r , удовлетворяющем уравнение

$$\frac{2Ze^2}{r} = E. \text{ После этого } \alpha\text{-частица совсем останется,}$$

затем повернет обратно и, гонимая отталкиванием от ядра, будет уходить назад со возрастающей скоростью.

Изучение строения атома позволило определить массу и заряд всех существующих в природе ядер. Как известно, масса ядра определяется сложением M , которое показывает, во сколько раз больше массы водородного атома, а зарядом Z , показывающим, во сколько раз заряд превосходит элементарный заряд e . Числа M всегда оказываются целыми. Всякое ядро с целыми числами M и Z состоит из M протонов и $M-Z$ электронов. Если взять за единицу массу водородного атома, считая массу электрона практически равной нулю, то комбинация из протонов и $M-Z$ электронов будет обладать массой, равной M , и зарядом $M(+e) + (M-Z)(-e) = (M - (M - Z)) = Ze$. Для ядра водородного атома ($M=1$, $Z=1$) это дает число приведенных равным 1, а число электронов равным 0; водородное ядро есть не что иное, как протон. Для ядра атома гелия ($M=4$, $Z=2$) это 4 протона и 2 электрона; для ядра железа ($M=26$, $Z=26$) это дает 56 протонов и 30 электронов, и т. д. Ядро самого тяжелого атома, урана ($M=92$, $Z=238$), состоит из 238 протонов и 146 электронов.

Эта „гипотеза“ в настоящее время может считаться твердо доказанным фактом. Доказательство заключается в том, что существует множество таких явлений, в которых ядро распадается на свои составные части. Давно известным мером является радиоактивность. Существуют ядер (наиболее тяжелых элементов), которые произвольно распадаются, выбрасывая из ядра частицу, масса и заряд которой такие же как у ядра гелия, что с нашей точки зренияказывает, что она состоит из 4 протонов и 2 электронов, т. е. ничем не отличается от ядра гелия. Выбрасывая β -частицу, ядро вращается в другое ядро, у которого M меньше, чем прежде, и Z на 2 меньше, чем у гелия. Выбрасывая β -частицу, ядро превращается в другое ядро, у которого M такое же, как раньше, а Z на 1 больше (так как число протонов осталось без изменения, а число электронов уменьшилось на 1).

Другим доказательством состава ядер является искусственное расщепление легких элементов

1919 г. Резерфорд доказал, что быстрые α -частицы, сталкиваясь с ядрами азота и алюминия, вышибают из них протоны. Так, например, ядро азота ($M=14$, $Z=7$), поглощая α -частицу ($M=4$, $Z=2$) и выбрасывая протон ($M=1$, $Z=1$), превращается в ядро, у которого $M=14+4-1=17$, а $Z=7+2-1=8$, т. е. превращается в один из изотопов (разновидностей) кислорода (большинство ядер кислорода, характеризуемого числом $Z=8$, имеет $M=16$, но есть и очень небольшой процент таких, у которых $M=17$). Вслед за азотом и алюминием, в результате расщеплению посредством столкновения с быстрыми α -частицами подверглись и многие другие ядра легких элементов. В 1932 г. ученик Резерфорда Коккрофт применил в качестве тела расщепления ядер не α -частицы, естественно испускаемые радиоактивными веществами, поток протонов, искусственно разгоняя звездами электрическими полями (порядка миллиона вольт). Ядро лития ($M=7$, $Z=3$), поглощая на него протон ($M=1$, $Z=1$), превращалось в ядро $M=8$, $Z=4$, которое неизменно распадалось на две α -частицы (у каждого $M=4$, $Z=2$), разлетавшиеся в противоположные стороны с кинетической энергией, во много превосходившей энергию первоначального ядра. Таким образом в этих опытах получалось освобождение больших (по отношению к ядру протона) количеств внутриядерной энергии. Заметим, что о техническом использовании триядерной энергии, освобождающейся в опытах этого рода, не может быть и речи, так как общего потока протонов лишь ничтожная доля связывается с ядром лития лобовым ударом, приводящим его вдребезги, с выигрышем энергии; большинство же протонов не вызывает расщепления, а поэтому в результате вместо выигрыша получается огромный проигрыш энергии. Используя тот же самый метод (искусственно разгоняя протоны), Коккрофт разбил множество ядер вплоть до ядер тяжелых элементов значительно. Впрочем заметим, что расщепление ядер по способу Коккрофта еще не прошло другими исследователями и вызывает сомнения; расщепление же легких элементов быстрыми протонами проверено и подтверждено многими другими исследователями (в том числе и у СССР работниками Харьковского физико-химического института). Все эти работы являются доказательством того, что ядра действительно обладают сложным характером, являясь комбинациями из протонов и из электронов. Причем, несомненно, отметить, что электроны, эти основные „кирпичи“ мироздания, из которых строятся ядра и вообще все природы, вступают друг с другом в самых атомов в различные, быть может и довольно сложные структурные связи; так, например, может случиться, что несколько электронов и ядер в ядре сцеплены друг с другом значительно прочнее, чем с другими частями ядра. Для этого требуется затратить гораздо меньше энергии того, чтобы вывести из ядра эту комбинацию целиком, чем для того чтобы ее разбить. Термин служит α -частица, которая является ядром тесной комбинацией 4 протонов и 2 ядер, что ее до сих пор никакими средствами не удается разбить; при радиоактивном расщеплении ядер быстрыми прото-

нами α -частица вылетает из ядра целиком. Нет сомнения в том, что уже в самом ядре существует некоторое (у тяжелых элементов довольно большое) количество таких комбинаций из 4 протонов и 2 электронов, которые уже сцеплены друг с другом в α -частицу. Изучение такого рода „структур“ ядра представляет весьма важную, но до сих пор не окончательно решенную задачу.

Большим толчком вперед в этой области исследований явилось сделанное в 1932 г. учеником Резерфорда Чэдвиком открытие нейтронов, т. е. частиц, состоящих из сцепленных друг с другом 1 протона и 1 электрона (ясно, что у нейтрона $M=1$, $Z=0$, т. е. он должен быть электрически нейтрален, откуда и пошло его название). Чэдвик доказал, что в некоторых случаях (например, при расщеплении ядра бериллия α -частицей) из ядра вылетает сразу такая „супружеская чета“, состоящая из 1 протона и 1 электрона, т. е. вылетает нейтрон. Весьма вероятно, что уже внутри ядра существует большое количество таких комбинаций.

Выше было указано, что вопрос о структуре ядра еще не выяснен окончательно, и в этом направлении можно делать лишь те или иные гипотезы. Весьма заманчивой (по многим причинам, о которых ниже) является гипотеза, сделанная в 1932 г. в связи с открытием Чэдвика немецким теоретиком Хайзенбергом. Хайзенберг предполагает, что все электроны ядра (а их число никогда не бывает больше числа протонов) соединены с таким же числом протонов в нейтроны. Таким образом ядро с данными M и Z можно считать состоящим из $M-Z$ нейтронов и Z протонов. Далее, между этими нейтронами и протонами образуются дальнейшие комбинации: 2 протона и 2 нейтрона образуют между собой α -частицу (легко проверить, что 2 протона и 2 нейтрона дают как раз $M=4$, $Z=2$). Такие комбинации 2 „супружеских“ пар с 2 „холостяками“ протонами весьма устойчивы и потому образуются в возможно большом количестве. Это приводит к тому, что в случае четного Z ядро представляет комбинацию из $Z/2$ α -частиц и $M-2Z$ оставшихся свободными ней-

тронов (проверка: $\frac{Z}{2} \cdot 4 + (M-2Z) \cdot 1 = M$; $\frac{Z}{2} \cdot 2 + (M-2Z) \cdot 0 = Z$), а в случае нечетного Z оно состоит из $\frac{Z-1}{2}$ α -частиц, 1 свободного протона и $M-2Z+1$ свободных нейтронов (проверка: $\frac{Z-1}{2} \times$

$\times 4 + 1 + (M-2Z) \cdot 1 = M$; $\frac{Z-1}{2} \cdot 2 + 1 + (M-2Z+1) \cdot 0 = Z$). С гипотезой Хайзенberга о структуре ядра мы вновь встретимся и в дальнейшем изложении.

Существенную роль при обсуждении структуры ядра играет так называемый „масс-дефект“ ядра. Дело в том, что всякое излучение энергии, как учит принцип относительности Эйнштейна, связано с уменьшением массы; если излучается энергия E , то уменьшение массы равно $m = \frac{E}{c^2}$, где c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/сек; для того чтобы уменьшение массы равнялось 1 г, нужно, следовательно, чтобы излученная энергия

составляла $9 \cdot 10^{-30}$ эргов. Когда мы говорили выше, что масса ядра, измеренная в единицах, равных массе водородного атома, всегда дает целое число, то это утверждение было правильным лишь приближенно не только потому, что мы пренебрегали при этом массой электрона, но также и потому что если соединение M протонов и $M-Z$ электронов в одно целое ядро сопровождается излучением энергии, то масса ядра на основании механики принципа относительности будет несколько меньше, чем сумма масс всех этих протонов и электронов. Поэтому даже если бы масса электронов в точности равнялась нулю, то масса ядра была бы несколько отлична от массы протона, помноженной на целое число M . Если мы сможем измерить точную (отличающуюся от целого числа M) массу ядра, то, сравнивая ее с суммой масс M протонов и $M-Z$ электронов мы сможем по разности (по дефекту массы, как говорят физики) вычислить на основании принципа относительности, сколько энергии выделилось при соединении друг с другом такой комбинации из M протонов и $M-Z$ электронов и, следовательно, сколько нужно затратить энергии, чтобы эту комбинацию разорвать. Дефект массы обычно уже сразу и пишут в единицах энергии; в качестве единицы энергии при этом берут обычно электрон-вольт (энергия, сообщаемая заряду одного электрона разностью потенциалов в 1 В) энергия в 1 электрон-вольт равна $1,59 \cdot 10^{-12}$ эргов; миллион электрон-вольтов образует весьма удобную единицу, так называемый "крокодил", равный $1,59 \cdot 10^{-6}$ эргов.

Дефект массы данного ядра характеризует его "прочность". Весьма прочной комбинацией оказывается α -частица, так как ее масса равна $6,598 \cdot 10^{-24}$ г, в то время как масса 4 протонов и 2 электронов равна $6,645 \cdot 10^{-24}$ г, что дает дефект массы в $4,7 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{-20} = 4,2 \cdot 10^{-5}$ эргов = 26 крокодилам. Это значит, что при образовании грамм-атома гелия из протонов и из электронов (т. е. из водорода) должно выделяться 600 000 Cal энергии, т. е. выделение тепла при такой "реакции" (которой мы, к сожалению, не умеем искусственно вызывать) в чудовищное количество раз превосходит теплоты образования наиболее устойчивых химических соединений из наименее устойчивых (например энергию, выделяющуюся при взрыве динамита). Дефект массы нейтрона, измеренный Чэдвиком, значительно меньше, чем у α -частицы, а именно равен приблизительно 1 или 2 крокодилам (более точных измерений еще нет). При дальнейшем соединении α -частиц и нейтронов друг с другом наблюдается дальнейшее выделение энергии; так например, из точной массы ядра кислорода, представляющего комбинацию 4 α -частиц, можно заключить, что при соединении 4 α -частиц друг с другом выделяется 8,2 крокодила энергии; это число весьма мало по сравнению с той энергией ($26 \cdot 4 = 104$ крокодилам), которая должна была выделиться при предварительном образовании этих 4 α -частиц из протонов и электронов.

Таким образом энергетические соображения вполне подтверждают представление об α -частице, которая является комбинацией протонов и электронов, сцепленных друг с другом гораздо более крепкими связями, чем с остальными протонами и электронами ядра. Что касается нейтрона, то из энергетических соображений как

будто нельзя заключить, что в нем протон и электрон связаны крепче, чем с другими протонами и электронами (например, при образовании частицы из 2 нейтронов и 2 протонов происходит значительно большее уменьшение массы, чем при предварительном образовании 2 нейтронов из протонов и электронов). В дальнейшем при суждении гипотезы Хайзенберга мы скажем сколько слов в объяснение того, почему нейтрон вопреки своему сравнительно небольшому дефекту массы, все-таки может считаться существующим в ядре в качестве одной из основ единиц, из которых затем уже складывается ядро в целом.

§ 2. Применение волновой механики к ядру

Резерфорд указал на следующий факт, объяснение которого наталкивается на непреодолимые трудности, если стоять на почве классической механики (механики Ньютона). Рассмотрим движение α -частицы, входящей в состав ядра с зарядом Z ; эта α -частица движется в поле, вызываемом всеми остальными частями ядра, которые в сущности образуют не что иное, как ядро с зарядом $Z-2$. Построим (рис. 2) диаграмму оси абсцисс которой отложим расстояние r от α -частицы от центра ядра, образованного всеми остальными частями ядра с зарядом Z ; оси ординат будем откладывать потенциальную энергию U нашей частицы как функцию r . Та диаграмма очень удобна, так как из нее можно сразу видеть, какие силы действуют на α -частицу на разных расстояниях от центра. Если наша α -частица находится вне ядра с зарядом $Z-2$, образуемого остальными частями ядра с зарядом Z , то потенциальная энергия будет равна $\frac{2(Z-2)e^2}{r}$, как это следует из закона

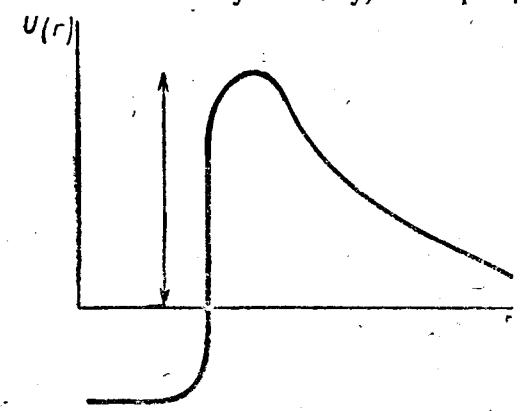


Рис. 2

движения α -частицы к ядру с зарядом $Z-2$ ее потенциальная энергия под влиянием сил отталкивания все время уменьшается. Однако на каком расстоянии отталкивающие силы должны остановиться притяжением, иначе было бы совершение непонятно, каким образом α -частица может вообще сидеть внутри ядра, образованного остальными частицами. Поэтому мы получаем нечто вроде кривой, изображенной на рис. 2. Таким образом

частица, находящаяся в поле остальных частиц ядра, сидит в некоторой „потенциальной яме“ (ближайшая к началу координат часть кристалла, отделенной от остального мира „потенциальный барьером“, имеющим снаружи гиперболический склон, который соответствует формуле зачатия Кулона).

Как определить высоту этого барьера? Резерфорд обращает внимание на то обстоятельство, что частица радиоактивного вещества ThC' , имеющая энергией $14 \cdot 10^{-6}$ эргов, никак не может проникнуть внутрь тяжелых ядер и даже в случае лобового удара доходит до некоторой точки наружного склона потенциального барьера, где она теряет всю свою кинетическую энергию, и затем возвращается обратно. Отсюда следует, что у тяжелых ядер высота барьера, изображенная на рис. 2 стрелкой, вероятно превышает $14 \cdot 10^{-6}$ эргов. С этим Резерфорд соединяет тот факт, что тяжелый элемент, уран ($Z=92$), испускает α -частицу, которая обладает сравнительно небольшой энергией, а именно 10^{-6} эргов, т. е. заведомо меньше, чем высота барьера. Если у α -частицы, как показывает измерение, оказывается такая маленькая энергия (и эта энергия согласно закону сохранения энергии должна быть при ее движении во внешнем поле постоянной), то откуда в ней сколько столько энергии, сколько нужно для пересечения через барьер? Ведь до того, как выйти из ядра урана, она сидела в яме. Появление частицы с энергией меньшей, чем высота барьера, резко противоречит классической механике.

Геймов и (независимо от него) Герней показали, что этот парадокс разрешается, если вместо классической механики применить волновую механику Шредингера. Основным уравнением волновой механики является уравнение Шредингера:

$$\frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \Delta \psi + U\psi = 0, \quad (1)$$

где ψ — масса частицы, движение которой мы называем, U — ее потенциальная энергия, рассматриваемая как функция координат пространства, оператор Лапласа, \hbar — постоянная Планка (она называется универсальная постоянная $\hbar = 6 \cdot 10^{-27}$ эргосекунд, имеющая размерность „силы“, т. е. энергия \times время, и входящая во формулы квантовой теории) и, наконец, „волновая функция“, физический смысл которой заключается в том, что квадрат абсолютной величины ψ представляет вероятность нахождения нашей частицы в единице об'ема, взятой в некотором месте пространства. Если мы введем еще ψ другую неизвестную функцию S , связанную с ψ посредством уравнения

$$\psi = e^{\frac{2\pi i}{\hbar} S}, \quad (2)$$

уравнение (1) превратится в

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right] + U + \frac{\hbar}{4\pi m i} \Delta S = 0. \quad (3)$$

Во всех тех случаях, когда последний член уравнения (3) мал по сравнению с остальными (мы

потом увидим, когда имеют место такие случаи), мы можем приближенно писать вместо (3)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right] + U = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) известно из классической механики. Оно называется уравнением Гамильтона-Якоби и определяет „функцию действия“ S , которая отличается тем свойством, что ее производная по времени равна постоянной энергии частицы, но только с обратным знаком, а ее производная по любой координате равна проекции количества движения частицы на эту ось координат.

То обстоятельство, что волновое уравнение Шредингера в некоторых случаях может быть приближенно заменено уравнением Гамильтона-Якоби, взятым из классической механики, показывает, что классическая механика есть частный случай волновой механики, годный для приближенного описания некоторой области явлений; волновая механика годится для описания гораздо более широкой области явлений.

Если какая-то частица движется свободно, т. е. вне силового поля ($U=0$), причем ее движение, как мы примем для простоты, совершается вдоль оси иксов со скоростью v , то мы можем положить

$$\frac{\partial S}{\partial x} = mv, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = -E = -\frac{1}{2}mv^2,$$

и уравнение (4) при $U=0$ сможет быть проинтегрировано посредством функции

$$S = mvx - Et.$$

Посредством формулы (2) находим

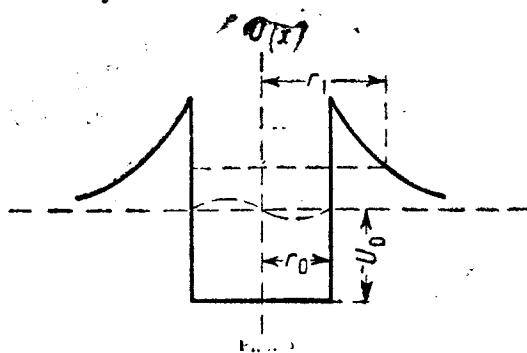
$$\psi = e^{\frac{2\pi i}{\hbar} \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{E}{\hbar} t \right)}, \quad (5)$$

где для сокращения принято

$$\lambda = \frac{\hbar}{mv}. \quad (6)$$

Формула (5), как легко проверить, удовлетворяет в точности уравнению (1) при $U=0$. Она представляет не что иное, как плоскую волну, длина которой равна λ (это значит, что ψ в данной точке пространства всегда равно тому ψ , которое в тот же момент времени мы имеем в точке пространства, находящейся на расстоянии λ , 2λ , 3λ , ..., отсчитанном по оси иксов в одном или в другом направлении). Такого рода волны, которые появляются в волновой механике на месте траекторий механики классической, называются волнами де-Бройля. Отношение волновой механики к механике классической совершенно такое же, как отношение волновой оптики к геометрической оптике, которая, как известно, может приближенно заменить волновую оптику лишь тогда, когда длина волны достаточно мала по сравнению с размерами тех неоднородностей (ширина и т. п.), которые встречаются на пути распространения света. Таким же точно образом классическая механика может приближенно заменить волновую, если длина волны де-Бройля достаточно мала по сравнению с размерами тех неоднородностей, которые встречаются в поле (т. е. по сравнению с теми расстояниями, на которых заметно меняется потенциальная энергия частицы в поле). Так как масса частицы стоит

в выражении (6) в знаменателе, то классическая механика оказывается достаточным приближением в том случае, если масса частицы достаточно велика. Однако это не всегда имеет место. Например, для того чтобы можно было применять классическую механику к электрону в атоме, нужно чтобы λ для электрона в этом случае было заметно меньше, чем 10^{-8} см, т. е. чем линейные размеры атомов. Однако на самом деле λ для электрона в атоме бывает как раз того же порядка величины, что и размеры атома, а потому классическую механику к нему применять нельзя, можно применять только волновую. Но для движения атома как целого среди других атомов классическая механика очень часто оказывается достаточным приближением, потому что благодаря большой массе атома λ в этом случае оказывается достаточно малым. Если же мы рассматриваем такой процесс, как выбрасывание α -частицы ядром, то для применения классической механики полагалось бы, чтобы λ было в этом случае гораздо меньше линейных размеров ядра, которые очень малы (по опытам Резерфорда над рассеянием α -частиц линейные размеры тяжелых ядер имеют порядок величины 10^{-12} см). При вычислении λ , подставив $\hbar = 6,5 \cdot 10^{-27}$ эргосекунд $m = 6,6 \cdot 10^{-24}$ г $v = 10^{-9}$ см/сек, то мы найдем, что λ оказывается такого же самого порядка величины. Поэтому классическую механику применять к выбрасыванию α -частицы радиоактивным ядром нельзя, а следует применять волновую механику.



Это и сделали Гамов и Герней.

Рассмотрим α -частицу, сидящую в потенциальной яме, которую мы для простоты нарисуем такой формы, как показано на рис. 3, и будем также для простоты рассматривать движение α -частицы только в одном измерении (т. е. только в радиальном направлении). Форма барьера, который мы для наглядности начертим в обе стороны от центра ядра, такова: когда x меняется от ∞ до r_0 (до радиуса ядра), мы имеем гиперболический склон с уравнением $U(x) = \frac{2(z-2)e^2}{x}$. Затем когда x переходит через r_0 , потенциальная энергия сразу падает и принимает постоянное значение $U(x) = U_0$ до самого центра ямы. Со стороны отрицательных значений x то же самое. Когда α -частица сидит внутри ямы, она описывается волновой функцией, которая представляет стоячую волну: от стенки до стенки укладывается обязательно ровно целое число волн. Наибольшая длина волны (а следовательно, наименьшая скорость, т. е. состояние с наименьшей энергией, в котором α -частица обыкновенно и находится) получится тогда, когда α -частица движется внутри ямы со скоро-

стью v_0 , определяемой из того, что в расстоянии от стенки до стенки (в расстоянии $2r_0$) укладывается одна волна. Это дает $\frac{\hbar}{mv_0} = 2r_0$. При

α -частица ударяется о стенки $\frac{v_0}{2r_0}$ раз в секунду как в секунду она проходит путь v_0 см, а размеры ее тюремы от стенки до стенки всего $2r_0$ см.

А так как $v_0 = \frac{\hbar}{2mr_0}$, то всего $\frac{\hbar}{4mr_0^2}$ раз в секунду α -частица стучится в стенку. Если бы подчинялась обыкновенной классической механике, то, обладая полной энергией $E = \frac{mv_0^2}{2} + U_0$, которая меньше, чем высота барьера $2(Z-2)e^2$, она не имела бы никаких шансов выйти из своей тюремы. Но в волновой механике для частицы всегда существует некоторая вероятность перейти через барьер, высота которого превышает ее энергию, и очутиться сразу в точке $x = r_1$, где $\frac{2(Z-2)e^2}{r_1} = E$ и где поэтому ее скорость

равна нулю, но откуда она всегда может катиться дальше по склону вниз, пока, наконец, не прервет своей полной скорости v , где $E = \frac{mv^2}{2}$. Вероятность такого запрещенного классической механикой, но разрешенного механикой волновой перехода через барьер равна согласно тому, что было сказано о физическом смысле функции квадрату абсолютной величины отношения функции ψ в точке $x = r_1$ к функции ψ в точке $x = r_0$. Если мы воспользуемся приближенной формулой (2), где

$$\frac{dS}{dx} = mv = \sqrt{2m(\frac{1}{2}mv^2)} = \sqrt{2m(E - U(x))} = i\sqrt{2m[U(x) - E]}$$

то отношение двух этих значений волновой функции будет равно

$$e^{-\frac{2\pi}{\hbar} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{2m[U(x) - E]} dx} = e^{-\frac{2\pi V \sqrt{2m}}{\hbar} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{\frac{2(Z-2)e^2}{x} - \frac{1}{2}mv^2} dx}$$

Поэтому вероятность того, что α -частица в течение секунды сумеет ускользнуть из ядра, будет равна

$$\Lambda = \frac{h}{4mr_0^2} e^{-\frac{4\pi V \sqrt{2m}}{\hbar} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{\frac{2(Z-2)e^2}{x} - \frac{1}{2}mv^2} dx}$$

Это и есть выведенная Гамовым основная формула волномеханической теории α -распада. Величина Λ (так называемая „константа распада“) будет, очевидно, равна относительному количеству радиоактивных ядер, распадающихся в

секунду (т. е. $\Lambda = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$, откуда n пропорционально $e^{-\Lambda t}$, где n — число ядер, еще не успевших выбросить α -частицу). Интеграл, стоящий в показателе формулы (7), легко вычисляется.

Если, как это часто бывает, отношение $\frac{r_1}{r_0}$ велико, то он может быть разложен по степеням этого отношения, что дает (после некоторых

ядра, которые мы здесь пропускаем), приближенную формулу

$$\Lambda = \frac{h}{4mr_0^2} e - \frac{8\pi^2}{h} \frac{e^2 (Z-2)}{v} + \frac{16\pi e V m}{h} V (Z-2) r_0$$

Если подставить численные значения постоянных, имея r_0 в первом множителе средним значением 10^{-12} см, годных для радиоактивных элементов (от r_0 в показателе константа распада зависит сильнее, поэтому там мы не будем делать этой замены), то получится для десятичного логарифма Λ удобная для вычисления формула

$$\lg \Lambda = 20,4652 - 1,191 \cdot 10^9 \frac{Z-2}{v} + 4,084 \cdot 10^6 \sqrt{Z-2} \sqrt{r_0}$$

Как в области радиоактивных элементов Z , так как мы теперь знаем, меняются сравнительно мало, то Λ весьма быстро растет с увеличением скорости v . Подобное соотношение между вероятностью распада и скоростью вылетающей α -частицы нашли эмпирически Гайгер и Нэттол за много до того, как Гамов вывел эту формулу. Гамовская формула не только дает теоретическое обоснование эмпирического соотношения Гайгер-Эттоля, но, кроме того, еще содержит и поправленный член, позволяющий вычислять радиус r_0 . С помощью этой формулы мы теперь можем, например, что радиус ядра урана равен $5 \cdot 10^{-13}$ см, что радиус ядра радия равен $8,6 \times 10^{-13}$ см и вообще все радиусы ядер элементов, излучающих α -лучи, нам теперь точно известны. Теория самопроизвольного распада, которую в общих чертах только что изложили, показывает чрезвычайную плодотворность методов волновой механики для физики ядра. Дальнейшим звеном теории, которую и дальше продолжал разрабатывать Гамов, было обяснение искусственного расщепления элементов, например, выбывания протонов из легких ядер α -частицами. Теория искусственного расщепления совершенно аналитична рассмотренной нами теории α -распада; различие состоит лишь в том, что здесь нужно знать вероятность двух переходов через барьер: вылетающей α -частицы внутрь и выхождения из ядра наружу. Никаких подробностей мы здесь не будем; заметим только, что теория Гамова и Гернера предсказала существование так называемых „резонансных расщеплений“, т. е. тех, когда вероятность расщепления сильно колеблется при некоторых определенных значениях энергии падающей на ядро частицы. Такие резонансные расщепления в самом деле наблюдались (в опытах Позе над расщеплением ядер золота α -частицами).

Дальнейшим весьма важным успехом теории было данное Гамовым обяснение явления длиннорубежных α -частиц, а также тонкой структуры α -лучей. Дело в том, что кроме основной группы частиц, вылетающих из данного ядра с вполне определенной скоростью, наблюдаются и второстепенные группы, содержащие α -частицы с большими или меньшими скоростями. Это обясняется тем, что ядро может находиться не только в основном состоянии (с наименьшей энергией), но и в возбужденном состоянии (с энергиями немногим большими). Если ядро испускает α -частицу,

находясь уже в возбужденном состоянии (часть ядер, возникающих в результате предыдущего радиоактивного распада, уже может находиться в таком состоянии), то α -частица может унести с собой не только свою обычную энергию, но и избыток энергии ядра, оставив его уже в основном состоянии. Так возникают α -частицы с большей энергией, чем обыкновенно (длиннорубежные α -частицы). С другой стороны, может случиться, что α -частица, вылетая из ядра, вместе с тем, переводит его в возбужденное состояние; на это тратится часть ее энергии, и она вылетает с энергией, меньшей чем обыкновенно (тонкая структура α -лучей). Сравнивая энергию различных групп α -частиц, вылетающих из одного и того же ядра, можно заключить о разностях между энергиями ядра в возбужденном и основном состояниях. Так как ядро может перейти из возбужденного состояния в основное не только посредством испускания длиннорубежной α -частицы, но также и непосредственно испусканием фотона (кванта света, в данном случае γ -лучей), то для подтверждения правильности данного Гамовом обяснения необходимо, чтобы радиоактивные элементы, дающие наряду с основной группой α -лучей также и второстепенные группы, испускали и γ -лучи с соответствующей величиной энергии кванта $h\nu$. Это и подтверждается экспериментами. Таким образом во многих случаях мы имеем вполне убедительные данные об уровнях энергии ядер.

Из всего сказанного видно, как много дает волновая механика для понимания процессов, происходящих в ядрах. Однако было бы ошибкой думать, что волновая механика позволяет построить полную и последовательную теорию атомного ядра. В целом ряде случаев вытекающие из волновой механики следствия оказываются по отношению к ядерным явлениям неверными. В чем же дело и чем же обясняются эти неудачи волновой механики, постигшие ее после ряда успехов? Ответ на это читатель найдет дальше.

§ 3. Проблема релятивистской теории квантов

Физические теории, которыми в настоящее время пользуется физика, не обладают абсолютным характером. Они все имеют определенную область применимости. Так, например, мы видели, что классическая механика, которая в течение нескольких столетий (от Ньютона до начала XX столетия) ошибочно считалась собранием абсолютно правильных и абсолютно точных законов природы, на самом деле оказалась лишь частным случаем более общей теории—волновой механики. По отношению к волновой механике классическая механика является приближением, годным для описания лишь одной небольшой части той обширной области явлений, к которой применима волновая механика. Математически это соотношение между обеими теориями выражается в том, что все формулы волновой механики содержат постоянную \hbar , встречающуюся нам выше, и отличаются тем свойством, что если сделать \hbar равной нулю, то они переходят в формулы классической механики [например наше уравнение (3), являющееся уравнением волновой механики, переходит в классическое уравнение (4)]. Физически это обозначает, что в тех явлениях, в которых постоянная \hbar по своей малости не очень влияет на ход явления,

классическая механика служит хорошим приближением. Однако необходимо заметить, что волновая механика (или, как ее иначе называют, квантовая механика) является не единственным расширением классической механики. В 1905 г. Эйнштейн, завершив труд Максвелла и Лоренца, построил теорию, которую обычно называют специальной теорией относительности, но которую

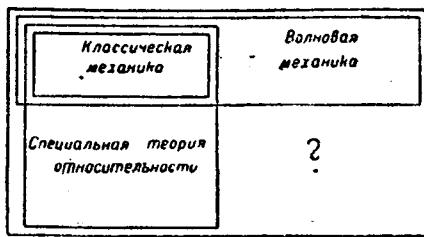


Рис. 4

было бы лучше назвать просто „теорией электромагнитного поля“. Эта теория находится в таком же отношении к классической механике, как и волновая механика: иными словами, существует обширная область явлений, к которой применима специальная теория относительности; в этой обширной области явлений есть небольшой уголок, в котором формулы классической механики являются хорошим приближением по отношению к формулам специальной теории относительности. Математически это сказывается в том, что формулы специальной теории относительности содержат некоторую постоянную величину c , равную 3×10^{10} см/сек (так называемая „скорость света“), и если эту величину сделать равной бесконечности, то формулы специальной теории относительности переходят в формулы классической механики. Физически это значит, что в тех явлениях, в которых мы встречаемся лишь со скоростями, очень малыми по сравнению с c , и в которых, следовательно, можно считать c практически бесконечным, классическая механика служит хорошим приближением. Соотношение между областями явлений, подчиняющимися волновой механике и специальной теории относительности, показано на рис. 4: обе области „пересекаются“ в области классической механики. Таким образом мы видим, что существующие теории охватывают такие области явлений, в которых сказываются или только квантовые эффекты (т. е. то, что h не есть нуль) или только релятивистские эффекты (т. е. то, что c не есть бесконечность). Возникает задача—построить более обширную теорию, которая учитывала бы и квантовые и релятивистские эффекты; в формулах этой теории должны фигурировать обе постоянные, h и c .

Такая теория до сих пор еще не построена; тем не менее ей уже заранее дали название, а именно называют ее (весьма естественно) релятивистской теорией квантов. Заметим, что релятивистская теория квантов, когда она будет построена, все-таки еще не будет окончательной физической теорией, охватывающей все возможные физические явления. Мы даже уже теперь можем заранее указать на будущие границы применимости этой еще не существующей теории. Однако этот вопрос не входит в рамки нашей статьи. Для нас здесь существенен лишь тот факт, что релятивистская теория квантов не построена и что построить ее чрезвычайно трудно, судя по

тому, что эта проблема в течение нескольких подвергается яростной и пока весьма безрезультатной атаке со стороны наиболее искусных теоретиков. Пока не построены лишь некоторые компромиссные теории (теория Дирака, электродинамика Хайзенберга и Паули), позволяющие в некоторых случаях решать отдельные задачи и вместе с тем, полные внутренних противоречий и, повидимому, крайне мало похожие на действующую правильную релятивистскую теорию квантов. Причиной таких неудач является, несомненно, то обстоятельство, что релятивистская теория квантов будет на самом деле весьма наглядна и весьма мало похожа на то, к чему мы привыкли до сих пор. Никакие предрассудки неуместны, когда речь идет о расширении физической теории; никакие физические принципы сколько бы они ни были привычны нам на основании прежних более частных теорий, не обязаны сохраняться в том же самом виде в будущем более общей теории, не обязаны потому, что природа вообще не давала никаких обязательств предсказывать нашим привычкам, и никакие априорные суждения к природе вообще неприменимы. Принцип сохранения энергии, обычные представления о пространстве и о времени, целый ряд основных свойств физических измерений—все это может оказаться неприменимым в релятивистской теории квантов и даже почти наверное окажется неприменимым (в частности, для закона сохранения энергии и момента количества движения тела)

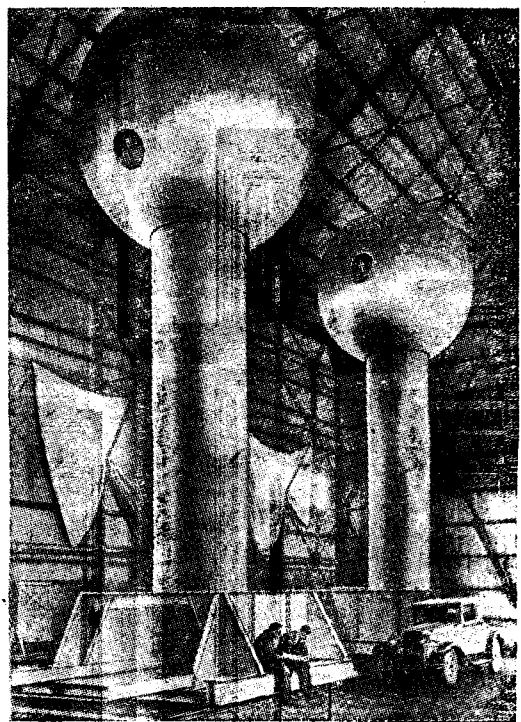


Рис. 5. Электрический генератор на 10 000 000 В, построенный в Массачусетском технологическом институте для изучения ядерной энергии

неприменимость к области, где релятивистские и квантовые эффекты одновременно играют роль (уже оказалась, как мы увидим ниже, экспериментальным фактом). Релятивистская теория квантов превзойдет по своей парадоксальности и революционности (последнее в смысле разрушения застарелых метафизических предрассудков) и что до сих пор мы встречали в физике. Вот эти

мое свойство, а также, вероятно, в значительной мере и то, что мы до сих пор знаем не очень много экспериментальных фактов, относящихся к области релятивистской теории квантов, сильно затрудняет ее построение.

Для теории ядра проблема релятивистской теории квантов имеет огромное значение. Применение волновой механики к тяжелым составным частям ядра (α -частицам—протонам, нейtronам) оказалось возможным потому, что все эти тяжелые частицы движутся со скоростями, очень малыми по сравнению со скоростью света, например, наиболее быстрые α -частицы вылетают со скоростью, в 15 раз меньшей, чем скорость света. Поэтому пока речь идет о тяжелых частях ядра, релятивистскими эффектами можно спокойно пренебречь. Но этого нельзя сказать о ядерных электронах, которые, несомненно, движутся со скоростями, когда очень близкими к скорости света (со скоростью, большей, чем скорость света, они на основании теории относительности двигаться не могут). Так, например, β -частицы, вылетая из радиоактивных ядер, обладают скоростями, уже почти неотличимыми от скорости света. Отсюда видно, что ядерные электроны должны подчиняться релятивистской теории квантов, и что пока эта теория не будет построена, создание полной теории ядерных явлений невозможно.

Рассмотрим наиболее эффектные примеры из экспериментов, из которых видно, что ядерные электроны ведут себя в резком противоречии существующими физическими теориями. Мы видели выше, как чувствительно значение постоянной распада Λ к изменению различных свойств ядра (например, к изменению радиуса). Невозможно поэтому сомневаться в том, что если два ядра, обладающие одинаковыми M и Z , имеют вполне одинаковые радиоактивные свойства (одинаковое Λ), то эти ядра обладают и во всем остальном совершенно одинаковыми свойствами. Тщательные измерения показали, что если мы имеем какой-нибудь распад, например, превращение радия E в радий F , то все ядра E до превращения, равно как и все ядра радия F после превращения, абсолютно одинаковы. Поэтому, если бы был введен закон сохранения энергии, то все β -частицы (электроны) вылетали бы из распадающегося ядра радия E с одной и той же энергией, равной разности энергий ядра радия E и ядра радия F . Однако опыт показывает, что β -частицы вылетают разнообразными значениями энергии, или, как обычно говорят, спектр энергии β -лучей непрерывен. Можно было бы предположить, что этот эффект кажущийся, и обяснить его тем, что многие частицы теряют часть своей энергии, сталкиваясь где-то с ядрами или с наружными электронами атомов, прежде чем экспериментатор измерит их энергию. Для того чтобы учесть эти потери, Эллис в 1927 г. произвел калориметрическое исследование, в котором непосредственно измерялась полная энергия, отдаваемая β -лучами в момент их возникновения. Исследование показало, что потери энергии практически равны нулю, и что, следовательно, β -частицы с самого момента выхода из ядра обладают разнообразными значениями энергии. Этот удивительный результат, тщательно проверенный и подтвержденный в 1930 г. опытами Майтнер, указывает, как на это впервые указал Бор, что в распаде радиоактивных элементов нару-

шается закон сохранения энергии. Нарушения закона сохранения энергии при β -распаде, как указал тот же Бор, могут играть весьма фундаментальную роль для физики звезд, так как весьма вероятно, что эти нарушения закона сохранения энергии, являются источником тех огромных количеств энергии, которые так щедро расточаются солнцем и звездами. В рамки нашей статьи не входит обсуждение этой замечательной гипотезы Бора, согласно которой всякая звезда является чем-то вроде гигантского *repetitum mobile*; мы указываем на существование этой гипотезы лишь для того, чтобы подчеркнуть тесную связь между физикой ядра и основными вопросами космической физики.

В тесной связи с несохранением энергии находится несохранение момента количества движения. Рассмотрим ядро азота, состоящее из 7 электронов и 14 протонов. Из волновой механики вытекает тот результат, что общий момент количества движения этой системы частиц, измеренный в единицах, равных $\frac{\hbar}{2\pi}$, обязательно должен равняться целому числу с половиной. Опыт показывает, однако, что он равен 1, т. е. целому числу без половины. Если мы каким-нибудь образом возьмем систему, состоящую из 7 электронов и 14 протонов на больших расстояниях друг от друга, когда они наверно удовлетворяют волновой механике, то момент количества движения такой системы будет равен целому числу с половиной; потому при их соединении друг с другом в ядро азота закон сохранения момента количества движения наверное нарушится. С этим также связан и тот факт, что два ядра азота, соединенные в молекулу, ведут себя друг по отношению к другу так, как если бы они, подчиняясь правилам волновой механики, состояли из четного числа частиц, в то время как на самом деле они состоят из нечетного ($14 + 7 = 21$). Все эти несоответствия указывают на неприменимость волновой механики к ядерным электронам.

Хайзенберг, предложивший считать ядро построенным из нейтронов и из протонов, т. е. из тяжелых частиц, указал на то, что если эта точка зрения правильна, то эффектами релятивистской теории квантов будут лишь те эффекты, которые связаны со структурой нейтронов, все же прочие ядерные явления будут подчиняться обычной волновой механике. Таким образом вся ответственность за "дикие" явления перекладывается на нейтроны. Нейтроны, состоя из двух частиц (протон + электрон), обладают моментом количе-

ства движения, равным половине $\left(\frac{\hbar}{2\pi}\right)$,

в то время как должны были бы обладать целочисленным моментом; они ведут себя друг по отношению к другу, как элементарные частицы, а не как системы, построенные из четного числа частиц. Они обладают большой прочностью, превосходящей их массы, который, как мы видели, невелик. При их распаде нарушается закон сохранения энергии (β -распад состоит по Хайзенбергу в том, что один из нейтронов распадается на части, а затем электрон выходит из ядра). Все это эффекты релятивистской теории квантов, связанные со структурой нейтрона. Но движение нейтрона, как целого, подчиняется обычной волновой механике. Точка зрения Хайзенберга весьма

привлекательна потому, что она позволяет заметно расширить область применения волновой механики к ядерным явлениям; при этом гипотеза Хайзенберга, об'яснив несколько экспериментальных фактов, еще нигде не натолкнулась на противоречия с опытом, поэтому весьма вероятно, что она справедлива. Из гипотезы Хайзенберга вытекает об'яснение следующих фактов (деталей самого об'яснения мы касаться не будем): об'яснение того, почему те свойства ядер, которые по волновой механике должны были бы зависеть от четности и нечетности числа из частиц, на самом деле определяются не четностью числа $2M - Z$, но четностью числа M (пример — азот, у которого $2M - Z = 21$, $M = 14$); затем об'яснение устойчивости α -частицы, об'яснение того, почему у всех ядер (кроме водорода) $M \geq 2Z$, причем у легких элементов имеет место приблизительное равенство, а у тяжелых разность $M - 2Z$ сильно растет. Сюда же относится и об'яснение того факта, почему в ряду радиоактивных элементов два β -распада обыкновенно следуют друг за другом, причем у первого из двух таких распадающихся ядер число Z четное, а у второго нечетное; из той же схемы Хайзенберга вытекает, почему второй из двух таких β -распадов сопровождается более интенсивным и богатым линиями γ -спектром, чем первый. В последнее время Гамов указал

на то, что из этой же системы взглядов вытекают особенности наблюдавшегося Греем и Тэррентом, а также Чао эффекта аномального рассеяния γ -лучей ядрами: ядра многих элементов по преимуществу тяжелых, обладают необычайным с точки зрения волновой механики свойством поглощать γ -лучи и затем испускать характеристические более мягкие γ -лучи. Согласно гипотезе Гамова здесь происходит искусственный β -распад, т. е. расщепление одного из свободных нейтронов под влиянием первичных γ -лучей. В результате такого β -распада ядро остается в возбужденном состоянии и затем переходит в основное состояние, испуская "характеристические" лучи, открытые Тэррентом и Греем. Впрочем, до сих пор еще не удалось подтвердить эту гипотезу в опыте, так как электроны, вырывающиеся из ядра при таком искусственном β -распаде, еще не обожжены.

Физика ядра представляет такую область физики, где вследствие неожиданных и колоссальных трудностей, вставших на пути развития теории, экспериментальное изучение вопроса становится вдвойне важным и выдвигается на первый план. Поэтому в ближайшее время дальнейших важных указаний на возможные пути к решению проблемы ядра следует ожидать именно от эксперимента, а не от теории.

Основные принципы конформных преобразований и их применения в электротехнике

Проф. И. А. Черданцев
Москва

От редакции

В связи с развитием применения метода конформных отображений в электротехнических расчетах редакция помещает статью профессора И. А. Черданцева, знакомящую читателя с основными приемами этого метода.

I. Начальные сведения по геометрической теории функций

§ 1. Геометрическое представление функции комплексной переменной и отображение вообще

Известно, что каждому частному значению комплексного числа $z = x + iy$ соответствует определенная точка в комплексной плоскости; абсцисса ее есть x , а ордината y . Эту плоскость назовем плоскостью z .

Пусть имеются два действительных переменных u и v , которые являются однозначными функциями x и y , например, $u = \varphi(x, y)$, $v = \psi(x, y)$; составим комплексное число $w = u + iv$; тогда в другой комплексной плоскости каждому значению w будет соответствовать определенная точка с абсциссой u и ординатой v . Эту плоскость назовем плоскостью w . Точки, соответствующие в комплексных плоскостях частным значениям комплексных чисел z и w , будем называть просто — точка z , точка w .

Если в выражениях

$$z = x + iy$$

$$w = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$$

x и y одни и те же, то точки z и w называются соответствующими. Каждой точке z соответствует одна (или несколько, если функции φ и ψ многозначны — этот случай мы исключим из нашего рассмотрения) точка w . Число w называют в этом случае функцией z , что мы и запишем в виде

$$w = f(z).$$

Определение. w называется функцией z , если каждому значению z соответствует одно или несколько значений w ; в дальнейшем мы будем иметь в виду, главным образом, однозначные функции.

Пусть $u = 2x$, $v = 3y$. Возьмем (рис. 1) в плоскости w прямоугольник $abcd$. Точки его периметра $abcd$ с координатами x_a, y_a соответствуют в плоскости z точка A с ординатами $u_A = 2x_a$ и $v_A = 3y_a$. Очевидно, что точками периметра $abcd$ в плоскости z будут соответствовать периметра прямоугольника $ABCD$ в плоскости w , при $AB = 2ab$ и $AD = 3ad$, и что любой точке z , находящейся внутри $abcd$, будет соответствовать точка w , находящаяся внутри $ABCD$. Мы говорим, что посредством формулы

$$w = 2x + 3iy$$

прямоугольник $abcd$ плоскости z отображается на прямоугольник $ABCD$ плоскости w и обратно.

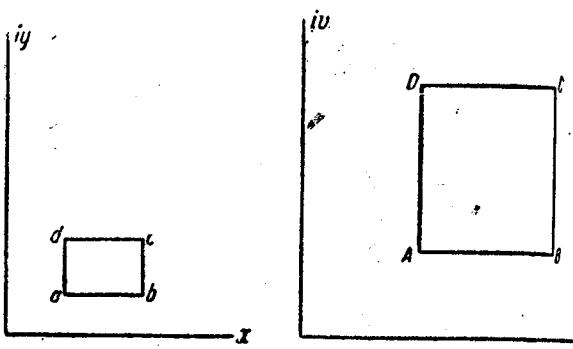


Рис. 1

Часть плоскости, лежащую внутри некоторого замкнутого кривого или ломаного контура, назовем областью. Определение. Две области, одна в плоскости z , другая в плоскости w , отображаются одна на другую, если существует закон, по которому для каждой точки одной области можно найти соответствующую точку (одну или несколько) в другой области.

Замечание. Сравнивая $abcd$ с $ABCD$ на рис. 1, замечаем, что эти два отображающиеся одна на другую области представляют фигуры не подобные.

Кроме отображения областей одна на другую можно говорить об отображении линий одна в другую или о преобразовании линий.

Обращаясь к величинам бесконечно малым, мы видим, что любой треугольник с бесконечно малыми сторонами имеет отображением треугольник тоже с бесконечно малыми сторонами, но не подобный первому.

Как видим далее, здесь могут быть и другие соотношения между других видах зависимости w от z .

§ 2. Понятие об аналитической функции

Не всякая функция $w = f(z)$ имеет производную $\frac{dw}{dz}$. Рассмотрим вопрос подробнее.

Производную функции комплексного переменного определим аналогично тому, как мы определяем производную функции действительной переменной.

$$f'(z) = \frac{dw}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \Delta z) - f(z)}{\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta z}.$$

Невидно, что $\Delta w = \Delta u + i \Delta v$, а $\Delta z = \Delta x + i \Delta y$, поэтому

$$\frac{dw}{dz} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u + i \Delta v}{\Delta x + i \Delta y} = \frac{du + i dv}{dx + i dy}.$$

Невидно, как u и v суть функции от x и y , то

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

$$dv = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy;$$

ставляя эти выражения вместо du и dv , и деля числитель и знаменатель на dx , получаем:

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{dy}{dx}}{1 + i \frac{dy}{dx}}. \quad (1)$$

Дополнительно, если не поставить дополнительных условий, w зависит от $\frac{dy}{dx}$, т. е. от направления, по которому точка

$+i\Delta y$ приближается к z при уменьшении Δz до нуля, а это значит, что функция w не имеет в соответствующей z точке определенной производной; чтобы она имела определенную производную, надо чтобы выражение (1) не зависело от $\frac{dy}{dx}$, а это возможно лишь на основании правил элементарной алгебры, если

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) : 1 = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) : i;$$

т. е. приравнивая друг другу мнимые части и делая то же действительными, получаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнения называются „условиями Коши-Римана“, необходимыми и достаточными для того, чтобы функция $w = f(z)$ имела в любой точке определенную производную; доказательство того, что они достаточны, мы здесь не приводим¹⁾.

Определение. Функция w , имеющая определенную комплексную производную, называется аналитической функцией комплексного переменного. Тот же смысл имеют термины „аналогичная“, „голоморфная“, „правильная“ функция.

Может случиться, что для некоторой точки плоскости z производная от w перестает быть конечной; мы говорим, что функция w в этой точке перестает быть правильной или аналитической, а точку эту называем „особой“. Такова, например, точка $z = 0$ для функции $w = \ln z$ или точка $z = 1$ для

функции $w = \frac{1}{z-1}$.

Наконец, величина $\frac{dw}{dz}$ из выражения (1) не зависит от величины

¹⁾ См. например, Привалов, Введение в теорию функций комплексного переменного.

чины $\frac{dy}{dx}$; поэтому, подставляя в (1) различные значения для $\frac{dy}{dx}$, мы получим одну и ту же величину для производной $\frac{dw}{dz}$.

Пусть, например, точка $z + \Delta z$ приближается к z по линии, параллельной оси абсцисс, тогда $\frac{dy}{dx} = 0$, и, следовательно, из (1)

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial (u + iv)}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x}; \quad (2')$$

если же она приближается по вертикали, то $\frac{dy}{dx} = \infty$ и из (1), делением числителя и знаменателя на $\frac{dy}{dx}$, получаем

$$\frac{dw}{dz} = \frac{1}{i} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial w}{\partial (iy)}. \quad (2'')$$

Условия (2') и (2'') выражают то же, что и условия (2), только в иной форме.

Таким образом из (2') и (2'')

$$\frac{dw}{dz} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial (iy)},$$

что дает нам возможность формулировать следующим простым образом условие аналитичности функции для тех случаев, когда мы имеем или можем найти явное выражение w в функции x и y , а это как раз и будет всегда иметь место в применении теории функций комплексного переменного к электротехнике: если w может быть выражено в функции только всего комплекса $x + iy = z$ в целом, то w есть аналитическая функция z .

Таким образом оказывается, что если $u = x^2 - y^2$ и $v = 2xy$, то функция аналитическая, ибо

$$w = u + iv = x^2 - y^2 + i 2xy = (x + iy)^2 = z^2;$$

а если $u = x^2 + y^2$ и $v = 2xy$, то функция не аналитическая, ибо

$$w = x^2 + y^2 + i 2xy$$

не может быть представлено как функция только всего комплекса $x + iy$ в целом.

Читателю рекомендуется проверить, что условия Коши-Римана в первом примере выполняются, а во втором — нет.

§ 3. Геометрическое значение модуля и аргумента производной аналитической функции

Представим себе для наглядности, что мы плоскость w наложили на плоскость z так, что их соответствующие оси совпадали. Производную $\frac{dw}{dz}$ можно представить, как всякую комплексную величину, в виде $Me^{i\mu}$, следовательно,

$$dw = Me^{i\mu} dz,$$

откуда

$$|dw| = M |dz|$$

и

$$\arg dw = \arg z + \mu,$$

т. е. величина $|dw|$ или модуль M раз больше величины или модуля $|dz|$ и dw повернуто в положительную сторону (против часовой стрелки) на угол $\mu = \arg \frac{dw}{dz}$ относительно dz .

Таким образом в бесконечно малой области около любой точки w (или её соответствующей z) сохраняется постоянство отношения $|dw|$ к $|dz|$ и постоянство поворота dw относительно dz . Любая бесконечно малая фигура, описанная около точки z , преображается в подобную ей бесконечно малую фигуру около точки w .

Для фигур же размеров конечных подобие будет существовать только в том случае, если зависимость w от z выражается целой линейной функцией

$$w = (a + ib)z + c + id.$$

Если мы в плоскости z имеем кривую L_1 , то посредством аналитической функции $w = f(z)$ точки этой кривой отображаются в точки кривой M_1 в плоскости w , а точки другой кривой L_2 в плоскости z отображаются в точки кривой M_2 в плоскости w .

Если L_1 и L_2 пересекаются в точке z_1 под некоторым углом α , то в точке $w_1 = f(z_1)$ кривые M_1 и M_2 пересекутся под тем же самым углом, ибо элементы кривых M_1 и M_2 у точки w_1 будут повернуты относительно элементов кривых L_1 и L_2 у точки z_1 на один и тот же угол,—именно на угол, равный аргументу $\frac{dw}{dz}$ в точке z_1 .

Такова теорема о консерватизме углов при отображении посредством аналитических функций.

Такое отображение иносит название конформного. Следствие. Если в одной из плоскостей w или z дана сеть ортогональных линий (например, в простейшем случае, сеть $x = \text{const}$, $y = \text{const}$), то она отображается в другой плоскости в сеть тоже ортогональных линий.

Все предыдущие заключения не будут правильны для тех точек, где $\frac{dw}{dz}$ обращается в 0 или в ∞ ; такие точки будут особыми точками.

§ 4. Понятие об интеграле аналитической функции

Чтобы имело смысл представление определенного интеграла аналитической функции как предела суммы бесконечно малых слагаемых, необходимо представить изменения независимого переменного z от значения его z_1 до значения z_2 совершающимися непрерывно, а точку z , следовательно, описывающей при этом некоторую кривую или ломаную линию в плоскости z .

Поэтому и говорят, что интеграл

$$\int_{z_1}^{z_2} f(z) dz$$

берется вдоль этой кривой от z_1 до z_2 .

Преобразуем этот интеграл следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_{z_1}^{z_2} f(z) dz &= \int_{z_1}^{z_2 + iy_1} (u + iv) (dx + i dy) = \\ &= \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} (udx - vdy) + i \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} (vdx + udy). \end{aligned}$$

Из условий Коши-Римана вытекает, что $vdx - udy$ и $vdx + udy$ являются полными дифференциалами, поэтому значения интеграла $\int_{z_1}^{z_2} f(z) dz$ зависят только от начальной и конечной точек z_1 и z_2 , но не зависят от вида кривой, по которой изменяется z .

II. Конформные отображения

§ 5. Основной принцип конформных отображений

Условимся линию, ограничивающую одну область плоскости от другой, называть правильной, если в каждой точке ее можно провести определенную касательную, которая при непрерывном перемещении точки касания по линии изменяет свое направление непрерывно.

Может случиться, что линия, ограничивающая область, состоит из нескольких частей, которые являются в отдельности правильными линиями, в этом случае контур этот называется кусочно-правильной линией. Примером может служить контур, показанный на рис. 2, состоящий из нескольких дуг окружностей и прямых.

Исходя из некоторой точки z_1 контура будем придавать z непрерывно следующие одно за другим значения—такие, что точка z будет перемещаться по контуру, мы, таким образом, можем обойти с точкой z весь контур.

Условились считать положительным такое направление обхода контура, при котором область, ограниченная этим контуром, остается слева.

Пусть состоящий из кусочно-правильной линии замкнутый контур G_1 в плоскости z посредством функции $w = f(z)$ отображается в контур G_2 в плоскости w , и пусть для точек z внутри контура и на нем функция w правильна; тогда внутренность контура G_1 отобразится на внутренность контура G_2 , если направление движения точки z по контуру G_1 совпадает с направлением движения по контуру G_2 точки w , соответствующей точке z .

Докажем этот основной принцип конформных отображений.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

Пусть (рис. 3) точке z_1 контура G_1 соответствует точка контура G_2 и пусть функция $w = f(z)$ такова, что точка контура G_1 , продвинувшись от z_1 по направлению, указанному стрелкой, т. е. такому, при котором внутренность контура лежит влево, соответствует точки контура G_2 , пропицнувшимся от w_1 в таком же направлении по своему контуру.

Представим себе, что точка z , продвинувшись на dz от контура G_1 , затем продвигается влево, т. е. внутрь контура (по нормали) тоже на dz . Тогда соответствующая ей точка w продвигается на dw вдоль по контуру G_2 , а затем, по теории о консерватизме углов (или о значении аргумента произвольной) поворачивает тоже влево, т. е. внутрь контура тоже по нормали, продвигаясь на dw ; затем точки z и w вращаются снова на контур. Представим себе такую операцию повторенной бесконечное число раз, тогда точки, отстоящие на dz по нормали от контура G_1 , внутри его отобразятся в точки, отстоящие по нормали к контуру G_2 на dw внутрь его, т. е. линия L_1 первого контура отобразится в линию L_2 второго; затем представим себе, что такую же совокупность

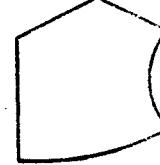


Рис. 2

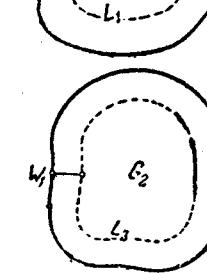
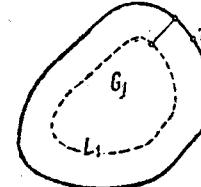
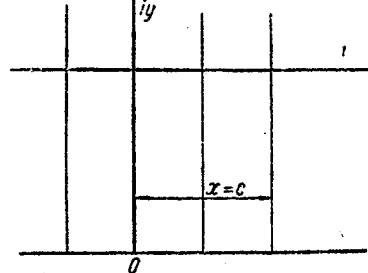


Рис. 3

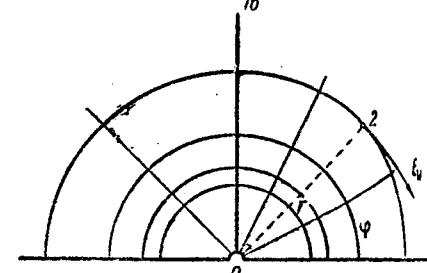


Рис. 4

продвижений проделывает точка контура L_1 , и мы получим, что контур L_1' отобразится в L_2' и т. д.; таким образом к совокупности точек внутри контура G_1 отобразится на смежную купность точек внутри контура G_2 и обратно, что и требовалось доказать. При этом внешняя для контура G_1 плоскость z , в которой функция w остается правильной, отобразится на внешнюю для контура G_2 область плоскости w .

Замечание. Если функция $w = f(z)$ такова, что при движении точки z в указанном направлении соответствует при движении точки w в направлении противоположном, при котором внутренность контура G_2 остается вправо, то внутренность контура G_1 отобразится на внешнюю и контура G_2 часть плоскости w , что ясно из предыдущего φ суждения.

Перейдем теперь к частным примерам конформного отображения.

Когда исследуют отображение посредством какой-либо функции, то прежде всего исследуют, как сеть линий, параллельных осям координат, так называемая „координатная решетка“ одной плоскости отображается в другой; затем их останавливают внимание еще на том, как та или иная кривая или система кривых, или система ортогональных кривых отображаются в другой плоскости.

§ 6. Отображение посредством показательной функции

Дана функция $w = e^z$, посмотрим, как координатная решетка $x = \text{const}$ или $y = \text{const}$ плоскости z отобразится на плоскость w .

Имеем, что

$$w = e^z = e^x + iy = e^x \cdot e^{iy} = re^{i\varphi},$$

полагая $e^x = r$, а $y = \varphi$.

Если $x = \text{const}$, то и $r = \text{const}$, следовательно, прямые, параллельные оси ординат в плоскости z , соответствуют кривым в другой плоскости.

матрические окружности радиусов r в плоскости w (рис. 4); при этом точке $x = c_1, y = 0$ соответствует точка $w = e^{i\alpha}$, лежащая на положительной оси u ; пока y растет от 0 до 2π и точка z движется по линии $x = c_1$ от оси x до линии $x = c_1, y = 2\pi$, точка w описывает окружность радиуса $r = e^{\alpha}$, когда точка z пойдет по указанной прямой далее, т. е. когда y будет расти дальше, точка w будет описывать же окружность во второй раз и т. д.

Прямые $y = \text{const}$ в плоскости z соответствуют линии $u = e^{\varphi} e^{i\alpha} \cdot \text{const}$, т. е. прямые, проходящие через начало координат под углами $\varphi = y = \text{const}$. Началу координат $x = 0, y = 0$ соответствует точка $w_0 = e_0 \cdot e^{i0} = 1$; оси ординат ($x = 0, y = \text{var}$) соответствуют окружности с радиусом $r = 1$. Прямые $x = \text{const}$ соответствуют окружности радиуса $r < 1$.

Изложенного об этом случае конформного отображения достаточно для целей настоящей статьи.

11. Отображение посредством степенной функции

Этот вопрос мы исследуем в иной постановке, просто для того, чтобы скорее получить необходимые для дальнейшего результаты.

Поставим себе такую задачу: в плоскости w дан угол $\frac{2\pi}{m}$ с вершиной в начале координат; требуется заключить его внутри его часть плоскости w отобразить на всю

плоскость z (рис. 5).

Решение дается функцией $z = w^m$, ибо посредством этой функции точки действительной оси $v = 0, u = \text{var}$ отображаются в точки $z = u^m$, лежащие, очевидно, тоже на действительной оси x ; точки прямой

$$w = r e^{i\alpha} \quad (r = \text{var}),$$

лежащей другой границей угла α , отображаются в точки $z = r^m e^{im\alpha} = r^m e^{i2\pi}$,

то есть ось x . Таким образом стороны угла α отобразятся в стороны угла 2π . По основному принципу конформных отображений внутренность угла α отобразится при этом в внутренность угла 2π , т. е. на всю плоскость z . При движении контура ось $+x$ надо представить себе движущимся (рис. 5) и мы идем сначала по нижней линии от $x = +\infty$ к $x = 0$, а затем по верхней от $x = 0$ до $x = +\infty$, оставляя, таким образом, отображаемую область слева.

Видоизменим задачу: требуется внутренность угла α отобразить на всю плоскость z , а только на половину ее, например на верхнюю полуплоскость z .

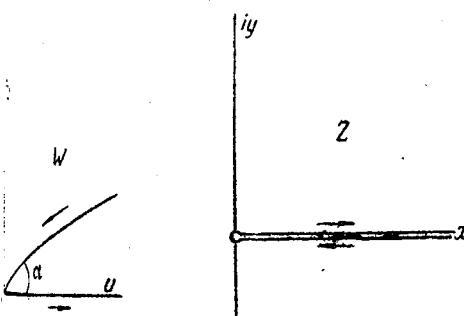


Рис. 5

Решение дается функцией $z = w^{\frac{m}{2}}$, ибо тогда ось $+u$ изобразится попрежнему в ось $+x$, а прямая $r e^{i\alpha}$ отобразится в прямую

$$r^{\frac{m}{2}} e^{i\alpha} \frac{m}{2} = r^{\frac{m}{2}} e^{i\pi},$$

на ось $-x$, а потому отобразится друг на друга и внутренности углов α и π ; при обходе контура мы идем от $x = -\infty$ до $x = +\infty$.

Сложная задача: пусть вершина угла находится не в начале координат, а в точке w_0 , и весь угол повернут из прежнего положения на угол β (рис. 6). Тогда, очевидно, надо лишь перенести его вершину в точку $w = 0$ и затем построить все радиусы-векторы $w - w_0$ на угол $-\beta$, следовательно, решение дается в виде

$$z = [(w - w_0) e^{-i\beta}]^{\frac{m}{2}},$$

или в более общем случае

$$z = (w - w_0)^{\frac{m}{2}} A e^{-i\beta \frac{m}{2}},$$

где A есть действительное число. При этом вершина угла w_0 соответствует $z = 0$, т. е. начало координат. Если мы желаем,

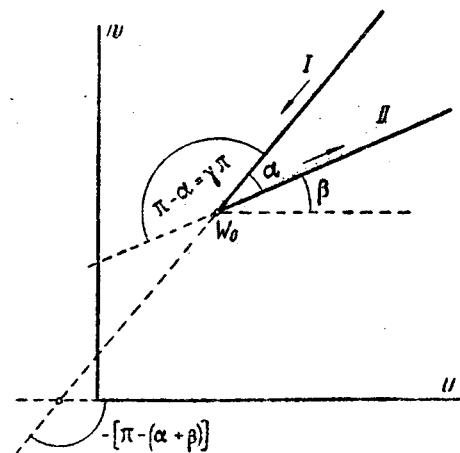


Рис. 6

чтобы точке w_0 соответствовала некоторая точка x оси $x = a_0$, то выражение для z должны написать так:

$$z = (w - w_0)^{\frac{m}{2}} A e^{-i\beta \frac{m}{2}} + a_0.$$

Исследуем соотношения при такой функции несколько подробнее, что нам пригодится дальше. Определим отсюда w :

$$w = B e^{i\beta} (z - a_0)^{\frac{2}{m}} + w_0.$$

Возьмем производную от w по z :

$$\frac{dw}{dz} = C (z - a_0)^{\frac{2}{m} - 1} = \frac{C}{1 - \frac{2}{m}} \frac{1}{(z - a_0)^{\frac{1}{m}}}. \quad (4)$$

Здесь γ имеет следующий смысл (рис. 6): угол, дополнительный для α до π , равен $\pi - \alpha = \pi - \frac{2\pi}{m} = \pi \left(1 - \frac{2}{m}\right) = \pi\gamma$.

Представим себе, что точка z движется от $z = -\infty + i \cdot \infty$ к $z = +a_0$ по действительной оси x ; соответствующая точка

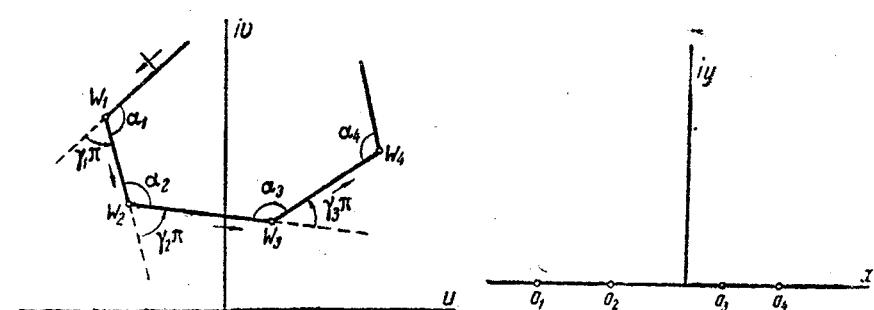


Рис. 7

w движется при этом по стороне I угла α от $w = \infty + i \cdot \infty$ к точке $w = w_0$.

Пока $z < a_0$, имеем $z - a_0 < 0$ и знаменатель у $\frac{dw}{dz}$ имеет вид

$$|z - a_0|^\gamma (-1)^\gamma = |z - a_0|^\gamma e^{i\pi\gamma},$$

поэтому

$$\arg \frac{dw}{dz} = \arg C - \gamma\pi.$$

Когда $z = a_0, \frac{dw}{dz} = \infty$, и мы имеем особую точку, в которой конформность нарушается. Когда z становится $> a_0, z - a_0$ делается > 0 , а множитель $(-1)^\gamma = e^{i\pi\gamma}$ в знаменателе исчезает; тогда получается, что

$$\arg \frac{dw}{dz} = \arg C.$$

Таким образом при переходе точки z через a_0 направление движения точки w изменяется на угол $+\gamma\pi$; раньше, вдоль стороны I , оно составляло с направлением $+x$ угол (рис. 6) $[\pi - (\alpha + \beta)]$, а теперь $[\pi - (\alpha - \beta)] + \gamma\pi = \beta$, т. е. совпадает с направлением стороны II .

§ 8. Отображение многоугольника в полу-плоскость

Пусть требуется отобразить область многоугольника в плоскости w (рис. 7) на всю верхнюю полу-плоскость z^2). При этом пусть вершинами многоугольника $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ соответствуют точки $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ оси действительных величин в плоскости z . Перенумерованы вершины w и точки a в том порядке, в каком их надо проходить, чтобы отображаемые друг на друга области многоугольника и полу-плоскости оставались слева.

В точках w_1, w_2, \dots, w_n меняется на углы $\gamma_1\pi, \gamma_2\pi, \dots, \gamma_n\pi$ направление продвижения точки w в то время, как dz все время направлено по оси x , ибо она есть контур верхней полуплоскости; поэтому в точках w_1, w_2, \dots аргумент производной должен меняться скачком, как в предыдущем параграфе, на $\gamma_1\pi, \gamma_2\pi, \dots$ и т. д. Следовательно, выражение производной должно содержать в себе произведение функций вида такого же, как правая часть выражения (4),—произведение потому, что только тогда изменения аргумента у одного из выражений $(z - a_n)^{\gamma_n}$ на величину $\gamma_n\pi$ будет в то же время изменением аргумента всей правой части и в то же время отдельные скачки $\gamma_1\pi, \gamma_2\pi, \dots$ и т. д. будут суммироваться, выражая поворот следующих одна за другой сторон многоугольника. Таким образом должно быть

$$\frac{dw}{dz} = \frac{C}{(z - a_1)^{\gamma_1} \cdot (z - a_2)^{\gamma_2} \cdots (z - a_n)^{\gamma_n}}. \quad (5)$$

Для практических применений нам оказывается иногда можно и не искать самой функции $w = f(z)$ как интеграла от выражения (5), а достаточным является лишь знание $\frac{dw}{dz}$, в некоторых других случаях надо выражение (5) интегрировать и находить самую функцию w .

Проанализируем еще раз вопрос об аргументе $\frac{dw}{dz}$. Пройдем в плоскости z ось абсцисс от $x = -\infty$ до $x = +\infty$, т. е. будем давать z различные действительные значения; верхняя полуплоскость будет при этом оставаться слева. Пока $z < a_1$ все в двучлены в скобках < 0 ; вынося -1 за скобки, получаем, обозначая прямыми скобками абсолютные величины двучленов:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dz} &= Me^{i\mu} = \\ &= C \cdot |z - a_1|^{-\gamma_1} \cdot (-1)^{-\gamma_1} \cdot |z - \\ &\quad - a_2|^{-\gamma_2} \cdot (-1)^{-\gamma_2} \cdots |z - a_n|^{-\gamma_n} \cdot (-1)^{-\gamma_n} = \\ &= C \cdot |z - a_1|^{-\gamma_1} \cdot e^{-i - \gamma_1\pi} \cdot |z - a_2|^{-\gamma_2} \cdot e^{-i - \gamma_2\pi} \cdots |z - \\ &\quad - a_n|^{-\gamma_n} \cdot e^{-i - \gamma_n\pi}, \end{aligned} \quad (6)$$

откуда

$$\mu = \arg C - \gamma_1\pi - \gamma_2\pi - \cdots - \gamma_n\pi.$$

При прохождении z через точку a_1 двучлен $(z - a_1)$ перестает быть отрицательным, от этого исчезает множитель $e^{-i - \gamma_1\pi}$ в только что написанном выражении, следовательно, μ увеличивается на $+\gamma_1\pi$; при прохождении z через точку a_2 исчезает $e^{-i - \gamma_2\pi}$ и μ еще увеличивается на $+\gamma_2\pi$ и т. д.; а так как точкам a_1, a_2, \dots соответствуют w_1, w_2, \dots , то направление обхода меняется в этих точках на указанные углы и w обходит контур данного многоугольника w_1, w_2, \dots

Следствием является отображение всей внутренней области многоугольника w на всю верхнюю полу-плоскость z .

Применим полученные сведения к конформному преобразованию полей.

III. Конформные преобразования полей

Плоскопараллельным полем называется такое поле, в котором напряженность поля зависит только от двух координат, так что, во-первых, силовые линии являются плоскими и вымы и, во-вторых, конфигурация их в плоскостях, параллельных плоскости силовой линии, одинакова. В таком же эквипотенциальные поверхности, пересекаясь с плоскостью в которых лежат силовые линии, дают эквипотенциальные кривые линии, ортогональные силовым.

Самый простой пример плоскопараллельного поля представляет электрическое поле между двумя плоскими обкладками конденсатора с бесконечно большой поверхностью как на находящимися на конечном расстоянии одна от другой (рис. Назовем такой конденсатор идеальным плоским конденсатором.

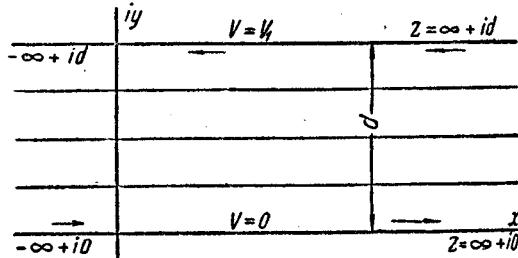


Рис. 8

Если одна обкладка пересекается с плоскостью чертежа линии оси абсцисс, а другая по линии, ей параллельной $u = d$, то силовые линии представляются прямыми $x = \text{const}$ и эквипотенциальные линии — прямыми $y = \text{const}$ ($d > 0$). Примем для дальнейшего, что нижняя обкладка обладает потенциалом $V = 0$, а верхняя — потенциалом $V = V_1 > 0$; вектор напряженности поля E_s будет направлен сверху вправо.

Пусть с помощью некоторой функции $w = f(z)$ область w между обкладками отображена на некоторую область в плоскости w . Введем в рассмотрение функцию, обратную данной

$$z = F(w),$$

иначе

$$x + iy = \psi(u, v) + i\varphi(u, v).$$

Всякая линия $u = c_1$ есть эквипотенциальная линия с постоянным потенциалом $\frac{V_1}{d} c_1$; в плоскости w она отображается в линию

$$\varphi(u, v) = c_1.$$

Выберем такой масштаб, чтобы $V_1 \equiv d$, тогда $\varphi(u, v) = c_1$ есть величина потенциала на полученной эквипотенциальной кривой, а для потенциала имеет место уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial v^2} = 0,$$

или, что то же самое, в данном случае

$$\frac{\partial^2 u}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial v^2} = 0.$$

Нетрудно видеть, что это уравнение есть следствие условия Коши-Римана, сформулированных для данной функции $u = F(w)$ согласно формулам (2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{du} &= \frac{dy}{dv}, \\ \frac{dx}{dv} &= -\frac{dy}{du}, \end{aligned} \right\}$$

ибо дифференцируя первое из этих уравнений по v , а второе по u и вычитая второе из первого, получим уравнение вида

Так же легко получается из условий Коши-Римана, что

$$\frac{\partial^2 x}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial v^2} = 0.$$

Иным способом это уравнение получим, если будем считать эквипотенциальными линиями прямые $x = c_2$ и $\psi(u, v)$ при z за величину потенциала, что в свою очередь подразумевает, что обкладки конденсатора повернуты из горизонтального в вертикальное положение.

²⁾ Задача эта впервые решена для некоторых частных случаев Sch warz, „Über einige Abbildungsaufgaben“, „Journ. für reine und angew. Mathem.“ Bd. 70, 1869; также „Ges. math. mathem. Abhandl.“ B. II и обобщена Kirchhoff, „Vorlesungen über mathem. Physik“, B. III, стр. 100—106 и Schläfli, „Journal für reine und angew. Math.“ Bd. 78, 1872.

Очевидно, что и наоборот

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0$$

Как вытекает из следствия конца § 4, система кривых $(u, v) = c_1$ и $\psi(u, v) = c_2$ ортогональна.

Если φ есть потенциал, то, очевидно,

$$E_w = -\frac{\partial \varphi}{\partial u} - i \frac{\partial \varphi}{\partial v}$$

напряженность поля в плоскости w . Аналогично формуле (7) имеем

$$\frac{dz}{dw} = \frac{dx}{du} + i \frac{dy}{du}$$

на основании (7)

$$\frac{dz}{dw} = \frac{\partial \varphi}{\partial u} + i \frac{\partial \varphi}{\partial v} = -i \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial u} + i \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right),$$

$$i \frac{dz}{dw} = -\frac{\partial \varphi}{\partial u} + i \frac{\partial \varphi}{\partial v}.$$

Сравнивая это выражение с E_w , можем написать:

$$E_w = K \left(i \frac{dz}{dw} \right),$$

где буква K означает, что надо взять не самую далее в скобках стоящую комплексную величину, а величину, ей сопряженную.

Мы предположили, что $V_1 \equiv d$; если мы будем у отсчитывать в единицах длины, а не потенциала, то надо за потенциал счесть величину $\frac{V_1}{d} \varphi$, а потому и

$$E_w = \frac{V_1}{d} K \left(i \frac{dz}{dw} \right) \quad (8)$$

и, вынося i за скобки и учитывая знак K ,

$$E_w = -i \frac{V_1}{d} K \left(\frac{dz}{dw} \right).$$

Член $\left(-i \frac{V_1}{d} \right)$ имеет определенный физический смысл: это вектор напряженности поля E_w в плоском конденсаторе между плоскостями z ; таким образом в данном частном случае

$$E_w = E_s \cdot K \left(\frac{dz}{dw} \right). \quad (9)$$

Это же соотношение (9), понятно, имеет место и в общем случае конформного преобразования двух полей одного в другом⁴⁾, когда ни одно из них не есть поле плоского конденсатора.

§ 10. Отображение поля идеального плоского конденсатора на верхнюю полуплоскость

Остановимся на следующей задаче. Требуется конформно отобразить поле, описанное в предыдущем параграфе идеального плоского конденсатора в плоскости z на всю верхнюю полуплоскость нового комплексного переменного

$$\zeta = \xi + i\eta.$$

В § 6 подобная задача решалась. С помощью показательной функции полоса шириной от $u=0$ до $u=2\pi$ в плоскости z отображалась на всю плоскость w , иначе — полоса от $u=0$ до $u=\pi$ отображалась на верхнюю полуплоскость w . Если ширина полосы есть d , то, очевидно, надо ввести переводочный множитель при z , и вид функции, отображающей полосу на полуплоскость, получается такой:

$$\zeta = e^{\frac{\pi}{d} z}.$$

Устанавливаем такое соответствие между контурами z и ζ . Обход контура z производим так: от точки $z=+\infty+id$ вдоль линии $u=d$ до точки $z=-\infty+id$, чему пусть соответствует обход по оси ξ от $\xi=-\infty$ до $\xi=-\tau$, где τ бесконечно малая величина. Эта половина оси ξ имеет тот же потенциал V_1 , что верхняя обкладка конденсатора, которую мы прошли. При таком обходе отображаемые друг от

друга области, — полоса z и верхняя плоскость ζ , — остаются слева.

Затем идем от точки $z=-\infty+id$ до точки $z=-\infty+i\cdot 0$ по вертикали, т. е. по силовой линии, а в плоскости ζ от $\xi=-\tau$ до $\xi=+\tau$ по бесконечно малой полуокружности, в которую преобразуется упомянутая вертикаль, ибо здесь

$$|\zeta| = e^{\frac{\pi}{d} x} = \frac{1}{e^{\frac{\pi}{d} \infty}}.$$

Точка $\zeta=0$ есть точка особая, в ней

$$\frac{dz}{d\zeta} = \infty,$$

и эту точку надо обойти, например, по упомянутой бесконечно малой окружности, исключив ее из всей картины конформного преобразования.

Затем идем от $z=-\infty+i\cdot 0$ до $z=+\infty+i\cdot 0$ по оси x , а в плоскости ζ от $\xi=+\tau$ до $\xi=+\infty$. Прямые силовые линии $x=c_1$ преобразуются при таком конформном отображении в полуокружности радиусов

$$e^{\frac{\pi}{d} c_1}.$$

Напряженность поля E_ζ в любой точке плоскости ζ определяется по формуле (9) или еще удобнее по формуле (8).

Произведем вычисление:

$$E_\zeta = \frac{V_1}{d} K \left(i \frac{dz}{d\zeta} \right) = \frac{V_1}{d} K \left(i \frac{d}{\pi} \cdot \frac{1}{\zeta} \right) = \frac{V_1}{\pi} K \left(\frac{i}{\zeta} \right).$$

Полагая $\zeta=re^{i\varphi}$, имеем:

$$E_\zeta = \frac{V_1}{\pi r} e^{i\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)}.$$

Например в точке 2 рис. 4, где $\varphi = \frac{\pi}{4}$,

$$E_{\zeta 2} = \frac{V_1}{\pi r} e^{-i\frac{\pi}{4}},$$

что и показано на рисунке.

Величина напряженности обратно пропорциональна радиусу полуокружности силовой линии, и $|E_\zeta| \cdot \pi r = V_1$.

Эквипотенциальные линии $u=c_3$ конденсатора z преобразуются в прямые, исходящие из точки $\zeta=0$ под углами $\varphi = \frac{\pi}{d} u$.

§ 11. Отображение поля, имеющего два разных потенциала на контуре, составленном из прямых линий, на поле идеального плоского конденсатора

Поле всякого действительно осуществленного конденсатора около краев обкладок неоднородно; вычислить напряженность его здесь можно, отобразив его конформно на поле идеального конденсатора⁴⁾.

Так как в общую формулу (12) для перевычисления напряженности поля входит не сама функция w , а ее производная, то задача решается следующим приемом: сначала мы по формуле (5) отобразим данный многоугольный контур w на верхнюю полуплоскость ζ и определим $\frac{dw}{d\zeta}$; затем, используем результаты предыдущего параграфа, где мы отображали поле идеального конденсатора на ту же полуплоскость, что нам дало значение E_ζ в любой точке; таким образом, применяя формулу (9), прежде всего получаем:

$$E_w = E_\zeta \cdot K \left(\frac{dw}{d\zeta} \right) = \frac{V_1}{\pi} K \left(\frac{i \frac{1}{\zeta}}{\frac{dw}{d\zeta}} \right); \quad (10)$$

остается только для различных точек ζ подставлять сюда значения ζ и $\frac{dw}{d\zeta}$.

⁴⁾ Эта задача решена Kirchhoff (I. c.); изложение в настоящей статье отлично от способа рассуждений Kirchhoff. См. также Weberg, Die konforme Abbildung in der elektrischen Festigkeitslehre, Arch. für Elekt., B. XVII, N. 2, 1926; см. также Л. И. Балабуха, «Математический расчет полей электростатики», «Теоретич. и эксперимент. электротехника» № 1-2, 1932.

На рис. 9 изображены края плоского конденсатора. Чтобы применить формулу (5), устанавливаем соответствие точек контура w с точками оси ζ плоскости ζ .

Обход контура w начинаем с бесконечно удаленной точки $w_1 = +\infty - ib$, которой пусть соответствует точка $\zeta = a_1 = -\infty$; затем идем к точке $w_2 = 0 - ib$, которой соответствует $a_2 = -\lambda$; затем в плоскости w направление обхода меняется на угол $\gamma_2 \pi = -\pi$, так что $\gamma_2 = -1$, и точке $w_3 = +\infty - ia$ соответствует точка $a_3 = -\tau$, где τ —бесконечно малая величина; от w_3 идем к $w_4 = +\infty + ia$, причем направление меняется на $\gamma_3 \pi = +\frac{\pi}{2}$, так что $\gamma_3 = +\frac{1}{2}$, а в плоскости ζ к $a_4 = +\tau$; затем к $w_5 = 0 + ib$ с таким же изменением направления $\gamma_4 \pi = +\frac{\pi}{2}$, так что $\gamma_4 = +\frac{1}{2}$, чему соответствует точка $a_5 = +\lambda$; в w_6 направление опять меняется на $-\pi$, так что $\gamma_5 = -1$; наконец, точке $w_6 = +\infty + ia$ соответствует $a_6 = +\infty$. Все перечисленные точки суть точки особые, и мы их бесконечно малыми дугами обходим, исключая из картины конформного преобразования.

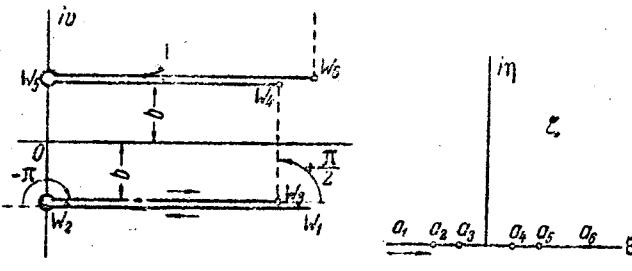


Рис. 9

Точки w_3 и w_4 лежат на достаточно большом расстоянии от оси u , чтобы между ними поле можно было считать равнинным; расстояние это мы обозначали через $+\infty$.

Точек же w_1 и w_6 мы вообще не рассматриваем, считая, что прямые $w_5 w_6$ и $w_2 w_1$ просто уходят в бесконечность. Можно было бы ввести в рассмотрение дугу окружности с центром в $w = 0$ и бесконечно большим радиусом, дугу, соединяющую точки w_6 и w_1 и пересекающую ось абсцисс u на отрицательной бесконечности. Таким образом в точке w_6 делается поворот $\frac{\pi}{2}$ влево, затем в точке w_1 делается еще такой же поворот. Обходу по этой дуге соответствует обход по полуокружности в плоскости ζ от точки a_6 до a_1 с такими же поворотами.

Таким образом мы можем написать, зная значения a и γ , что

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{C}{(\zeta + \lambda)^{-1} (\zeta + \tau)^{\frac{1}{2}} (\zeta - \tau)^{\frac{1}{2}} (\zeta - \lambda)^{-1}}.$$

Полагая в пределе $\tau = 0$, имеем

$$\frac{dw}{d\zeta} = C \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{\zeta}.$$

Постоянную C мы находим интегрированием dw по пути от точки w_3 до точки w_4 и соответственно от $\zeta = -\tau$ до $\zeta = +\tau$:

$$\int_{w_3}^{w_4} dw = w_4 - w_3 = 2ib = C \int_{\zeta = -\tau}^{\zeta = +\tau} \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{\zeta} d\zeta = \\ = \left[C \frac{\zeta^2}{2} - C \lambda^2 \ln \zeta \right]_{-\tau}^{+\tau}.$$

Полагая $\zeta = \tau e^{i\varphi}$, где при $\zeta = -\tau$, $\varphi = \pi$, а при $\zeta = +\tau$, $\varphi = 0$, имеем окончательно, что квадратные скобки дают величину

$$+ C \lambda^2 i \pi,$$

и, таким образом,

$$2ib = C \lambda^2 i \pi,$$

откуда

$$C = \frac{2b}{\lambda^2 \pi};$$

следовательно,

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{2b}{\lambda^2 \pi} \cdot \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{\zeta} \quad (11)$$

$$w = \frac{2b}{\lambda^2 \pi} \left(\frac{\zeta^2}{2} - \lambda^2 \ln \zeta \right) + C. \quad (12)$$

Постоянную C_1 определяем из условия, что когда $w = w_2 = +i$, то $\zeta = a_2 = +\lambda$, или, что дает тот же результат $w_3 = -i$, $\zeta = -\lambda$:

$$C_1 = \left(\frac{2}{\pi} \ln \lambda + i - \frac{1}{\pi} \right) b.$$

Так как уравнение (12) решать относительно ζ неудобно, проще всего при построении картины поля исходить из силовых линий поля ζ , которые являются полуокружностями. Полагая

$$\zeta = A e^{i\varphi},$$

где $A = \text{const}$, и изменяя φ от 0 до π , вычисляем по (12) значения w и строим силовую линию; а вычислив по (11) $\frac{dw}{d\zeta}$, по (10) вычисляем напряженность поля E_w в эти же точках w . Изменяя ζ модуль и удерживая аргумент постоянным, получим, проделав вычисления величин w , эквивалентные линии в плоскости w .

В более сложных случаях интегрирование выражения $\frac{dw}{d\zeta}$ встречается с трудностями.

Остановимся еще на учете влияния толщины пластин обкладок (рис. 10⁵). Называя соответствующие различным w действительные значения ζ через a с такими же индексами, ображая точки w_4 и w_5 в точки $a_4 = -\tau$, $a_5 = +\tau$ и помножив затем $\tau = 0$, получаем, применяя формулу (5):

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{C}{(\zeta - a_2)^{-\frac{1}{2}} (\zeta - a_3)^{-\frac{1}{2}} (\zeta + \tau)^{\frac{1}{2}} (\zeta - \tau)^{\frac{1}{2}} (\zeta - a_6)^{-\frac{1}{2}} (\zeta - a_7)^{-\frac{1}{2}}} \\ \text{или} \\ \frac{dw}{d\zeta} = C \sqrt{(\zeta - a_2)(\zeta - a_3)(\zeta - a_6)(\zeta - a_7)}.$$

Замечание. Следует заметить, что при выборе соответствующих друг другу точек: вершин многоугольника и точек действительной оси ζ , мы произвольно можем назначить такое соответствие только для трех пар точек ζ , этим вполне определяется масштаб для перевода w . Остальные точки определяются аналогично постоянной C .

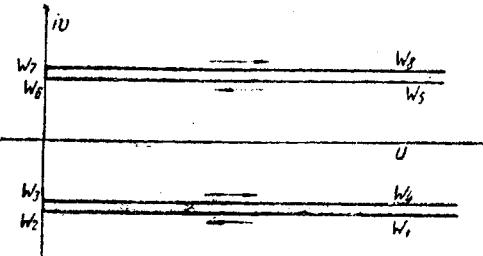


Рис. 10

§ 12. Отображение поля, имеющего нескольких потенциалов на своем многоугольном контуре

На рис. 11 представлено поле между тремя прямоугольными границами I , II , III с тремя разными потенциалами V_1 , V_2 , V_3 , причем $V_1 > V_2 > V_3$. В практических расчетах I и II могут представлять две обмотки трансформатора: I —высокого, II —низкого напряжения, а III —кожух его. Чтобы вычислить напряжение поля в любой его точке, надо отобразить его при помощи полуплоскости ζ на поле идеального конденсатора тоже с тремя потенциалами⁶). Если мы пойдем на рис. 11 вдоль по контуру, начиная с точки w_1 по части контура, имеющей потенциал V_1 , то мы увидим, что в некоторой точке h_w силовые линии, направлявшиеся до этой точки к части контура III с потенциалом V_3 , дальше ее направляются уже к части контура II с потенциалом V_2 , а далее, идя по этой именно части II контура V_2 , замечаем, что далее точки g_w силовые линии выходят из II и идут к III .

Представим себе, что в поле идеального конденсатора с потенциалами обкладок V_1 и V_3 , рис. 12, мы поместили бесконечно тонкую металлическую пластинку так, что она совпала в точности с поверхностью уровня потенциала V_2 . Так как V_2 по условию заключается между V_1 и V_3 , то такую поверхность уровня всегда можно подобрать.

⁵ Rogowski, Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators, Arch. für Elektr., B. XII, Heft. 1, 1923.

⁶ Esta задача впервые решена в Labus, Arch. f. Elektr., B. XI, H. 1, 1917.

Поверхности у этой пластинки две, и она, конечно, представляет собой двойной электрический слой. Обход ее будем проводить, как указано стрелками на рис. 12.

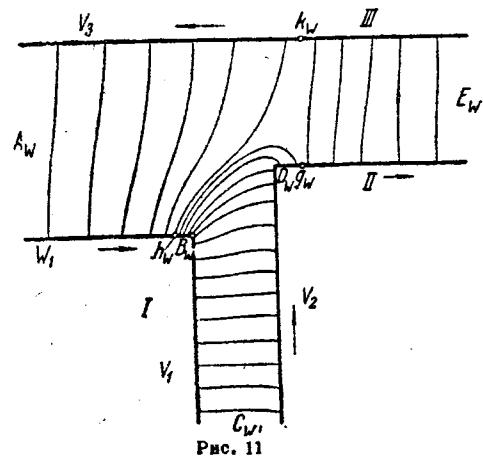


Рис. 11

соответствующие друг другу точки на всех плоскостях w , z и ζ указаны одинаковыми буквами с индексами w , z и ζ . Таким образом полю между I и III частями контура плоскости w (рис. 11) соответствует поле вправо от ординаты h_2 — полю z (рис. 12); полю w между I и II частями контура w соответствует поле между верхней обкладкой z и нижней полосой, и, наконец, полю между II и III — полю w между обкладками.

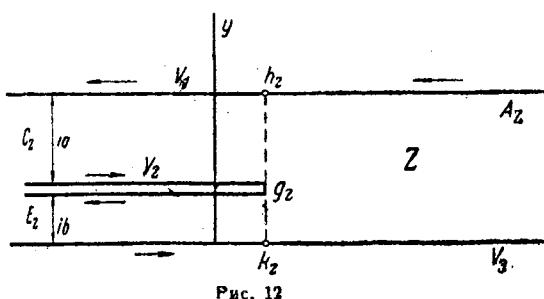


Рис. 12

Читателю рекомендуется строго проследить соответствие полю w , z и ζ друг к другу в каждой отдельной части их. Давайте теперь выражение $\frac{dz}{d\zeta}$ для отображения поля с контуром z (рис. 12) на верхнюю полуплоскость ζ (рис. 13). Края многоугольника z таковы: A_z , C_z , g_z , и E_z ; или пусть соответствующие точки $A_\zeta = -\infty$, $C_\zeta = -1$, g_ζ и $E_\zeta = +1$, причем $g_1 = -1$ и $g_2 = +1$. Тогда

$$\frac{dz}{d\zeta} = \frac{c_1}{(\zeta + 1)^{+1} (\zeta - g_\zeta)^{-1} (\zeta - 1)^{+1}},$$

$$z = c_1 \int \frac{\zeta - g_\zeta}{\zeta^2 - 1} d\zeta + c_2. \quad (13)$$

Проведя интегрирование, получаем

$$z = c_1 \left\{ \frac{1 - g_\zeta}{2} \ln(\zeta - 1) + \frac{1 + g_\zeta}{2} \ln(\zeta + 1) \right\} + c_2.$$

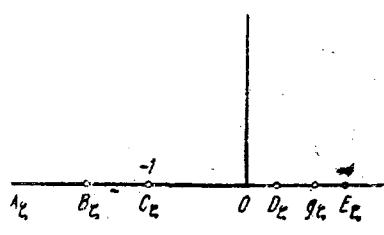


Рис. 13

Так как мы задались тремя точками A_ζ , C_ζ и E_ζ , то g_ζ надо определить вычислением, а не задавать заранее, тоже и c_1 . Интегрируем вдоль бесконечно малых полуокружностей около точек C_ζ и E_ζ ; этим полуокружностям соответствуют находящиеся на бесконечности прямолинейные, по линиям направленные пути ia и ib — метод нахожде-

ния c_1 , совершенно подобный описанному в предыдущем параграфе нахождению C .

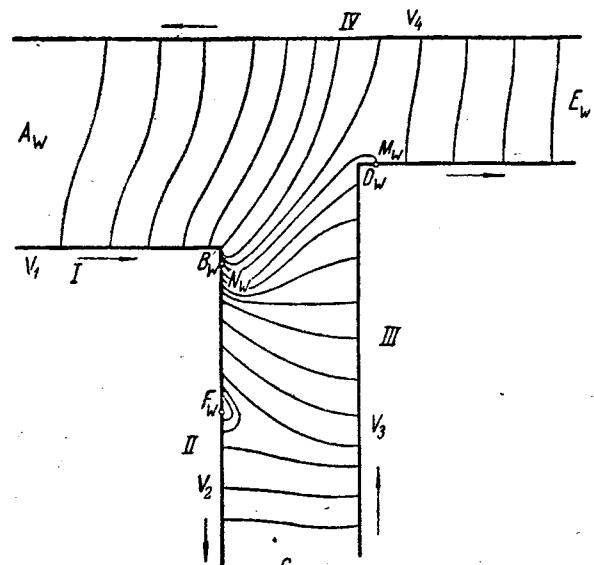


Рис. 14

Точки полуокружности около C_ζ выражаются так:

$$\zeta = -1 + \rho e^{i\varphi},$$

и из выражения (13) имеем

$$\int dz = -ia = c_1 \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \frac{(-1 - g_\zeta + \rho e^{i\varphi}) i\rho e^{i\varphi}}{\rho e^{i\varphi} (\rho e^{i\varphi} - 2)} d\varphi.$$

Полагая после сокращения здесь $\rho = 0$, получаем

$$-ia = -i c_1 \cdot \frac{1 + g_\zeta}{2} \cdot \pi,$$

или

$$c_1 (1 + g_\zeta) = \frac{2}{\pi} a. \quad (14)$$

Подобным же интегрированием по полуокружности около точки E_ζ , где

$$\zeta = +1 + \rho e^{i\varphi}$$

получается совершенно аналогично

$$\int dz = -ib = -i c_1 \frac{1 - g_\zeta}{2} \pi,$$

или

$$c_1 (1 - g_\zeta) = \frac{2}{\pi} b. \quad (15)$$

Из (14) и (15) имеем

$$c_1 = \frac{a + b}{\pi} \text{ и } g_\zeta = \frac{a - b}{a + b}.$$

Отображающая функция получает вид

$$z = \frac{b}{\pi} \ln(\zeta - 1) + \frac{a}{\pi} \ln(\zeta + 1) + c_2. \quad (16)$$

c_2 определяется помещением начала координат плоскости z в ту или иную точку.

Итак, посредством соотношения (16) области z и ζ конформно отображаются одна на другую.

Теперь надо отобразить многоугольный контур w на полуплоскость ζ , выбрав точки действительной оси ζ плоскости ζ соответственно вершинам углов w ; эти точки показаны на рис. 13, — после чего можно определить E_w по формуле

$$E_w = E_\zeta K \left(\frac{d\zeta}{dw} \right) = E_\zeta K \left(\frac{dz}{dw} \right) K \left(\frac{dw}{d\zeta} \right)$$

или

$$E_w = E_\zeta K \left(\frac{\frac{dz}{d\zeta}}{\frac{dw}{d\zeta}} \right).$$

Каким образом строить силовую линию в этом случае?

Берем значения z вдоль по некоторой силовой линии; из (16) определяем значения ζ , соответствующие этим z , и на основании выражения $w = f(\zeta)$ вычисляем w , соответствующие этим ζ , и, следовательно, взятые z .

Практически очень важно бывает знать величину напряженности поля около углов, т. е. для точек ζ , лежащих около точек, соответствующих вершинам углов, и именно вблизи действительной оси, т. е. можно давать ζ только действительные значения.

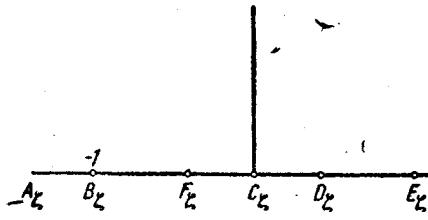


Рис. 15

Подобным же образом решается задача и в том случае, когда контур имеет не три, а четыре или больше различных потенциала. При этом надо представить себе введенными в поле идеального конденсатора две или больше проводящих бесконечно тонких пластин, совпадающие как раз с поверхностями уровня соответствующих потенциалов. Далее задача решается путем, совершенно аналогичным решению предыдущего случая.

Главная трудность этих задач заключается в интегрировании выражения для dw , когда $\frac{dw}{d\zeta}$ мы уже составили, и то же для $\frac{dz}{d\zeta}$.

Последним случаем здесь является тот, когда потенциал вдоль определенных частей контура непостоянен, чему соответствует в практике, например, падение потенциала вдоль обмоток трансформатора⁷⁾.

Чтобы иметь возможность свести такое поле к полю идеального конденсатора, представим себе в последнем плоскость, идущую под определенным углом к направлению силовых линий. Плоскость эту нельзя мыслить себе проводящей, так как она находится в местах с разными потенциалами, потенциал вдоль ее непрерывно изменяется. Силовые линии все пересекают ее под одним и тем же углом; следовательно, при конформном преобразовании силовые линии в области w должны входить в соответствующую часть контура тоже все под одинаковым углом.

Если последнее условие не выполняется, то в поле идеального конденсатора надо вообразить уже не упомянутую плоскость, а на чертеже — не прямую линию, а криволинейную поверхность, которая на чертеже даст кривую линию. Но при вхождении в контур такой кривой линии мы не сможем так просто решить задачу о конформном отображении такой области на полу平面, как это мы делали до сих пор: формула (5) здесь уже неприменима.

Рассмотрим пример. На рис. 14 часть контура поля $I-II$ есть обмотка высокого напряжения; ниже точки F_2 потенциал ее V_2 ; выше точки E_2 потенциал равномерно повышается до величины V_1 в точке B_2 , и остается таким далее; III есть обмотка низкого напряжения, а IV — кожух.

Обход производим от точки A_2 на бесконечности по части контура $I-II$ до C_2 тоже на бесконечности, затем по части III , точку E_2 на бесконечности и часть IV .

Чтобы отобразить этот контур на полу平面, назначим $A_2 = -\infty$, $B_2 = -1$ и $C_2 = 0$ (рис. 15), так что неизвестным остаются точки D_2 и E_2 ; далее, нетрудно видеть, что

$$\gamma_B = -\frac{1}{2}, \gamma_C = +1, \gamma_D = -\frac{1}{2}, \gamma_E = +1;$$

7) Labus, „Arch. f. Elektr.“ I. c. и B. XXI, N. 3, 1928.

таким образом,

$$\frac{dw}{d\zeta} = \frac{C_1}{(\zeta + 1)^{\frac{1}{2}} (\zeta - 0)^{\frac{1}{2}} (\zeta - \xi_D)^{\frac{1}{2}} (\zeta - \xi_E)^{\frac{1}{2}}}$$

или

$$\frac{dw}{d\zeta} = C_1 \frac{\sqrt{(\zeta + 1)(\zeta - \xi_D)}}{\zeta(\zeta - \xi_E)}.$$

Переходим ко второй части нашей задачи, — к отображению друг на друга полу平面 ζ и поля идеального конденсатора, в котором строим следующий сложный многоугольный контур. Начинаем обход с точки $z = +\infty + id$ и идем верхней обкладке с потенциалом V_1 ; в точке B_2 сходим с ζ и идем по наклонной линии до точки F_2 , лежащей на верхности уровня с потенциалом V_2 , причем, понятно, $\zeta = \frac{V_2}{V_1} d$; далее, идем по эквипотенциальной линии до точки C_2 , на бесконечности; там поворачиваем на угол $\gamma_C \pi = -\pi$ (так что $\gamma_C = +1$) и идем по эквипотенциальной линии с потенциалом V_3 до точки M_2 , где поворачиваем на угол $\gamma_M \pi = -\pi$ (так что $\gamma_M = -1$), идем до точки E_2 на бесконечности и опять поворачиваем на угол $\gamma_E \pi = +\pi$ ($\gamma_E = +1$) идем по оси абсцисс до $x = +\infty$. Укажем индексом букве ξ , какой из точек B, F, C, M или E соответствует ζ . Тогда можем написать:

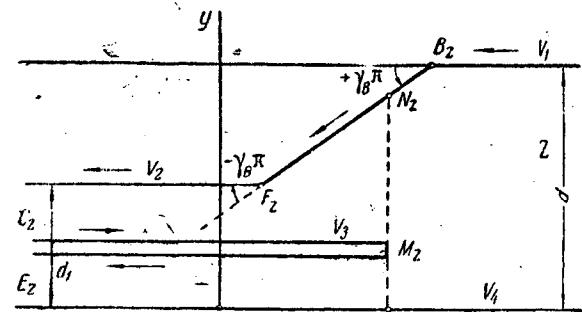


Рис. 16

$$\frac{dz}{d\zeta} = \frac{c_1}{(\zeta - \xi_B)^{\gamma_B} (\zeta - \xi_F)^{\gamma_F} (\zeta - \xi_C)^{\gamma_C} (\zeta - \xi_M)^{\gamma_M} (\zeta - \xi_E)^{\gamma_E}}$$

или, помня, что $\xi_B = -1$, $\xi_C = 0$,

$$\frac{dz}{d\zeta} = c_1 \frac{(\zeta - \xi_F)^{\gamma_F} (\zeta - \xi_M)^{\gamma_M}}{\zeta(\zeta + 1)^{\gamma_B} (\zeta - \xi_E)^{\gamma_E}}.$$

Следует заметить, что в рис. 16 содержится упрощение: пренебрегли тем потоком, который исходит из места ζ выше точки F_2 и замыкается около нее, входя в ту же контура II ниже точки F_2 . Чтобы отобразить и этот поток, надо было бы на рис. 16 из точки F_2 повернуть прямую ось x в сторону положительных ее значений и же сделав поворот на угол $-\pi$ пойти уже по прямой $F_2 C_2$.

§ 13. Отображение магнитного поля

Индукционные линии выходят из железа под углом α к поверхности, близким к прямому; если положить магнитную проницаемость железа равной бесконечности, то угол α в точности равен $\frac{\pi}{2}$. Таким образом поверхность же можно приближенно принять за поверхность уровня, и один полюс у этого железа, отобразив поле около него в однородное поле между двумя разноименными плоскими люсами с бесконечно большой поверхностью.

Таким образом можно построить картину поля, например пазу якоря динамомашины и вычислить напряженность в любой его точке.

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Пропускная способность линии передачи с трансформаторами на концах и настройка линии на половину волны напряжения

Инж. Е. Чернышева
ЛЭФИ

От редакции

Статья Е. Чернышевой дает в простой и литературной форме анализ уравнений длиной линии без потерь при длине l около (больше) длины полуволны. В статье рассматривается в элементарной форме и влияние импедансов трансформаторов (генераторов). Поскольку в дальнейшем вопрос о передаче полуволной будет освещаться на страницах «Электричества» (такое освещение уже имело место) в более полной и точной форме (учет потерь) и заинтересует, вероятно, широкие круги электротехников, редакция помещает статью Е. Чернышевой как вводную к этой серии.

Уравнения линии передачи при пренебрежении потерями в ней имеют, как известно, следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= E_r \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} + j I_r z_0 \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}, \\ I_r &= j \frac{E_r}{z_0} \sin 2\pi \frac{l}{\lambda} + I_r \cos 2\pi \frac{l}{\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

E_r — волновое сопротивление линии, равное при отсутствии потерь $\sqrt{\frac{L}{C}}$, l — длина линии, λ — длина волны напряжения.

При настройке линии на половину волны напряжения, т. е. при $l = \frac{\lambda}{2}$, получаем:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= -E_r, \\ I_r &= -I_r. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Напряжение и ток в середине линии могут быть получены из уравнения (1) при подстановке $l = \frac{\lambda}{4}$ следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= j z_0 I_r, \\ I_0 &= j \frac{E_r}{z_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнения (1) и (3) дают возможность проследить характер распределения напряжения в данной линии при различных величинах передаваемой мощности.

При передаче мощности, не превосходящей так называемую натуральную мощность ($P_{nat} = \frac{E^2}{z_0}$),

при сопротивлениях нагрузки $z > z_0$, напряжение в середине линии не может превзойти напряжения на приемном и генераторном концах линии. Так как передача мощности, превосходящей сколько-нибудь значительно величину

$\frac{E^2}{z_0}$, мало вероятно даже при очень высоких напряжениях, то следует признать, что при настройке линии на половину волны распределение напряжения вдоль линии оказывается благоприятным.

Другим преимуществом настройки линии на половину волны напряжения является повышение ее пропускной способности при настройке. Пропускная способность линии мы характеризуем величиной мощности, которую линия может пропускать

при заданных условиях напряжения. При равенстве напряжений на генераторном и приемном концах линии и при отсутствии потерь максимальную мощность можно определить из выражения:

$$P_{max} = \frac{E^2}{z_0 \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}}. \quad (4)$$

При приближении длины линии к величине $\frac{\lambda}{2}$ пропускная способность резко возрастает. Предельного случая точной настройки на половину волны мы касаться не будем, так как точная настройка при пренебрежении потерями потребовала бы исследования поведения системы передачи в условиях полного резонанса. Здесь следует оговориться, что пренебрежение потерями может внести не только количественное но и качественное искажение. Поэтому приведенные выводы можно рассматривать лишь как грубое приближение к действительности.

Увеличение пропускной способности линии повышает степень устойчивости системы благодаря увеличению запаса устойчивости. При длине, несколько превосходящей половину длины волны напряжения, теоретически условия работы получаются эквивалентными условиям работы очень коротких линий. Таким образом настройка линии на половину волны напряжения дает преимущества в отношении устойчивости параллельной работы и создает благоприятные условия напряжения.

В реальных условиях режим работы линии определяется не только постоянными линии, но также и постоянными повышающими и понижающими трансформаторами и машинами, включенных по концам. Наличие трансформаторов и машин влечет за собой уменьшение пропускной способности, изменение зависимости пропускной способности от напряжения передачи и, естественно, изменяет условия настройки линии.

Для исследования влияния сопротивления трансформаторов (и генераторов) на пропускную способность линии передачи воспользуемся уравнениями линии в обобщенном виде:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= A_0 E_r + B_0 I_r, \\ I_r &= C_0 E_r + D_0 I_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В уравнениях (5) величины A_0 , B_0 , C_0 , и D_0 представляют собой обобщенные постоянные, зависящие от характеристиках, приключенных по концам линии. В первом приближении влияние трансфор-

маторов (и генераторов) можно оценить, изобразив их в виде некоторых сопротивлений, включенных последовательно по концам линии. Оценка ошибки, которая получается благодаря пренебрежению проводимостью трансформатора, будет дана в дальнейшем. Если для дальнейшего упрощения

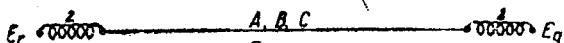


Рис. 1

предположить еще, что сопротивления по концам линии, изображающих трансформаторы, равны между собой, то мы приходим к схеме, изображенной на рис. 1.

Обобщенные постоянные подобной схемы определяются из напряжений

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= D_0 = A + Cz, \\ B_0 &= B + 2Az + z^2C, \\ C_0 &= C, \end{aligned} \right\} \quad (6) \quad ^1)$$

где $z = r + jx$.

Если пренебречь потерями в линии и трансформаторах, то уравнения (6) приводятся к виду:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} - \frac{x}{z_0} \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}, \\ B_0 &= j \left(z_0 \sin 2\pi \frac{l}{\lambda} + 2x \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} - \frac{x^2}{z_0} \sin 2\pi \frac{l}{\lambda} \right), \\ C_0 &= j \frac{1}{z_0} \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Подставляя значение постоянной B_0 в выражение для максимальной мощности, получим после простых преобразований (для случая $E = \text{const}$).

$$P_{\max} = \frac{E^2}{z_0^2 - x^2} \sin 2\pi \frac{l}{\lambda} + 2x \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} \quad (8)$$

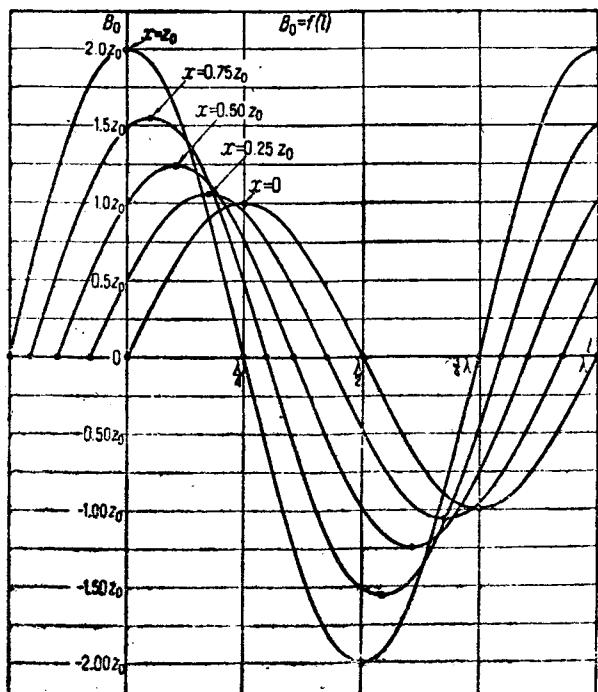


Рис. 2. Зависимость постоянной B_0 от длины линии при различных значениях сопротивления по концам. Длина линии выражена в долях волны напряжения, а сопротивление — в долях волнового сопротивления линии

или

$$P_{\max} = \frac{E^2}{z_0^2 + x^2} \sin \left(2\pi \frac{l}{\lambda} + \alpha \right),$$

где

$$\alpha = \arctg \frac{2x z_0}{z_0^2 - x^2}.$$

Полученные выражения дают возможность следить зависимость пропускной способности от ее длины при различных значениях сопротивлений по концам. Легко убедиться, что максимальная мощность изменяется по закону косеканса, при присутствии сопротивлений по концам уменьшают абсолютные значения максимальной мощности и сдвигают кривые в сторону более коротких линий. Соответствующие кривые даны на рис. 3. Величина сопротивлений x , включенных по концам линии, дана в долях волнового сопротивления. При таких условиях максимальная мощность получается выраженной в долях натуральной мощности. Для получения максимальной мощности в мегаваттах необходимо знать величину натуральной мощности для данного прохода при данных условиях напряжения.

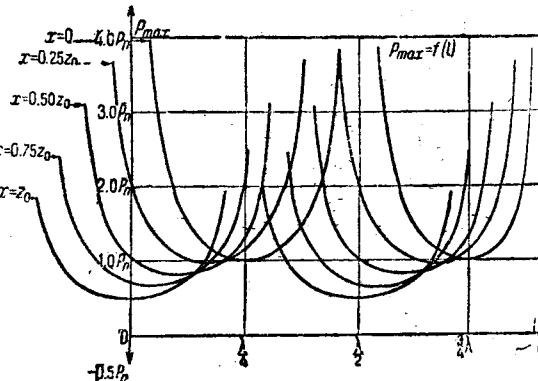


Рис. 3. Зависимость P_{\max} от длины линии при различных значениях сопротивления по концам. P_{\max} выражена в долях натуральной мощности

Для возможности подобного пересчета на рис. даны кривые зависимости натуральной мощности от величины напряжения передачи для проходного диаметром 40 mm. Напряжение и мощность выражены в фазе.

Что касается зависимости пропускной способности линии передачи от напряжения, то при отсутствии трансформаторов по концам она выражается квадратичной кривой.

Для выяснения влияния трансформаторов необходимо, как это видно из выражений (8) или знать зависимость величины x от напряжения.

Для трансформатора, как известно:

$$x = \frac{0.01 \times E^2}{P},$$

где P — мощность трансформатора, а x — реактивное сопротивление трансформатора, выраженное в процентах.

Таким образом, наиболее резко влияние трансформатора сказалось бы в том случае, если мощность его оставалась постоянной. В частности, если положить для высоковольтных трансформаторов

¹⁾ См. Е. Уильямс, Бейлз, "Power Limitations of Transm. System", "Tr. AIEE", 1924.

торов $x = 15\%$, то для величины максимальной способности получим выражение

$$P_{\max} = \frac{E^2}{z_0^2 + \frac{0,15 E^2}{P}} \sin \left(2\pi \frac{l}{\lambda} + \alpha \right), \quad (11)$$

$$z_0 = \frac{0,3 E^2}{P} \cdot \frac{1}{z_0} = \frac{0,0225}{P^2} E^4$$

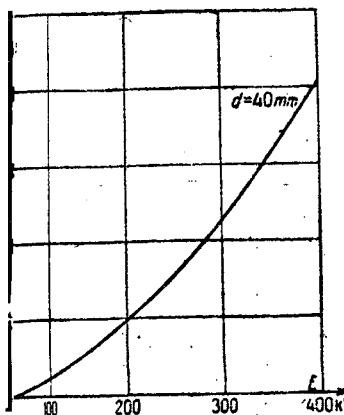


Рис. 3а

Конечно, что чем короче линия передачи, тем сильнее скажется влияние трансформатора. На рис. 4, 5 и 6 даны кривые зависимости максимальной мощности от напряжения передачи для случаев длины, равной соответственно 250, 500 и 1000 км, и мощности трансформаторов $P = 200$ MW (кривые a). Кривые с рис. 4, 5 и 6 дают ту же зависимость при отсутствии трансформаторов.

Характер кривых рис. 4 может привести к заблуждению, что трансформаторы ставят пределы повышению пропускной способности линии с возрастающим напряжением. Подобные утверждения можно иногда встретить на практике. Однако если учесть во внимание, что повышение напряжения передачи целесообразно лишь при соответствующем увеличении передаваемой мощности, а следовательно, и при увеличении мощности трансформаторов, то выводы окажутся совершенно иными. Если передаваемая мощность растет пропорционально квадрату напряжения передачи, что обычно имеет место, то как видно из выражения (11), характер зависимости пропускной способности от напряжения не будет меняться благодаря присутствию трансформаторов. Если положить мощность трансформаторов $P = \frac{E^2}{z_0}$, то для пропускной способности получим

$$P_{\max} = \frac{E^2}{1,0225 z_0 \sin \left(2\pi \frac{l}{\lambda} + \alpha \right)}, \quad (12)$$

$$\alpha \approx 17^\circ.$$

Кривые b на рис. 4, 5 и 6 дают эту зависимость универсальной научной библиотеки

На рис. 3 б даны кривые зависимости пропускной способности линии передачи от ее длины при наличии ее по концам трансформаторов, мощность которых равна соответственно 200 MW и $\frac{E^2}{z_0}$.

Из приведенных соображений следует, что при наличии трансформаторов характер зависимости

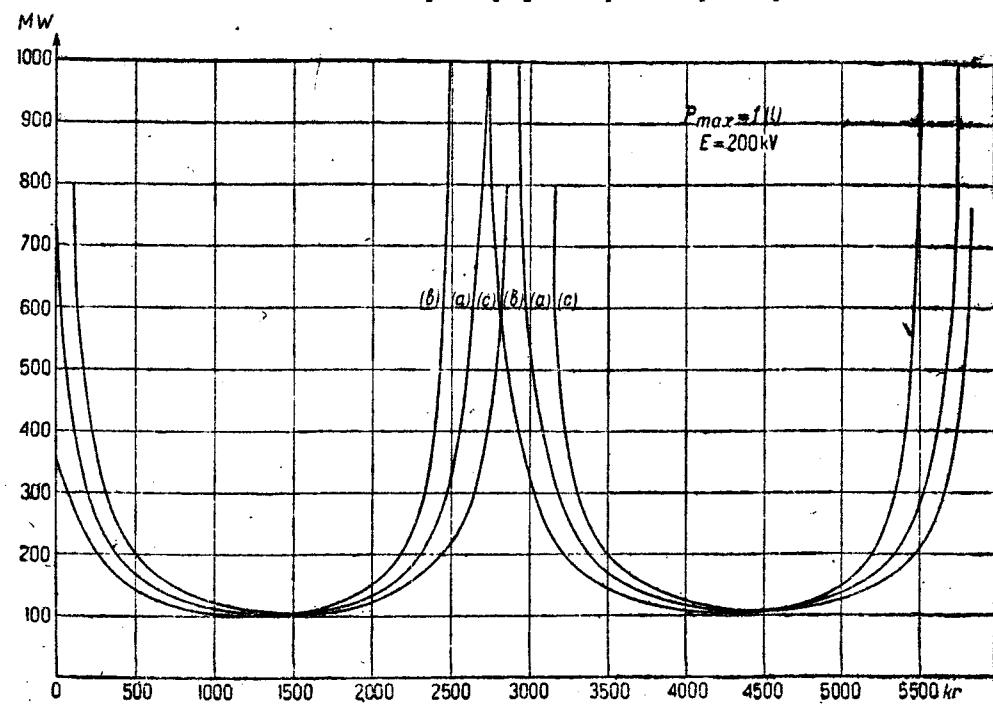


Рис. 3б

пропускной способности линий от напряжения передачи не меняется.

Перейдем к вопросу о настройке линии, имеющей по концам трансформаторы или другие сопротивления, на половину волны приложенного

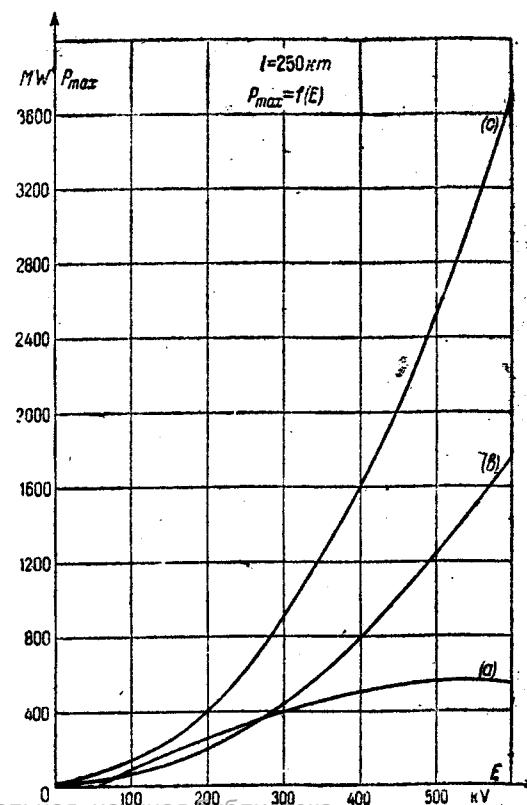


Рис. 4

напряжения и выясним, каким условиям должны удовлетворять сопротивления по концам для возможности настройки.

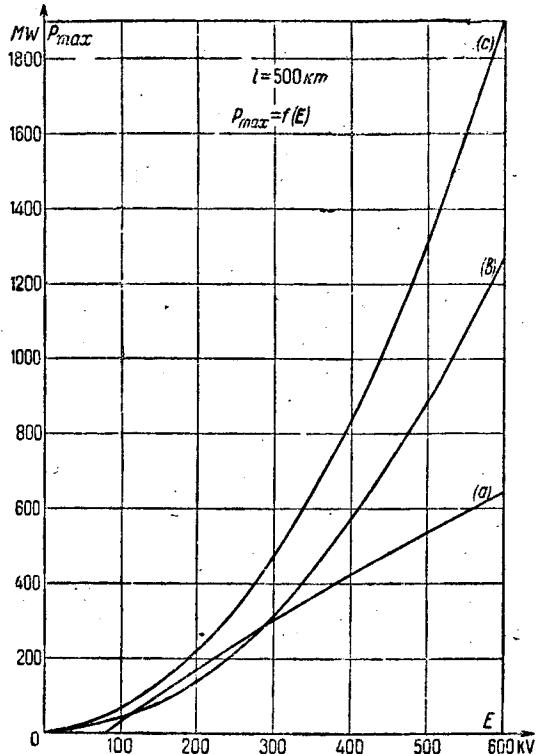


Рис. 5

Условием настройки линии на половину волны напряжения является равенство

$$b_{02} = 0$$

или согласно уравнению (7)

$$\left(z_0 - \frac{x^2}{z_0} \right) \sin \frac{2\pi l}{\lambda} + 2x \cos 2\pi \frac{l}{\lambda} = 0. \quad (13)$$

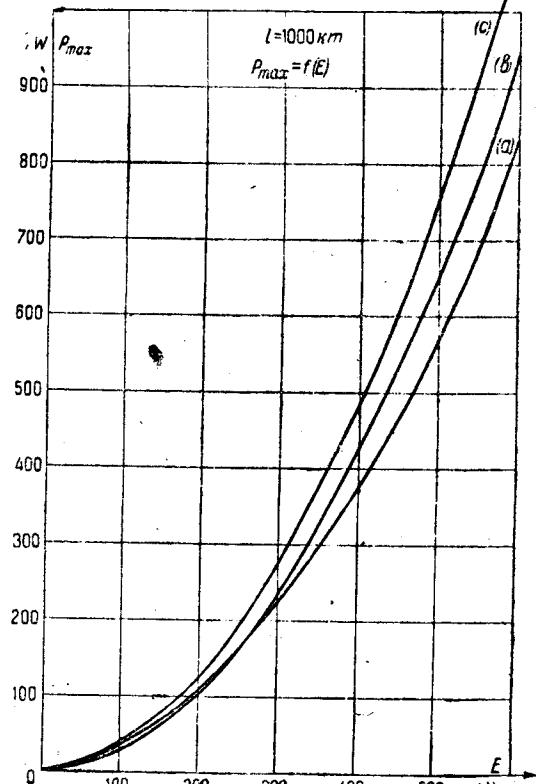


Рис. 6

Решая уравнение (13) относительно величины $2\pi \frac{l}{\lambda}$, получим

$$\operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda} = \frac{2xz_0}{x^2 - z_0^2}.$$

Подбирая соответствующим образом длину линии l , длину волны приложенного напряжения (или частоту) и сопротивление по концам x , можно добиться настройки линии на половину волны.

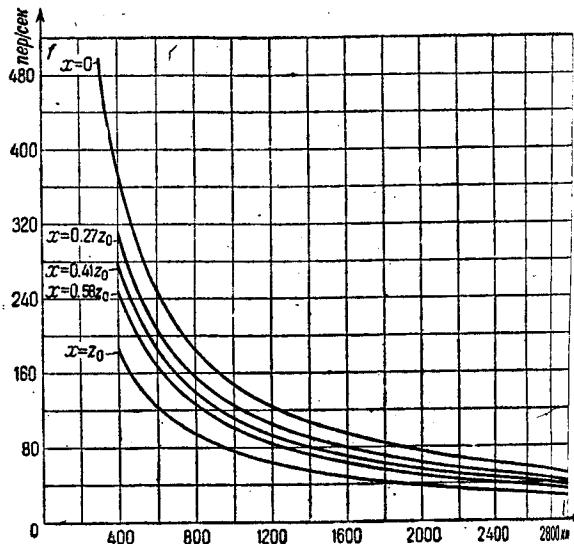


Рис. 7. Зависимость частоты, соответствующей настройке на половину волны напряжения, от длины линии при разных значениях сопротивлений по концам.

Длина линии передачи является обычно змейкой, причем в отдельных звеньях ЕВС Союза величина может изменяться в весьма широких пределах—от нескольких сотен до нескольких тысяч километров. Поэтому интересно выяснить зависимость частоты, необходимой для настройки линии на половину волны напряжения, от длины линии при различных значениях сопротивлений, включенных по концам. Однако изменение частоты не является единственным способом настройки линии и, кроме того, сопровождается значительными конструктивными затруднениями. Ввиду этого следует выяснить практическую возможность настройки линии изменением величины сопротивлений по концам. Для этого необходимо проследить зависимость сопротивления по концам, необходимое для настройки, от длины линии.

Указанные зависимости очень просто можно получить на уравнении (14). Давая величинам различные значения, получим семейство кривых, определяющих зависимость частоты от длины линии передачи. Кривые эти даны на рис. 7, причем величина x выражена в долях волнового сопротивления линии.

Решая уравнение (14) относительно x при различных значениях λ (т. е. при различных значениях частоты приложенного напряжения), получим семейство кривых, определяющих зависимость сопротивления по концам, необходимого для настройки линии, от длины последней. Эти кривые даны на рис. 3, причем величина x выражена в долях волнового сопротивления линии.

Для трансформатора мощностью $P = \frac{E^2}{z_0}$, имеющего реактивное сопротивление, равное $x = 0.15 z_0$.

Проводя на рис. 8 прямую, соответствующую этому значению x , до пересечения с кривыми, можно определить длину линии, соответствующую половине волны напряжения при различных частотах с учетом влияния трансформаторов. Для настройки трех коротких линий потребуется включение реакторов или соответственное увеличение реактивного сопротивления трансформаторов.

Учет влияния реактивного сопротивления генераторов может быть произведен аналогичным приемом.

Выше было указано, что настройка линии на половину волны приложенного напряжения дает преимущества в отношении устойчивости параллельной работы. Однако при точной настройке, при наличии сдвига между э. д. с. генераторного и приемного концов точно равного π , неизвестно малое изменение этого угла в стоящем уменьшении переведет систему в область

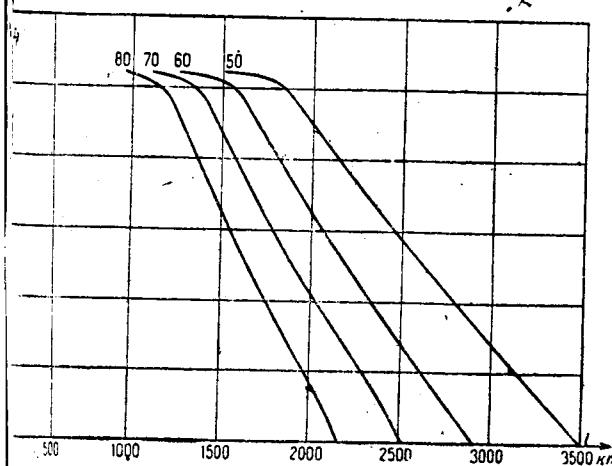


Рис. 8. Зависимость сопротивления по концам линии, необходимого для настройки на половину волны напряжения, от длины линии при различных частотах

устойчивой работы. Поэтому практически работа настроенной линии должна протекать при значениях угла между э. д. с., превосходящих π . В этом соотношении между электрической длиной линии и величиной сопротивления по концам линии, конечно, другой вид. Исследование полученных выше зависимостей легко производится с помощью выражений (7) и (5). Определяя уравнений (5) угол ϑ между э. д. с., подставляя его значения обобщенных постоянных и приравнивая заданному значению угла ϑ , получаем уравнение вида (14).

На рис. 9 и 10 даны соответственные кривые зависимости частоты, необходимой для настройки

на угол $\vartheta = \pi + \frac{\pi}{6}$, от длины линии при

различных значениях сопротивлений по концам линии. Зависимость величины этих сопротивлений от длины линии при различных частотах. Кривые изображены для случая передачи натуральной мощности. При других условиях наличие сопротивления на концах, необходимого для настройки, будет зависеть также и от нагрузки.

В заключение следует остановиться на оценке погрешностей, которые получаются в результате пренебрежения потерями в линии и в трансформаторах, и проводимости трансформаторов.

Что касается потерь, то детальное рассмотрение этого вопроса сопряжено с весьма длительными расчетами. Однако можно заранее сказать,

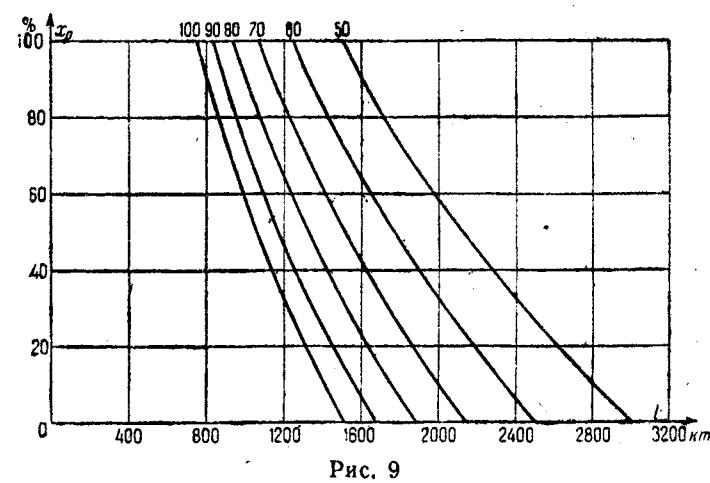


Рис. 9

что наличие потерь снизит величину пропускной способности линий. Кроме того, наличие явлений резонанса в настроенных линиях может повлечь за собой усиление токов и соответственно неизвестное возрастание потерь, которое может иметь весьма неприятные последствия. Подробно останавливаться на этом вопросе мы здесь не будем.

Для выяснения порядка погрешности, вносимой при пренебрежениях проводимостью трансформатора, рассмотрим условия настройки для более точной схемы, изображенной на рис. 11.

Для простоты предположим, что постоянные повышающего и понижающего трансформаторов равны. Обобщенные постоянные схемы рис. 11 определяются, как известно, выражениями:

$$B_0 = B \left(1 + \frac{zy}{2} \right)^2 + 2Az \left(1 + \frac{zy}{2} \right) \left(1 + \frac{zy}{4} \right) + Cz^2 \left(1 + \frac{zy}{4} \right)^2,$$

где

$$z = r + jx, y = g - jb.$$

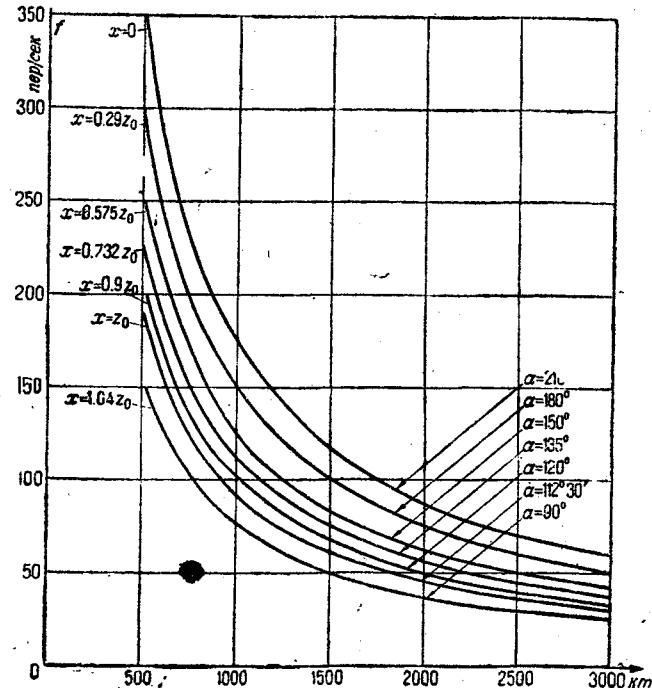


Рис. 10

Пренебрегая потерями в трансформаторе, получим

$$B_0 = B \left(1 + \frac{bx}{2}\right)^2 + 2jAx \left(1 + \frac{bx}{2}\right) \left(1 + \frac{bx}{4}\right) - Cx^2 \left(1 + \frac{bx}{4}\right)^2.$$

Подставляя в полученное выражение значения постоянных A , B и C и приравнивая для случая

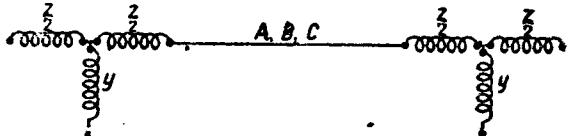


Рис. 11

настройки линии на половину волны постоянную B_0 нулю, получим условия настройки в следующем виде:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2xz_0 \left(1 + \frac{bx}{4}\right) \left(1 + \frac{bx}{2}\right)}{x^2 \left(1 + \frac{bx}{4}\right) - z_0^2 \left(1 - \frac{bx}{2}\right)^2}. \quad (15)$$

Так как величины $\frac{bx}{2}$ и $\frac{bx}{4}$ представляют собой очень малые дроби, притом почти не изменяющиеся при изменениях напряжения и мощности, то и погрешность, вносимая пренебрежением проводимости трансформатора, очень мала. Практически эта погрешность выражается в десятых долях процента.

Выводы

1. Настройка линии передачи на половину волны приложенного напряжения создает благоприятные условия распределения напряжения вдоль линии при нагрузках, не превосходящих натуральную.

2. Пропускная способность линии, длина которой несколько превосходит половину длины волны приложенного напряжения, значительно увеличивается.

3. Наличие повышающих и понижающих трансформаторов уменьшает пропускную способность. Однако это уменьшение не очень значительно, достигая в практических условиях всего нескольких процентов, можно предположить, что уменьшение пропускной способности линии за счет потерь окажется величиной того же порядка.

4. Характер возрастания пропускной способности линии с увеличением напряжения практически не меняется и при наличии трансформаторов по концам.

5. Настройка линии может производиться изменением частоты приложенной э. д. с. или изменением сопротивлений, включенных по концам в частности изменением сопротивлений трансформаторов.

6. При изменении величины сопротивлений включенных по концам, от нуля до значений, соответствующих волновому сопротивлению линии и при расстояниях передачи от 1500 до 3000 км в области частот, соответствующих настройке на половину волны, лежит в пределах от 100 до 25 пер/сек.

7. При технической частоте (50 пер/сек) изменение сопротивлений по концам от нуля до нового сопротивления линии позволяет производить настройку на половину волны для линий протяженностью от 1500 до 3000 км.

8. Если считать возможным изменение реактивного сопротивления трансформаторов в пределах от 15 до 30%, то настройка линии на половину волны без применения специальных реактивных катушек окажется возможной для передачи протяженностью от 2400 до 2700 км. Учет реактивного сопротивления генераторов соответственно расширит эти пределы.

Электрический расчет сложных систем

Инж. Певзнер Б.
Теплоэлектротехника

Почти во всех руководствах и журнальных статьях, посвященных вопросу электрического расчета линий электропередач, рассматривается элементарный классический случай передачи энергии в одну точку. В связи с ростом электрических сетей и развитием интерконнекции сетей различных обединений классический случай передачи потерял уже практический интерес.

Мы можем уже сейчас указать на сети 110 кВ Мосэнерго, Донэнерго и других обединений, которые выполняют работу распределительных сетей высокого напряжения. Эти причины заставили автора описать практические методы электрического расчета сложных сетей.

Под электрическим расчетом линии мы будем понимать узко только расчеты, связанные с определением пределов регулирования. Остальные вопросы, относимые многими авторитетами к электрическому расчету, например, параллельная работа станций, токи короткого замыкания, нами в этой статье не рассматриваются.

А. Радиальные линии

Обычно для электрического расчета задаются активные и реактивные нагрузки по подстанциям, активные и реактивные мощности генераторных станций и предварительно определены конфигурация сети и сечения проводов. Требуется найти величину напряжений в отдельных точках сети при разных режимах работы сети.

1. Метод токов

Рассмотрим схему сети согласно рис. 1 и предварительно пренебрежем емкостной проводимостью линий. Как видно из диаграммы для нашей линии, токи отдельных потребителей сдвинуты на углы, зависящие от углов сдвига между напряжениями соответственных точек (рис. 2).

Токи в точках потребления известны нам своим составом, причем ось вещественных величин токов совпадает с направлением вектора напряжения в данной точке. Нам по закону Кирхгофа ток, протекающий по участку l (рис. 3), мы должны написать выражение:

$$I_{12} = \bar{I}_3 + \bar{I}_2$$

или

$$I_{12} - jI_{12}'' = \bar{I}_3 - j\bar{I}_3'' + \bar{I} - j\bar{I}_2'',$$

причем мнимые и вещественные величины должны быть саны для токов \bar{I}_2 и \bar{I}_3 к одним и тем же осям координат. Нам же известны составляющие токов, отнесенные к разным осям координат, повернутые друг от друга на угол α между векторами напряжений в отдельных точках.

Не зная этих углов, мы не можем произвести пересчета составляющих токов для другой системы координат. Так потребление энергии задается обычно в киловаттах, то, пользуясь методом токов, мы будем делать две ошибки: первая при нахождении токов, задаваясь предварительно напря

данной точке, вторую — складывая составляющие то-
з. отнесенные к разным координатным осям. Вследствие
этого метод токов не нашел себе широкого применения.

2. Метод мощностей

Несколько иные условия получаются в случае, если мы будем оперировать мощностями. Из общезвестного выражения мощности

$$W = EI \cos \varphi - jEI \sin \varphi$$

видимо, что величина составляющих не зависит от расположения осей координат и зависит лишь от угла сдвига между током и напряжением. Последнее положение можно легко доказать.

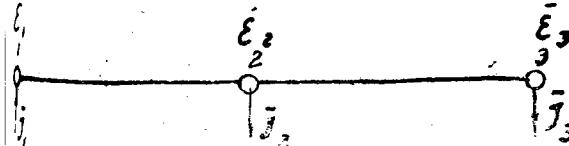


Рис. 1

Для осей $I - I$ (рис. 4) мы можем написать следующее выражение для мощности:

$$I_1 = P_1 - jQ_1 = \bar{I} \bar{E} = (I' - jI'') \bar{E} = I(\cos \varphi - j \sin \varphi) \bar{E} = (I E \cos \varphi - j I E \sin \varphi) = I E \cos \varphi - j I E \sin \varphi.$$

для осей $II - II$:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{II} = P_{II} - jQ_{II} &= \bar{I} \bar{E} = (I''' - jI^{IV}) (\bar{E}' + j\bar{E}'') = \\ &= [(\cos(\varphi + \theta) - j \sin(\varphi + \theta)) (E \cos \theta + j E \sin \theta)] = \\ &= I E [(\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \theta) - j (\sin \varphi \cos \theta + \\ &+ \cos \varphi \sin \theta)] \cdot (\cos \theta + j \sin \theta) = I E (\cos \varphi - j \sin \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Получили то же выражение, что для уравнения (1). Таким образом, оперируя с мощностями, мы избежим тех осложнений, которые у нас получались с токами.

Пойдем теперь к выводу основных расчетных выражений. Рассмотрим радиальную линию, имеющей $n - 1$ участок с n концами; тогда для любого участка k можно написать следующие уравнения (рис. 5):

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{k+1} + \Delta \bar{E}_{k(k+1)} \quad (3)$$

и сопряженных величин

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{k+1} + \Delta \bar{E}_{k(k+1)},$$

\bar{E}_k — напряжение в начале участка k на подстанции k ,

\bar{E}_{k+1} — напряжение в конце участка k на подстанции $k+1$,

$\Delta \bar{E}_{k(k+1)}$ — падение напряжения на участке k ;

$$\Delta \bar{E}_k = \bar{I}_{k(k+1)} \bar{Z}_{k(k+1)}. \quad (4)$$

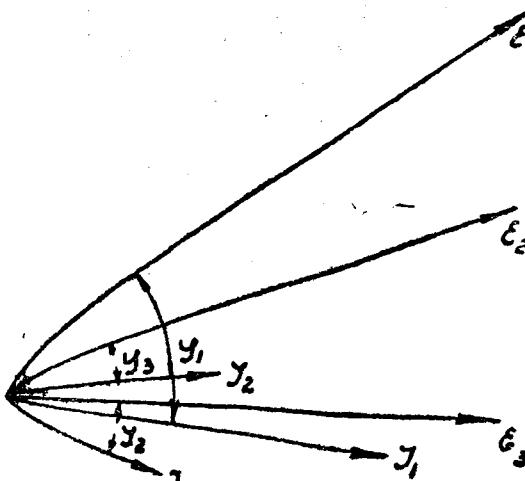


Рис. 2

$\bar{I}_{k(k+1)}$ — ток на участке k , $\bar{Z}_{k(k+1)}$ — сопротивление участка k .

Сложим выражение (4) в уравнение (3), получим

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{k+1} + \bar{I}_{k(k+1)} \bar{Z}_{k(k+1)} \quad (5)$$

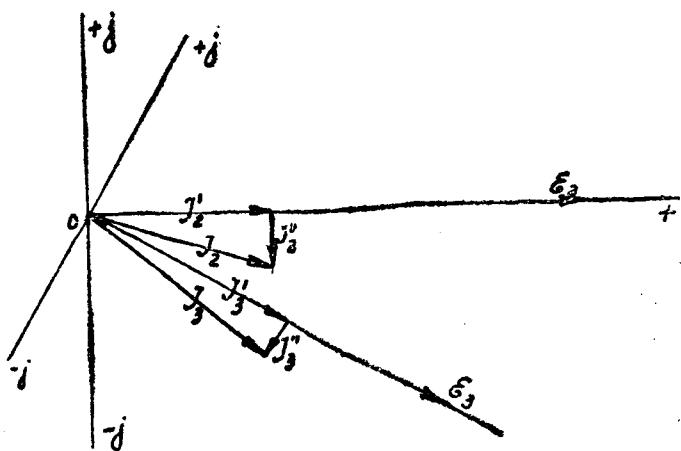


Рис. 3

Умножая уравнение (3) на $\bar{I}_{k(k+1)}$ и взяв сопряженные величины для напряжений, получим

$$\bar{I}_{k(k+1)} \bar{E}_k = \bar{I}_{k(k+1)} \bar{E}_{k+1} + \bar{I}_{k(k+1)} \Delta \bar{E}_{k(k+1)}. \quad (6)$$

В правой части этого уравнения первый член представляет собой мощность в конце участка (ток на участке равен току в конце), второй член — потерю мощности на участке. Обозначая $\bar{I}_{k(k+1)} \bar{E}_{k+1} = \bar{W}_{k+1}$ и $\bar{I}_{k(k+1)} \Delta \bar{E}_{k(k+1)} = \Delta \bar{W}_{k(k+1)}$, можем найти величину

$$\bar{I}_{k(k+1)} = \frac{\bar{W}_{k+1} + \Delta \bar{W}_{k(k+1)}}{\bar{E}_k}. \quad (7)$$

Для предыдущего участка мы можем написать по закону Кирхгофа

$$\bar{I}_{(k-1)k} = \bar{I}_k + \bar{I}_{k(k+1)}, \quad (8)$$

где $\bar{I}_{(k-1)k}$ — ток на участке $k - 1$, \bar{I}_k — ток на подстанции k , $\bar{I}_{k(k+1)}$ — ток на участке k .

Напряжение в точке $k - 1$ будет

$$\bar{E}_{k-1} = \bar{E}_k + \Delta \bar{E}_{(k-1)k}$$

или

$$\bar{E}_{k-1} \bar{E}_k + \Delta \bar{E}_{(k-1)k}. \quad (9)$$

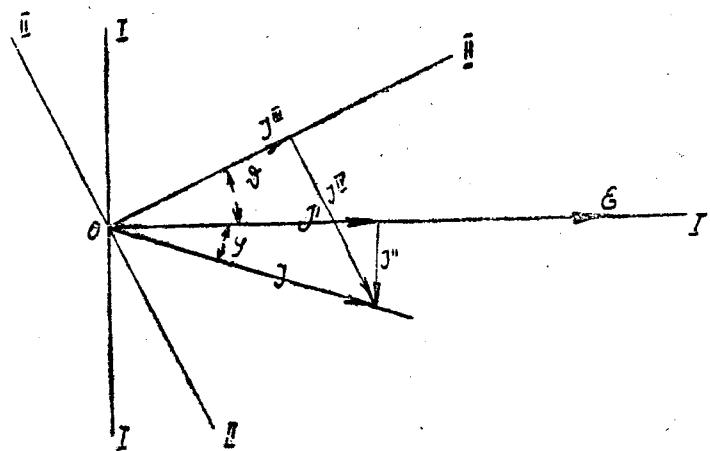
Перемножая уравнения (8) на (9), получим

$$\bar{I}_{(k-1)k} \bar{E}_{k-1} = \bar{I}_k \bar{E}_k + \bar{I}_{k(k+1)} \bar{E}_k + \bar{I}_{(k-1)k} \Delta \bar{E}_{(k-1)k}.$$

Подставляя вместо $\bar{I}_{k(k+1)} \bar{E}_k$ его значение согласно выражению (7) и зная, что $I_k \bar{E}_k$ — нагрузка подстанции k , а $\bar{I}_{(k-1)k} \Delta \bar{E}_{(k-1)k}$ — согласно предыдущему потерю мощности на участке $k - 1$, мы можем написать:

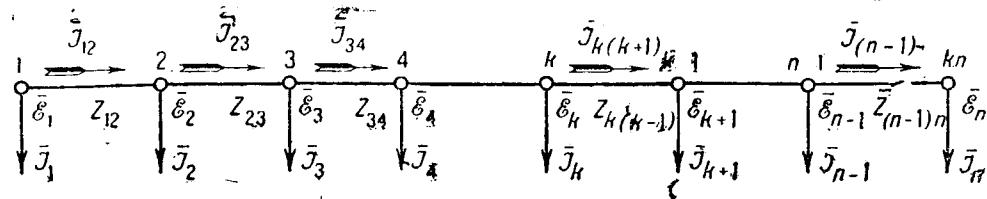
$$\bar{I}_{(k-1)k} \bar{E}_{k-1} = \bar{W}_k + \Delta \bar{W}_{(k-1)k} + \bar{W}_{k+1} + \Delta \bar{W}_{k(k+1)}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что мощность, подтекающая из какой-либо точки сети, равна сумме мощностей, утекающих от данной точки, если в последней учтены потери в участках линий, прилегающих к данной точке, и что, учтя потери



в линиях, можно с мощностями производить действия, как с токами, по закону Кирхгофа.

Можно написать, что мощность в начале линии электропередачи (рис. 5).



личин совпадающей с вектором \bar{E}_k , получаем:

$$E'_{k+1} + j E''_{k+1} = E_k - \frac{P'_k + j Q'_k}{E_k} (R_{k(k+1)} + j X_{k(k+1)})$$

В начале любого участка мощность выражается:

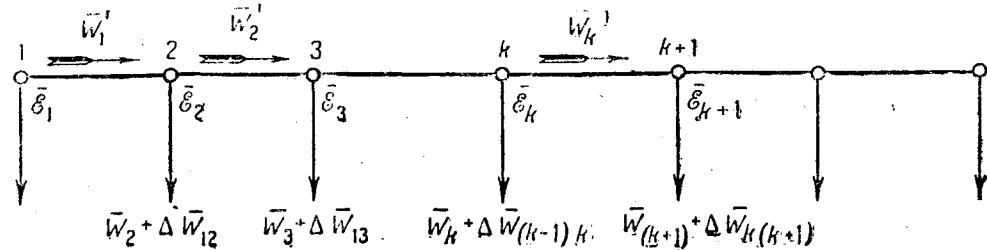
$$\bar{W}'_2 = (\bar{W}_3 + \bar{W}_4 + \dots + \bar{W}_n) + (\Delta \bar{W}_{12} + \Delta \bar{W}_{23} + \Delta \bar{W}_{34} + \dots + \Delta \bar{W}_{(n-1)n}).$$

$$\bar{W}'_3 = (\bar{W}_4 + \dots + \bar{W}_n) + (\Delta \bar{W}_{23} + \dots + \Delta \bar{W}_{(n-1)n}).$$

$$\dots$$

$$\bar{W}'_{n-1} = \bar{W}_n + \Delta \bar{W}_{(n-1)n},$$

где \bar{W}'_k — мощность, оттекающая от подстанции k , \bar{W}_k — нагрузка от подстанции k , $\Delta \bar{W}_{k(k+1)}$ — потеря мощности на участке между подстанциями k и $k+1$.



Преобразуя и разделяя мнимые и действительные уравнения, получаем

$$E'_{k+1} = E_k - \frac{P'_k R_{k(k+1)} - Q'_k X_{k(k+1)}}{E_k}$$

и

$$E''_{k+1} = - \frac{P'_k X_{k(k+1)} + Q'_k R_{k(k+1)}}{E_k}.$$

По формулам (15) и (16) определяются активная и соответственно реактивная составляющие напряжения.

Для анализа работы системы требуется очень часто диаграмму напряжений, например, для расчетов устойчивости параллельной работы. Пользуясь выражениями (15) и (16), очень легко построить последнюю. Для построения примем

Рис. 6

Исходя из уравнений (11), можно составить схему распределения мощностей для радиальной линии. Подобного рода схема дана на рис. 6. Из этой схемы видно, что потери мощности на участках должны быть присоединены к нагрузке конца соответственного участка.

Вывод расчетных формул для нахождения напряжений

Выражение для тока на основании выражений (11) и (5) может быть написано:

$$I_{k(k+1)} = \frac{\sum_{n=n}^{n=k+1} \bar{W}_n + \sum_{n=(n-1)n}^{n=k(k+1)} \Delta \bar{W}_n}{E_k}. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в уравнение для напряжений, получим

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{k+1} + \frac{\sum_{n=n}^{n=k+1} \bar{W}_n + \sum_{n=(n-1)n}^{n=k(k+1)} \Delta \bar{W}_n}{E_k} \bar{Z}_{k(k+1)}, \quad (13)$$

откуда

$$\bar{E}_{k+1} = \bar{E}_k - \frac{\bar{W}'_k}{E_k} \bar{Z}_{k(k+1)}. \quad (14)$$

Из выражения (14), зная нагрузки подстанций и потери мощности на отдельных участках сети, а также напряжение в начале линии (участка), можно найти напряжение в конце.

Для расчетов удобнее пользоваться символическим способом написания уравнений:

$$\bar{E}'_{k+1} + j \bar{E}''_{k+1} = \bar{E}'_k + j \bar{E}''_k - \frac{P'_k + j Q'_k}{E'_k - j E''_k} (R_{k(k+1)} + j X_{k(k+1)}); \quad (14')$$

буквой E с одним штрихом ('') обозначена активная и с двумя штрихами ('') — реактивная составляющие напряжения, буквой P'_k — активная, а Q'_k — реактивная составляющие мощности, утекающие от точки k . Полагая ось вещественных

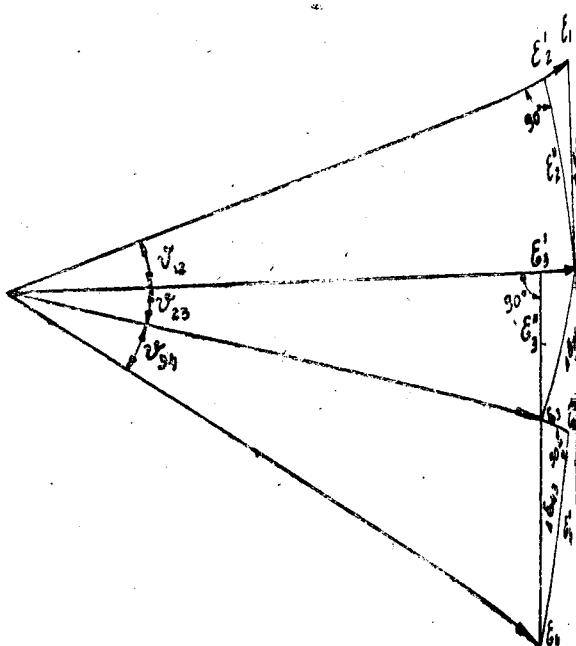


Рис. 7

то вычесть из отстающей реактивной мощности нагрузки и расчетах оперировать разностью реактивных мощностей, можем пользоваться выведенными формулами. Ошибка, которая при этом получится, будет зависеть только от степени точности примененной П-образной схемы.

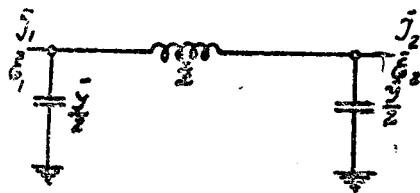


Рис. 8

Если по каким-либо причинам точность, получаемая по этой П-образной схеме, не удовлетворяет, и желательно иметь равномерно распределенную емкость линии; можно пользоваться искусственным приемом. Для вывода последнего рассмотрим подробней П-образную схему замещения (8). Из схемы получаем следующие соотношения:

$$\bar{E}_1 - \bar{E}_2 = \left(\bar{I}_2 + \frac{\bar{E}_2 \bar{Y}}{2} \right) \bar{Z} \quad (17)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1 \bar{Y}}{2} + I_2 + \frac{\bar{E}_2 \bar{Y}}{2}. \quad (18)$$

Сумма уравнения (17) и (18), получаем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_1 - \bar{E}_2 &= \left(1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{2} \right) + I_2 Z, \\ \bar{I}_1 - \bar{I}_2 &= \left(1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{2} \right) + \bar{E}_2 \left(\bar{Y} + \frac{\bar{Z} \bar{Y}^2}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

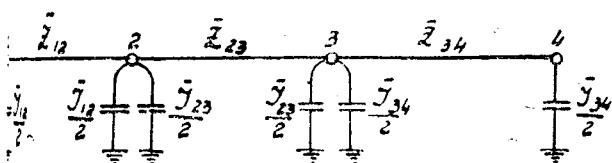


Рис. 9

Другие выражения для напряжения и тока в линии электропередачи, как известно, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{A} \bar{E}_2 + \bar{B} \bar{I}_2, \\ \bar{I}_1 &= \bar{D} \bar{I}_2 + \bar{C} \bar{E}_2. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Сравнивая выражения (19) с (20), получаем, что напряжения на концах линии будут равны для обоих уравнений,

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{2}, \\ \bar{B} &= \bar{Z}, \\ \bar{C} &= \bar{Y} + \frac{\bar{Z} \bar{Y}^2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Зависимости от желаемой точности можем, взяв известные в теории электропередачи константы A, B, C, D , заменяющими значениями или с гиперболическими функциями, или Штейнмцу. Так, например:

$$\left. \begin{aligned} A &= D = \operatorname{ch} \nu l, \\ B &= w \operatorname{sh} \nu l, \\ C &= \frac{1}{w} \operatorname{sh} \nu l, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ν — коэффициент распространения, w — волновое сопротивление, l — длина линии¹). Решая уравнения (21) и (22) относительно \bar{Z} и \bar{Y} , получим:

$$\bar{Z} = w \operatorname{sh} \nu l, \quad (23)$$

$$\bar{Y} = \frac{2}{w} \operatorname{th} \frac{\nu l}{2}. \quad (24)$$

Ключевые значения для \bar{Z} и \bar{Y} можно найти по таблицам гиперболических функций комплексного переменного или табличкам.

Введя вместо обычных значений для \bar{Z} и \bar{Y} в П-образную схему замещения значения согласно формулам (23) и (24), мы можем получить ту же точность, что и при расчетах для линии электропередачи с распределенными постоянными. Нетрудно вывести аналогично предыдущему связь между \bar{Z} и \bar{Y} по П-образной схеме замещения и константами по Штейнмцу.

Удобство П-образной схемы замещения заключается в возможности применить ее к самым сложным системам. Расчетная схема получается согласно рис. 9.

В. Расчет кольцевых сетей

1. Метод мощностей

Принципиально расчет кольцевых сетей ничем не отличается от расчета радиальных. Он также распадается на две части: нахождение распределения мощностей по участкам и определение напряжений на подстанциях. Однако, в то время как нахождение распределения мощностей в радиальной сети сводится к простому составлению балансов по участкам, нахождение распределения мощностей в кольцевой сети представляет сложную и очень трудоемкую задачу. Последнее обстоятельство станет яснее после дальнейшего анализа.

Уравнение (14) может быть написано в виде:

$$\bar{E}_k \bar{E}_k - \bar{E}_{k+1} \bar{E}_k = \bar{W}'_{k(k+1)} \bar{Z}_{k(k+1)}. \quad (14')$$

Обозначая

$$\bar{E}_k = E_k e^{j \delta_k}, \bar{E}_{k+1} = E_{k+1} e^{j \delta_{k+1}},$$

$$W'_k = P'_k + j Q'_k, \bar{Z}_{k(k+1)} = R_{k(k+1)} + j X_{k(k+1)},$$

$$\delta_{k+1} - \delta_k = \delta_{k(k+1)},$$

преобразуем уравнение (14'):

$$\begin{aligned} E_k^2 - E_{k+1} E_k \cos \delta_{k(k+1)} - j E_{k+1} E_k \sin \delta_{k(k+1)} &= \\ = (P'_k + j Q'_k) (R_{k(k+1)} + j X_{k(k+1)}). \end{aligned} \quad (25)$$

Решив уравнение и отделив мнимые величины от действительных, получаем:

$$E_k^2 - E_k E_{k+1} \cos \delta_{k(k+1)} = P'_k R_{k(k+1)} - Q'_k X_{k(k+1)} \quad (26)$$

и

$$E_k E_{k+1} \sin \delta_{k(k+1)} = - (P'_k X_{k(k+1)} + Q'_k R_{k(k+1)}). \quad (27)$$

Уравнения типа (26) и (27) могут быть написаны для каждого участка кольцевой сети, т. е. при n участках мы получим $2n$ уравнений. Можно написать еще одно уравнение для углов между напряжениями, основанное на том, что, обходя замкнутый контур, мы возвращаемся в ту же точку.

$$\delta_{12} + \delta_{23} + \delta_{34} + \dots + \delta_{n1} = 0. \quad (28)$$

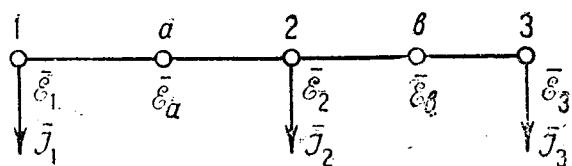


Рис. 10

Используя еще $2(n-1)$ уравнения, полученных из выражения (11) разделением на мнимые и вещественные части, будем иметь $4n-1$ уравнений. Неизвестными будут $2n$ мощностей, $n-1$ напряжений и n углов. Напряжением в одной точке можно задаваться. Однако решение уравнений (26) и (27) представляет значительные трудности. Искусственным методом Соловьев и Баскаков² получили уравнения, решение которых несколько проще.

Если мы имеем радиальную сеть с двумя подстанциями (рис. 10), то напряжения в середине участков в точках a и b будут:

$$\bar{E}_a = \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_2}{2} \text{ и } \bar{E}_b = \frac{\bar{E}_2 + \bar{E}_3}{2}. \quad (29)$$

Далее, можно написать:

$$\bar{E}_a = \bar{E}_2 + \frac{\Delta \bar{E}_{12}}{2},$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_b + \frac{\Delta \bar{E}_{23}}{2},$$

$$\bar{E}_b = \bar{E}_3 + \frac{\Delta \bar{E}_{23}}{2}.$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_2 + \bar{I}_{23},$$

$$\bar{I}_{23} = \bar{I}_3$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_2 + \bar{I}_3.$$

Произведя ряд преобразований, получаем

$$\bar{E}_b \bar{I}_{23} = \bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2}, \quad (30)$$

$$\bar{E}_a \bar{I}_{12} = \bar{W} + \frac{\Delta \bar{W}_{12}}{2} + \bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2}. \quad (31)$$

Определяем из уравнений (30) и (31) величину тока:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{12} &= \frac{\bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{12}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2}}{\bar{E}_b} = \\ &= \frac{\bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{12}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2}}{\bar{E}_1 + \bar{E}_2}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\bar{I}_{23} = 2 \frac{\bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2}}{\bar{E}_2 + \bar{E}_3}. \quad (33)$$

Так как

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_2 + \bar{I}_{12} \bar{Z}_{12},$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_3 + \bar{I}_{23} \bar{Z}_{23},$$

мы получаем окончательно:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_2 + \frac{2 \left(\bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \frac{\Delta \bar{W}_{12}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} \right) \bar{Z}_{12}}{\bar{E}_1 + \bar{E}_2}, \quad (34)$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_3 + \frac{2 \left(\bar{W}_2 + \frac{\Delta \bar{W}_{23}}{2} \right)}{\bar{E}_2 + \bar{E}_3} \bar{Z}_{23}. \quad (35)$$

В результате ряда преобразований получаются уравнения вида:

$$E_{k+1}^2 - E_k^2 = 2 (P''_{k(k+1)} R_{k(k+1)} - Q''_{k(k+1)} X_{k(k+1)}), \quad (36)$$

$$E_k E_{k+1} \sin \delta_{k(k+1)} = - (P''_{k(k+1)} X_{k(k+1)} + Q''_{k(k+1)} R_{k(k+1)}). \quad (37)$$

Здесь $P''_{k(k+1)}$ обозначают активные мощности, текущие на участке k ; $Q''_{k(k+1)}$ обозначают то же для реактивных мощностей. Двуштрих поставлены для отличия от формул (15) и (16), так как в этом случае, как видно из выражений (34) и (35),

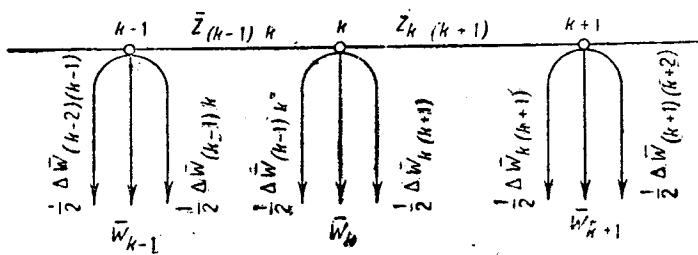


Рис. 11

величины мощностей иные. Из вышеуказанных выражений следует, что потери в участках линий передачи должны быть разделены на 2 и разнесены на начальную и конечную подстанции участка.

Расчетная схема дана на рис. 11.

Как видно, пользоваться выражениями (36) для нахождения распределения мощностей достаточно просто и затруднительно. Приближенное решение этих уравнений получается

суммированием правой и левой частей уравнения (36) в замкнутой сети:

$$\sum_{n=1}^n P''_{n(n+1)} R_{n(n+1)} - \sum_{n=1}^n Q''_{n(n+1)} X_{n(n+1)} X_{n(n+1)} = 0.$$

Тоже для уравнения (37):

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^n E_n E_{n+1} \sin \delta_{n(n+1)} &= - \\ - \left(\sum_{n=1}^n P''_{n(n+1)} X_{n(n+1)} + \sum_{n=1}^n Q''_{n(n+1)} R_{n(n+1)} \right) & \end{aligned}$$

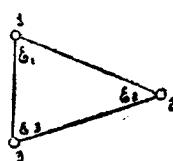


Рис. 12

Если принять $\sum_{n=1}^n E_n E_{n+1} \sin \delta''_{n(n+1)} = 0$, то уравнение (39) переписывается:

$$\sum_{n=1}^n P''_{n(n+1)} X_{n(n+1)} + \sum_{n=1}^n Q''_{n(n+1)} R_{n(n+1)} = 0.$$

Решив оба уравнения (38) и (39), мы можем найти распределение мощностей, а зная последние, уже по формули (37) находить напряжение в отдельных точках сети. Но необходимо указать, что, не зная распределения мощности по линиям, мы не можем определить потерю в линиях, и поэтому приходится делать расчет, не учитывая потерю в линиях.

Таким образом мы делаем в расчете по этому методу ошибки: первая получается из-за пренебрежения величиной $\sum E_n E_{n+1} \sin \delta_{n(n+1)}$, вторая—из-за неучета потерь в линиях, что равносильно принятию равенства напряжений во всех точках и совпадению их по фазе. Последующими переходами с учетом потерь можно вторую ошибку уменьшить до минимума.

Отсюда ясно, что метод токов, будучи приложен к какой-либо сети, не может согласно вышесказанному дать более точное решение, чем расчет по формулам (38) и (39). Нашим законам Кирхгофа токораспределение, мы в очень многих случаях затратим времени не больше, чем при расчетах по методам инж. Баскакова и Соловьева, и получим более точный результат.

2. Метод суперпозиции³⁾

Характерной особенностью кольцевой сети является то, что произведя обход ее по какому-либо направлению, мы попадем в точку (начала обхода) с тем же напряжением величине и фазе, с которым мы начали обход. На рис. даны примерная схема сети и векторная диаграмма поясняющие сказанное. Если использовать это свойство, получим достаточно простой и точный метод для расчета.

Выяснение сущности способа расчета произведем на простейшем примере сети согласно рис. 13. Если разрезать линию электропередачи в точке a , наша кольцевая сеть разделяется на две радиальных. Можно очень просто показать, что действительное токораспределение определяется согласно следующим выражениям:

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_{yp},$$

$$\bar{I}_{23} = \bar{I}_3 + \bar{I}_{yp},$$

$$\bar{I}_{34} = \bar{I}_{yp},$$

$$\bar{I}_{41} = \bar{I}_4 - \bar{I}_{yp},$$

где

$$\bar{I}_{yp} = \frac{\bar{E}_4 - \bar{E}_1}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{34} + \bar{Z}_{41}},$$

\bar{E}_4 —напряжение в точке 4 при разомкнутой сети, \bar{E}_{41} —для точки 4 , \bar{Z}_{12} и т. д.—импедансы участков между 1 и 2 и т. д.

как фаза тока \bar{I}_{yp} определяется фазой \bar{E}_3^I и \bar{E}_4^I и от-
делением между омическим и индуктивным сопротивлениями,
нужно отсчет фазы напряжения \bar{E}_3^I и \bar{E}_4^I произво-
дить от одной оси действительных величин, относительно ко-
торой определяются остальные величины тока. В данном слу-
чае всего за ось действительных величин принять
напряжение в начале линии E_1 в точке 1. Выражение (40)
может быть написано в виде:

$$I_{yp}' + j I_{yp}'' = \frac{1}{\Sigma (r + jx)} (\bar{E}_3^I \cos \delta_{31} + j \bar{E}_3^I \sin \delta_{31} - \bar{E}_4^I \cos \delta_{41} + j \bar{E}_4^I \sin \delta_{41}), \quad (41)$$

где δ_{31} — угол между напряжениями в точках 3 и 1 при разомкнутой сети, δ_{41} — угол между напряжениями в точках 4 и 1 при замкнутой сети, Σr — сумма омических сопротивле-
ний участков замкнутой сети, Σx — сумма индуктивных сопро-
тивлений участков замкнутой сети.

Изобразив выражение (41), получаем:

$$I_{yp}' + j I_{yp}'' = \frac{(\bar{E}_3^I \cos \delta_{31} + j \bar{E}_3^I \sin \delta_{31}) - (\bar{E}_4^I \cos \delta_{41} + j \bar{E}_4^I \sin \delta_{41})}{(\Sigma r)^2 + (\Sigma x)^2} \quad (42)$$

Значит

$$\bar{E}_3^I - \bar{E}_4^I \cos \delta_{41} = \Delta e', \quad \bar{E}_3^I \sin \delta_{31} - \bar{E}_4^I \sin \delta_{41} = \Delta e'', \quad \Sigma r = R_c, \quad \Sigma x = X_c$$

то выражение (42) перепишется:

$$I_{yp}' + I_{yp}'' = \frac{\Delta e' + j \Delta e''}{R_c^2 + X_c^2} (R_c - j X_c). \quad (43)$$

Напряжение от I_{yp} на любом участке определяется произведение тока на импеданс участка:

$$I_{yp} Z_{k(k+1)} =$$

$$\frac{\Delta e' + j \Delta e''}{R_c^2 + X_c^2} (R_c - j X_c) (R_{k(k+1)} + j X_{k(k+1)}), \quad (44)$$

$$I_{yp} Z_{k(k+1)} = \frac{\Delta e' (R R_c + X X_c) - \Delta e'' (R_c X - R X_c)}{R_c^2 + X_c^2} +$$

$$+ j \frac{\Delta e'' (R R_c + X X_c) + \Delta e' (R_c X - R X_c)}{R_c^2 + X_c^2}. \quad (45)$$

Напряжение от уравнительного \bar{I}_{yp} должно быть равно к падению напряжений от токов, текущих по сети при разомкнутой сети. Таким образом для нахожде-

ния суммы двух векторов. Построить один из них (заключенный в скобки) мы можем по формулам (15) и (16), построение второго можно произвести по формуле (45), необходимо только при построении не забывать, что оси координат для обоих построений разные.

На рис. 15 дано построение для сети по схеме рис. 14. Построив вектор \bar{E}_1 , откладываем от конца вектора величину $E_1 a'$, равную активной составляющей падения напряжения по формуле (15), и реактивную составляющую по формуле (16), равную ab . Полученный вектор \bar{E}_2'' соответствует нагрузке при разомкнутой сети. Строить его нет необходимости. От точки b откладываем активную составляющую падения от \bar{I}_{yp} , равную bc , и реактивную, равную cd .

Все падения напряжения строятся, понятно, для участка 1—2. Точка d , как видно из выражения (46), даст конец вектора \bar{E}_2 . Подобным же образом поступают и при построении вектора \bar{E}_3 . Необходимо лишь отметить, что для построения \bar{E}_3 активные

$$(\bar{E}_4^I \cos \delta_{41} + j \bar{E}_4^I \sin \delta_{41}) \quad (\Sigma r - \Sigma jx) \quad (42)$$

и реактивные составляющие падения напряжений от нагрузки, соответствующей разомкнутой сети, берутся относительно оси действительных величин, совпадающей с \bar{E}_2 , те же величины для тока \bar{I}_{yp} берутся по оси \bar{E}_1 . Построение диаграммы может быть произведено только для концов векторов, что и сделано на рис. 15.

Электрический расчет кольцевой сети методом суперпозиции заключается в следующих основных операциях:

- 1) разрезать кольцо, превратив сеть в радиальную;
- 2) найти распределение мощностей в радиальной сети;
- 3) найти напряжения в точках разреза сети;
- 4) найти уравнительный ток и распределение последнего по участкам сети;
- 5) найти падение напряжения от уравнительного тока;
- 6) построить диаграмму напряжений для замкнутой сети и определить напряжения в точках сети.

По всем вышеизложенным методам, за исключением последнего, расчет должен производиться по операциям аналогичным, но значительно более сложным, и нужно требовать пересчета, т. е. повторения этих операций.

Подробное освещение отдельных расчетных операций будет дано на конкретном примере в следующей статье.

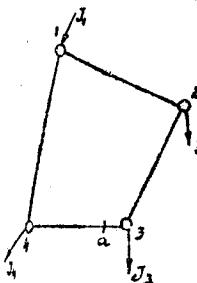


Рис. 13

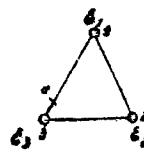


Рис. 14

Напряжений в замкнутой сети можно воспользоваться выражением (14), добавив в правой части его падение напряжения от \bar{I}_{yp} :

$$\bar{E}_{k+1} = \left(\bar{E}_k - \frac{\bar{W}_k'}{\bar{E}_k^I} \bar{Z}_{k(k+1)} \right) - \bar{I}_{yp} \bar{Z}_{k(k+1)}, \quad (46)$$

\bar{E}_k — напряжение в начале участка линии между точками $k+1$ для замкнутой сети; \bar{E}_{k+1} — напряжение в конце линии между точками k и $k+1$ для замкнутой сети

— падение напряжения от мощности, текущей по линии между точками k и $k+1$ при разрезанной сети; $\bar{Z}_{k(k+1)}$ — импеданс

линии между точками k и $k+1$.

Математически решить уравнение (46) трудно. Заключенная часть может быть решена просто, если принять замкнутую с действительной осью координат. Сделать такое допущение для уравнения (46) мы можем только для линий сети, прилегающих к точке 1, потому что величина \bar{I}_{yp} определена жестко для оси действительных величин, совпадающей с вектором напряжения в начале сети, т. е. с \bar{E}_1 .

Математически решить это уравнение достаточно просто, исходя из соображения, что правая часть уравнения (46) есть

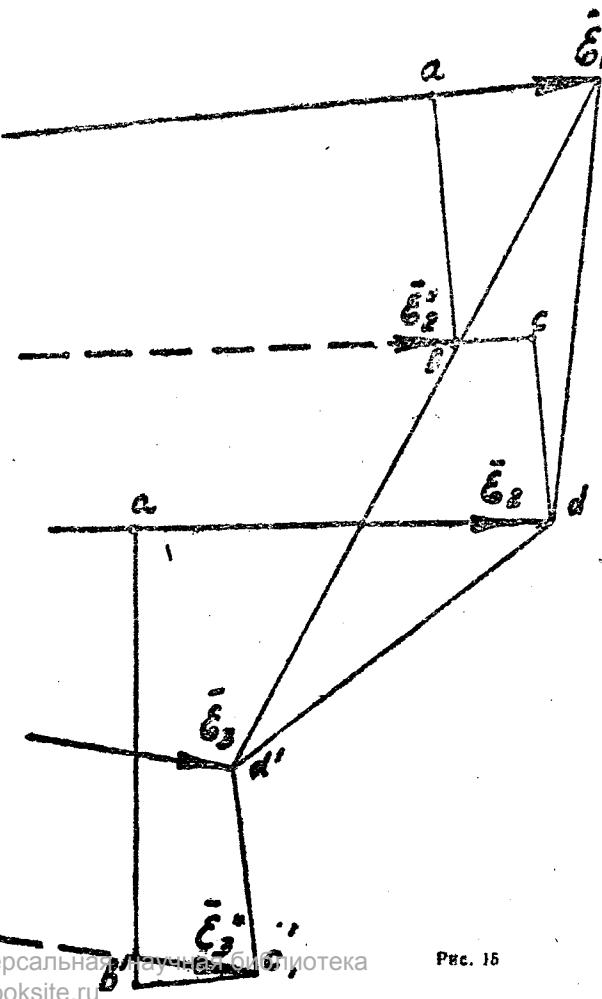


Рис. 15

ИЗ РАБОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ И ЛАБОРАТОРИЙ

Влияние высших гармоник кривой напряжения на работу статических конденсаторов, устанавливаемых для исправления коэффициента мощности

Проф. А. А. Воронов
Ленинград

В некоторых случаях применение статического конденсатора в электрической установке может не только не повысить коэффициент мощности, но даже и понизить его. Целью настоящей статьи является выяснение тех условий, при которых работа статического конденсатора для указанной цели может быть неудовлетворительной.

При всех технических расчетах, точно так же и при определении мощности конденсаторов, необходимой для исправления $\cos \varphi$, обыкновенно принимается, что как кривая напряжения, так и кривая тока представляют правильные синусоиды. Напряжение в мощных электрических сетях, питаемых мощными генераторами, действительно очень мало отличается от синусоиды. Правила и нормы считают кривую практически синусоидальной, если ни одна из ее ординат не отличается от соответствующей ординате основной синусоиды более чем на 5% амплитудного значения основной синусоиды (§ 2 „Правил и норм для испытания электрических машин“ и § 2 „Правил и норм для испытания трансформаторов“). Таким образом кривая напряжения, признаваемая практически синусоидальной, все же может не быть строго синусоидальной. Но всякую несинусоидальную периодическую кривую, как известно, можно представить как сумму гармонических периодических кривых:

$$y = \sum A_n \sin(n\omega t + \beta_n).$$

Здесь A_n — амплитуда какой-либо n -й гармоники, ω — угловая скорость вращения вектора A_1 первой основной гармоники, n — порядковый номер соответствующей гармоники и β_n — тот угол, который определяет положение вектора A_n соответствующей n -й гармоники и мгновенную величину ее ординаты в момент времени $t = 0$.

Кривая э. д. с. и напряжения, хотя и отличающаяся от синусоиды, всегда имеет такую форму, что отрицательная ее ветвь представляет обращенную положительную ветвь, а это условие определяет отсутствие всех четных гармоник. Вследствие этого для несинусоидальной кривой напряжения можно написать такое выражение, где n всегда будет представлять целое нечетное число:

$$n = U_{m1} \sin(\omega t + \beta_1) + U_{m3} \sin(3\omega t + \beta_3) + U_{m5} \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots$$

Допустим теперь, что в электрической цепи, например, в цепи одной фазы трехфазной системы, включены последовательно омическое сопротивление R , самоиндукция L и емкость C . Тогда какая-либо n -я гармоника напряжения

$$U_n = U_{mn} \sin(n\omega t + \beta_n)$$

создаст в цепи n -ю гармонику тока

$$I_n = I_{mn} \sin(n\omega t + \beta_n - \varphi_n).$$

Вследствие этого в цепи появятся э. д. с. омического падения напряжения, самоиндукции и емкости, действующие величины которых будут равны

$$RI_n, n\omega L I_n \text{ и } \frac{1}{n\omega C} I_n.$$

Здесь $n\omega$ — угловая скорость изменения фазы соответствующей гармоники, или угловая скорость вращения ее вектора.

Геометрическое сложение этих э. д. с. приводит к следующему выражению действующей силы тока n -й гармоники:

$$I_n = \sqrt{\left(R^2 + \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)^2\right)}.$$

Здесь $U_n = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{mn}$ действующая величина n -й гармоники напряжения.

Это выражение показывает, что сопротивления индукционное $n\omega L$ и емкостное $\frac{1}{n\omega C}$ будут совершенно различны для гармоник различного порядка. Первое из них сильно увеличивается с увеличением порядка гармоники, а второе, наоборот, сильно уменьшается. Поэтому если в цепи имеется

только самоиндукция, но конденсатор в нее не включен для высших гармоник тока цепь будет представлять бесконечное сопротивление, и они будут погашаться; если же, наоборот, в цепь включен конденсатор, но в ней нет самоиндукции для высших гармоник тока сопротивление цепи будет уменьшаться, и гармоники будут увеличиваться. Первое уменьшает $C = \infty$, а второе $L = 0$.

Для выяснения поставленного нами вопроса возьмем чистый пример, подходящий к действительным заводским условиям.

Допустим, что заводской цех, требующий 750 kW, потребляет при напряжении 6300 V и работает при $\cos \varphi = 0.8$. Определим мощность этих конденсаторов и выясним, как они будут работать при появлении в кривой напряжения высших гармоник, если фидер, питаящий цех, будет защищен от токов короткого замыкания 5%.

Если мы обозначим активную мощность, требуемую цехом через P , реактивную мощность конденсаторов через P_c , то отставание токов до исправления $\cos \varphi$ и после исправления соответственно через φ_1 и φ_2 , то получим следующее выражение для мощности конденсаторов:

$$P_c = P (\lg \varphi_1 - \lg \varphi_2).$$

Подставив сюда соответственные числовые величины, получим

$$P_c = 750 (1.1703 - 0.7508) = 315 \text{ kVA}.$$

Емкость конденсаторов, приходящаяся на одну фазу в соединении их звездой, получится из равенства

$$10^3 P_c = 3 \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \omega C = U^2 \omega C.$$

Допустим, что конденсатор должен быть установлен в питавшем цех кабеле, чтобы уменьшить силу тока и что омическая потеря напряжения в этом кабеле приблизительно составляет 2%. Тогда, учитывая понижение напряжения из-за сопротивления кабеля ($0.02 \cos \varphi_2$) и от реактора ($0.05 \sin \varphi_2$), получим приблизительную величину напряжения на конце линии, равную

$$6300 (1 - 0.02 \cdot 0.8 - 0.05 \cdot 0.6) = 6300 \cdot 0.954 = 6000 \text{ V}.$$

Поэтому при частоте тока 50 пер/сек емкость конденсатора на одну фазу

$$C = \frac{315 \cdot 1000}{314 \cdot 6000^2} = 27.8 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

Определим теперь коэффициент самоиндукции реактора. Он получится из равенства

$$\frac{\sqrt{3} \omega L I}{U} = 0.05.$$

При $\cos \varphi = 0.8$ сила тока должна получиться равной

$$I = \frac{10^3 P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{750000}{\sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 0.8} = 86 \text{ A}.$$

Поэтому коэффициент самоиндукции реактора должен быть равным

$$L = \frac{0.05 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 86} = 6.75 \cdot 10^{-3} \text{ H}.$$

В настоящем случае как самоиндукция, так и емкость имеются в одной цепи в последовательном соединении. Такое соединение может создать для некоторых гармоник условия резонанса

$$n\omega L - \frac{1}{n\omega C} = 0.$$

4) Кроме индуктивности реактора при практических подсчетах учитывать и индуктивность трансформатора.

определим теперь, какая гармоника будет ближе всего соответствовать этому условию. Для полученных нами величин C оно дает величину

$$n = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{1}{LC}} = 314 \sqrt{\frac{10^6}{6,75 \cdot 27,8}} = 7,25.$$

Более близкой к этому условию является 7-я гармоника. Пусть теперь, что кривая напряжения содержит одну гармонику, имеющую величину, равную 4% от амплитуды значения основной синусоиды напряжения, т. е. такую же, какая согласно указанным выше нормам дает право на кривую напряжения практически синусоидальной. Учтите в этом расчете омическое сопротивление фидера включенного в него реактора, мы определим его, исходя из полученного процента отношения омического падения напряжения. Мы его приняли равным 2% от начального напряжения 6300 В. Следовательно, можем написать

$$RI = 0,02 \frac{6300}{\sqrt{3}}, \text{ где } I = 86.$$

Тогда получим $R = 0,85 \Omega$.

Реактивное сопротивление для 7-й гармоники будет равно

$$n\omega L - \frac{1}{n\omega C} = 7 \cdot 314 \cdot 6,75 \cdot 10^{-3} - \frac{10^6}{7 \cdot 314 \cdot 27,8} = 14,8 - 16,4 = -1,6 \Omega.$$

Из полученных нами числовых величинах омического и реактивного сопротивлений действующая сила тока 7-й гармоники должна получиться равной

$$I_7 = \frac{0,04 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,85^2 + 1,6^2}} = 80,5 \text{ A.}$$

Сила тока в цепи при правильной синусоиде и при $n=8$ нами была определена равной 86 А. Теперь на эту силу тока накладывается 7-я гармоника, дающая 80,5 А. Следовательно, действующая сила тока в фидере будет теперь

$$\sqrt{86^2 + 80,5^2} = 118 \text{ A.}$$

Сила тока и должна показываться амперметром. Эта гармоника напряжения может создать сильный ток, что, только в той ветви, в которую включен конденсатор. Но же остальных ветвях электрической сети, питаемой из фидера, в которых будут действовать сопротивления емкостные и омические, силы тока этой гармоники будут сильно малы, что их нет основания принимать в расчет. Потребляемая мощность, потребляемая цехом, при этом существенно не изменится и будет практически иметь ту же величину 750 kW, но коэффициент мощности, который лишь можно было обозначить теперь через $\cos \varphi$, уменьшится. Сила его при этом получится равной

$$\frac{750000}{\sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 118} = 0,583,$$

менее первоначальной величины, которую надо было иметь постановкой конденсаторов.

В этом примера мы предположили в кривой напряжения не только гармонику, притом очень близкую к условиям звонка напряжений. В действительности, если кривая отличается от синусоиды, она всегда содержит несколько более или менее развитых гармоник. Кроме того, полученные выше величины, определяющие реактивное сопротивление 7-й гармоники, показывают, что при условии, близком к звонку напряжений, очень малые ошибки в определении коэффициента самоиндукции реакторов, и емкости конденсаторов могут очень сильно влиять на конечный результат. Но он все же показывает характер явления и при этом может быть неудач при постановке конденсаторов, более, что условия, взятые для этого примерного расчета, они к тем, которые дает заводская практика.

Пусть теперь, что реактора в цепи фидера нет. В этом случае условия резонанса отпадают, и, например, в рассмотренном нами примере численная величина реактивного сопротивления цепи увеличивается для 7-й гармоники с 1,6 до 19. Сила тока ее должна уменьшиться приблизительно в 1,6 раза. Но более сильное развитие в этом случае должны быть гармоники более высоких порядков, если они имеют заметные амплитуды в кривой напряжения. Для выяснения явления мы также возьмем численный пример.

Пусть, что в кривой напряжения имеется 13-я гармоника, сила которой составляет 3% от амплитуды основной

синусоиды. Емкостное сопротивление конденсатора для этой гармоники будет равно

$$\frac{10^6}{13 \cdot 314 \cdot 27,8} = 8,8 \Omega.$$

Действующая сила тока этой гармоники будет равна

$$\frac{0,03 \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,85^2 + 8,8^2}} = 11,7 \text{ A.}$$

Такая величина, составляющая лишь 13,6% от действующей величины основной синусоиды тока, равной в нашем примере 86 А, мало изменит силу тока в фидере. Она будет более лишь в $\sqrt{1 + 0,136^2} = 1,01$ раза, т. е. всего лишь на 1%, хотя кривая тока получит ясно выраженный зубчатый характер. Коэффициент мощности от этого понизится также приблизительно на 1%. Для ослабления зубчатого характера кривой тока в этих случаях иногда рекомендуется включать последовательно в цепь конденсаторов небольшое индукционное сопротивление. Но формула реактивного сопротивления

$1/n\omega L - 1/n\omega C$ показывает, что это индукционное сопротивление должно быть для данной гармоники во всяком случае более соответствующего ей емкостного сопротивления, в противном случае сила тока этой гармоники не уменьшится, а увеличится, и здесь также может получиться условие резонанса.

Если, например, требуется снизить силу тока 13-й гармоники до 5%, т. е. до 4,3 А, то необходимая величина индукционного сопротивления получится из соотношения какущихся сопротивлений:

$$\frac{\sqrt{0,85^2 + x^2}}{\sqrt{0,85^2 + 8,8^2}} + \frac{11,7}{5,4},$$

откуда

$$x = 19,17.$$

Но так как здесь $x = n\omega L - \frac{1}{n\omega C}$, то, подставив сюда соответствующие численные величины, получим

$$L = \frac{19,17 + 8,8}{13 \cdot 314} = 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ H.}$$

Полученная величина коэффициента самоиндукции при той силе тока, которая должна проходить через конденсатор, потребует реактивных катушек довольно больших размеров. Приведенный расчет показывает, что коэффициент самоиндукции этих катушек будет иметь малую величину только для гармоник очень высокого порядка.

На основной синусоиде тока включение таких катушек отразится немного, так как реактивное сопротивление от этого мало для нее изменится. В данном примере оно будет равно для основной синусоиды

$$n\omega L - \frac{1}{n\omega C} = 314 \cdot 6,85 \cdot 10^{-3} - \frac{10^6}{314 \cdot 27,8} = 2,15 - 114,5 = -112,35.$$

Следовательно, оно уменьшится менее чем на 2%, но включение реактивных катушек может создать условия резонанса для какой-либо промежуточной гармоники, если такая будет в кривой напряжения, как это уже было выяснено выше.

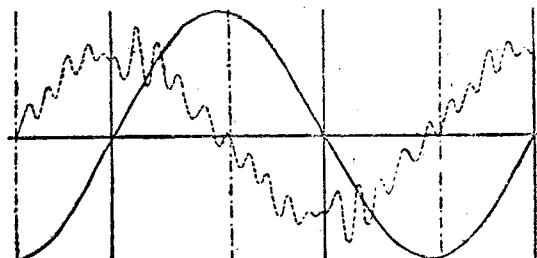


Рис. 1

Для опытного пояснения этих явлений батарея в 20 μ F (10 по 2 μ F) была включена в городскую ленинградскую сеть низкого напряжения 120 V. Из осцилограммы, показанной на рис. 1, видно, что кривая напряжения этой сети не имела заметных высших гармоник, но в кривой тока конденсаторов получились высшие гармоники, причем особенно ясное развитие получила 19-я гармоника.

Реактивное емкостное сопротивление для этой гармоники получилось равным

$$\frac{10^6}{19 \cdot 314 \cdot 20} = 8,4 \Omega.$$

Затем в цепь конденсаторов была включена реактивная катушка без железа с коэффициентом самоиндукции $L = 3,31 \text{ мН}$. Для реактивного сопротивления основной гармоники эта катушка не имела существенного значения, так как изменяла его лишь на 0,65%. Для 19-й гармоники она создала реактивное сопротивление, равное

$$19 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3,31 \cdot 10^{-3} - \frac{10^6}{19 \cdot 314 \cdot 20} = 19,8 - 8,4 = 11,4 \Omega$$

Вместе с тем эта катушка создала условия для развития 11-й и 13-й гармоник, что видно из условия резонанса, к которому эти гармоники близко подходят,

$$n \cdot 314 \cdot 3,31 \cdot 10^{-3} = \frac{10^6}{n \cdot 314 \cdot 20}$$

откуда

$$n = \sqrt{152,5} = 12,35.$$

Кривая тока, полученного при включении катушки, видна на осцилограмме, показанной на рис. 2. Здесь видно развитие, главным образом, 11-й гармоники, гармоники же более высоких порядков уменьшились.

Улучшения работы конденсаторов при этом не получилось.

В кривой тока, показанной на рис. 1, амплитуду 19-й гармоники можно оценить примерно в 7% от амплитуды основной синусоиды. Кроме этой гармоники в кривой тока существуют и другие менее развитые соседние гармоники. Суммирование их амплитуд и дает повышенную волну в средней части полу-периода кривой.

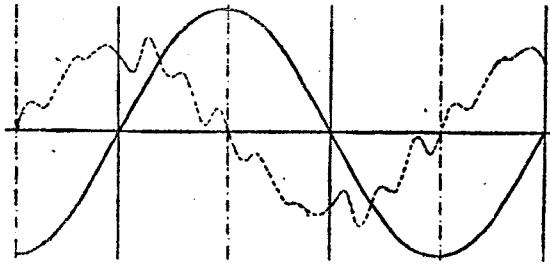


Рис. 2

Выясним теперь, какую величину должна иметь 19-я гармоника кривой напряжения, чтобы могла получиться 19-я гармоника в 7%.

При опыте вольтметр показал 120,8 В. Амперметр показал 0,812 А. По формуле $I_n = U_n n \omega C$ получим

$$0,07 \cdot 0,812 = \epsilon 120,8 \cdot 19 \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-6},$$

откуда

$$\epsilon = 0,394 \cdot 10^{-2}.$$

Следовательно, 19-я гармоника напряжения должна составлять около 0,4% основной синусоиды. Такую малую величину нельзя обнаружить в осцилограмме.

Очень слабые гармоники высших порядков всегда могут быть в кривой напряжения от влияния зубцов в статорах и роторах как генераторов, так и некоторых машин приемников энергии, например, синхронных двигателей. Эти гармоники должны создавать зубчатую форму кривой тока конденсатора. Однако при сложении этого тока с током, потребляемым заводом, влияние таких гармоник сильно ослабляется, и на коэффициенты мощности они не окажут сколько-нибудь существенного влияния.

Мы сделали здесь примерные подсчеты применительно к нормальной работе цеха, т. е. к тому случаю, когда нагрузка его электрических приемников соответствует продолжительному максимуму ее. Но еще менее благоприятные условия получатся при неполной работе цеха, когда общий коэффициент мощности всех его приемников уменьшается. Допустим, что вследствие неполной работы цеха и неполной нагрузки работающих в нем двигателей потребляемая им мощность уменьшилась до 500 kW, а коэффициент мощности его приемников уменьшился до 0,55, вместо 0,65 при нормальной работе. Эти числа дают следующие величины активного и отстающего реактивного токов:

$$I \cos \phi = \frac{10^3 P}{\sqrt{3} V} = \frac{500000}{3 \cdot 6300} = 46 \text{ A},$$

$$I \sin \phi = 46 \operatorname{tg} \phi = 46 \cdot 1,52 = 69,5 \text{ A}.$$

Конденсатор дает тот же самый ток, который определится из его кажущейся мощности и будет равен

$$\frac{315000}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 29 \text{ A}.$$

Следовательно, сила тока, требуемая цехом, будет равна

$$\sqrt{46^2 + (69,5 - 29)^2} = 61,3 \text{ A}.$$

Коэффициент мощности при синусоидальном токе должен быть равен $46 : 61,3 = 0,75$. Если же при этом в цепи конденсатора будет действовать определенная выше 7-я гармоника тока, равная 80,5 А, то действующая сила тока будет равна

$$\sqrt{61,3^2 + 80,5^2} = 101 \text{ A}.$$

Коэффициент мощности определится при этом следующей величиной:

$$\frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 101} = 0,453.$$

Он получается здесь менее той величины, которая по нашему должна быть без применения конденсаторов.

Высшие гармоники всегда будут понижать коэффициенты мощности и при совпадении основной синусоиды тока с новной синусоидой напряжения, когда $\cos \phi = 1$, коэффициент мощности, вычисленный по величинам P , U и I , будет из единицы. Следовательно, при этом получится такое явление, что при переходе тока из отстающего в опережающий коэффициент мощности будет увеличиваться и затем снова уменьшаться, не доходя до единицы.

Высшие гармоники тока при своем развитии могут как также повышение амплитуды напряжения в сети, если имеются условия, близкие к резонансу напряжений. Чтобы выяснить, насколько существенно может быть такое явление и какое оно может иметь практическое значение, мы взяли тот же пример, который был нами рассмотрен. В этом же мере мы получили силу тока 7-й гармоники, когда не питающая цех, защищена 5% реактором, равную 80,5 А. Эта величина дает действующую величину напряжения гармоники за реактором, т. е. в сети, питающей цех, равную

$$7 \cdot 314 \cdot 6,75 \cdot 80,5 \cdot 10^{-3} = 1195 \text{ V}.$$

Если в распределительной сети цеха основная синусоидальная напряжения даст 6000 В, то от 7-й гармоники получится повышение действующей величины до

$$\sqrt{6000^2 + (\sqrt{3} \cdot 1195)^2} = 6350 \text{ V},$$

т. е. на 5,85%. В то же время максимальная мгновенная величина при совпадении амплитуд может повыситься с $\sqrt{2}$ до $\sqrt{2}(6000 + \sqrt{3} \cdot 1195) = 12200 \text{ V}$, т. е. на 43,4%. Числа показывают, что в случае применения конденсаторов в цепи, защищенной реактором, даже при сильном развитии высших гармоник тока получится относительно небольшое увеличение действующего напряжения, но мгновенная же максимальная величина напряжения может сильно увеличиться, подвергнувшись опасному напряжению изоляции сети.

В рассмотренных нами примерных расчетах, выяснив работу конденсаторов, мы получили особенно неблагоприятные условия в том случае, когда в подводящем энергии к дому имеется реактор, могущий создать для некоторых приемников условия резонанса напряжений. Но подобные же условия могут получиться и без реактора, так как значительная индукция в подводящих линиях создается не только реакторами, но и трансформаторами. Само собой разумеется, если кривая напряжения сети имеет совершенно правильную синусоидальную форму, то не будет и причин для появления высших гармоник. Но мы видим, что даже неправильности, выходящие из пределов практической синусоидальности кривой напряжения, могут создать условия, совершенно нарушающие правильность работы конденсаторов. Высшие гармоники более высоких порядков, не выходящие из норм, всегда могут быть в кривой напряжения, и если в цепи не получатся условий, способствующих особенно сильному развитию соответствующих гармоник тока, то все же они могут создать работу конденсаторов. Они не создадут тогда токов, превышающих коэффициента мощности, которое определяется: четом, исходящим из предположения синусоидальности кривой напряжения.

Синхронные компенсаторы тоже могут дать высшие гармоники в кривой тока, но при современных правильно сконструированных машинах эти гармоники не могут иметь существенного значения по своей величине. Появление их может быть: неправильности кривой э. д. с. компенсатора даже и тогда, когда кривая напряжения в цепи будет иметь совершенно правильную синусоидальную форму. Они могут создать разность мгновенных величин приложенного напряжения обратной э. д. с. компенсатора, если одна из этих машин или обе они будут иметь высшие гармоники. Но высшие гармоники токов не могут получить при этом сильного роста вследствие самоиндукции обмотки самого компенсатора.

Приведенные здесь результаты испытаний и примерных расчетов приводят к следующим заключениям:

1. Применение статических конденсаторов для исправления коэффициента мощности могут привести к вполне надежным результатам лишь в том случае, когда кривая напряжения не представляет правильную синусоиду.

2. Существование высших гармоник в кривой напряжения, имея более или менее развитые гармоники в кривой тока, проходящего через конденсатор, будет понижать коэффициент мощности против той расчетной величины, которая определена для правильных синусоид.

3. Это понижение расчетного коэффициента мощности может быть весьма значительным, если самоиндукция линии, передающей ток например от реактора или от трансформатора, бу-

дет создавать явления резонанса для одной из гармоник кривой напряжения. В этом случае конденсатор может совершенно не оправдать своего назначения.

4. Слабое развитие нескольких высших гармоник в кривой тока существенно не повлияет на то улучшение коэффициента мощности, которое получилось бы при правильной синусоиде, но все же уменьшил его.

В заключение автор должен выразить благодарность электротехнической лаборатории Ленинградского химико-технологического института, в которой были произведены приведенные здесь опыты, а также сотрудникам этой лаборатории, в особенности Л. А. Гуну, снимавшему осциллограммы.

Разряд в воздухе и масле при промышленной частоте и при импульсах

Инж. К. С. Архангельский,
инж. П. И. Войденов и инж.
А. И. Хмельницкий

Лаборатория высокого напряжения им. проф. Смуррова, ЛЭМИ

До настоящего времени в литературе не нашли отражения работы союзных лабораторий по разрядам в воздухе и масле при высоких напряжениях, хотя потребность в этих данных в связи с быстрым развитием союзной электропромышленности несомненно имеется. Из иностранной литературы известны аналогичные работы, но они, в первых, не охватывают всех случаев, необходимых для практических расчетов, и, во-вторых, некоторые из них являются сомнительными и требуют проверки.

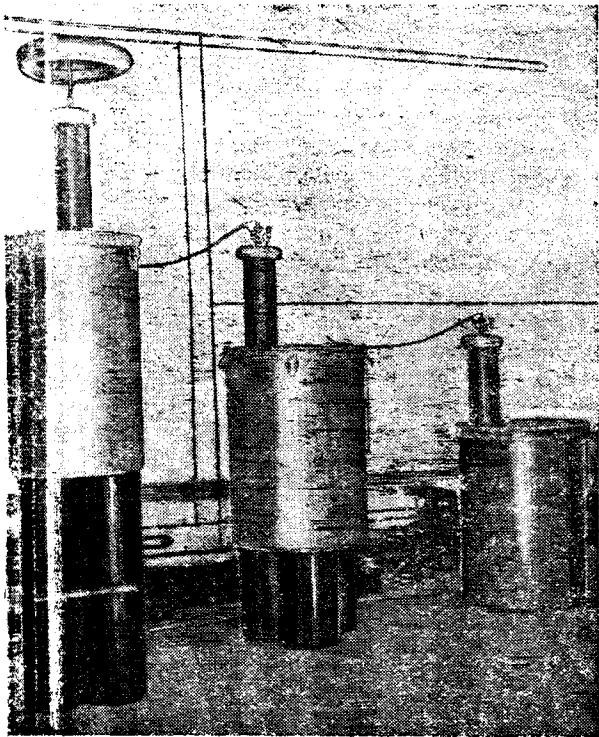


Рис. 1. Каскад трансформаторов фирмы GEC на общее напряжение 1050 кВ; мощность каскада 1050 кВА

В задачу настоящей работы, выполненной по заданию завода „Электроаппарат“, входило:

- 1) определение зависимости разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами: а) „игла-игла“, „игла-плоскость“ в воздухе, б) „игла-плоскость“ в масле при промышленной частоте и при импульсах различных форм и по-мощностей;

2) определение влияния температуры и прочности масла на разрядное напряжение при промышленной частоте и импульсах.

Испытательные трансформаторы и методика работы

Для исследования разрядов при напряжении от 30 до 100 кВ применялся трансформатор GEC на

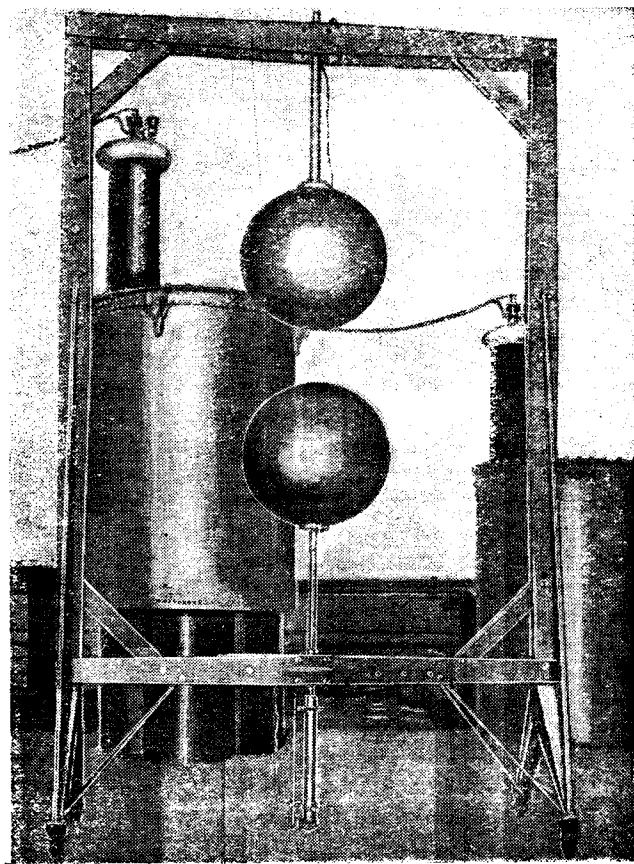


Рис. 2. Шаровой разрядник, $d = 100$ см

напряжение 100 кВ мощностью 10 кВА. Для исследования разрядов от 100 до 300 кВ применялся каскад из трех трансформаторов фирмы Koch & Sterzel на общее напряжение 375 кВ. Мощность единиц каскада 75, 50 и 25 кВА. Напряжение регулировалось в обоих случаях потенциальными регуляторами. Для исследования разрядов при напряжении от 250 до 1000 кВ применялся каскад из

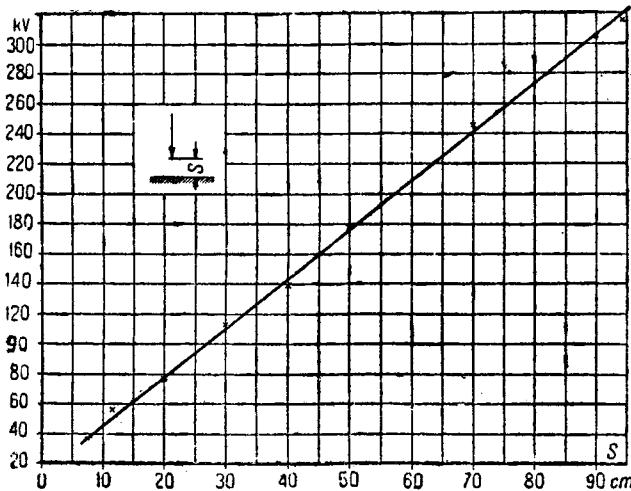


Рис. 3. Зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами игла-плоскость в воздухе при $f = 50$

трех трансформаторов фирмы GEC на общее напряжение 1050 kVA. Мощность каскада 1050 kVA. Фотография каскада трансформаторов GEC приведена на рис. 1. Питание трансформаторов производилось от специального генератора мощностью 1050 kVA. Регулирование напряжения производилось изменением поля возбуждения генератора.

Измерение напряжения производилось вольтметром, включенным в специальную обмотку трансформатора. Вольтметр предварительно градуировался шаровым разрядником при включении всех проводников, подводящих напряжение к электродам.

Этот метод измерения напряжения многократно проверялся следующим образом. По вольтметру определялось среднее значение напряжения, при котором происходил разряд при данном расстоянии между электродами. Затем электроды несколько раздвигались, и на систему измерительные щары-электроды подавалось напряжение, соответствующее среднему значению напряжения, при котором происходит разряд между электродами. Щары сдвигались до разряда между ними, и по расстоянию между ними определялось напряжение. Этот опыт повторялся 3—4 раза. По определенным таким образом напряжениям определялось их среднее значение. Оба вышеописанных метода давали одинаковые значения разрядного напряжения между электродами.

Во всех случаях разрядное напряжение между щарами определялось по формуле Peek.

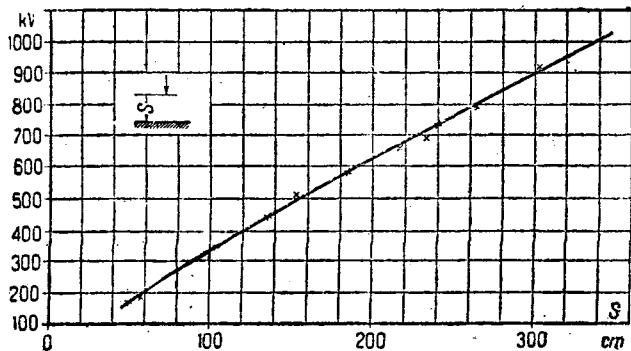


Рис. 4. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в воздухе между электродами игла-плоскость, $f = 50$

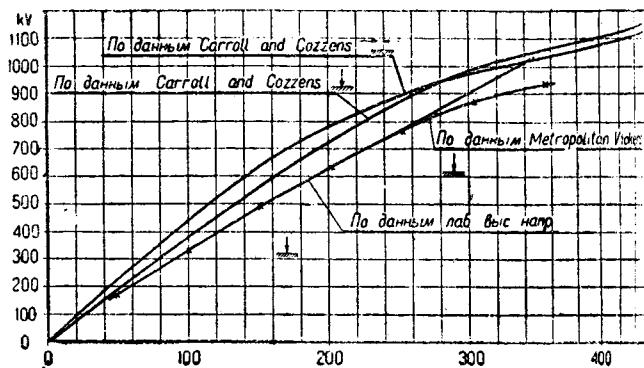


Рис. 5. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в воздухе для электродов игла-плоскость и игла-игла при $f = 50$ по различным данным

Разрядное напряжение для данного расстояния между электродами определялось как среднее из 3—5 показаний.

А. Разряд в воздухе между электродами игла-плоскость, игла-заземленная игла, игла-игла (нейтраль заземлена)

Во всех описанных ниже опытах иглой служил медный стержень диаметром 5 мм с концом, затаченным на конус высотой 50 мм; плоскость-заземленные железные листы общим размером 200×300 мм, уложенные непосредственно на бетонном полу.

Электроды игла-плоскость. Расстояние от иглы до ближайшей железной конструкции (бак трансформаторов) 900 см. Результаты измерений приведены на рис. 3 и 4. Максимальное отклонение отдельных измерений от среднего значения—5%. На рис. 5 приведены для сравнения кривые разрядного напряжения в зависимости от расстояния между иглой и плоскостью: данным Carroll и Cozzens^[1] и Metropolitan Vicks^[2].

Из приведенных кривых видно, что данные полученные лабораторией высокого напряжения и данные Metropolitan Vicks совпадают вполне хорошо. Наибольшее расхождение имеет место при больших расстояниях. Однако при 1000 см расхождение не превышает 8%. Данные Carroll и Cozzens'a отличаются весьма значительно. На-

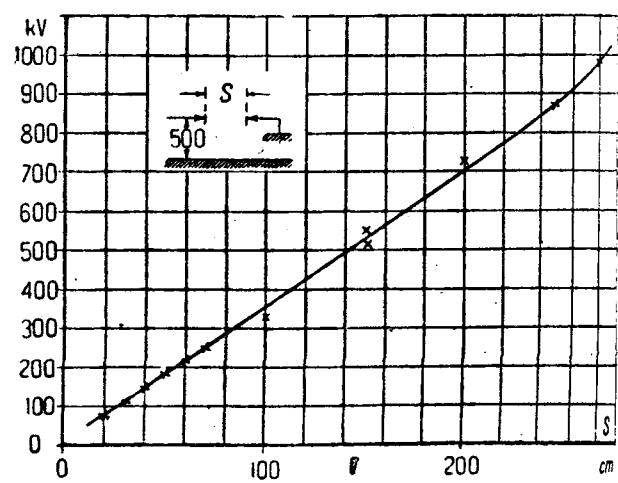


Рис. 6. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в воздухе между электродами игла-игла при $f = 50$

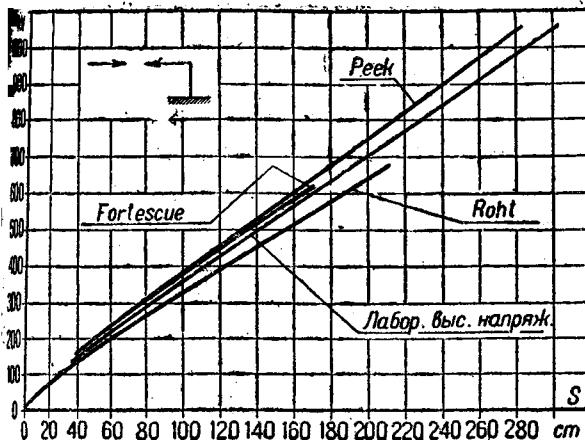


Рис. 7. Зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами игла-игла (одна из игл заземлена) при $f = 50$ по различным данным

Наибольшее расхождение с данными лаборатории высокого напряжения имеет место при напряжениях около 600 кВ и достигает 17—19 %. Причину расхождения установить довольно трудно.

Если сравнить данные Corrol и Cozzens для разряда между иглой и плоскостью с данными лаборатории высокого напряжения и данными Fortesque^[3] (см. далее) для разряда между электродами игла-игла, то нетрудно видеть, что разрядное напряжение между иглой и плоскостью по данным Corrol и Cozzens будет выше, чем разрядное напряжение между иглой-иглой, тогда как это должно быть ниже. Интересно еще отметить, что кривые Corrol и Cozzens для разряда между иглой-иглой и иглой-плоскостью пересекаются, и при больших расстояниях разрядное напряжение между иглой-иглой оказывается ниже, чем разрядное напряжение между иглой-плоскостью. Такое соотношение разрядных напряжений представляется сомнительным.

На основании приведенных выше соображений можно считать, что данные Corrol и Cozzens относятся к каким-то специфическим условиям опыта.

Электроды игла-заземленная игла. Иглы устанавливались горизонтально на высоте 230 см от пола при расстояниях между иглами до 70 см и на высоте 500 см от пола при расстояниях между иглами больше 70 см.

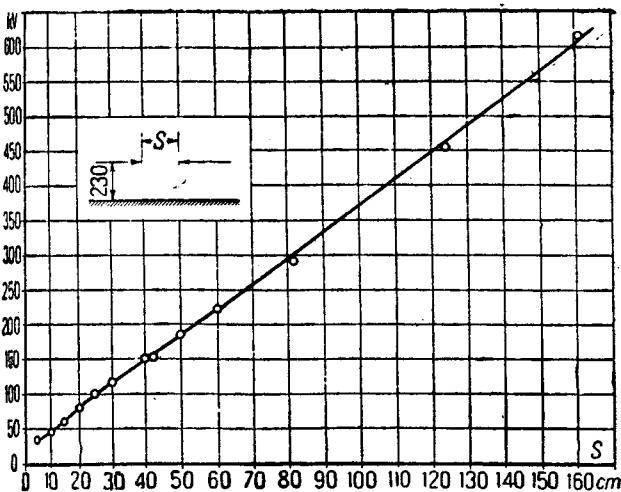


Рис. 8. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в воздухе между электродами игла-игла (нейтраль заземлена) при $f = 50$

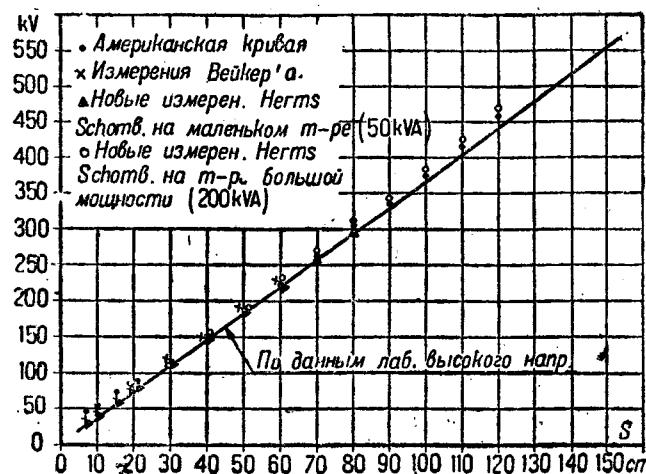


Рис. 9. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в воздухе между электродами (одна из игл заземлена) при $f = 50$ по различным данным

Результаты опытов приведены на рис. 6 и 7. Максимальное отклонение отдельных разрядных напряжений от среднего значения составляет 4 %. Для сравнения на рис. 7 приведены данные о разрядном напряжении между иглами по Peek^[6], Roth^[4] и Fortesque^[3] и по опытам лаборатории высокого напряжения.

Данные лаборатории высокого напряжения не значительны, примерно на 5 % ниже соответствующих данных Peek, но выше примерно на 10 % значений, полученных по формуле Roth. Данные Fortesque ближе к данным лаборатории высокого напряжения, чем данные Peek; по Fortesque разрядное напряжение примерно на 1—2 % выше данных лаборатории высокого напряжения.

Электроды игла-заземленная игла (нейтраль заземлена). Максимальное отклонение от среднего значения составляет 4 %. Результаты опытов приведены на рис. 8, 9 и 10. Для сравнения на рис. 9 приведены данные о разрядном напряжении между углами по Weicker^[5], Peek и лаборатории высокого напряжения; нетрудно видеть, что все эти данные довольно хорошо совпадают. Для сравнения величин разрядного напряжения между различными электродами на рис. 10 приведены кривые разрядного напряжения по данным лаборатории высокого напряжения между электродами игла-плоскость, игла-игла (нейтраль заземлена) и игла-заземленная игла.

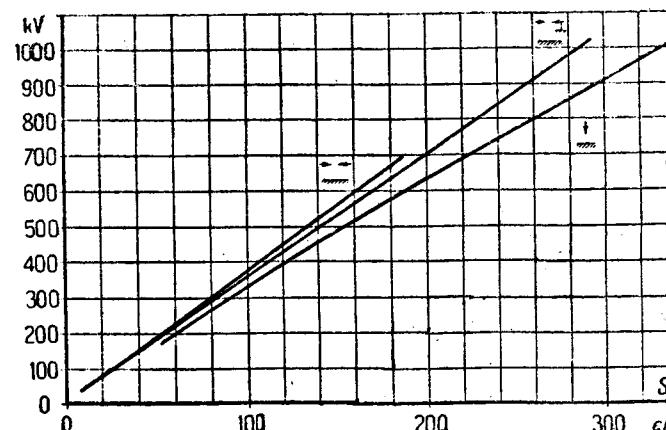


Рис. 10. Сравнительные данные зависимости разрядного напряжения от расстояния в воздухе между электродами игла-игла (нейтраль заземлена), игла-игла (одна из игл заземлена) и игла-плоскость при $f = 50$

Б. Разряд в масле при промышленной частоте

Одним из электродов служила игла, вторым — железное дно бака. Размеры применявшихся баков приведены на соответствующих рисунках.

Метод определения разрядного напряжения. Приведенные ниже данные относятся к двухминутному и мгновенному разрядному напряжению.

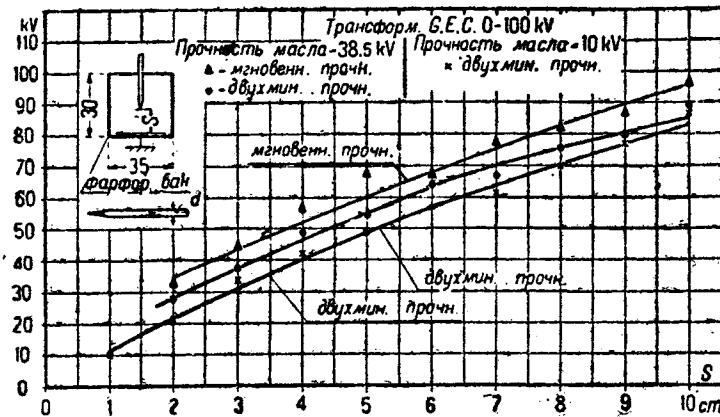


Рис. 11. Зависимости разрядного напряжения от расстояния в масле прочностью 38,5 и 10 кВ между электродами игла-плоскость при $f=50$

Мгновенное разрядное напряжение определялось следующим образом: к электродам подводилось напряжение, которое повышалось со скоростью $3 \pm 5 \text{ kV/sec}$ до разряда; определенное таким образом напряжение принималось за мгновенное.

Для определения двухминутного разрядного напряжения к электродам подводились напряжения, равные $75 \pm 80\%$ от мгновенного, это напряжение держалось 2 мин., затем оно повышалось на $2 \pm 3\%$, вновь держалось 2 мин. и так далее до тех пор, пока не происходил разряд. Между отдельными разрядами соблюдался интервал, необходимый для выхода из масла пузырьков газа, образующихся при разрядах.

Результаты исследования разряда в масле. На рис. 11 и 12 приведены значения разрядных напряжений при различных расстояниях для электродов игла-плоскость. Для сравнения на рис. 13 приведены данные Miner^[7], Go-

odlet^[2] и Roth^[4]. Данные Goodlet, относящиеся к электродам игла-плоскость, довольно хорошо совпадают с полученными нами результатами в пределах до 250 кВ. Кривая Miner, относящаяся к электродам игла-игла, как это и следовало ожидать, дает большие значения, чем электроды игла-плоскость.

Для выяснения влияния прочности масла на величину разрядного напряжения была определена зависимость разрядного напряжения от расстояния

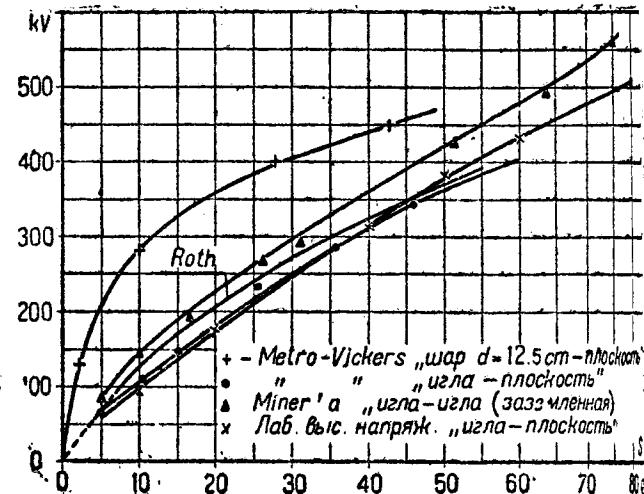


Рис. 13. Сравнительные данные по различным источникам в зависимости разрядного напряжения от расстояния в масле между различными электродами при $f=50$

ния в масле прочности 30, 10 и 5 кВ (прочность масла определялась в стандартном разряднике). Приведенные на рис. 11 и 14 данные показывают, что прочность масла оказывает влияние на величину разрядного напряжения в пределах до 10 ± 12 см. На рис. 11 приведена зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами при прочности масла 38,5 и 10 кВ. При расстояниях между иглой и плоскостью свыше 12 см (что соответствует разрядному напряжению порядка 100 кВ) прочность масла не влияет на величину разрядного напряжения.

Для выяснения влияния температуры производилось определение разрядного напряжения в масле при температурах 13 и 62°C . Как видно из данных, приведенных на рис. 15, при повышении температуры масла разрядные напряжения для электродов игла-плоскость поникаются. На рис.

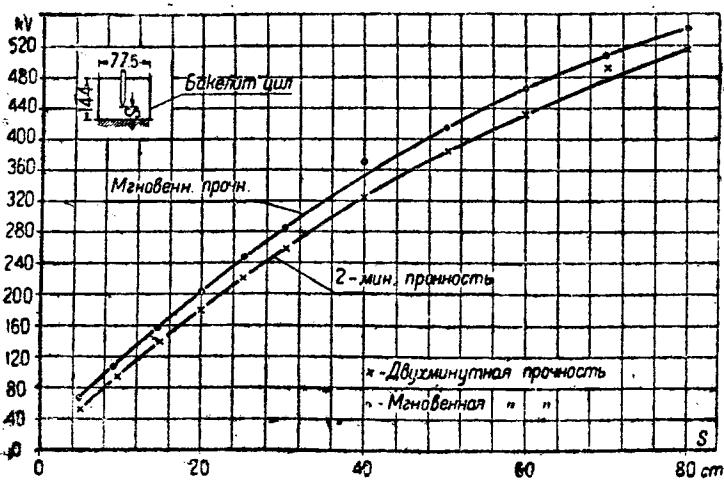


Рис. 12. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле между электродами игла-плоскость при $f=50$. Точки взяты как средние из четырех срезов. Прочность масла 29 и 5 кВ

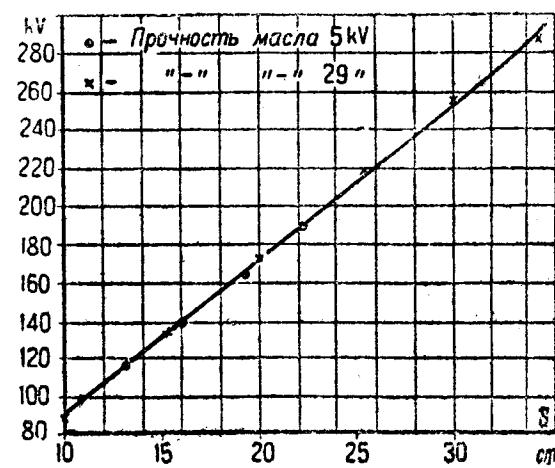


Рис. 14. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле между электродами игла-плоскость при прочности масла 29 и 5 кВ при $f=50$. Двеуминутная прочность

издена зависимость разрядного напряжения от температуры масла при постоянном расстоянии между электродами 30 см по данным Goodlet. Ниже поставлены точки по данным лаборатории высокого напряжения.

Разряд в воздухе при импульсах между электродами игла-плоскость

Определение зависимости разрядного напряжения от расстояния между электродами игла-плоскость производилось при различных полярностях и видах волны импульса. Опыты производились при импульсах, достигавших максимального значения время примерно 0,2 μ sec и спадавших до половины максимального значения через 5, 20 и 80 μ sec. Форма волны импульса определялась

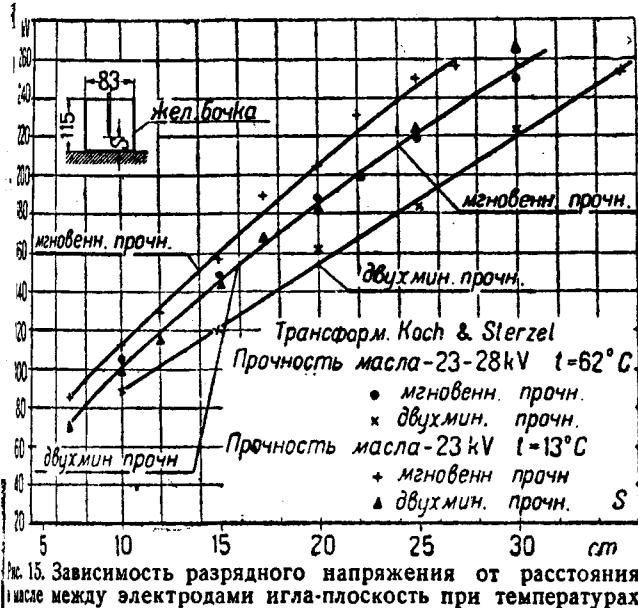


Рис. 15. Зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами игла-плоскость при температурах $t = 62^\circ\text{C}$ и $t = 13^\circ\text{C}$ и $t = 50$

расчетным путем на основании постоянных цепи генератора импульсов. Общий вид генератора импульсов приведен на фотографии рис. 17.

Методика измерений. Возбуждающие (прежуточные) разрядники генератора устанавливались на какое-либо расстояние, чем и задавалось напряжение импульса. Полученное напряжение измерялось шаровым разрядником с диаметром шаров, равным 100 см, имеющим дистанционное управление, фотография шаров приведена на рис. 2. Расстояние между измерительными шарами регулировалось таким образом, чтобы из общего числа приложенных к разряднику импульсов примерно 50% вызывали разряд между шарами. По полученному расстоянию между шарами определялось напряжение по формуле Peek. Метод измерения напряжения импульса помощью шарового разрядника общепринят; однако, как выяснилось в процессе работы, разрядное напряжение шарового разрядника при расстоянии даже меньше радиуса сферы зависит как от формы, так и от полярности волны¹). Это не учитывается обычными формулами для шарового разрядника. Так как в настоящее время нет данных различных напряжений между шарами при импульсах различной полярности, то в данной работе разрядное напряжение между шарами определяется

по формулам Peek, т. е. приведенные значения напряжений следует относить к разряду между шарами, причем незаземленный шар имеет ту же полярность, что и игла.

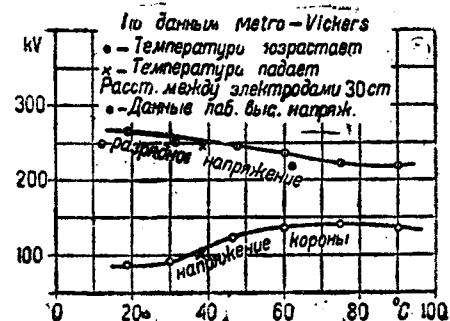
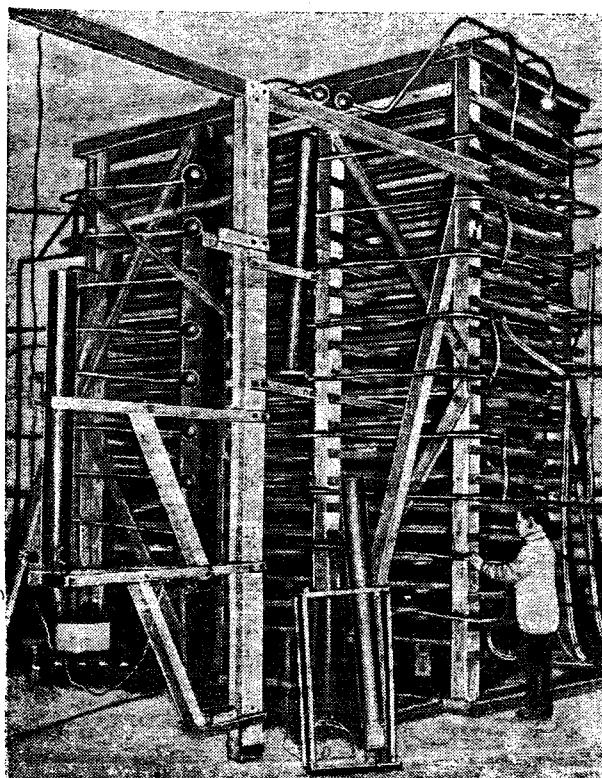


Рис. 16. Зависимость разрядного напряжения от температуры масла при постоянном расстоянии между электродами 30 см по данным Goodlet с указанием точек по данным лаборатории высокого напряжения

Крайне желательной является постановка работы по изучению поведения шарового разрядника (диаметром порядка 100 см) при импульсах различных форм и полярностей при высоких напряжениях.

После измерения напряжения шары немного раздвигались и подбирались такое расстояние между иглой и плоскостью, чтобы из десяти импульсов пять вызвало разряд между иглой и плоскостью. Метод этот был назван Peek методом испытания полной волной.

Результаты исследования. Полученные зависимости разрядного напряжения от расстояния при импульсах различных форм и полярностей приведены на рис. 18. Приведенные данные относены к плотности воздуха $\delta = 1$. Как видно из кривых, разрядные напряжения между иглой и плоскостью значительно выше в том случае, когда игла имеет отрицательную полярность.



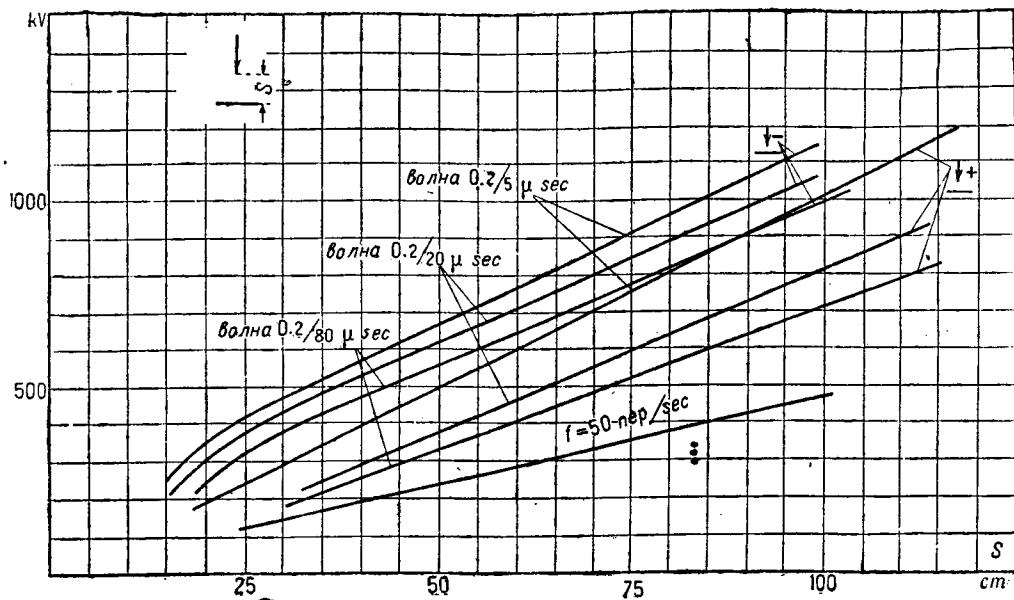


Рис. 18. Зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами игла-плоскость в воздухе при импульсах различных форм волны положительной и отрицательной полярности

Г. Разряд в масле при импульсах между электродами игла-плоскость

Исследование разряда в масле производилось при апериодических импульсах, достигавших максимального значения за время 0,2 μ сес и спадавших до половины максимального значения че-

рез 5,20 и 80 μ сес; форма волны импульса определялась расчетным путем по постоянным цепям генератора импульсов.

Опыты производились в бакелитовом баке диаметром 800 см и высотою 1400 см с вделанным железным дном, которое и служило одним из электродов. Вторым электродом служила медная игла, которая подвешивалась над баком на длинном шнуре, перекинутом через блок. Свободный конец шнуря позволял экспериментатору регулировать под напряжением расстояние между иглой и дном бака.

После измерения напряжения импульса медной иглой, описанным в разделе "В" данной статьи, измерительные шарики несколько раздвигались, тем самым игла постепенно опускалась (примерно на 3—4 мм после приложения двух импульсов), пробоя в масле. Определенный, таким образом, промежуток между иглой и плоскостью соответствовал напряжению импульса, измеренному шариками.

Результаты исследования. Полученные зависимости разрядного напряжения от расстояния при импульсах различных форм и полярностей приведены на рис. 19, 20, 21 и 22. Как видно из приведенных данных, разрядное напряжение выше при отрицательной полярности им-

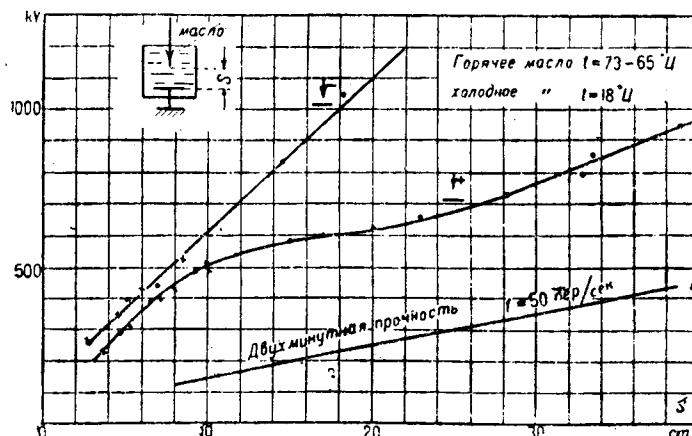


Рис. 19. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле между электродами игла-плоскость при импульсах 0,2/5 μ сес и температурах $t = 73 \div 65^{\circ}\text{C}$ и $t = 18^{\circ}\text{C}$. Прочность масла 27 KV. Волна 0,2/5 μ сес

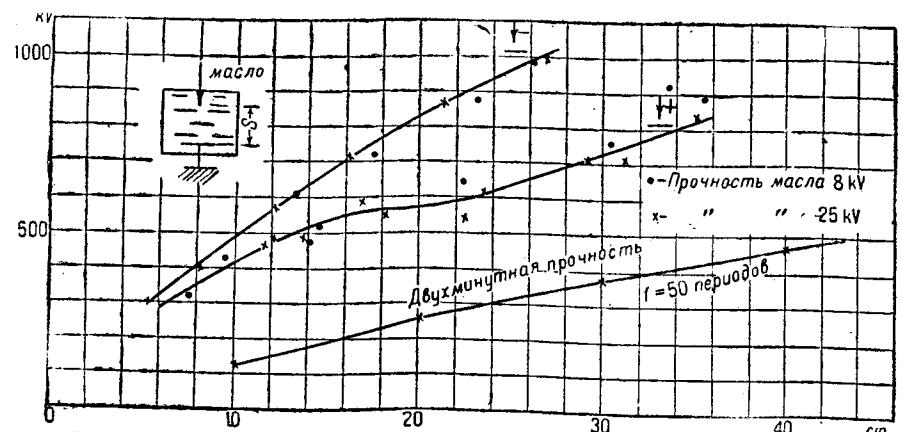


Рис. 20. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле между электродами игла-плоскость при импульсах 0,2/20 μ сес. Прочность масла 25 и 8 KV

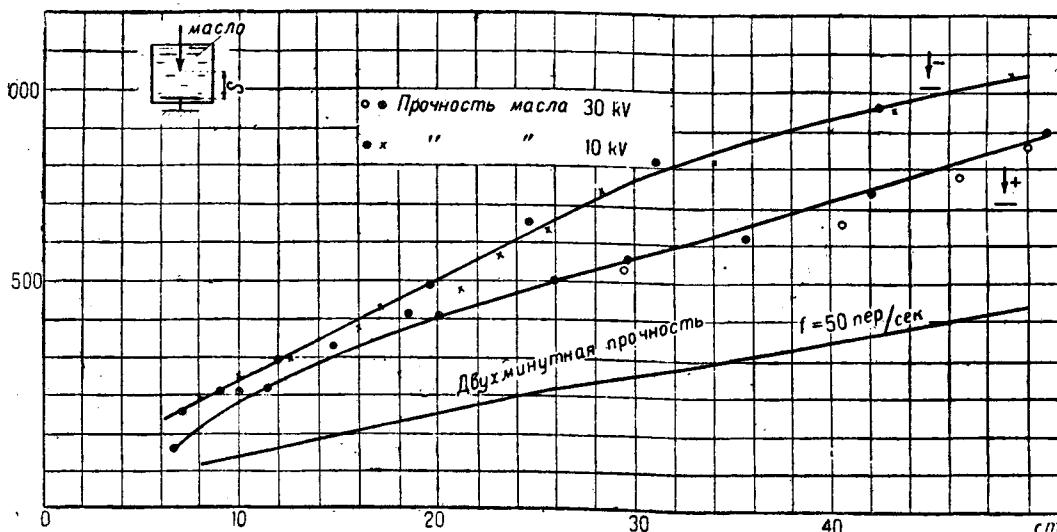


Рис. 21. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле между электродами игла-плоскость при импульсах 0,2/80 μ sec. Прочность масла 30 и 10 кВ

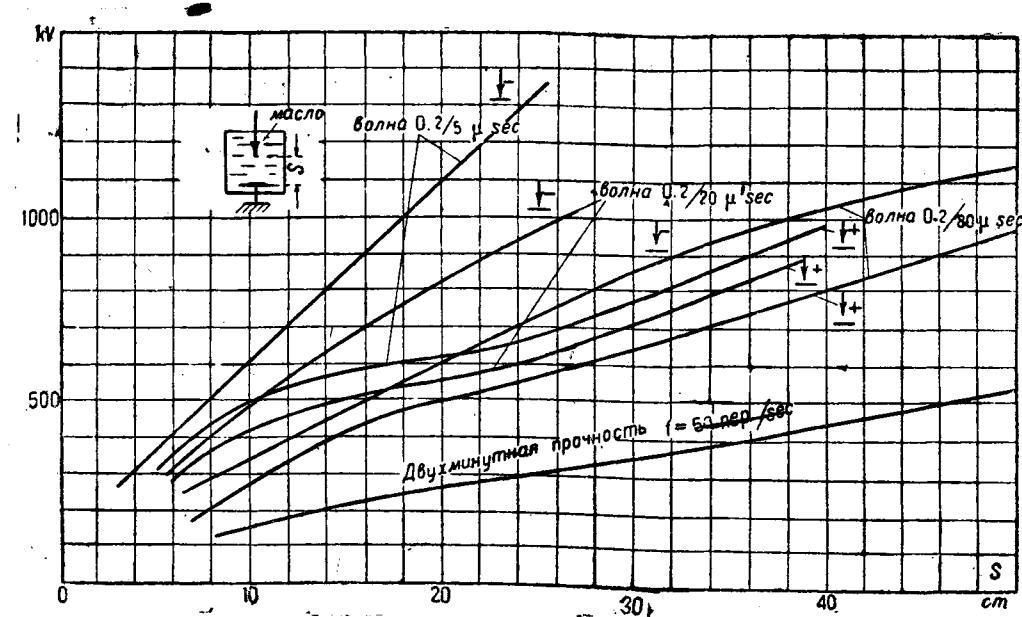


Рис. 22. Зависимость разрядного напряжения от расстояния в масле при различных прочностях масла, различных формах импульсов при положительной и отрицательной полярностях

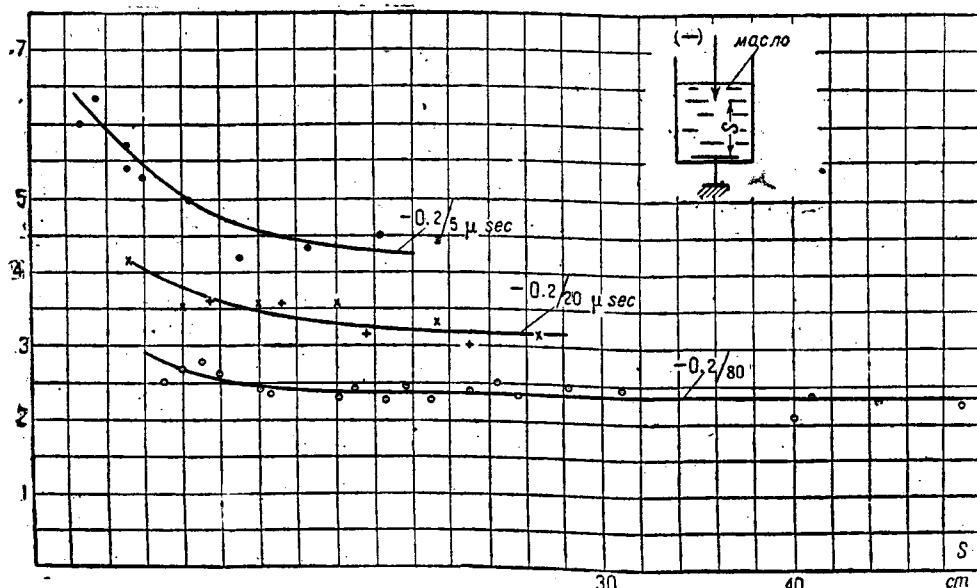


Рис. 23. Зависимость коэффициента импульса от расстояния между электродами при импульсах различных форм отрицательной полярности

Чем короче волна, тем выше разрядное напряжение. На кривых рис. 23 и 24 приведена зависимость коэффициента импульса от расстояния между электродами для импульсов различных форм. При отрицательной полярности коэффициент импульса значительно больше, чем при положительной. При расстояниях больше 15—20 см коэффициент импульса меняется незначительно.

Влияние температуры масла на разрядное напряжение при импульсах. Для определения влияния температуры на пробивное напряжение масло нагревалось в железной бочке до температуры 73°C, и затем определялось пробивное напряжение при импульсах 0,2/5 μ sec при различных расстояниях тем же методом, который был ранее описан. Полученные результаты приведены на рис. 19. Как видно из этих данных при изменении температуры до 73—65°C разрядное напряжение в масле не изменяется.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность проф. Г. Т. Третьяку за ряд ценных указаний в процессе работы.

Список литературы

1. Carroll & Cozzens, Sphere—Gap and Point Gap Arc-over Voltage, „Tr. of AIEE“, 1929, V, 48, p. 100.
2. Goodlet, Edwards & Perry, Dielectric Phenomena at High Voltages, „JIEE“, 1931, V, 60, p. 625 и „Metropolitan Vickers Gasette“, 1931.
3. Fortesque, Flashover Characteristics of Insulating, Structure, „Ei Journ“ 1930, April.
4. Рот, Техника высокого напряжения, 1931.
5. „Hescho-Mitteilungen“, 1927.
6. Peek, Lightning, „Tr. of AIEE“, 1929, V, 48, № 2, p. 437.
7. Miner, Oil Breakdown at Large Speising, „JAE“, 1927, April, p. 336.

Выбор типа мощного выключателя на 380 кВ

Инж. Л. Е. Машкиллайсон и проф. Г. Т. Третьяк
Лаборатория им. проф. А. А. Смурова ЛЭИ

От редакции

Вопрос о путях развития нашей выключающей высоковольтной аппаратуры является одним из важнейших и сложнейших вопросов советской электротехники.

Помещая статью тт. Машкиллайсона и Третьяка о выборе выключателя на 380 кВ, редакция рассматривает ее как первую попытку наметить эти пути и пригласить специалистов, работающих в области коммутационной аппаратуры, принять участие в дальнейшей разработке этой проблемы.

Задача постройки мощного выключателя на 380 кВ является одной из труднейших в ряде задач, составляющих общий комплекс проблемы осуществления передачи электрической энергии при напряжении 380 кВ. Прежде чем перейти

к анализу возможных путей решения поставленной задачи, остановимся кратко на основных характеристиках такого выключателя.

Вообще говоря, выключатель характеризуется номинальной силой тока, номинальным напряже-

ж, разрывной мощностью (вернее, разрывным током) и устойчивостью против термического электродинамического действия токов короткого замыкания. Однако по отношению к выключателю на 380 кВ часть этих характеристик теряет свое значение. Из конструктивных соображений попытка такого выключателя на малую силу тока невозможна, так как при больших размерах выключателя сечения токоведущих частей из соображения механической прочности не могут быть от небольшого размера. Таким образом руководясь при постройке выключателя только конструктивными соображениями, мы получим вы-

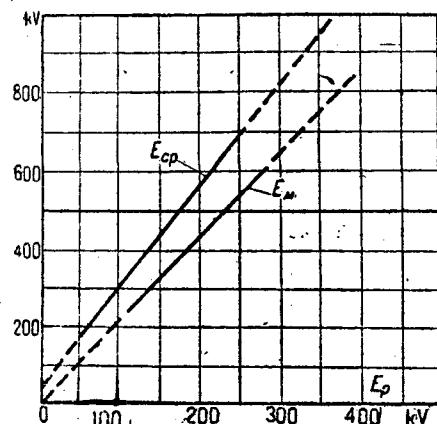


Рис. 1. Зависимость сухого ($E_{c,p}$) и мокрого ($E_{m,p}$) разрывных напряжений для вводов современных выключателей от рабочего напряжения (E_p)

ключатель, могущий во всяком случае работать в силе тока порядка 1000 А. Такой силе тока будет соответствовать рабочая мощность около 50 МВА, т. е. во всяком случае превосходящая максимальную мощность, которую можно будет пропустить по одной линии или сосредоточить в одной секции шин.

Приведенные выше соображения подтверждаются, например, тем, что фирма GE строит машины выключатель типа FHK-239 на 230 кВ тип МКП-274-с завода „Электроаппарат“) только в силу тока 1200 А. Для вышеуказанного машины МКП-274-с допускаемая амплитуда тока короткого замыкания равняется 70 000 А при допускаемой пятисекундной силе тока 40 000 А. Таким образом ток соответствует при напряжении 380 кВ мгновенная мощность короткого замыкания 26 500 МВА, причем ту же мощность выключатель может выдержать в течение 5 секунд. Очевидно, что получаемые запасы прочности весьма велики, и с этой точки зрения постройка выключателя на 380 кВ не может встретить никаких затруднений.

Необходимая величина разрывной мощности выключателя на 380 кВ в настоящее время вряд ли может быть достаточно строго обоснована, так как мы еще не имеем конкретных случаев применения напряжения 380 кВ и не знаем еще характеристик всех элементов такой системы передачи. Учитывая, однако, современные типы выключателей на 200 кВ и возможную концентрацию мощностей на будущих системах 380 кВ, можно принять необходимую разрывную мощность выключателя на 380 кВ порядка 5 000 МВА. Некоторая ориентировочность этой цифры не имеет особого значения, так как для выключателя на такое напряжение размеры и вес, обусловливаю-

щие степень трудности постройки выключателя, будут определяться почти исключительно изоляцией, т. е. требуемой величиной разрядного напряжения.

Задание номинального напряжения выключателя тем самым определяет необходимое разрядное напряжение его изоляторов. Вопрос о точном выборе характеристик изоляции выключателя на 380 кВ выходит из рамок настоящей статьи. Ввиду этого мы ограничимся только определением необходимой величины разрядного напряжения изоляторов выключателя при промышленной частоте.

На рис. 1 построены графики зависимости разрядного напряжения изоляторов современных выключателей от рабочего напряжения. Из этих графиков следует, что для напряжений выше 100 кВ можно принять.

$$E_{m,p} = 2,15 E_p,$$

$$E_{c,p} = 2,60 E_p + 50 \text{ кВ},$$

где E_p — рабочее напряжение, $E_{m,p}$ и $E_{c,p}$ — мокрое и сухое разрядные напряжения при промышленной частоте (все напряжения в киловольтах). Отсюда получим для 380 кВ

$$E_{m,p} = 820 \text{ кВ},$$

$$E_{c,p} = 1040 \text{ кВ}.$$

Округляя цифры, получим следующие необходимые характеристики выключателя на 380 кВ:

Номинальное напряжение 380 кВ

Номинальная сила тока 1000 А

Мокрое разрядное напряжение изоляторов 800 кВ

Сухое разрядное напряжение изоляторов 1050 кВ

Разрывная мощность 5 000 МВА

Разрывная сила тока 7500 А

В литературе имеется весьма мало указаний на работы в области постройки выключателей на

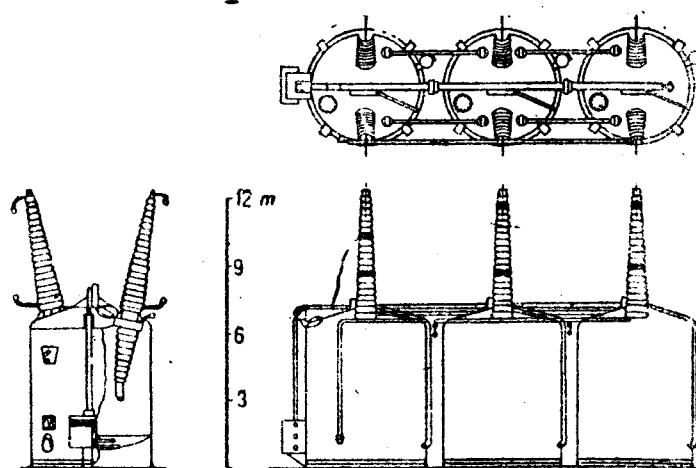


Рис. 2. Эскизы масляного выключателя на 380 кВ по данным Metropolitan Vickers

380 кВ. Wilkins & Crellin¹) приводят серию выключателей американской фирмы Condiz (строившей выключатели с многократным разрывом), в которую включен масляник на 345 кВ и 4 000 МВА. К сожалению, никаких данных о выключателе не приводится, и можно полагать, что он является

¹ Wilkins & Crellin, High Voltage Circuit Breakers, New York 1930.

только каталожным типом, возможно не существующим даже в чертежах. Фирмы SSW и AEG выпустили выключатели для рейнско-вестфальской установки, причем в отдельных сообщениях эти выключатели относились к классу 380 kV. Так как, однако, разрядное напряжение этих выключателей всего порядка $600 \div 650$ kV при промышлен-

(серии МКП завода „Электроаппарат“). Для кривых могут быть с достаточной точностью даны эмпирические уравнения:

вес масляного выключателя

$$P = 3,9 D^{2,5} \text{ t},$$

вес масла

$$P_m = 2,75 D^3 \text{ t},$$

где D — диаметр бака в метрах.

Пользуясь этими уравнениями, получим верхний вес выключателя по эскизу рис. 2 около 220 и вес масла около 340 т (общий вес — 560). Такой колоссальный вес следует уже считать приемлемым. Кроме того, при диаметре бака возможность перевозки выключателя по железным дорогам исключается, так как с точки зрения железнодорожного габарита наибольшим допустимым диаметром бака следует считать 3,25 м. Таким образом, даже идя на чрезвычайно

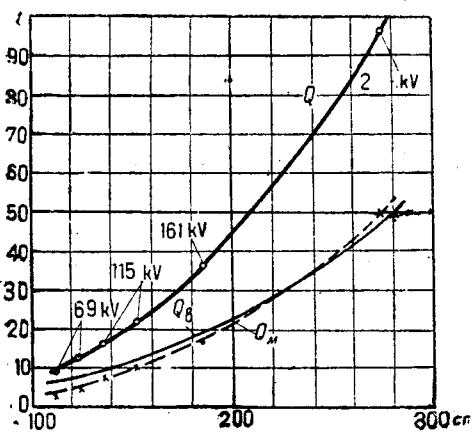


Рис. 3. Зависимость веса мощных подстанционных выключателей от диаметра бака (Q — общая масса, Q_b — вес выключателя без масла, P_m — вес масла)

ной частоте, то, очевидно, отнесение их к классу 380 kV является неверным. Фирмой Westinghouse для одной из американских установок был построен масляный выключатель с изоляторами на разрядное напряжение 800 kV, что является значительным шагом вверх от нормальной изоляции на 220 kV, но все же недостаточным, чтобы отнести этот выключатель к классу 380 kV.

Во всех отмеченных выше случаях при попытках создания выключателя на напряжение более 220 kV имеется общая тенденция идти путем простого увеличения размеров нормального выключателя на 220 kV. Наиболее характерным в этом отношении является появившееся в 1931 г. сообщение²⁾ фирмой Metropolitan Vickers, давшей эскиз масляного выключателя на 380 kV, приведенный на рис. 2. Как видно из эскиза, размеры выключателя получаются совершенно неприемлемыми. На рис. 3 приведены кривые веса трехбаковых выключателей серии FHKO-239 фирмы GE

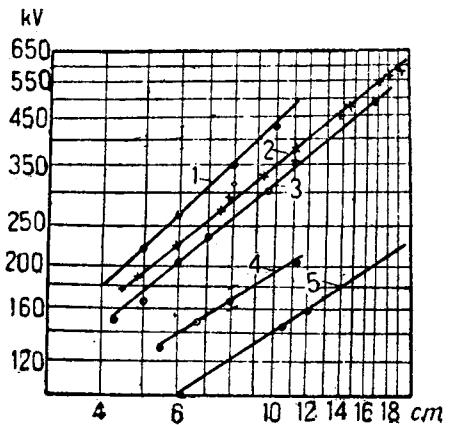


Рис. 4. Разрядные и испытательные напряжения в масле в зависимости от расстояния без барьеров и с барьерами. 1 — разряд между плоскостями; 2 и 3 — испытательное напряжение новых трансформаторов; 4 — то же старых трансформаторов; 5 — разряд между иглами (без барьеров)

²⁾ „Высоковольтная техника в Англии“, „Электричество“ № 5, 1931.

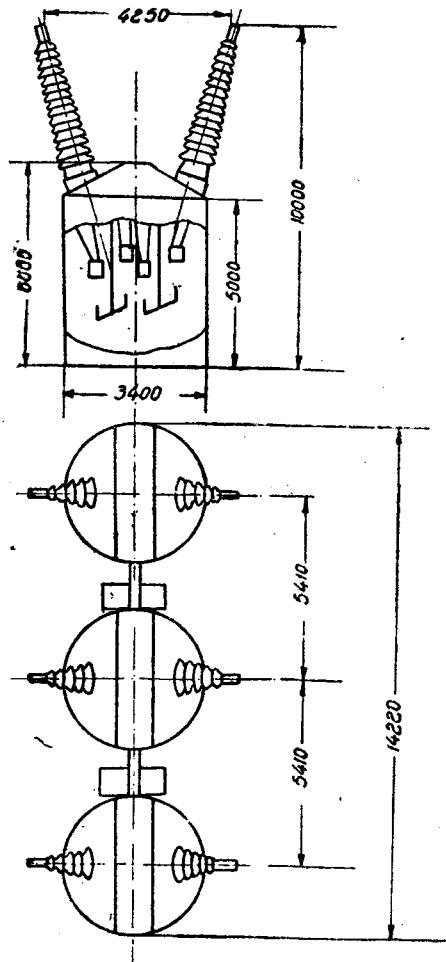


Рис. 5. Эскиз масляного выключателя на 380 kV с четырьмя гасительными камерами

модную конструкцию (рис. 2), осуществленную последней было бы возможно только в отдельных случаях, когда от места изготовления выключателя до места установки последнего возможен перевозка не железнодорожным путем. Такое ограничение является, конечно, весьма, серьезным препятствием, и, очевидно, что при проектировании выключателя на 380 kV следует отказаться от простого увеличения размеров.

Необходимо также отметить, что даже при таких больших размерах выключателя на 380 kV нельзя быть уверенным в том, что он сможет

включать дугу при напряжении 380 кВ, так как статье не указан принцип, по которому будет гашиться дуга. Экстраполяция в отношении гашения дуги для выключателя на 380 кВ недопустима. Поэтому основным требованием к проекту выключателя на 380 кВ надо признать следующее. Отношения изоляции и в механическом отношении в эскизном проекте могут быть допущены элементы экстраполяции, так как последняя может быть обоснована расчетом и испытаниями при разработке проекта. В отношении же гашения не необходимо проектировать выключатель так, чтобы была уверенность в том, что дугу при 380 кВ он будет выключать.

Перейдем к рассмотрению отдельных возможных вариантов выключателя на 380 кВ.

Вариант 1. На основании работ лаборатории высокого напряжения проф. А. А. Смуррова по вопросам, связанным с повышением электрической прочности газообразных и жидких диэлектриков, можно полагать, что при рациональном расположении изоляции электрические расстояния для выключателя на 380 кВ могут быть значительно уменьшены.

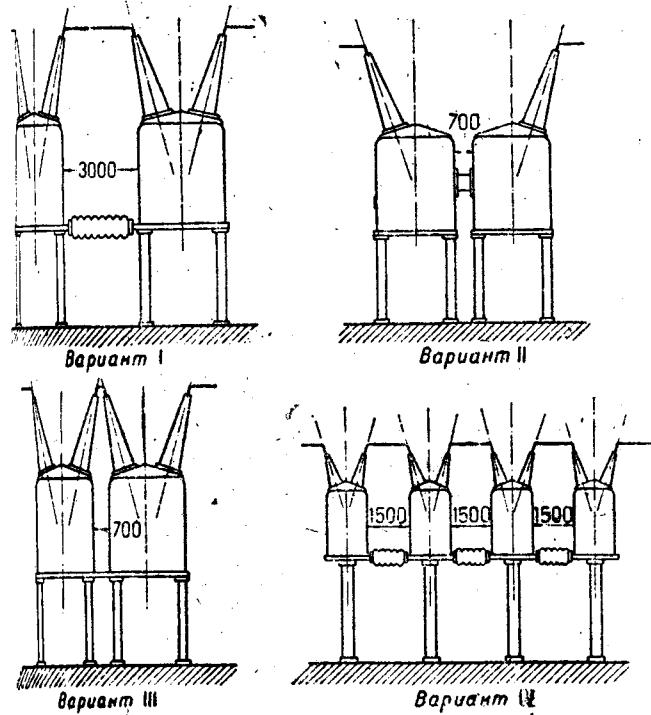


Рис. 6. Различные варианты последовательного включения масляных выключателей более низкого напряжения для получения выключателя на 380 кВ.

Вариант I—два масляных выключателя на 230 кВ с изоляцией между баками;
вариант II—два масляных выключателя на 230 кВ с одним проходным изолятором и на общей подставке;
вариант III—то же, но с двумя проходными изоляторами;
вариант IV—четыре масляных выключателя на 115 кВ с изоляцией между баками.

Вопрос о целесообразном размещении изоляции является новым и в трансформаторостроении. За последние годы благодаря применению барьеров удалось довести разрядные напряжения до значений, близких к разрядным напряжениям равномерном поле, что иллюстрируется кривыми рис. 4.

Исходя из предположения, что в масляном выключателе можно добиться аналогичных результатов, проф. Г. Т. Третьяк предложил конструкцию

выключателя на 380 кВ, изображенную на рис. 5. Выключатель предложен с четырьмя гасительными камерами с масляным дутьем на фазу, что при надлежащем распределении напряжения на отдельных разрывах позволяет применить нормальные камеры на 220 кВ-выключателей серии МКП завода „Электроаппарат“. Механизм выключателя получается путем удвоения механизма на 220 кВ. Выключатель имеет предельные размеры, допустимые с точки зрения железнодорожного транспорта. Вес выключателя будет, повидимому, около 120 т без масла и около 230 т с маслом (на три фазы). Можно полагать, что по-

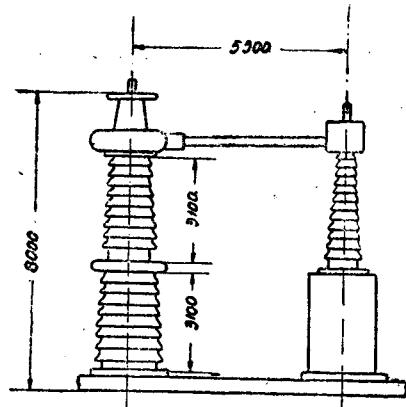


Рис. 7. Эскиз расширительного выключателя на 380 кВ

лученные размеры и веса являются предельными, и итти выше было бы совершенно нецелесообразно. Однако практическое осуществление такого выключателя представляется возможным лишь в том случае, если удастся справиться с проблемой изоляции и добиться необходимого уменьшения электрических расстояний. Более правильным было бы при проектировании выключателя на 380 кВ вообще отказаться от обычных форм масляных выключателей на более низкое напряжение и искать новых путей.

Вариант 2. Инж. Б. А. Воронов, Л. Е. Машкиллайсон и Г. Б. Холяевский предложили в развитие идеи, данной SSW, применить для получения выключателя на 380 кВ последовательное включение нескольких масляных выключателей на более низкое напряжение. Различные способы осуществления такого включения представлены на эскизах рис. 6. При осуществлении такого предложения значительные затруднения будут заключаться в выполнении приводного механизма, который должен быть изолирован от механизмов выключателей. Кроме того, способность гасить дугу у такого каскадного выключателя будет зависеть от закона распределения напряжения между отдельными промежутками. Повидимому, добиться вполне равномерного распределения напряжения в рассматриваемой конструкции будет трудно, так как возможности регулирования величин отдельных емкостей весьма ограничены. В связи с этим возникает вопрос о влиянии неравномерности распределения напряжения на процесс гашения дуги, для разрешения которого необходимо будет поставить соответствующее исследование. Вместо масляных выключателей возможно, конечно, применить и другие конструкции выключателей.

Вариант 3. Следующим путем, по которому в насторожнее время может итти конструктивное

выполнение выключателя на 380 кВ, является путь проектирования расширительного выключателя, выпущенного впервые фирмой SSW. Расширительный выключатель представляет в настоящее время один из наиболее совершенных типов, в котором использованы современные идеи гашения дуги, развитые на основании работ школы Slepian.

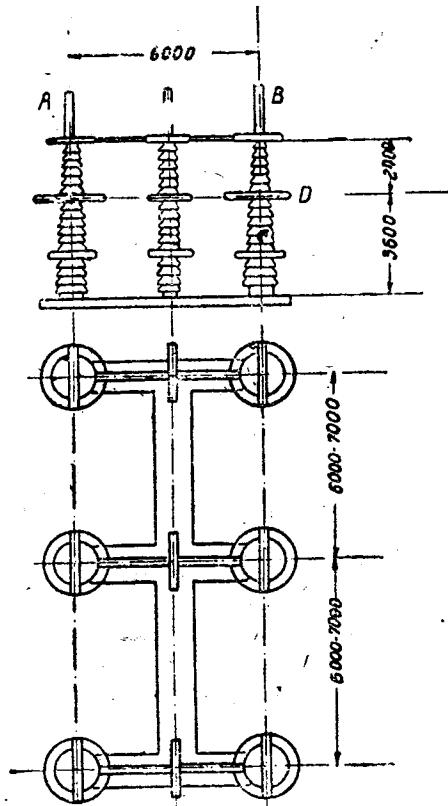


Рис. 8. Эскиз расширительного выключателя на 380 кВ с двумя разрывами и принудительным распределением напряжения между разрывами. A, B, C и D—электростатические экраны

SSW, проектируя расширительный выключатель, не использовал старых шаблонов, а выполнил его в совершенно новой форме, исходя из конструкции, требуемой для решения проблем изоляции и гашения дуги. В результате получилась чрезвычайно изящная конструкция, имеющая значительно меньшие размеры, чем обычный масляный выключатель. На рис. 7 дан эскиз расширительного выключателя на 380 кВ, полученный путем соответствующего увеличения размеров выключателей на более низкое напряжение без изменения конструкции. Как видно из эскиза, размеры выключателей получаются значительно меньше, чем для масляного выключателя. Тем не менее, практическое осуществление конструкции по эскизу рис. 8 встретит чрезвычайно большие затруднения, главным образом, в отношении получения необходимого фарфора, имеющего совершенно необычные размеры. Кроме того, в отношении гашения дуги в последнем выключателе принята

экстраполяция, правильность которой не может быть в настоящее время установлена. Ввиду этого вариант 3 на сегодняшний день следует признать неприемлемым, но в то же время он является весьма серьезным конкурентом в ближайшем будущем для всех остальных, если под возможностью гашения дуги при 380 кВ в одном промежутке будет подведена серьезная теоретическая и экспериментальная база.

Вариант 4. Авторами настоящей статьи было предложено идти по пути каскадного соединения двух расширительных выключателей на 220 кВ. Идея такой конструкции ясна из эскиза рис. 6. Преимущество конструкции помимо возможности использования нормальных деталей выключателей на 220 кВ заключается в возможности применения принудительного распределения напряжения между отдельными ступенями, что встречает большие затруднения в конструкциях, данных на рис. 6.

Конечно, в работе такого каскада встретятся некоторые механические затруднения, которые, повидимому, можно будет преодолеть. Выше изложены те пути постройки выключателя на 380 кВ, которые в настоящее время могут считаться вполне реальными. Мы оставляем совершенствование в стороне вопрос о пустотных выключателях, так как современное положение этого вопроса не дает возможности говорить о нем как о technically реальном аппарате сегодняшнего дня. Однако характерные особенности пустотных выключателей, минимальные размеры и вес требуют направления нашей экспериментальной работы также и в эту сторону.

Как следует из вышеизложенного, в настоящее время могут быть намечены различные пути проектирования выключателя на 380 кВ, но трудно сказать между этими путями исчерпывающий выбор. Повидимому, наиболее правильное решение вопроса даст принцип каскадного соединения расширительных выключателей, но окончательное суждение может быть сделано только после получения необходимого экспериментального материала и, возможно, после постройки пробных образцов или макетов.

Наиболее существенными в деле постройки выключателя на 380 кВ является проблема повышения электрической прочности газообразных и жидких диэлектриков и вопрос о работе последовательно включенных дуговых промежутков при естественном и принудительном распределении напряжения между ними. Наиболее важной задачей ближайшего времени является проведение соответствующих экспериментальных исследований.

В заключение авторы выражают благодарность заводу „Электроаппарат“ и лаборатории высокого напряжения проф. А. А. Смуррова, предоставившему авторам возможность использования материалов, приведенных в настоящей статье.

РИБУНА ЧИТАТЕЛЕЙ „ЭЛЕКТРИЧЕСТВА“

БАЗИСНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ^{*)}

Инж. П. Г. Седов

Северный Кавказ, НИИЭЭ

От редакции

Помещая в № 15—16 журнала „Электричество“ в 1932 г. статью инж. Ракушева, редакция имела в виду ознакомить читателей с возможным видом расчета токов короткого замыкания с помощью видимых автором новых понятий об „удельных нагрузках“.

Считая такой расчет заслуживающим внимания, редакция все же должна отметить, что в статье инж. Ракушева по недосмотру был допущен ряд ошибок, не дающих возможности допустить, что предлагаемый им способ был распространен на случай сложных сетей.

Ниже мы помещаем статью т. Седова, вскрывающую указанные ошибки.

Изучая статью т. Ракушева и его положения о расчете токов короткого замыкания, можно видеться в том, что вводимые им новые термины являются лишь перефразировкой старых, только не дающих каких-либо преимуществ, лишь усложняющих процесс расчета.

Рассмотрим все положения т. Ракушева в их последовательности и осветим все те моменты, которых допущены принципиальные ошибки.

Сопротивления

При расчете токов коротких замыканий (сокращенно к. з.) применяются: 1) сопротивления в омах, которые назовем абсолютными. В этом случае мощность трехфазного к. з. определяется уравнением:

$$P_k = I_k U \sqrt{3} = \frac{U}{x \sqrt{3}} U \sqrt{3} = \frac{U^2}{x}, \quad (1)$$

где под U подразумевается межфазовое напряжение, существовавшее перед к. з.; 2) сопротивление в процентах или же в относительных единицах, отмечаемое звездочкой. Процентные относительные сопротивления обычно относят к номинальной мощности P соответствующего оборудования. Связь между ними такова:

$$x_* = \frac{x\%}{100} = \frac{Px}{U^2}. \quad (2)$$

Мощность к. з. выражается в виде

$$P_k = \frac{P}{x_*} = 100 \frac{P}{x\%}. \quad (3)$$

Абсолютные сопротивления имеют тот недостаток, что в системах с несколькими напряжениями требуется их приводить к одному общему. Относительные сопротивления, обладая рядом преимуществ, не могут быть применены в качестве постоянных для линий передач, ибо последние имеют фиксированной номинальной мощности. Относительные сопротивления задаются для номинальных мощностей отдельных элементов об-

орудования и затем обычно приводятся к суммарной номинальной мощности синхронных машин данной системы. Формула приведения такова:

$$x_{*2} = x_{1*} \frac{P_2}{P_1} \text{ или } x_*\% = x_1\% \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

Особенно удобно пользоваться „базисными“ сопротивлениями, отнесенными к базисной мощности 100 mVA, одновременно являющимися и абсолютными, отнесенными к 10 kV, ибо из уравнения (2) при $P = 100$ и $U = 10$ находим

$$\frac{x_*}{x} = \frac{P}{U^2} = \frac{100}{10^2} = 1. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) после подстановки $U_2 = 10$ или $P_2 = 100$ принимают весьма удобную форму:

$$X = x \frac{100}{U^2} = x_* \frac{100}{P} = \frac{x\%}{P}, \quad (6)$$

а формула (3) мощности к. з. принимает вид

$$P_k = \frac{100}{X} : \quad (7)$$

С целью упрощения мы оперировали только с реактивными сопротивлениями X , однако сущность дела не изменится, если ввести полное сопротивление $Z = R + jX$ в его комплексной форме. Тогда получим

$$P = i \hat{U} \sqrt{3} = P_a - jP_r, \quad (8)$$

где \hat{U} — сопряженное напряжение, а отрицательный член $-jP_r$ соответствует индуктивной нагрузке.

Сущность „удельной нагрузки“

При сравнении основного уравнения (6) т. Ракушева с нашим уравнением (7) обнаруживается их полная идентичность, так как по указанию автора, например, для генераторов

$$\frac{1}{G_0} = \frac{1}{G} = \frac{x_*\%}{G} = \frac{x\%}{P}. \quad (9)$$

В правой части равенства G заменено более обычным обозначением мощности P . Сравнивая это уравнение с нашим (6), видим, что $1:G_0$ есть не что иное, как базисное сопротивление X , а G_0 соответствует базисной проводимости. Но незачем пользоваться проводимостями, когда более привычны и удобны сопротивления. Известно, что для получения полной проводимости нескольких параллельно соединенных сопротивлений надо просуммировать их проводимости; поэтому, очевидно, $x_* = \frac{1}{G_0' + G_0'' + \dots}$ и уравнения (13) и (15) т. Ракушева принимают простую форму:

$$P_k = \frac{100}{\frac{x_* + x_{1*}}{G}} = \frac{100}{X_* + X_{1*}}$$

^{*)} Краткая статья инж. Н. Ф. Ракушева, О расчете токов короткого замыкания и выборе реакторов для их ограничения, „Электричество“ № 15, 1932.

и

$$P_k = \frac{100}{\frac{x_g + x_r}{G}} = \frac{100}{X_g + X_r} \cdot n.$$

Здесь сопротивления X отнесены к одному генератору, а n есть число параллельно работающих единиц.

Кольцевые линии

Тоз. Ракушев приводит рис. 3 как пример кольцевых линий. Однако при к. з. в точке A никаких колец не будет, а останутся только три параллельные линии. Уравнение для решения трех параллельных линий выведено алгебраически неверно, так как из уравнения (17) статьи следует, что

$$P_k = 100 \frac{X'X'' + X''X''' + X'''X'}{X'X''X'''}, \quad (10)$$

а не то, что показано в уравнениях (18) и (19).

В качестве цифрового примера автор приводит отыскание мощности к. з. на Свердловской подстанции, но проводит расчет в противоречии с основными законами электротехники. Принципиальные ошибки заключаются в следующем: для нахождения мощности к. з. от двух параллельно работающих генераторов (наш рис. 1) автор отыскивает сначала мощность к. з. первой машины, пренебрегая второй, затем поступает также со второй машиной и, складывая найденные выражения, отыскивает якобы полную мощность к. з. в виде

$$P_k = P_{k1} + P_{k2} = 100 \frac{X_1 + X_2 + 2X_3}{X_1X_2 + X_2X_3 + X_3X_1 + X_3^2}.$$

Однако, складывая параллельно сопротивления двух генераторов и прибавляя к ним сопротивление общего участка, мы должны иметь

$$P_{k1} = \frac{100}{\frac{X_1X_2}{X_1 + X_2} + X_3} = 100 \frac{X_1 + X_2}{X_1X_2 + X_2X_3 + X_3X_1}. \quad (11)$$

Проследить это легко, если вспомнить, что $1:G$, или $1:T$, или $1:L$ представляют собой сопротивления X_1, X_2, X_3 отдельных элементов цепи.

Вторая принципиальная ошибка в числовом примере заключается в расчете треугольника Чгрэс — Златоуст — Кыштым без преобразования в звезду путем отбрасывания сначала Златоуста, а потом Чгрэс, и с последующим суммированием полученных мощностей к. з. на Свердловской подстанции. Для выявления погрешностей автора и подтверждения наглядности метода базисных сопротивлений повторим подсчет токов к. з. на шинах 110 кВ Свердловской подстанции по схеме т. Ракушева (рис. 4), пользуясь обычными методами преобразований.

Прежде всего переведем все сопротивления в базисные с одновременной заменой параллельно включенных однотипных единиц одной эквивалентной. Для этого воспользуемся уравнением (6) в виде

$$X = \frac{x\%}{nT}$$

Болгарская областная универсальная научная библиотека

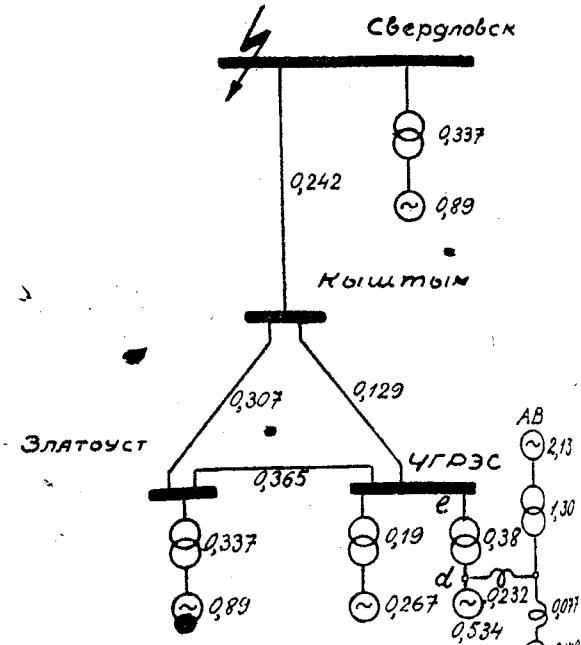


Рис. 2

где n — число параллельно включенных одинаковых сопротивлений по $x\%$, отнесенное каждому к мощности P . Получаем упрощенную схему (рис. 2). На нем подлежит еще дальнейшему упрощению схема Чгрэс путем последовательного применения нашего уравнения (11). Таким образом в точке d для генераторов AB и $1, 2$, включенных параллельно, имеем

$$X_d = \frac{\lambda_1 X_2}{X_1 + X_2} + X_3 = \frac{(2.13 + 1.30)(0.178 + 0.077)}{2.13 + 1.30 + 0.178 + 0.077} + 0.232 = 0.469$$

Таким же образом для точки e , вводя параллельно работающий генератор 4 , получаем

$$X_e = \frac{0.469 \cdot 0.534}{0.469 + 0.534} + 0.38 = 0.630.$$

Вводя для той же точки параллельно генераторы 5 и 6 , получаем окончательно

$$X'_e = \frac{0.630(0.267 + 0.19)}{0.630 + 0.267 + 0.19} = 0.265.$$

По нашему уравнению (7) находим мощность к. з. на шинах 110 кВ Чгрэс:

$$P_k = \frac{100}{X'_e} = \frac{100}{0.265} = 378 \text{ mVA.}$$

По расчету т. Ракушева найдено 468 мВА, ошибка равна $+24\%$.

Полученную в результате упрощенную схему (рис. 3а), содержащую треугольник линий, мы разделяем в звезду (рис. 3б) по известным формулам:

$$X_1 = \frac{X_a X_c}{X_a + X_b + X_c} = \frac{0.129 \cdot 0.365}{0.801} = 0.0588,$$

$$X_2 = \frac{X_a X_b}{X_a + X_b + X_c} = \frac{0.365 \cdot 0.307}{0.801} = 0.140,$$

$$X_3 = \frac{X_a X_b}{X_a + X_b + X_c} = \frac{0.307 \cdot 0.129}{0.801} = 0.0495.$$

Издавая в полученной звезде реактивности линий 1 и 2 параллельно между собой и последовательно с 3, находим полное внешнее сопротивление относительно шин Свердловска:

$$X' = \frac{X_1' X_2'}{X_1' + X_2'} + X_3' =$$

$$= \frac{(1,227 + 0,140)(0,265 + 0,0588)}{1,227 + 0,140 + 0,265 + 0,0588} +$$

$$+ 0,0495 + 0,242 = 0,553.$$

Фактическая мощность к. з. на 110-kV шинах Свердловска от внешних источников энер-

$$P_k' = \frac{100}{X'} = \frac{100}{0,553} = 181 \text{ mVA.}$$

Мощность, полученная т. Ракушевым, составляет 187 mVA, т. е. погрешность равна +31%.

Мощность к. з. от Свердловских компенсаторов

читаена правильно $(P_k'' = \frac{100}{X''} = \frac{100}{0,89 + 0,337} = 31,5 \text{ mVA})$.

В сумме с предыдущим это дает полную мощность к. з. на 110-kV шинах Свердловска: $P_k = P_k' + P_k'' = 181 + 31,5 = 262,5 \text{ mVA}$ против 272 mVA, найденных т. Ракушевым с погрешностью в +22%.

Выбор реакторов

Рассуждения, приведенные автором в отношении выбора реакторов, получают при использовании базисными сопротивлениями несравненно же простую и наглядную математическую формулировку. Уравнение (7) внешне аналогично закону Ома для частного случая $U=100 \text{ kV}$, только в левой части вместо силы тока получаем мощность. Обозначим базисные сопротивления трансформаторов или реакторов, помещенных на той подстанции непосредственно перед машинным выключателем, через X_1 , а сопротивление, эквивалентное внешней сети, через X_2 .

$$P = \frac{100}{X} = \frac{100}{X_1 + X_2}. \quad (13)$$

Тогда можно найти такое сопротивление реакторов, чтобы к. з. равнялось разрывной мощности масляных выключателей или по уравнению (6)

$$X_1 = \frac{100}{P} - X_2, \quad (14)$$

$$x_1 \% = 100 - x_2 \%.$$

Мощность внешней сети равна бесконечно, т. е. $X_2 = 0$, то

$$x_1 \% = 100. \quad (15)$$

Формулировка необходимого сопротивления реакторов или трансформаторов настолько проста, что не нуждается в каких-либо кривых.

Не останавливаясь дальше на этом разделе, помним, что тип масляных выключателей диктует не только разрывной мощностью, но также термической и динамической стойкостью.

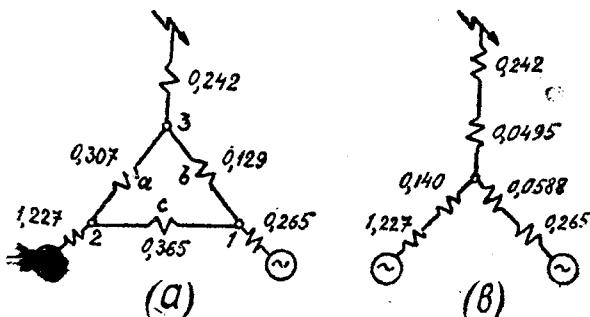


Рис. 3

Несимметричные короткие замыкания

В начале своей статьи т. Ракушев говорит: "...при расчете токов к. з. наиболее часто пользуются двумя способами их определения—методом приведенных процентных реактивностей и способом симметричных составляющих". Но это неправильно, ибо процентные реактивности—это один из способов изображения сопротивлений, а симметричные составляющие—это метод отыскания распределения токов в трехфазных сетях при несимметричных нагрузках. Поэтому эти два способа вполне совместимы и не должны противопоставляться один другому.

Обычно при пользовании методом симметричных составляющих пользуются абсолютными сопротивлениями (в омах), и в результате получаются силы токов. Перестроим эти формулы для базисных сопротивлений.

Как известно, для однополюсного к. з. фазы a (на землю при заземленной нулевой точке) имеем полный ток к. з. в комплексном виде:

$$I_k = \frac{3 \dot{U}_{p1}}{z_1 + z_2 + z_0}, \quad (16)$$

где \dot{U}_{p1} —фазовое напряжение прямой последовательности источника тока, а $z_1 z_2 z_0$ —сопротивления в омах прямой, обратной и нулевой последовательностей, причем $z_1 = r_1 + jx_1$ и т. д.

Симметричные составляющие тока в фазе a :

$$i_{a1} = i_{a2} = i_{a0} = \frac{\dot{U}_{p1}}{z_1 + z_2 + z_0}. \quad (17)$$

Мощность к. з. из уравнения (18), учитывая, что ток течет только в одной фазе a :

$$P_k = i_k \dot{U}_{p1} = 3 \frac{\dot{U}_{p1}^2}{z_1 + z_2 + z_0} = \frac{U^2}{z_1 + z_2 + z_0}. \quad (18)$$

Здесь \dot{U}_{p1} есть сопряженное с \dot{U}_{p1} фазовое напряжение. Если $\dot{U}_{p1} = U_{p1} e^{ja}$, то $\dot{U}_{p1} = U_{p1} e^{-ja}$ и $\dot{U}_{p1} \dot{U}_{p1} = U_{p1}^2$ (скалярная величина).

Подставляя в соответствии с уравнением (6) вместо абсолютных сопротивлений базисные:

$$z = z \frac{U^2}{100},$$

находим из уравнения (20) мощность однополюсного к. з. в виде:

$$P_k = \frac{100}{z_1 + z_2 + z_0}. \quad (19)$$

Аналогичные выражения могут быть получены для двухполюсного к. з. между фазами b и c :

$$P_k = \frac{100}{z_1 + z_2 + z_0}. \quad (20)$$

Для двухполюсного к. з. между фазами a и b и одновременно на землю:

$$P_k = 100 \frac{\dot{z}_1 + \dot{z}_2}{\dot{z}_3}, \quad (21)$$

где

$$\dot{z}_3 = \dot{z}_0 \dot{z}_1 + \dot{z}_1 \dot{z}_2 + \dot{z}_2 \dot{z}_0, \quad (22)$$

и для симметричного трехполюсного к. з.:

$$P_k = \frac{100}{\dot{z}_1}. \quad (23)$$

Во всех вышеприведенных уравнениях (19), (20), (21), (22) и (23) можно, пренебрегая активными сопротивлениями, подставить $\dot{z} = 0 + jx$, и тогда $P = -jP$. Вводя вместо jX просто X , получим мощность уже не в комплексных, а в абсолютных числах.

Выводы

Простые хорошо известные процентные сопротивления т. Ракушев заменил обратными по величине менее удобными проводимостями, назвав их „удельными нагрузками“.

При помощи известных по существу уравнений сделана попытка упрощения существующих методов расчетов к. з. в замкнутых сетях. Однако одновременно был допущен ряд неверных алгебраических и электрических операций. Самые же формулы благодаря искусственно преобразований получились настолько сложными, что вряд ли удобно их применять вообще и, в частности, для распространенного сейчас метода симметричных составляющих.

Для последнего необходима мощность в комплексной форме. Она может оказаться весьма

полезной и для расчетов на потерю напряжения при нормальных режимах.

Преимущество мощностей перед токами то, что они характеризуют величину к. з. независимо от напряжения и этим дают возможность более глядно и удобно проводить сравнения к. з. в различных точках системы.

Преимущество базисного сопротивления то, что будучи численно равно относительному при 100 kVA или абсолютному при 10 kV, оно имеет связь между относительными и абсолютными сопротивлениями. Это позволяет составить таблицы сопротивления для всего стандартного оборудования.

Пользуясь базисными сопротивлениями, мы получаем мощности в комплексной форме, и мощность к. з. может быть записана в общей форме

$$P_k = \frac{100}{\dot{z}},$$

где для трехполюсного к. з. $\dot{z} = \dot{z}_1$, двухполюсного (без соединения с землей) $\dot{z} = \dot{z}_1 + \dot{z}_2$ и для однополюсного $\dot{z} = \dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_0$.

Требуемая разрывная мощность масляных выключателей с разделенными фазами определяется действующей силой тока одной фазы. Поэтому для трех-двух- и однополюсного к. з. не более 0,25 сек. или более, когда слагающую постоянную тока можно считать исчезнувшей, имеющей

$$P_3 = P_k; P_2 = \sqrt{3} P_k; P_1 = 3 P_k.$$

Изложенные соображения, отмечающие удобства пользования базисными сопротивлениями, приводят к настоятельной желательности введения их в разрабатываемый проект стандартов расчету к. з. одновременно с методом симметричных составляющих.

К статье инж. А. Я. Буйлова „К исследованию высоковольтных выключателей на разрыв тока короткого замыкания“ („Электричество“ № 5, 1932 стр. 282—298)

В весьма интересной статье А. Я. Буйлова содержится ценный анализ влияния различных факторов на работу специальных генераторов, предназначенных для испытания выключателей на разрывную мощность. В связи с актуальностью поднятого вопроса для развития нашего аппаратуростроения некоторая дискуссия по поднятым в вышеуказанной статье вопросам представляется весьма своевременной.

Одним из центральных мест работы инж. А. Я. Буйлова является рассмотрение вопроса о спадании числа оборотов генератора за время опыта; однако при современном состоянии вопроса испытания выключателей нужно полагать, что явление спадания числа оборотов вряд ли может значительно повлиять на выбор типа генератора. В условиях мощной лаборатории разрывной мощности в связи со стремлением возможного уменьшения длины испытательной цепи активная мощность короткого замыкания при испытаниях выключателей на разрывную мощность сравнительно невелика. Так, например, для генератора с номинальной мощно-

стью 100 MVA при 11 kV, имеющего мгновенную реактивность 10% и активное падение напряжения 1% при общей длине внешней цепи 100 м и сечении ее 500 mm² (медь), активная мощность (максимальная без учета постоянной составляющей) получается при коротком замыкании равной приблизительно 40% от номинальной мощности генератора. Принимая ориентировочно эту цифру в табл. 1 подсчитано уменьшение числа оборотов различных генераторов лабораторий разрывной мощности.

Длительность короткого замыкания при испытаниях современных выключателей на разрывную мощность не превосходит обычно 0,1 \div 0,15 с (0,05 \div 0,1 сек. до начала дуги) и 0,01 \div 0,1 с — длительность дуги и при большей длительности короткого вследствие большей длительности дуги опыта уже не представляет интереса, так и для современных выключателей длительность дуги более 0,05 \div 0,08 полупериодов является показателем неудовлетворительности выключателя. Цифры, приведенные в табл. 1, являются ориентировочными, тем не менее показывают

Таблица 1

Время	Номинальная мощность генератора MVA	Число оборотов в минуту	Маховыи момент kgm ²	Запас энергии		Потери энергии за 1 сек. kW sec	Уменьшение числа оборотов генератора за время		
				kgm	kW sec		0,1 сек. %	0,2 сек. %	0,3 сек. %
БС	26,7	300	125 000	1 560 000	15 900	10 700	3,3	7	10,5
	2 X 12	600	31 000	1 550 000	15 800	9 600	3	6,2	9,7
	100	514	210 000	7 700 000	78 500	40 000	2,5	5,2	8
ED	50	1 500	32 000	10 000 000	102 000	20 000	1	1	4,1

возможное спадание числа оборотов вряд ли имеет серьезное влияние на опыт. Рассмотрим осциллограмм действительных испытаний выключателей на разрывную мощность показывает, что в действительности спадание числа оборотов получается значительно меньшим, чем указано таблице, даже при малом затухании тока короткого замыкания. Так, в моем распоряжении имеется осциллограмма выключения мощности 1 MVA (по американскому определению) во испытания на генераторе 100 MVA, 100 об/мин, 60 пер/сек $x = 15\%$, причем за 20 мгновений спадание числа оборотов генератора не 1%, т. е. практически не имеет места.

Приведем также данные нескольких испытаний, проведенных с моим участием в лаборатории AEG генераторе мощностью 100 MVA.

Испытание на электродинамическую прочность трансформатора тока типа ТП-2, 50/5 A, 6 kV. Испытаний генератор 100 MVA, 6,3 kV через трансформатор 6,3/9 kV, 100 MVA, $x = 2^{1/2}\%$ сочтется на испытуемый трансформатор тока. Таких добавочных реактивностей не было. Генератор возбуждался до 83% от нормального напряжения. Общая длительность короткого замыкания около 1,25 сек. Средние числа оборотов в осциллограмме следующие: в ноябре через 1 сек. — 2%, через 0,5 сек. — 6%, через 1 сек. — 4%. Затухание силы тока за 0,5 сек. приближено в $1^{1/2}$ раза.

Такое же испытание трансформатора тока 102, 6,6 kV, 500/5A. Генератор возбуждался до полного напряжения, т. е. использовалась полная мощность. Общая длительность короткого замыкания около 2 сек. Затухание тока как и выше. Спадение числа оборотов по осциллограмме: за 0,2 сек. — 2%, через 0,5 сек. — 8%, через 1 сек. — 16%. Таким образом для получения существенного уменьшения числа оборотов необходимо значительное время, превосходящее нормальную длительность испытания выключателя разрывную мощность.

В виде иллюстрации того, с какими длительностями приходится иметь дело при испытаниях в лаборатории, укажем, что при испытаниях выключателей завода „Электроаппарат“ в лаборатории AEG в 1931—1932 гг. из общего количества 40 опытов общая длительность короткого замыкания была:

менее 0,1 сек.	21	короткое замыкание или 52,5%
0,1—0,15 сек.	14	коротких замыканий или 35%
0,15—0,2 сек.	2	коротких замыканий или 5%
менее 0,2 сек.	3	коротких замыкания или 7 $^{1/2}\%$

Во всех случаях дуга начиналась при достаточно затухшей постоянной составляющей. При двух опытах с длительностью короткого замыкания от 0,15 до 0,2 сек. выключение было весьма тяжелым и показало неудовлетворительную работу масляного выключателя. Все выключения при длительности более 0,2 сек. имели место при аварии испытуемого выключателя.

Большая длительность опыта может понадобиться при испытаниях аппаратов на термическую устойчивость. Однако при этом целесообразнее итти путем установки специального понизительного трансформатора, мощность которого (номинальная) достаточно иметь порядка 10—20% от номинальной мощности генератора. При этом, однако, вследствие сравнительно небольшой мощности короткого замыкания трудно ожидать недопустимого падения числа оборотов даже через 3—5 сек. после начала короткого замыкания. Таким образом, повидимому, при выборе генератора основными соображениями должны быть (кроме экономических соображений) условия максимальной надежности. С этой точки зрения как будто следует остановиться на тихоходном типе (около 500 об/мин) аналогично установкам GEC и BBC. Такая же точка зрения была высказана, между прочим, проф. Бирманом во время консультации с ним по проекту лаборатории разрывной мощности завода „Электроаппарат“.

Принимаемая инж. А. Я. Буйловым (стр. 289) система защиты генератора при отказе испытуемого выключателя путем выключения короткого защитным выключателем вряд ли целесообразна. Более целесообразной является защита путем размагничивания генератора (у AEG через 0,35 сек. после начала короткого) с тем, что защитный выключатель используется как перестраховка при отказе размагничивающего устройства. Между прочим, установка AEG с генератором 100 MVA вообще не имеет защитного выключателя и никаких затруднений в работе, повидимому, не вызывает.

Спорным является мнение инж. А. Я. Буйлова о том, что с физической стороны наиболее обоснованным следует считать определение разрывной мощности по швейцарским нормам. Как уже было указано выше, уменьшением э. д. с. генератора вследствие уменьшения числа оборотов последнего можно пренебречь, и, следовательно, необходимо считаться только с уменьшением напряжения вследствие реакции якоря.

На основании современных взглядов на природу гашения электрической дуги, подкреплен-

ных большим количеством экспериментов, можно считать установленным, что на работу выключателя при выключении короткого замыкания в весьма сильной степени влияет скорость восстановления напряжения на контактах выключателя после прохождения тока через нуль, т. е. частота собственных колебаний системы, и при увеличении последней процесс выключения значительно утяжеляется¹⁾.

Рассмотрим теперь следующие два гипотетических случая.

1. Короткое замыкание имеет место на зажимах генератора с номинальной мощностью W и реактивностью $x\%$. Отходящих линий нет.

2. Короткое замыкание имеет место на конце длинной линии, имеющей реактивность $x\%$ и отходящей от генератора с номинальной мощностью $2W$ и реактивностью $x\%$.

В обоих случаях реактивности отнесены к мощности соответствующего генератора. По швейцарскому определению разрывная мощность будет в первом случае

$$W_k' \approx \frac{100}{x} W \left(\frac{E_b'}{E_0'} \right)^2$$

и во втором случае

$$W_k'' \approx \frac{109}{x} W \left(\frac{E_b''}{E_0''} \right)^2$$

где E_0 — напряжение до начала короткого замыкания и E_b — восстанавливающееся напряжение. Знаки ' и '' относятся к номеру рассматриваемого случая. Так как во втором случае имеется значительная внешняя реактивность, то размагничивание генератора будет меньшим, чем в первом случае, откуда, очевидно, следует

$$\frac{E_b''}{E_0''} > \frac{E_b'}{E_0'}$$

и, следовательно,

$$W_k'' > W_k'.$$

Таким образом, ориентируясь на швейцарские нормы, мы должны были бы во втором случае поставить более мощный выключатель. В действительности, однако, получается обратная картина и вследствие влияния линии, уменьшающей скорость восстановления напряжения, выключение во втором случае будет значительно более легким, чем в первом случае.

В виде иллюстрации в табл. 2 приводим результаты двух испытаний масляных выключателей, произведенных в Америке в 1925 г.²⁾

Таблица

	Короткое замыкание у генератора	Короткое замыкание у конца линии
Напряжение перед испытанием	13,200 кВ	15,0 кВ
Сила тока в дуге	1 420 А	1 400 А
Длина дуги	12,2 см	3,05 см
Длительность дуги в полупериодах	10,0	3,5
Давление в баке	2,43 кг/см ²	0,44 кг/см ²

Из вышесказанного следует, что во втором случае швейцарское определение может оказаться в прямом противоречии с действительностью явления, и вряд ли можно базироваться на нем при решении вопросов, связанных с выключением коротких замыканий.

Повидимому, вообще существующее определение разрывной мощности требует ревизии, что подтверждается рядом работ, опубликованных в последнее время в иностранной технической литературе.

Инж. Л. Машкиллейсон

Еще об установке для испытания мощных выключателей

(Ответ инж. Л. Е. Машкиллейсон)

В своих замечаниях по поводу моей статьи "К исследованию высоковольтных выключателей на разрыв тока короткого замыкания" инж. Л. Е. Машкиллейсон возражает против учета спадания числа оборотов генератора. В подтверждение своего мнения он приводит ряд цифр (см. его табл. 1), характеризующих с этой стороны работу существующих генераторов, результирующие цифры в которой подсчитаны им, исходя из мгновенной реактивности генераторов 10%, активного падения напряжения в 1% и активной мощности при коротком замыкании, равной 40% от номинальной мощности генератора.

Прежде всего следует заметить, что взятые инж. Л. Е. Машкиллейсоном цифры активного падения напряжения в генераторе и активной мощности при коротком замыкании никак не согласуются между собой. Действительно, если учитывать только одни потери в меди генератора, то и тогда без учета постоянной слагающей тока короткого замыкания средняя активная мощность

при коротком замыкании будет выражаться в виде

$$WP_{cp} = \left(\frac{100}{e_s \%} \right)^2 \frac{e_r \%}{100} \frac{1}{t} \int_0^t m^2 dt,$$

где $e_s \%$ — мгновенная реактивность генератора в процентах, $e_r \%$ — активное падение напряжения в процентах, m — коэффициент затухания первичной слагающей тока короткого замыкания.

Или, заменяя $\frac{1}{t} \int_0^t m^2 dt$ через m_{cp}^2 , получим

$$W = \left(\frac{100}{e_s \%} \right)^2 \frac{e_r \%}{100} m_{cp}^2.$$

Взяв значения $e_s \%$ и $e_r \%$, т. е. какие брали Л. Е. Машкиллейсон, т. е. 10% и 1%, получим что

$$W = m_{cp}^2.$$

2) Park and Skoets. Circuit Breakers Recovery Magnitudes and Rates of Rise, "Tr. AIEE", vol. 50, 1931, p. 204.

Число m_{cp}^2 есть функция длительности короткого замыкания и отношения мгновенного рефлекса и синхронного реактора. Если принять равное отношение равным 0,25, то, исходя из данных Бирманса¹⁾, для коэффициента m можно определить значения m_{cp}^2 в зависимости от времени замыкания (табл. 1).

Таблица 1

.....	0,1	0,2	0,3	0,4
.....	0,85	0,73	0,65	0,60

Ходя из данных табл. 1, является совершенно логичным утверждение Л. Е. Машкиллайсона о том, что активная мощность при коротком замыкании (с учетом еще и потерь в соединительных проводах) равна только 40% от номинальной мощности генератора. Как видно из табл. 1, для малых промежутков времени, взятых инж. Л. Е. Машкиллайсоном (0,1–0,3 сек.), эта величина колеблется (с учетом только одних потерь в меди генератора) от 85 до 65% номинальной мощности генератора. Если же учесть еще и потери в соединительных проводах, в дуге самого испытуемого выключателя и принять во внимание, что при коротком замыкании в генераторе имеют место потери, не учитываемые активным падением напряжения при нормальном токе, то станет ясно, что для тех малых промежутков времени, с которыми оперировал инж. Л. Е. Машкиллайсон, величину m_{cp}^2 следует считать близкой к единице и активную мощность при коротком замыкании можно приблизительно 100% от нормальной мощности генератора.

Если табл. 1, приводимая инж. Л. Е. Машкиллайсоном, имела бы следующий вид (табл. 2):

Таблица 2

Генератор	Номинальная мощность генератора MVA	Потери в 1 сек. kW sec	Сдача в оборотах в %			
			$t = 0,1$	$t = 0,2$	$t = 0,3$	$t = 0,4$
GEC . . .	26,7	26 700	8,6	18	29,5	42,5
.....	2,12	24 000	8	16,5	26	37
.....	100	100 000	6	13,5	21	30
ACED . . .	50	50 000	2,5	5	7,6	10,2

Таким образом величины сдачи оборотов генератором, приведенные инж. Л. Е. Машкиллайсоном, неверны и показывают преуменьшенные значения. Приводимые инж. Л. Е. Машкиллайсоном данные на этот счет, взятые из практики заграничных лабораторий, для испытания выключателей неубедительны.

Его ссылка на испытание в лаборатории GEC мощностью 510 MVA несколько странна по своим данным. Действительно, если допустить, что спадение оборотов было за 20 периодов действительности 1%, то, считая запас живой силы ротора генератора равным 78 500 kW sec, получим величину потерь в 1 550 kW sec [из формулы (10) на 10% предыдущей статьи²⁾]. Имея в виду, что длительность короткого замыкания равна 0,33 сек, получим среднюю активную мощность за время короткого—4 650 kW, т. е. она составляет приблизительно 4,6% от нормальной мощности генератора.

Инж. Л. Е. Машкиллайсон не указывает, каким образом получена была мощность 510 MVA от генератора GEC—путем ли снижения его возбуждения или путем введения сопротивления в цепь генератора. Неизвестно также, к какому моменту времени (от начала короткого) относится подсчет указанной мощности. Поэтому трудно установить режим короткого замыкания в данном случае.

Допустим, что подсчет мощности относился к начальной стадии короткого, и постоянная слагающая тока короткого замыкания не учитывалась. Тогда значение расчетного тока, очевидно, должно быть в 5,1 раза больше нормального, т. е. как бы цепь имела реактивность порядка 20%. В таком случае из уравнения

$$\left(\frac{100}{e_s \% } \right)^2 \frac{e_r \% }{100} = W,$$

считая $W = 0,046$ и $e_r \% = 20\%$. Можно определить, что $e_s \% = 0,185$, т. е. активное падение напряжения в замыкаемой цепи, отнесенное к нормальному току генератора и учитывающее все потери, могущие быть во время короткого замыкания, имеет величину порядка 0,2%.

Такая величина $e_s \%$ не может не вызвать сомнений, так как для самого только генератора она должна быть значительно больше, и мне кажется, что в указанном примере инж. Л. Е. Машкиллайсон каким-то образом указал ошибочно.

Что касается ссылки на опыты у AEG, то они тоже неубедительны, так как величина β для генератора AEG равна примерно $4,5 \cdot 10^6$, и с точки зрения спадания числа оборотов этот генератор выбран более или менее правильно и что испытание при пониженной мощности вообще мало характеризует генератор с точки зрения его сдачи в оборотах.

Необоснованность возражений по этому поводу станет еще более очевидной, если принять во внимание, что одним из центральных мест моих соображений в статье является величина реактора генератора, для которого я рекомендовал возможно меньшую величину. А так как с увеличением ударной мощности генератора сдача его в оборотах растет, то, следовательно, при малых реакторах опасность недополучить мощность тоже вырастает.

Инж. Л. Е. Машкиллайсон оперирует, главным образом, со старыми генераторами (за исключением генератора GEC на 100 MVA), рассчитанными на малую величину ударной мощности (максимальную величину разрывной мощности из приведенных трех генераторов дает генератор ACED: она равна 300 MVA по швейцарским нормам), и даже если бы для них те подсчеты, которые проделал (не ошибаясь) инж. Л. Е. Машкиллайсон, показали действительно очень незначительную сдачу в оборотах генератора, то это еще ничего не говорило бы против моих выводов, так как, повторяю, я в своей статье совсем не ориентировался на те реакторы, какие существуют для данного типа генераторов в настояще время (иногда 10–15%), и ставил вопрос об уменьшении этой величины, а следовательно, и об изменении соотношения между запасом живой силы ротора генератора и потерями при опыте в сравнении с имеющимися в настоящее время на практике.

В то же время, если обратить внимание на устройство последней мощной лаборатории BBC³⁾, то очень показательным является тот факт, что у этой фирмы генератор имеет реактор всего 6% и ротор, несмотря на малое число оборотов (500 об/мин), сделан сплошным, с маховым моментом в 550 000 kg².

Инж. Л. Е. Машкиллейсон возражает также против принятого мною времени опыта 0,4 сек. Эта цифра взята мною из следующих соображений. Как известно, еще Kopellowitsch⁴⁾ экспериментально доказал неоднозначность влияния постоянной слагающей тока короткого замыкания на разрыв дуги в масляном выключателе. Поэтому проверить выключатель при наличии в цепи только симметричной составляющей тока короткого замыкания является очень желательным. При трехполюсном же замыкании это можно сделать только путем выдержки времени. Постоянная слагающая затухает спустя 0,15 ± 0,25 сек. К этому времени необходимо прибавить время горения дуги (при наличии соответствующих устройств время выдержки вследствие инерции движущихся частей самого выключателя и вспомогательных аппаратов может не учитываться). Ориентируясь на выключатель с номинальным напряжением 100 ± 200 kV и на выключатель с длительным (сравнительно) временем горения дуги (такие выключатели тоже придется испытывать), можно получить как раз те 0,4 сек., которые я ввел в свои расчеты.

Для контрольного испытания выключателей, может быть, можно считаться только со временем горения дуги, поскольку и в действительных условиях при разрыве трехфазного короткого замыкания, через выключатель всегда проходит постоянная слагающая тока короткого замыкания, но для исследовательских целей (а лаборатория мощностей короткого замыкания должна, очевидно, обслуживать и этот вид работ) возможность освободиться от постоянной слагающей тока короткого замыкания является, безусловно, необходимой. Но вместе с тем при контрольном испытании выключателя нормы требуют, чтобы выключатель разорвал предложенную ему мощность 2 ± 3 раза подряд, с перерывами между опытами в 1 ± 2 мин. (по нормам различных стран указанные цифры отличаются друг от друга). В этом случае, если считать, что двигатель, приводящий в движение генератор, в течение паузы между двумя опытами не восполнит отнятую у вращающихся масс энергию, мы должны считаться с удвоенным и даже утроенным временем одного опыта (и даже больше, так как цикл СО — выключение, меньше по продолжительности цикла ОСО — включение и выключение)⁵⁾.

Исходя из последнего соображения, принятое мною время опыта равным 0,4 сек. следует считать скорее преуменьшенным, чем преувеличенным, что в свою очередь еще более заостряет вопрос о запасе живой силы масс, сидящих на валу генератора.

3) Bull. SEV № 25, 1931.

4) Bull. SEV № 8, 1918.

5) Возможно ли технически и рационально ли экономически иметь такой мотор и такое устройство его управления, при котором мотор может за время паузы между двумя опытами восполнить энергию, отнятую у вращающихся масс, — вопрос, требующий специального анализа, но при больших мощностях короткого замыкания и кратковременной паузе вряд ли этот вопрос может быть решен в положительном смысле.

Те же 0,1 ± 0,15 сек., которые инж. Л. Е. Машкиллейсон считает достаточными для прохождения испытания выключателя, для специальной лаборатории совершенно неприемлемы. При них — это значит заранее ити на уменьшение пользования лаборатории и на невозможность полного изучения процессов выключения.

Инж. Л. Е. Машкиллейсон совершенно прав, когда говорит о том, что в некоторых случаях меньшая величина разрывной мощности не означает еще меньшую напряженность работы выключателя. Например, Grant⁶⁾ в этом отношении еще дальше, чем многие современные исследователи в области выключателей. Он прямо говорит, что ограничение тока короткого замыкания (а это, конечно, и мощности короткого замыкания) помочь реактора может не только не облегчить работу выключателя, но даже повести к взрыву его именно благодаря более быстрому нарастанию напряжения.

Если уж говорить о влиянии на процесс разрыва скорости восстановления напряжения на бортах выключателя, то, как известно, эта скорость восстановления напряжения зависит не только от собственной частоты колебаний системы, а также от мгновенного значения э. д. с., которая занимает место в выключаемой цепи в момент прохода через нуль. А эта величина э. д. с. как раз и определяет возвращающееся напряжение, с которым определяются швейцарские нормы. Номинальное же напряжение, с которым оперируют американские нормы, не определяет скорости восстановления напряжения на бортах выключателя, так что эти стороны швейцарские нормы являются более обоснованными, чем американские.

В то же время инж. Л. Е. Машкиллейсон совсем удачно иллюстрировал свою мысль примером; в его табл. 2 как бы перепутаны два понятия — энергия дуги и разрывная мощность. Удар в выключателе в основном зависит от энергии дуги, а последняя — в значительной степени (но не полностью) от времени горения дуги, и сравнив два опыта, имеющих разную длину и разное время горения дуги, с этой стороны очень трудно, более, что в указанных опытах, очевидно, и скорости выключения были различны, так как время горения дуги уменьшается (исходя из табл. инж. Л. Е. Машкиллейсона) от первого опыта к второму в $\frac{10}{3,5} = 2,86$ раза, в то время как длина дуги уменьшается в $\frac{12,2}{3,04} = 4$ раза. Кроме того, пример, приведенный инж. Л. Е. Машкиллейсоном не характерен еще и потому, что и по американским нормам и по любым другим нормам разрывная мощность во втором опыте будет больше, чем в первом, так как токи почти одинаковы, а напряжение во втором случае выше, чем в первом.

При современном состоянии вопроса можно сказать, что разрывная мощность хотя является и недостаточным критерием для определения способности выключателя, но в то же время совершенно необходимым, и при проектировании специальной установки для испытания выключателей вопрос о ее величине и определении ее в первую очередь.

6) „Journ. of IEE“ № 5, 1930.

инж. Л. Е. Машкиллайсон своим примером с различными цепями краткого замыкания и различными генераторами ни в коей мере отрицал недостатков швейцарского определения разрывной мощности по сравнению с другим определением. Он только лишил разрывного определения этого понятия для выключателя вообще.

Однако если производить именно сравнение двух определений разрывной мощности, то становится ясным, что швейцарское определение является наиболее обоснованным. Действительно, факт, что увеличение мощности за счет появления слагающей не всегда означает ухудшение процесса гашения дуги, сам по себе заставляет отказаться от определения тока по американским нормам. Если дуга горит некоторое время, течение которого происходит изменение э. д. с., то повторное зажигание дуги, очевидно, не больше обусловлено последующим напряжением на контактах, нежели предыдущим, и по этому напряжение, определяемое по швейцарским нормам, конечно, физически более обосновано, чем определяемое по немецким нормам, не говоря уже об американских нормах.

Для целей эксплоатации можно еще говорить о удобстве пользования швейцарским определением напряжения. Упоминавшийся мною исследователь Kapelowitsch в той же статье, например, вызывая большую физическую обоснованность швейцарского определения разрываемого напряжения для целей эксплоатации все же рекомендует номинальное напряжение, но при этом указывает исключительно на удобстве пользования для эксплоатирующих организаций.

Что касается определения разрывной мощности нашего специального случая, то здесь тем же необходимо остановиться на швейцарском определении, так как спадание в оборотах генератора и реакция якоря (которая ввиду уменьшения реактанца генератора по сравнению с нормальными машинами будет сказываться значительно сильнее) диктуют необходимость учета уменьшения напряжения во время процесса разрыва. Если, например, взять американское определение разрывной мощности и представить себе генератор с малым реактанцем и малым запасом

живой силы, то ввиду больших потерь за время опыта (большой ток) может получиться такая картина: масляник не выдержал бы этой мощности и в нем получилась бы устойчивая дуга, ведущая к взрыву выключателя, но ввиду быстрого спадания действующей мощности он благополучно разорвал ток.

Можно представить себе при этом такой случай, когда момент погасания дуги совпадает с моментом почти полной остановки генератора, что, конечно, нельзя было бы назвать испытанием выключателя. Но даже и без учета спадания числа оборотов генератора может быть подобная картина, когда формально (при пользовании американскими нормами) масляник разорвал большую мощность, в то время как в действительности она значительно меньше. Количество соотношение в этом случае может характеризовать рис. 12 на стр. 293 моей статьи.

Вместе с тем инж. Л. Е. Машкиллайсон совершенно неправильно приписывает мне систему защиты генератора. На эту систему я указал только как на одну из часто встречающихся (стр. 283). Систему защиты генератора я в своей статье не разбирал, так как это вопрос специальный и может послужить темой специального обсуждения. Точно так же я не указывал, какой тип генератора я считаю более удобным. По моему мнению (и я это указывал в статье) выбор типа генератора в значительной степени зависит от заданной величины разрывной мощности и от условий работы установки, в частности, от числа циклов последовательных испытаний и от того, каким определением пользоваться при подсчете величины разрывной мощности.

Само собой разумеется, что такие вопросы, как безопасность изоляции при быстрых повышениях температуры токоведущих стержней, механическая прочность и др., должны быть также приняты во внимание при выборе типа генератора.

Выбор типа генератора может, как и система защиты его и система регулировки тех или иных величин, явиться обширной темой специального обсуждения.

В заключение, воспользовавшись случаем, укажу некоторые замеченные мной опечатки в моей прежней статье.

Страница	Напечатано	Должно быть	Примечание
287, 1-й столбец	$N' = \frac{P}{I_k\%}$	$N' = \frac{P}{e_k\%}$	В дальнейшем тоже вместо $e_k\%$ поставлено $I_k\%$
288, 1-й столбец	kW/sec	kW sec	В дальнейшем опечатка повторяется
289 формула 13	$A_1 = \dots \text{kg/m}$	$A_1 = \dots \text{kg m}$	
289, 2-й столбец	$L_m = \dots + s \sqrt{\frac{hv}{N'}}$	$L_m = \dots + s \sqrt{\frac{Pv}{N'}}$	В дальнейшем ошибка повторяется
290, 1-й столбец	$hv^3 = \beta$	$Pv^3 = \beta$	
290, формула (24)	$M_{max} = \dots \text{kg/cm}$	$M_{max} = \dots \text{kg cm}$	(формулы (18), (19), (20), (21))
291, 1-й столбец, строка 23	2) возможное уменьшение числа оборотов	2) возможно меньшее уменьшение числа	

ЗА РАЦИОНАЛИЗАЦИЮ В ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВЕ

Допустимые падения напряжения в низковольтных осветительных сетях

Инж. Е. Н. Приклонский
Москва

По вопросу о выборе допустимых падений напряжения существует много самых разнообразных мнений. Этот вопрос считается спорным.

Разнообразие во взглядах проектировщиков приводит к массе практических затруднений при пуске электрических установок. Иногда при малых падениях напряжения в сетях приходится искусственно снижать напряжение, чтобы увеличить долговечность ламп. Наоборот, бывают случаи слишком больших падений напряжения в сетях, что влечет увеличение колебания напряжения и уменьшение освещенности.

Подобные факты говорят о необходимости установить единое мнение на выбор допустимых падений напряжения.

На выбор допустимых падений напряжений в отдельных частях установок влияет несколько факторов, например:

- стоимость отпускаемой электроэнергии на освещение;
- величина нормального напряжения трансформатора;
- стоимость единицы мощности установки;
- мощность единицы трансформатора;
- использование дополнительных зажимов на стороне высокого напряжения трансформатора для регулировки напряжения в пределах $\pm 5\%$;
- допустимые колебания напряжения в сети;
- напряжение на стороне высокого напряжения и его колебания;
- чувствительность присоединенной нагрузки к изменениям напряжения;
- сроки амортизации отдельных частей установки.

С этих точек зрения и рассматривается вопрос о падении напряжения в осветительных сетях.

Согласно постановлению комитета по стандартизации при СТО (ОСТ № 569) допустимые отклонения в эксплуатации от нормального напря-

жения в электрических установках не должны превышать $\pm 5\%$, т. е. максимальное падение напряжения (при полной нагрузке) на последней лампе в цепи не должно превышать -5% , в обратном случае при минимальных падениях напряжение на первых лампах не должно превышать 105% от номинального (рис. 1). При под номинальным эксплуатационным напряжением разумеется напряжение на зажимах приемника.

На рис. 1 сеть рассматривается только со стороны допустимых колебаний напряжения. Диаграммы следуют, что при постоянстве напряжения на высоковольтной стороне общее допустимое падение напряжения не может превышать 10% и распределение его должно быть так, чтобы в трансформаторе и питательной линии не терялось не более 5% . Данные падения напряжения выведены из условия постоянства напряжения на высоковольтной стороне трансформатора, что не всегда соответствует действительности. Поэтому необходимо изменить их величину ожидаемого колебания напряжения на высоковольтной стороне.

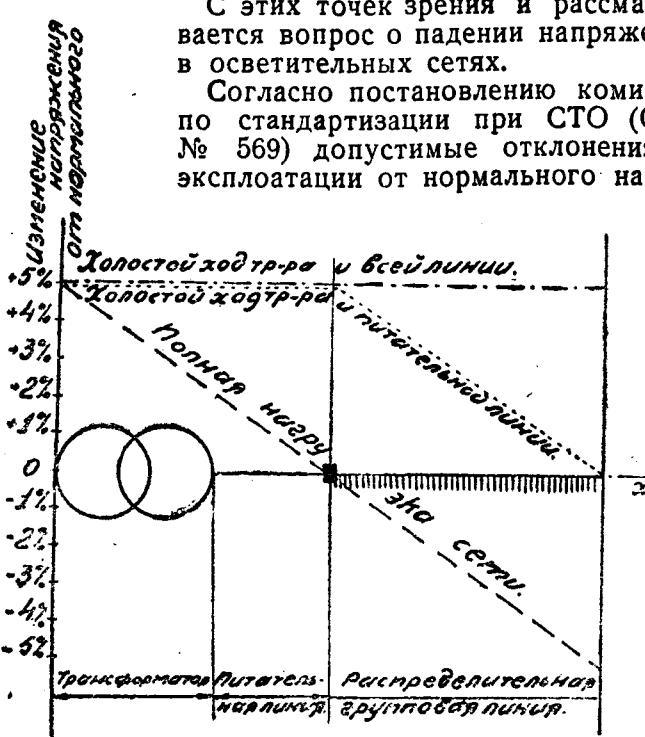
Практически влияние колебания напряжения на высоковольтной стороне ослабляется вследствие того, что с ростом осветительной нагрузки происходит улучшение коэффициента мощности (коэффициента мощности на высоковольтной стороне). Остатки колебаний напряжения обычно компенсируются регулированием напряжения. В некоторых случаях регулирование приводит к допустимости повышения напряжения.

Итак, в общем случае в осветительной сети трансформаторе допустимо по колебанию напряжения падение $e = 2 (5 \pm \epsilon)$, где ϵ есть практически ожидаемые отклонения напряжения от среднего значения или предполагаемая регулировка напряжения.

Учитывая, что при малых нагрузках первая лампа неизбежно горит с полным накалом, необходимо, чтобы при полной нагрузке первая лампа горела с полным накалом. Тогда при какой-либо "средней" нагрузке имеем нормальные условия, когда средняя лампа группы горит с полным накалом. Найдя таким образом максимум падения по допустимому колебанию напряжения, рассмотрим теперь элементы сети с точки зрения этих факторов.

Групповые линии

Согласно основной характеристике лампы излучения, дающей изменение светового потока в зависимости от напряжения (рис. 2), заключается, что избежание заметных разностей между лампами в группе недопустимо падение напряжения свыше 2% . Считая допустимым максимум изменения светового потока на 5% , получаем, что падение напряжения в групповой сети не должно превышать 2% . Данное падение напряжения на наконечниках ламп на 220 и 120 В, так как оно касается ламп на 220 и 120 В, так



живительность их к изменениям напряжения (Баков¹).

Определение экономического падения напряжения в групповых линиях нельзя производить по правилу Томсона, которая не учитывает специфики осветительной сети. Формула проф. Хрущева² нам кажется очень сложной. Поэтому предлагаем более упрощенный метод.

Для выявления экономических факторов ниже изображено влияние увеличения падения напряжения $e\%$ на переменные составляющие годовых первоначальных затрат. При увеличении падения напряжения мы соответственно увеличиваем мощности, снижаем световой поток последней лампы на $3,5e\%$ или в среднем на $1,75e\%$, также уменьшаем к. п. д. последней лампы на $0,5\%$ или в среднем на $0,75e\%$. Полное увеличение расхода энергии с увеличением падения напряжения равно:

$$(1 + 1,75 + 0,75)e = 3,5e\%.$$

Стоимость перерасходованной электрической энергии на каждый киловатт установленной мощности за T часов горения ламп в год и при стоимости электрической энергии a коп. за 1 kWh равна

$$K_1 = \frac{3,5e \cdot Ta}{100 \cdot 100} = \frac{eTa}{2860} \text{ руб. на 1 kW.}$$

В тоже время увеличение падения напряжения повышает расход на лампы. В среднем экономия в лампах равна:

$$K_2 = \frac{5eTb_1}{100 \cdot 800} \text{ руб. на 1 kW,}$$

где b_1 —стоимость ламп накаливания на 1 установленный киловатт, 800—число часов горения при нормальном напряжении.

Для компенсации снижения освещенности при увеличении падения напряжения необходимо увеличение установленной мощности осветительной станции на $1,75e\%$. Если стоимость 1 установленного киловатта равна b_2 руб. при падении напряжения $e_1\%$, то при новом падении $e\%$ изменение соответствует

$$A_1 = \frac{1,75 \cdot b_2 e}{100 e_1} \text{ руб. на 1 kW.}$$

Одновременно, как было указано, увеличение потребления энергии растет в отношении $3,5e\%$, то требует увеличения мощности электрических станций и высоковольтных систем. Принимая стоимость установленного киловатта станций и высоковольтных систем равным b_3 руб., увеличение затрат выразится величиною

$$A_2 = \frac{b_3 \cdot 3,5e}{100} \text{ руб. на 1 kW.}$$

Наконец, увеличение допустимых падений напряжений в групповых проводах вызывает соответствующее уменьшение сечения их. Практически можно принять, что рост стоимости проводов примерно соответствует 50% роста сечения. От-

сюда находим увеличение переменной части первоначальных затрат:

$$A_3 = \frac{b_4 \cdot 50 \cdot e_1}{100 e} \text{ руб. на 1 kW,}$$

где b_4 —стоимость групповых проводов на 1 kW при допустимых падения напряжения $e_1\%$.

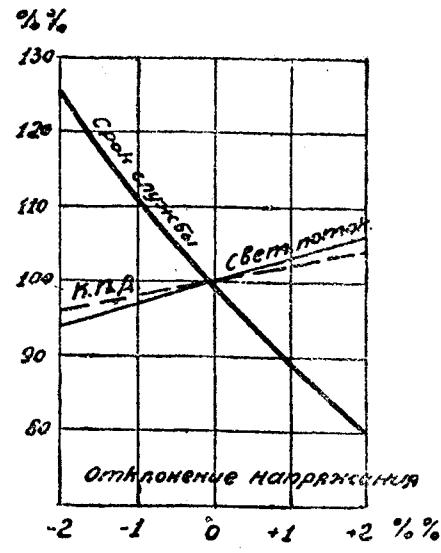


Рис. 2

Если $p\%$ —амортизационные отчисления и ремонт, учитывающие при этом необходимую степень экономии в первоначальных затратах, то годовое увеличение расходов соответствует

$$K = \frac{eTa}{2860} - \frac{eTb_1}{16000} + \frac{p}{100} \left(\frac{b_2 e}{57e_1} + \frac{b_3 e}{28,6} + \frac{b_4 e_1}{2e} \right) \text{ руб. на 1 kW.}$$

Экономически наиболее приемлемо такое падение напряжения e , которое обеспечит минимальное значение K . Для нахождения минимума данного выражения продифференцируем его и приравняем производную нулю:

$$\frac{dK}{de} = \frac{Ta}{2860} - \frac{Tb_1}{16000} + \frac{pb_2}{5700e_1} + \frac{pb_3}{2860} - \frac{pb_4 e_1}{200e^2} = 0.$$

Отсюда экономически наивыгоднейшее падение напряжения выразится формулой

$$e = 8,95 \sqrt{\frac{pb_4 e_1}{5,6 Ta - Tb_1 + 2,8 pb_2 \frac{pb_2}{e_1} + 5,6 pb_3}} \text{ %.}$$

Практически без большой погрешности можно считать, что $Tb_1 = 5,6 pb_3$, т. е., что увеличение расхода на электрические станции и высоковольтные сети компенсируется уменьшением расхода на лампы накаливания. При этом условии формула несколько упрощается и получает вид:

$$e = 5,45 e_1 \sqrt{\frac{pb_4}{2Ta + pb_2}} \text{ %.}$$

На основании вышеуказанных формул составлена табл. 1 допустимых падений напряжения в низковольтных групповых осветительных сетях, причем в основу положены данные Гипрохима.

¹ Надеждин, О допустимых повышениях напряжения в сетях с лампами 220 В. «Информационный бюллетень Электро-рома», 1932, № 1, стр. 40.

² Е. М., 1930, № 8.

Стоимость групповых проводов на 1 установленный киловатт b_4 принята равной примерно:

- а) Для сетей 220 В от 50 до 100 руб.
б) " 120 В от 75 до 150 "

Большие стоимости относятся к проводке проводом Куло, СРГН, в газовых трубах, в бергмановских трубах и т. д., а меньшие к ПР, ШР и т. д. Указанные стоимости проводов соответствуют средним данным по проектам, где падение напряжения принимались равными при 220 В $e_1 = 1,3\%$, при 120 В $e_1 = 2\%$.

Стоимость установленного 1 киловатта всей осветительной установки b_2 принята равной от 300 до 500 руб.

Таблица 1

Стоимость электро- энергии коп./кWh	Нормально допустимые падения напряжения в групповых осветительных проводах				
	4 000 часов горе- ния в год		2 500 часов горе- ния в год		
	120 В	220 В	120 В	220 В	
0÷4	2%	2%	2%	2%	
5÷10	2%	1,5%	2%	1,5%	
21÷26	1,5%	1%	2%	1%	
27÷32	1%	1%	1,5%	1%	
33÷60	1%	0,5%	1%	0,5%	

Питательные линии

Как было выявлено ранее, никакие экономические соображения не могут влиять на выбор допустимого или, вернее, необходимого падения напряжения в питательных линиях. Необходимое падение напряжения определяется условием, что первые лампы группы при полной нагрузке горят с номинальным накалом. Увеличение или уменьшение данных падений напряжения приводят к чрезмерному недокалу или перекалу ламп.

Тем не менее, данное условие может привести в некоторых случаях к чрезмерным колебаниям напряжения в сети, во избежание чего необходима регулировка напряжения. Величина этой регулировки соответственно больше при наличии колебаний напряжения в высоковольтной сети. Если величина колебаний в высоковольтной сети равна $\pm \epsilon \%$, а необходимое падение напряжения в трансформаторе и питательной линии $e\%$, то регулирование должно быть равным

$$m = e - (5 - \epsilon) \%$$

В тех случаях, когда эта величина имеет положительное значение, необходима регулировка в пределах $\pm m\%$; в тех случаях, когда она имеет отрицательное значение, возможны колебания в высоковольтной сети больше на $\mp m\%$.

Для нормальных условий согласно ОСТ № 713 номинальное напряжение на вторичных обмотках трансформатора (при холостом ходе) для осве-

тительной нагрузки может иметь следующие значения: 125, 230, 230/133, 440/231 В при нормальных напряжениях 120 и 220 В. Поэтому, для получения полного напряжения на первых же в группе необходимо потерять в трансформаторе и питательной линии разность между номинальным и нормальным напряжениями. Величины падений приведены в табл. 2.

Таблица

Номинальное напряжение	125 В	230 В	230/133 В
Нормальное напряжение	120 В	220 В	120 В
Разность	5 В	10 В	13 В
Разность в процентах	4,17%	4,55%	10,8%

Как видим, суммарное падение напряжения системы 125 В, 230 и 400/231 В не превышает т. е. данные системы могут обойтись без регулировки напряжения; системы 125 В и 230 В допускают незначительные колебания напряжения в высоковольтной сети. В системе же 230/133 В слишком велики необходимые падения напряжения, что значительно увеличивает эксплуатационные расходы. Поэтому целесообразно при системе 230/133 В нормально использовать дополнительные зажимы на $+5\%$, чтобы снизить необходимое падение напряжения до величины 5,8%. Среднедневная характеристика этих систем дана в табл. 3.

Таблица

Номинальное напряжение	125 В	230 В	230/133 В
Падение напряжения в трансформаторе и питательной линии	4,17%	4,55%	5,8%
Характеристика системы	Допустимые колебания напряжения в высоковольтной сети на $\pm 0,83\%$	Допустимые колебания напряжения в высоковольтной сети на $\pm 0,45\%$	Необходимые регулировки напряжения на $\pm (0,8 + \pm \epsilon) \%$

Падение напряжения в трансформаторе в какой степени зависит от коэффициента мощности присоединенной нагрузки и от мощности единичного трансформатора. Поэтому необходимо рассмотреть отдельно случай осветительной нагрузки на трансформатор ($\cos \varphi = 1$) и смешанной ($\cos \varphi < 0,9$).

Величина падения напряжения зависит также от мощности трансформаторов. В табл. 4 приведены данные для падений напряжения в питательной линии на основании ОСТ № 713%.

Таблица 4

Нормально допустимые падения напряжения в питательной и светильной сети при чисто осветительной нагрузке трансформатора

Номинальная мощность трансформатора kW	Номинальное напряжение			
	125 V	230 V	230/133 V	400/231 V
0÷10	1%	1,5%	2% ⁴⁾	1,5%
11÷50	1,5%	2%	2,5% ⁴⁾	2%
51÷130	2%	2,5%	3% ⁴⁾	2,5%
131÷320	2%	2,5%	3% ⁴⁾	3%
321÷1809	2,5%	3%	3,5% ⁴⁾	3%

Приведенные в табл. 4 и 5 падения e_T даны в предположении, что на первичной стороне трансформатора напряжение строго постоянно. В случае отклонения напряжения от нормального E_n необходим перерасчет по нижеследующей формуле:

$$e = e_T + \frac{E - E_n}{E_n} \cdot 100\%,$$

где e —необходимое падение напряжения для случая, когда среднее значение напряжения на первичной стороне равно E .

При применении последней формулы необходимо еще учитывать использование дополнительных зажимов (если такие имеются) для регулирования напряжения.

Таблица 5

Нормально допустимые падения напряжения в питательной сети при смешанной силовой и осветительной нагрузке ($\cos \varphi < 0,9$).

Номинальная мощность трансформатора kW	Номинальное напряжение			
	125 V	230 V	230/133 V	400/231 V
0÷10	4% ⁵⁾	5% ⁵⁾	1,5% ⁴⁾	5% ⁵⁾
11÷30	5% ⁵⁾	0,5%	2% ⁴⁾	0,5%
31÷135	0,5% ⁵⁾	1%	2% ⁴⁾	1%
136÷560	0,5% ⁵⁾	1%	2% ⁴⁾	1%
561÷1 800	4,5% ⁵⁾	5% ⁵⁾	1,5% ⁴⁾	3% ⁵⁾

Необходим ли для промышленного предприятия отдельный световой трансформатор?

Инж. Е. К. Попов
ЦНИИмаш

Широкая электрификация производства вместе с строительством новых промпредприятий при фильтре металла и энергии заостряет вопрос о выборе наиболее целесообразной системы электроснабжения. В частности, по вопросу об отдельном световом трансформаторе помимо трансформаторов для электродвигателей, до сих пор существует единого мнения, и вопрос разрешается на практике различно, хотя по экономичности различные решения этого вопроса совершенно не эквивалентны.

Доводы в защиту отдельного светового трансформатора сводятся к тому, что достигается 1) спокойное без мигания горение ламп, независимо от колебаний режима работы электродвигателей, 2) широкое применение коротковолновых электродвигателей, 3) возможность значительного падения напряжения в световой сети, а следовательно, получать большую экономию на меди, 4) при моторном напряжении в 380 V возможность применять лампы на 120 V, которые по эффективности светового потока стоят выше чем 220 V, и что 5) всякая авария в моторном действии, вплоть до выключения силовых трансформаторов, не отражается на освещении.

Преимущества же использования общих трансформаторов и для освещения, и для питания

электродвигателей заключаются в 1) уменьшении стоимости трансформаторов, аппаратуры и здания за счет уменьшения количества устанавливаемых трансформаторных единиц при незначительном увеличении мощности каждой из них, 2) в уменьшении установленной мощности трансформаторов за счет увеличения коэффициента мощности общей нагрузки и несовпадения максимумов моторной и световой нагрузок, 3) в увеличении общего к. п. д. и общего коэффициента мощности подстанции за счет изъятия из эксплуатации мелких трансформаторов, и часто 4) в возможности, в зависимости от характера силовой нагрузки, использовать для освещения силовые фидеры.

В зависимости от условий работы и характера нагрузки предприятия превалируют те или другие факторы, влияющие на соответствующее решение.

Мигание света. Известно, что колебания напряжения сильно влияют на световой поток ламп. Так, для ламп с металлической нитью изменение напряжения на $\pm 5\%$ вызывает уменьшение или увеличение светового потока ламп на 18—20%. Такие колебания светового потока, конечно, ухудшают качество освещения, вызывая заметные, утомительные для глаз колебания света, что отражается на производительности. Как показала практика, колебание напряжения у ламп ниже 3% нечувствительно для глаз. Обыкновенно при расчетах на постоянство освещенности из-за предосторожности принимают колебание напряжения в $\pm 5\%$.

⁴⁾ Предполагается использование дополнительных зажимов

⁵⁾ Предполагается использование дополнительных зажимов

жения у ламп в $\pm 2\%$. Нормы ограничиваются только указанием на недопустимость изменений силы источников света, заметных для глаз. Для весьма редких колебаний допустимые напряжения принимают большие значения. Так, по проекту ВЭО колебание напряжения при включении короткозамкнутых электродвигателей допускается до 4%. Для дальнейших расчетов примем допустимое колебание напряжения в $\pm 2.5\%$, что вызывает колебание освещенности в $+8-9\%$, имея в виду сравнительно редкую повторяемость.

Вообще колебания напряжения в сети вызываются: а) колебанием нагрузки и б) включением короткозамкнутых электродвигателей.

Чтобы определить величину колебания напряжения в зависимости от колебания нагрузки, обратимся к формуле падения напряжения в трансформаторах, по нашим нормам

$$\Delta V\% = e_r \cos \varphi_2 + e_s \sin \varphi_2 + \frac{(e_s \cos \varphi_2 - e_r \sin \varphi_2)^2}{200}, \quad (1)$$

где $e_r = \frac{I_1 r_k}{V_1} \cdot 100\%$ и $e_s = \frac{I_1 x_k}{V_1} \cdot 100\%$ определяются из опыта короткого замыкания, без чего определение $\Delta V\%$ сопряжено с большим количеством вычислений. С целью упрощения делим и умножаем все члены правой части уравнения

на $e_k = \frac{I_1 Z_k}{V_1} \cdot 100\%$ и вводим

$$\frac{e_r}{e_k} = \cos \varphi_k; \quad \frac{e_s}{e_k} = \sin \varphi_k,$$

где φ_k есть угол треугольника короткого замыкания трансформатора между гипотенузой e_k и катетом e_r . После подстановки формула (1) принимает вид

$$\Delta V\% = e_k \cos(\varphi_k - \varphi_2) + \frac{[e_k \sin(\varphi_k - \varphi_2)]^2}{200}. \quad (2)$$

Член $\frac{e_k^2 \sin^2(\varphi_k - \varphi_2)}{200}$ при $\varphi_k = \varphi_2$ превращается

в нуль, а при своем максимальном значении $\varphi = 0$ (исключая емкостную нагрузку) исчисляется сотыми долями процента. Поэтому без ущерба можно этим членом пренебречь, т. е.

$$\Delta V\% = e_k \cos(\varphi_k - \varphi_2), \quad (3)$$

где $\varphi_k = \arccos \frac{e_r}{e_k}$.

При $\varphi_2 = 0 \quad \Delta V\% = e_k \cos \varphi_k = e_r$.

Если взять по каталогу или ОСТ 713 величину падения напряжения для $\varphi_2 = 1$ и напряжение короткого замыкания, то для всякого коэффициента мощности при любой нагрузке и каждого трансформатора можно весьма просто определить $\Delta V\%$.

На основании этих рассуждений вычислены падения напряжения и составлена табл. 1.

Для наглядности построен также график $\Delta V\% = f(kVA)$ (рис. 1), для $\cos \varphi_2 = 1$, почти для всех типов, приведенных в таблице, и для $\cos \varphi_2 = 0.8$ только для наиболее характерных. При $\cos \varphi_2 = 0.5$ почти для всех мощностей, кроме 750 и 1000, значения $\Delta V\%$ одинаковы и изображены одной прямой. По этому графику нетрудно заметить, что колебание напряжения на 2.5% мо-

Таблица
Падение напряжения $\Delta V\%$ в трансформаторах в зависимости от их мощности и от $\cos \varphi$

$\cos \varphi_2$ kVA	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	e_r
50	2,45	3,64	3,95	4,06	4,1	4,07	4,1
75	2,3	3,5	3,8	3,94	4	3,99	4
100	2,2	3,44	3,75	3,92	3,99	3,99	4
135	2,1	3,39	3,7	3,9	3,98	3,99	4
180	1,95	3,27	3,65	3,84	3,96	4	4
240	1,85	3,23	3,6	3,84	3,95	4	4
320	1,78	3,17	3,55	3,8	3,92	3,99	4
420	1,67	3,09	3,5	3,76	3,92	3,99	4
560	1,63	3,06	3,5	3,76	3,9	3,97	4
750	1,75	3,85	4,55	4,94	5,21	5,38	5,5
1 000	1,7	3,79	4,5	4,89	5,17	5,37	5,5

жет быть вызвано изменением нагрузки на 70% при наиболее худших условиях, т. е. при $\cos \varphi = 0.5$. Такие скачки могут вызываться одновременным изменением потребной мощности, присоединением больших короткозамкнутых двигателей, или же электрической сваркой. Обычно работа одной производственной машины, даже если ее колебания доходят до 100% , не может дать значительного толчка на общих шинах. Следовательно, чтобы вызвать мгновенное изменение нагрузки на 70% , необходимо, чтобы большинство работающих машин попадало в $\Delta V\%$. В практике такие случаи только единичны и, конечно, их нельзя брать в расчет.

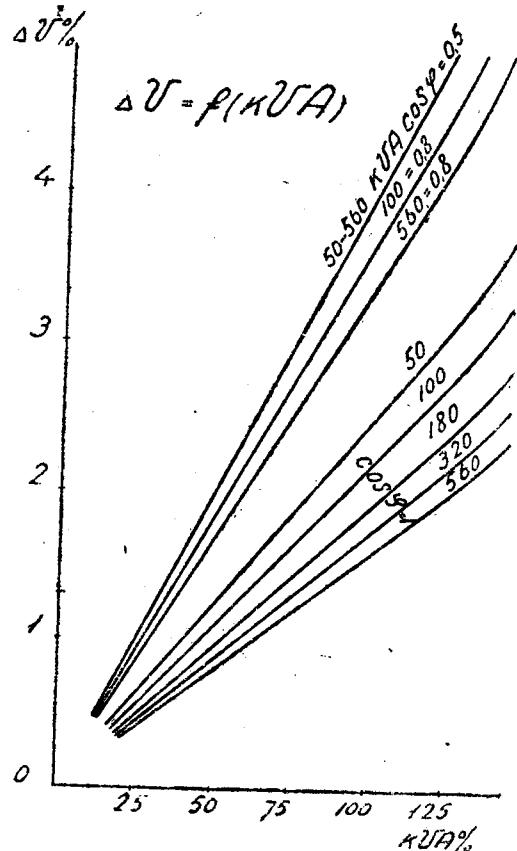


Рис. 1. Падение напряжения в трансформаторах в зависимости от мощности и от $\cos \varphi$

Что касается присоединения короткозамкнутых электродвигателей, то при условии заданного максимума колебаний напряжения их мощност-

ибо, ограничены. По проекту ВЭО допустимый толчок тока определяется по формуле

$$\frac{\Sigma I_{\text{допускаемых двигателей}}}{I_{\text{норм. трансф.}}} = \frac{e_{\text{дополн. пад. напр. у ламп}}^1}{e_{\text{кор. зам. трансф.}}},$$

Что то же,

$$\frac{\Sigma kVA_{\text{пуск. дв.}}}{kVA_{\text{норм. трансф.}}} = \frac{e_{\text{доп.}}}{e_k}. \quad (4)$$

Имея в виду, что пусковой ток короткозамкнутого двигателя в среднем в 6,5 раз больше нормального, можно определить соответствующую отдельную мощность. Согласно тому же проекту принимаем возможное совпадение пуска двух двигателей одинаковых мощностей и допустимое падение напряжения у ламп в 4%. Далее, принимаем напряжение короткого замыкания трансформатора $e_k = 4\%$, что соответствует наиболее потребительным мощностям трансформаторов 6-60 kVA, 6000/400 V. Считаем произведенное к. п. д. и коэффициент мощности для электродвигателей небольших мощностей равным 0,7. В данном случае суммарная кажущаяся мощность пускаемых двигателей равна:

$$\Sigma kVA_{\text{пуск. дв.}} = P_{\text{дв.}} \cdot \frac{2 \cdot 6,5}{0,7},$$

$P_{\text{дв.}}$ есть мощность в киловаттах короткозамкнутого двигателя. Мощность трансформатора принимаем за 100%, т. е. $kVA_{\text{трансф.}} = 100\%$, $e_{\text{норм. напр.}} = 4\%$; $e_k = 4\%$. Следовательно

$$\frac{P_{\text{дв.}} \cdot \frac{2 \cdot 6,5}{0,7}}{100\%} = \frac{4}{4}, \text{ т. е. } P_{\text{дв.}} = 5,5\%.$$

В расчет не принято отличие коэффициента мощности данных двигателей при пуске и коэффициента мощности прочей нагрузки, что в действительности значительно снижает результирующую кажущуюся нагрузку трансформаторов при пуске двигателей, следовательно, и колебание напряжения в них. При пуске короткозамкнутых электродвигателей переключателем со звезды на треугольник их отдельная мощность повысится примерно до 55% при соответствующем уменьшении пускового момента электродвигателя, но не менее 60% нормального, что вполне достаточно для большинства машин. При пуске с автотрансформатором отдельная мощность увеличится до 30-40% от мощности трансформаторов, если малый пусковой момент (около 30-25%) не препятствует этому. Этот расчет строится на предположении совпадения пусков двух двигателей одинаковой мощности. Если же такой случай невозможен для данной установки, то допустимые мощности короткозамкнутых двигателей увеличатся в 2 раза. С точки зрения светотехники несколько менее благоприятны условия для общего трансформатора при электрической сварке на переменном токе. При сварке на постоянном токе толчки значительно сглаживаются механической и электромагнитной инерцией преобразователя. При сварке же переменным током нормальной частоты электромагнитная инерция трансформатора с ротором не в состоянии снижать броски тока такой степени, как мотор-генератор. Методика

подсчета допустимой мощности аппаратов та же, что и для короткозамкнутого двигателя.

Итак, с точки зрения колебаний напряжения, недопустимых в светотехнике, общий трансформатор в большинстве случаев допустим для одновременного питания световых и силовых установок.

Падение напряжения в световой сети. Вопрос о величине допустимого падения напряжения в сети независимо от системы питания не может разрешаться только лишь наличными соотношениями между номинальными напряжениями трансформаторов и ламп или других приемников электроэнергии. Приведем некоторые данные ОСТ на номинальные напряжения: для электродвигателей (ОСТ 678) 127, 220 и 380 V, для ламп (ОСТ 195) 110, 120 и 220 V. На трансформаторах (ОСТ 713) соответствующие вторичные напряжения — 125, 230 и 400 V, а при выводе нулевой точки — 230/133 и 400/231 V. Падение напряжения $\Delta V\%$ в трансформаторах при $\cos \varphi_2 = 0,8$ составит 3,75%, а при $\cos \varphi_2 = 1$ оно равно 2% (см. график). При полной нагрузке превышение напряжения трансформатора над номинальным напряжением электродвигателей и ламп 220 V при $\cos \varphi_2 = 0,8$ равно 1,3-0,8%, при $\cos \varphi_2 = 1$ равно 3-2,5%. Столь малые величины не могут являться предельными, и поэтому при проектировании заводской сети исходят обычно из эластичности и допустимого отклонения напряжения от номинального для приемников электроэнергии без ущерба для эксплуатации.

В эксплуатации же, используя добавочные ответвления трансформаторов (+5%), приспособляются к напряжению, поддерживаемому станцией у пункта питания, причем совпадения его с номинальным напряжением трансформатора нельзя ожидать с точностью выше 1-2%.

Отсюда получается вывод, что сэкономить медь в световой сети при раздельном питании нельзя, так как 1) нельзя предполагать точного совпадения напряжения станции в данной точке сети с номинальным напряжением трансформатора и 2) если бы это и было, то принимая превышение напряжения нагруженного трансформатора над номинальным напряжением приемников за предельное падение напряжения, мы потеряли бы больше на силовой сети, чем выиграли бы на световой.

В самом деле, при общих трансформаторах усматривают перерасход меди в световой сети или неполное использование ламп, но при отдельных трансформаторах упускают из вида условия работы электродвигателей при пониженном напряжении, допуская в сети падение напряжения в 3-5%, когда превышение при $\cos \varphi_2 = 0,8$ составляет только 0,8-1,3%. Это привело бы (см. „Эл-во“ № 18, за 1931 г.) к преувеличению токов электродвигателей и к излишней потери в сети, не говоря уже о возможности перегружать электродвигатели. Последствия того, что напряжение у электродвигателей ниже нормы, оказываются более вредными в эксплуатации, чем недокал ламп.

В несколько иных условиях находятся лампы 120 V при питании их от трансформаторов с напряжением 230/133 V. При индукционной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 0,8$) имеем превышение напряжения трансформатора при полной нагрузке над номинальным напряжением ламп в 7%, а при $\cos \varphi_2 = 1$ в 9%,

в то время как для электродвигателей на 220/127 V превышение составит только около 1% при $\cos \varphi_2 = 0,8$.

В целях сохранения ламп это вынуждает при отдельном световом трансформаторе использовать добавочные ответвления, а при общем — увеличивать падение напряжения в сети (что именно и вызывает уменьшение меди). Эти соотношения, конечно, не могут считаться нормальными и являются одной из „неувязок“ норм.

Скажем несколько слов о перекале ламп при малой нагрузке из-за увеличения напряжения за счет уменьшения падения напряжения. Если период такой работы кратковременный, то это почти не вредит лампам. Если же это носит постоянный характер, то, изменяя соответственно суточный график нагрузки, влияем на выбор трансформаторов, в результате чего продолжительная нагрузка меньше 30—40% мощности трансформатора в эксплоатации обычно не имеет места, а следовательно, повышение напряжения от сбрасывания нагрузки выше 3—2,5% также не может иметь места, т. е. не вызывается опасность перекала ламп.

Вопрос о возможности применения ламп 120 V при всяких напряжениях в силовой сети находится в непосредственной связи с вопросом рентабельности для данной установки того или другого напряжения. Возможно, что в некоторых случаях применение для освещения напряжения 380/220 V будет нецелесообразно, тогда как для электродвигателей оно наиболее подходит и, таким образом, вопрос разрешится в пользу отдельного светового трансформатора¹⁾.

Выключение трансформатора при аварии. При достаточном „освещении безопасности“ от отдельного трансформатора нельзя говорить о серьезном препятствии к установке общих трансформаторов, так как при остановке силового оборудования „рабочие освещенности“ уже в большинстве случаев не нужны.

Рассмотрим преимущества общих трансформаторов.

1. Удешевление установленной единицы мощности подстанции.

а) **Экономия на удельной стоимости трансформаторов.** Наиболее часто встречающиеся мощности световых трансформаторов в промышленных предприятиях колеблются между 30 и 180 kVA или в среднем 100 kVA. Для силового питания мощность одного трансформатора можно ориентировочно принять в 320 kVA. Стоимость (с маслом) понижающего трансформатора на 100 kVA, 6 kV равна 16,5 руб. за 1 kVA, а при 320 kVA и тех же условиях 12 руб. за 1 kVA. Следовательно, экономия на удельной стоимости трансформаторов составит 16,5 — 12 = 4,5 руб.

б) **Экономия на аппаратуре.** Присоединение световой нагрузки к силовым трансформаторам, которая редко бывает выше 25—30% от общей, почти не влечет за собою увеличения стоимости аппаратуры. Самый малый по мощности тип выключателей, треншальтеров и пр. на много превосходит мощности заводских трансформаторов. Стоимость остальной аппаратуры

¹⁾ Противопоставление 380/220 V с изолированной нейтралью системе с заземлением — еще весьма проблематично, чтобы стоило здесь останавливаться на нем как на аргументе за отдельный световой трансформатор.

и кубатура здания незначительно зависят от мощности в данном случае. Установка отдельного светового трансформатора требует затрат на оборудование ячейки масляного выключателя, удаления сборных шин и соответствующего увеличения оборудования щита.

Стоимость оборудования высокого напряжения приходящегося на одну ячейку с масляным выключателем, слагается из: 1) масляного выключателя на 200 A 6 600 V, типа ВМ-14 с непосредственным автоматическим приводом и с маслом стоимостью 800 руб.; 2) однополюсных треншальтеров 200 A, 6,6 kV — 6 шт., по 34 р. 50 коп. 207 руб., 3) соединительных и сборных шин с оборудованием, приходящимся на одну ячейку, около 340 руб., 4) амперметров с трансформаторами тока ТП—102,6 kV, 3 комплекта по 195 руб. 585 руб., 5) счетчиков трехфазного тока 5: 110 V—50 руб., 6) арматуры для сигнальных ламп и пр. 18 руб., 7) монтаж — 250 руб., всего 2 250 руб.

Стоимость оборудования низкого напряжения при установке светового трансформатора складывается из: 1) трехполюсного рубильника типа на 350 A, 500 V—51 руб., 2) предохранителей типа Н на 3 полюса на 350 A 500 kV со всеми ками—28 руб., 3) вольтметра с переключателем—58 руб., 4) стоимости одной третьей панели низкого напряжения, включая шины, соединительные провода, каркас и монтаж около 360 руб. т. е. всего 500 руб.

Экономия на здании. Увеличение стоимости здания подстанции при установке отдельного светового трансформатора, считая по 33 руб. 1 m³ составит 800 руб.

Всего экономии получится 2 250 + 500 + 800 = 3 550 руб., что дает на 1 kVA 35,5 руб. Следовательно, при установке отдельного светового трансформатора в сравнении с системой питания от общего трансформатора имеем увеличение питательных затрат на 3 550 + (1 650 — 12·100) = 4 000 руб., что на 1 kW световой нагрузки ставит в среднем 40 руб., причем значительная часть падает на медь.

Уменьшение установленной мощности трансформаторов. При питании силовой и осветительной нагрузок от общих трансформаторов коэффициент мощности всегда выше, чем при работе трансформаторов без освещения, а следовательно потребная мощность их при данной активной мощности приемников будет в первом случае меньше. При нормальной эксплуатации максимальный расход энергии на электродвигатели и освещение всегда сдвинуты по времени. Полагаем в среднем максимальную мощность освещения в 15% от максимума силовой нагрузки или 13% от суммарного, и, считая участие силового максимума в световом на 90%, при $\cos \varphi_2 = 0,65$, имеем следующий максимум в процентах от суммарного максимума (100%).

$$\sqrt{(87 \cdot 0,9 \cdot 0,65 + 13)^2 + (87 \cdot 9 \cdot 0,76)^2} = 87\%.$$
 Следовательно, установленная мощность трансформаторов меньше при раздельном питании на 13%, при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = \frac{87 \cdot 0,9 \cdot 0,65 + 13}{87} = 0,74$, т. е. на мощность светового трансформатора. Если исходить из средних данных, то экономия на уменьшении установленной мощности трансформаторов составит 1 650 руб.

В случае установки компенсаторов сдвига фаз и уменьшение их установленной мощности в общих трансформаторах на

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_2' - \operatorname{tg} \varphi_2''}{\operatorname{tg} \varphi_2' - \operatorname{tg} \varphi_2} \cdot 100\%,$$

$\operatorname{tg} \varphi_2'$ есть средний за сутки тангенс угла сдвига фаз при работе силового трансформатора в освещении и без компенсации, $\operatorname{tg} \varphi_2''$ — то же, при общей нагрузке, $\operatorname{tg} \varphi_2'''$ — при компенсации наиболее экономичного при данном тарифе коэффициента мощности, полагая его, с некоторым ущербом, одинаковым как для первого, так и для второго случая. Так, например, при коэффициентах мощности, равных $\cos \varphi_2' = 0,6$, $\cos \varphi_2'' = 0,7$ и $\cos \varphi_2''' = 0,95$, уменьшение установленной

мощности компенсаторов составит $\frac{1,33 - 1,04}{1,33 - 0,34} \cdot 100 = 30\%$.

Отсюда получается экономия до 5,8 тыс. руб. Увеличение к. п. д. подстанции. Количественно можно показать на трансформаторах, мощностью 100 kVA (световом) и 320 kVA (силовом). Для светового трансформатора коэффициент загрузки 80%, для силового — 60%, при этом (за период действия освещения) коэффициент мощности 0,6. Тогда для общего трансформатора получим коэффициент загрузки

$$\frac{13 \cdot 0,8 + 87 \cdot 0,6}{87} \approx 70\%,$$

$$\eta = \frac{13 \cdot 0,8 + 87 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{\sqrt{(13 \cdot 0,8 + 87 \cdot 0,6 \cdot 0,6)^2 + 87 \cdot 0,6 \cdot 0,8^2}} = 0,71.$$

Потери (ОСТ 713) при 100% нагрузки для трансформатора 100 kVA в меди = 2200 W в железе = 100 W, всего 2860 W или

$$\frac{2860 \cdot 100}{100 \cdot 1000 + 2860} = 2,8\%,$$

при 80% нагрузке

$$\frac{2200 (0,8)^2 + 660}{100000 \cdot 0,8 + 2200 (0,8)^2 + 660} \cdot 100 = 2,5\%.$$

Для трансформатора на 320 kVA потери в меди 5700 W в железе — 1700 W, всего 7400 W при 3,7% при 100% нагрузке и при $\cos \varphi_2 = 0,6$. При 60% нагрузке и $\cos \varphi_2 = 0,6$:

$$\frac{5700 (0,6)^2 + 1700}{1000 \cdot 0,6 \cdot 0,6 + 5700 (0,6)^2 + 1700} \cdot 100 = 3,15\%$$

При 70% нагрузке и при $\cos \varphi_1 = 0,71$ потери составят 2,75%.

При компенсации до $\cos \varphi_2 = 0,95$ при том же коэффициенте загрузки потери составят 2,05%.

Следовательно, средний к. п. д. подстанции за период действия освещения при отдельном силовом трансформаторе (световую нагрузку принимаем в 15% от силовой) достигнет $100 - (2,5 \cdot 0,13 + 3,15 \cdot 0,87) = 96,9\%$, а при общих трансформаторах $100 - 2,75 = 97,25\%$ и при компенсации до $\cos \varphi_2 = 0,95$ найдем, что к. п. д. = $100 - 2,05 = 97,95\%$.

Этот примерный подсчет показывает, что при благоприятных условиях для общих трансформаторов (высокий $\cos \varphi_2$ силовой нагрузки, малый световой трансформатор и пр.) все же

к. п. д. выше при общих трансформаторах и особенно при установке компенсаторов.

Повышение коэффициента мощности. Прежде всего необходимо выяснить, насколько увеличится угол сдвига фаз, вызываемый самим трансформатором.

Как известно, угол сдвига фаз между напряжением и силой тока первичной цепи для беземкостной нагрузки равен (рис. 2):

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \vartheta_k + \vartheta_0, \quad (5)$$

где φ_2 есть угол сдвига фаз во вторичной цепи трансформатора, ϑ_k — угол, вызываемый полным сопротивлением обмоток трансформатора, ϑ_0 — угол, вызываемый током холостого хода.

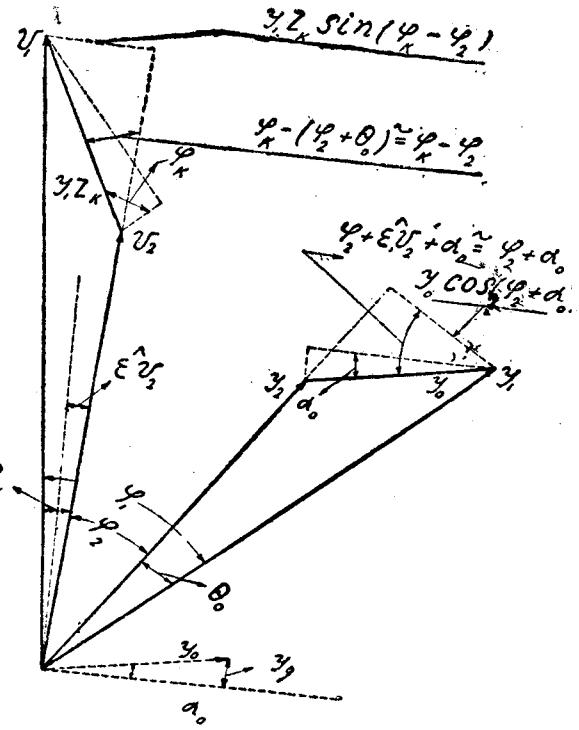


Рис. 2

Численно углы ϑ_k и ϑ_0 определяются через синусы:

$$\sin \vartheta_k = \frac{V_k \%}{100} = \frac{I x_k}{v_1} \cos \varphi_2 - \frac{I r_k}{v_1} \sin \varphi_2,$$

или в виде:

$$\sin \vartheta_k = \frac{I Z_k \%}{100} \sin (\varphi_k - \varphi_2), \quad (6)$$

где $\varphi_k = \arccos \frac{e_r}{e_k}$.

Так как ϑ_k мал при всяких условиях работы трансформаторов, то $\sin \vartheta_k \approx \vartheta_k$.

Далее

$$\sin \vartheta_0 = \frac{V_0 \%}{100 (1+j)} = \frac{\frac{v_1 b_0}{I} \cos \varphi_2 - \frac{V_1 g_0}{I} \sin \varphi_2}{1+j},$$

где b_0 и g_0 — реактивная и активная составляющие проводимости трансформатора при холостом ходе.

Слагаемым в знаменателе $j = \frac{I_1 - I_2'}{I_2'}$ можно пренебречь как величиной порядка сотых долей единицы. Далее преобразуем числитель, исходя из

треугольника тока холостого хода:

$$\frac{v_1 b_0}{I} \cos \varphi_2 - \frac{v_1 g_0}{I} \sin \varphi_2 = \\ = \frac{I_0}{I} \left(\frac{v_1 b_0}{I_0/I} \cos \varphi_2 - \frac{v_1 g_0}{I_0/I} \sin \varphi_2 \right) = \frac{I_0}{I} \cos (\alpha_0 + \varphi_2),$$

где α_0 — угол железных потерь в трансформаторе — может быть определен по ОСТ 713 $\alpha_0 = 22^{\circ} 52' \approx \frac{I_0}{I_0} = \frac{W_0\%}{I_0\%}$.

$$\frac{87 \cdot 0,6 \cdot 0,53 + 13 \cdot 0,8 \cdot 0,99}{\sqrt{(87 \cdot 0,6 \cdot 0,53 + 13 \cdot 0,8 \cdot 0,99)^2 + (87 \cdot 0,6 \cdot 0,84 + 13 \cdot 0,8 \cdot 0,14)^2}} = 0,645.$$

Отсюда

$$\sin \vartheta_0 \approx \frac{I_0}{I} \cos \left(\frac{W_0\%}{I_0\%} 57,3 + \varphi_2 \right), \quad (7)$$

где W_0 — потери в трансформаторе на холостом ходу.

Эту же формулу можно вывести и из диаграммы.

Окончательно имеем

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \frac{IZ_k\%}{100} 57,3 \sin (\varphi_k - \varphi_2) + \\ + \arcsin \left[\frac{I_0}{I} \cos \left(\frac{W_0\%}{I_0\%} 57,3 + \varphi_2 \right) \right]. \quad (8)$$

Из этой формулы видно, что с уменьшением нагрузки, хотя ϑ_k и уменьшается, но φ_1 за счет ϑ_0 увеличивается с уменьшением нагрузки в пределе почти до 90° . С уменьшением φ_2 оба члена увеличиваются.

Применяя эту формулу, имеем для отдельного светового трансформатора $100 \times \text{kVA}$ при $I_0\% = 7\%$ (ОСТ 713), $\varphi_k = 56,5^{\circ}$ (см. таблицу):

$$W_0\% = \frac{0,66}{100} \cdot 100 = 0,66\%;$$

коэффициент загрузки 80%

$$\varphi_1 = \frac{4 \cdot 0,8 \cdot 57,3}{100} \sin 56,5 + \arcsin \left[\frac{7}{80} \cos \frac{0,66 \cdot 57,3}{7} \right] = \\ = 1,5^{\circ} + 5^{\circ} = 6,5^{\circ}, \cos \varphi_1 = 0,99.$$

Для отдельного силового трансформатора на 320 kVA коэффициент загрузки 60%, коэффициент мощности 0,6, $\varphi_1 = 53^{\circ}$, $\varphi_k = 63,5^{\circ}$, $I_0\% = 7\%$:

$$W_0\% = \frac{1,7 \cdot 100}{320} = 0,53\%;$$

$$\varphi_1 = 53 + \frac{4 \cdot 0,6}{100} \cdot 57,3 \sin (63,5 - 53) + \\ + \arcsin \left[\frac{7}{60} \cos \left(\frac{0,53}{7} \cdot 57,3 + 53 \right) \right] = \\ = 53 + 0,25 + 4,4 = 57,7^{\circ} \text{ и } \cos \varphi_1 = 0,53.$$

Для общего трансформатора 320 kVA , коэффициент загрузки 70%, коэффициент мощности 0,7, $\varphi_2 = 45^{\circ}$:

$$\varphi_1 = \frac{45 + 4 \cdot 0,7}{100} \cdot 57,3 \sin (63,5 - 45) + \\ + \arcsin \frac{7}{70} \cos \frac{0,53}{7} \cdot 57,3 + 45 = 45^{\circ} + \\ + 0,56^{\circ} + 3,2^{\circ} = 48,8^{\circ}; \cos \varphi_1 = 0,66.$$

Результирующий коэффициент мощности в подводящем фидере при отдельном световом трансформаторе, при том же соотношении нагрузок

Следовательно, ухудшение коэффициента мощности от трансформации при отдельном силовом трансформаторе несколько больше, на 0,015—2,3%. В данном случае при регулярном выключении взят весьма высокий коэффициент загрузки в эксплуатации же работа светового трансформатора часто проходит почти на холостом ходу.

Возможность использования силовых фидеров для питания освещения²⁾. Обыкновенно падение напряжения в силовых фидерах не превосходит 3%. При включении освещения к силовому фидеру имеем почти все те же явления, что и в общих трансформаторах, а следовательно, рассуждения применимы и здесь, т. е. почти не увеличивая сечения можно питать освещение силового кабеля, но при известном ограничении мощностей короткозамкнутых электродвигателей и колебаний силовой нагрузки.

Резюмируя, можно сказать, что:

1. Система с общим трансформатором, имеющие преимущества, так как дает экономию в капитальных затратах за счет уменьшения стоимости установленного киловольтампера трансформаторной подстанции и суммарной установленной мощности трансформаторов, причем значительная часть экономии падает на затраты на медь.

Ориентировочно экономия может быть оценена в 51,5 руб. на каждый киловатт освещения, т. е. для Советского союза это дало бы десятки миллионов рублей экономии.

2. Экономия энергии за счет улучшения качества трансформаторов в среднем на 0,4—1% ежегодно должно составить для СССР сотни тысяч рублей.

3. Увеличение пропускной способности всем электроснабжения за счет увеличения $\cos \varphi$ в среднем на 2—2,5% дает экономию и на капитальных затратах, и на эксплуатации.

4. Для данного промпредприятия экономия от уменьшения платы за установленную мощность трансформаторов и штрафов за низкий $\cos \varphi$.

²⁾ Использование свинцовой оболочки силовых кабелей в качестве нулевого провода особо подчеркивает преимущества общих трансформаторов.

БИОГРАФИЯ

— Детали электрических машин, перевод с немецкого и дополнения инж. И. Г. Решина, Энергоиздат 1932, ц. 4 руб., стр. 228, 300 рис., тираж 7 200 экз.

из Георга Эспера „Elemente des Elektromaschinenbaus“ включает собою руководство для проектирующих электрические машины невысоких мощностей и напряжений. Вводную часть составляет весьма сжатое описание важнейших материалов, употребляемых в электромашиностроении, далее, излагаются принципы взаимозаменяемости деталей и системы до конструирования различных деталей с основными частями и указаниями о технологических процессах изготавления. Книга при сугубо практическом уклоне дает весьма полезный материал, могущий дать значительную помощь в работе конструктора и производственника-инженера и техника, даже студента.

Искусство и своевременность перевода этой книги на наш язык не требуют подтверждения. Аналогичной по содержанию и в то же время неустаревшей книгой у нас является „Конструирование электрических машин постоянного тока“ Г. П. Тареева и В. П. Биноградова (Энергоиздат, посвященная, как показывает название, лишь машинам постоянного тока).

Переводчик переработал и дополнил некоторые места книги особенно к советским условиям, дал наши нормы и т. п. Но еще более повысилась бы ценность издания, если бы

он в большей степени сделал упор на освобождение нашей электропромышленности от импортной зависимости, на конструкций советских заводов и т. п.

Сам перевод далеко не безупречен. Язык не всегда четок, грешит терминологией, не исправлены некоторые ошибки оригинала. По всей книге путаница в единицах измерений удельных сопротивлений, диэлектрической прочности и пр. Отметим, как пример, ряд дефектов: мицанит из каленой (!) слюды (стр. 35); напряжение на роторе и статоре 500 кВ (!) (стр. 36); сопротивление перекрытию $10^{14} \div 10^{15} \Omega/\text{см}$ (!)—стр. 37. Статит ником образом не „состоит из смеси магнезии и кварца“ (стр. 36). Данные о каучуке и резине (стр. 42—43)—явная бессмыслица. Эбонит отнюдь не „отличается теплостойкостью“ (стр. 43). Путано и совершенно ошибочно изложение о параллельном и последовательном включении диэлектриков на стр. 49. Измышлены переводчиком такие материалы, как „электрорезистин“, „красная бумага“, „обработанная фибра“. Абсурдна, например, фраза „коллекторная медь вытягивается штамповочным молотом из медных брусков“ (стр. 145). Непонятно, что подразумевается под таинственными „лучшими клинкерами“, из коих должны изготавливаться фундаменты машин (стр. 263).

В целом, книга безусловно дает весьма ценный материал, но дефекты перевода требуют от читателя весьма критического подхода к ней.

Инж. Б. Тареев

ХРОНИКА

Подготовка СССР к международным энергетическим конференциям

Идет по участию СССР в международных энергетических конференциях при Госплане Союза ССР, представляющий в Международной электротехнической комиссии, в Международной энергетической конференции, в Международной комиссии по большим электрическим сетям высокого напряжения в Международной комиссии по большим платинам, в своей постоянной работе провел большую подготовительную работу для обеспечения полноценного участия наших исследовательских, производственных и строительных организаций и отдельных специалистов, работающих в области энергетики и электротехники в предстоящих в 1933 г. международных научно-технических собраниях. В результате данной подготовительной работы комитетом представлены традиционным комитетам соответствующих собраний 31 письма, связанных с организационными вопросами заседаний, представляющих докладов, организационные комитеты предстоящих собраний с удовлетворением отмечают общую ценность материала, собранного в представленных комитетах докладах, равно как и значительно большее, чем существовавшие годы, количество их.

В международных собраниях, участие в которых СССР занимается комитетом, в 1933 г. предстоит 3: 1) Европе-очередная сессия 1933 г. Международной конференции по большим электрическим сетям высокого напряжения. Состоится она в Париже 18—24 июня. Вопросы, входящие в программу сессии, разделены на три секции: к первой относятся вопросы, связанные с производством и преобразованием тока, ко второй—вопросы, связанные с соединением, содержанием и изоляцией линий, и к третьей—вопросы, связанные с эксплоатацией и защитой сетей. Комитетом представлено 14 докладов, ниже будет дан подробный их перечень.

Второе собрание—специальная сессия 1933 г. Мировой энергетической конференции. Состоится она в скандинавских странах с 26 июня по 10 июля: открытие в Копенгагене, основное место собраний Стокгольм, где находится и оргкомитет заседаний сессии, ответственность за деятельность которого, равно как и главную часть организационных расходов, возложена на Шведский национальный комитет Мировой энергетической конференции, закрытие сессии в Осло; в течение сессии будут проведены ряд экскурсий по Дании, Швеции, Норвегии и Исландии для осмотра энергоустановок, электрифицированных железных дорог и других объектов, связанных с производством энергетики и ее роли в экономике государственного значения.

В программу входят вопросы, связанные с применением энергии в тяжелой промышленности и на транспорте, программа разбита на два основных отдела и девять секций.

I. Промышленность:

- 1) энергоснабжение,
- 2) смешанные теплосиловые установки,
- 3) специальные вопросы энергетики в промышленности потребляющей отработанные тепло и пар,
- 4) специальные вопросы в железной и стальной промышленности,
- 5) электрическое тепло,
- 6) передача и приспособление движущей силы к промышленным машинам.

II. Транспорт:

- 7) железные дороги,
- 8) городские и пригородные сообщения,
- 9) водные сообщения.

Комитетом СССР представлено 12 докладов, перечень дан ниже.

Одновременно с специальной сессией Мировой энергетической конференции состоится первый пленум Международной комиссии по большим платинам, являющейся организацией, входящей в состав Мировой энергетической конференции. Пленум ее будет третьим из международных собраний, участие в которых подготовлено комитетом. Этому собранию представлено 5 докладов. Небольшое по сравнению с другими собраниями количество докладов обясняется строго ограниченным кругом вопросов, стоящих в повестке дня пленума.

I. Гравитационные плотины из бетона или каменной кладки:

- а) изнашивание бетона от времени,
- б) вопросы, касающиеся влияния внутренней температуры и деформации в гравитационных плотинах.

II. Земляные плотины:

- а) способы испытания материала на пригодность к употреблению при постройке земляной плотины,
- б) изучение физических законов, обуславливающих фильтрацию воды сквозь плотину.

Время и место собраний пленума то же, что и специальной сессии Мировой энергетической конференции.

Список докладов, представляемых сессии 1933 г. Международной конференции по большим электрическим сетям высокого напряжения

Темы	Авторы
1. Защита линий связи от опасных индуктивных влияний линий электропередач.	Н. Девятков, Н. Миролюбов, А. Чернышев
2. Телефония высокой частоты по линиям высокого напряжения.	А. М. Кругляков, А. А. Чернышев, Г. Лавров и Е. Чернышев.
3. К расчету длинных линий передач.	Б. К. Шембель.
4. Прибор для определения дефективных изоляторов в гирляндах, работающих линий электропередач.	А. В. Трамбецкий
5. Способ быстрого нахождения основных размеров мощных трансформаторов при предварительных расчетах.	Чернышев и Глазанов. Виноградов и Савицкий.
6. Некоторые возможности применения трансформатора с изолированным от земли боком.	С. А. Лебедев.
7. Экспериментальная линия 500 кВ ЛЭПИ.	М. М. Горбунов.
8. Устойчивость параллельной работы при передаче энергии на большие расстояния по схеме Баума.	В. Карасев.
9. О влиянии напряжения перед импульсом на коэффициент импульса.	З. П. Черногубовский.
10. Разность потенциалов между витками, обусловленная разрядом блуждающей волны перед трансформатором.	Б. В. Иванов.
11. Выбор способа заземления нейтрали электрических систем высокого напряжения.	С. М. Гохберг.
12. Основные факторы, определяющие размеры открытых подстанций высокого напряжения и возможность стандартизации последних.	М. М. Ситников.
13. Искажение симметрии напряжений трехфазных сетей, вызываемое крупными однофазными потребителями.	
14. О применении ионного преобразователя для передачи электроэнергии постоянным током.	

Список докладов, представленных комитетом Международного собрания 1933 г. I. Специальной сессии Мировой энергетической конференции

Темы	Авторы
1. Московская тэц' сверхвысокого давления.	Ю. Н. Флакер
2. Динамика энерговооруженности и энергобаланса промышленности СССР	В. И. Вей
3. Металлургические печи высокой частоты.	В. П. Волков
4. Электрификация промышленности во втором пятилетнем плане.	М. И. Румянцев
5. Определение мощности электродвигателей для одиночного привода станков и машин.	С. А. Пресняков (Ленинградский машиностроительный институт)
6. Энергоснабжение metallurgической и машиностроительной промышленности в СССР.	Шефтель (ГЭИ, энерго)
7. Топочная техника в Советском союзе	Корниций (ГИИ)
8. Сжигание антрацитовых штыбов в виде пыли.	ВТИ (Комплексные работы по угольным рудникам ГИИ)
9. Сжигание фрезерного торфа во взвешенном состоянии.	Мартынов (ВЭИ)
10. Современные задачи электропривода угольной промышленности СССР.	
11. Ионные преобразователи.	М. М. Ситников
12. Сравнение электросварки постоянным и переменным токами.	Нитусов (ВЭИ)
II. II Пленуму Международной комиссии по большим плотинам	
1. О движении грунтовых вод под плотинами.	Н. Н. Павлов (НИГИ)
2. О фильтрации воды через земляные плотины.	Н. Н. Павлов (НИГИ)
3. Опыты по фильтрации через земляные плотины.	Р. Н. Давидов (НИГИ)
4. Методы испытания, позволяющие определять пригодность данного материала к употреблению его при постройке земляной плотины.	С. В. Избаш (НИГИ)
5. Исследование деформации и температурного режима внутри бетонной кладки плотины Днепростроя.	Ю. А. Никонов (ВИС)

Всесоюзная конференция по качеству высоковольтного фарфора

По инициативе Ленинградского областного НИТО «СТЕКЛОФАРФОР» в конце мая с. г. в Ленинграде созывается Всесоюзная конференция по качеству высоковольтного фарфора.

В повестку работ конференции включены следующие вопросы:

1) Значение высоковольтного фарфора в народном хозяйстве СССР.

2) Технические требования к высоковольтным изоляторам и дальнейшее их применение в связи с развитием техники.

3) Положение дела стандартизации высоковольтных изоляторов.

4) Общее положение с качеством высоковольтных изоляторов.

5) Доклады с мест основных организаций, потребляющих и производящих электрофарфор, по вопросу о качестве высоковольтных изоляторов и о мероприятиях к его улучшению.

6) Доклады институтов ВЭИ и РИКИ о состоянии научно-исследовательских работ в области повышения качества изоляторов, о методике и организации производственного контроля качества.

7) Пути технической реконструкции производства высоковольтного фарфора.

Намечаемая продолжительность конференции—4 дня.

Адрес Оргкомиссии по созыву конференции: Ленинград, проспект 25 октября, д. 21, «СОЮЗСТЕКЛОФАРФОРСТРОЙ», председатель комиссии инж. БЕРКМАН.

ЛАЦИИ

И. Бровштейн—Физика атомного ядра, „Эл-во“, № 6—7, стр. 1.

Изложение современных попыток теоретического и экспериментального фактов из области ядерной физики.

И. Черданцов—Основные принципы конформных и их применения в электротехнике, „Эл-во“, № 6—10.

Излагаются начальные сведения по теории конформных изоморфизмов и по применению их для определения электрических и магнитных полей.

Черышева—Пропускная способность линий цепи-изоморфометрами по концам и настройка линии на напряжение, „Эл-во“, 1933, № 6—7, стр. 19.

Излагается анализ уравнений длиной линии передачи при примерно одинаковой длине полуволны напряжения. Способность линии, длина которой несколько превышает длину волны приложенного напряжения, увеличивается. При частоте в 50 пер/сек и при сопротивлении по концам в пределах от нуля до 100 км.

И. Певзнер—Электрический расчет сложных си-стем, № 6—7, 1933, стр. 24.

Статья рассматривает различные методы электрического расчета высоковольтных сетей, одновременно и последних. В статье освещены вопросы, касающиеся радиальной и кольцевой конфигурации и даются рекомендации на распределение мощностей.

И. Воронов—Влияние высших гармоник кривой напряжения на работу статических конденсаторов, устанавливаемых для исправления коэффициента мощности, № 6—7, стр. 30.

Статических конденсаторов для повышения $\cos \phi$ этой цели лишь в том случае, если кривая напряжения представляет правильную синусоиду. Существование гармоник понижает $\cos \phi$ против расчетной величины определена для правильных синусоид.

Излагаются указанные условия работы конденсаторов, устанавливаются пределы целесообразности установки при различных степенях искажения синусоиды кривой напряжения.

И. С. Архангельский, инж. П. И. Войденов, инж. Б. Н. Глазов—Разряд в воздухе и в масле при про-межуточной частоте и при импульсах, „Эл-во“, № 6—7,

Излагаются экспериментальные данные о разряде в воздухе между простейшими электродами при от расстояния при частоте $f = 50$ до 1000 кВ импульсах 0,2/20, 0,2/80 и 0,2/5 μ сек обеих полярностей. Приведены данные экспериментального исследования напряжений в масле при промышлен-

ной частоте в зависимости от расстояния для электродов игла-плоскость до 600 кВ, при импульсах 0,2/20, 0,2/80 и 0,2/5 μ сек обеих полярностей при различных прочностях масла и различных температурах до 1100 кВ. Приведены также некоторые данные, опубликованные в иностранной литературе.

Инж. А. Е. Машкиллесон и проф. Г. Т. Третьяк—Выбор типа мощного выключателя на 380 В, „Эл-во“, 1933, № 6—7, стр. 40.

Отмечая трудность практического осуществления выключателя на 380 В, автор описывает несколько вариантов конструктивного выполнения такого выключателя и те пути, по которым должно идти дальнейшее его развитие, причем считает наиболее правильным решением вопроса принцип каскадного соединения расширительных выключателей.

Инж. П. Г. Седов—Базисные сопротивления в расчетах токов коротких замыканий, „Эл-во“, 1933, № 6—7, стр. 45.

Критикуя положения тов. Ракушева, автор доказывает: 1) неприемлемость для расчета токов к. з. абсолютных и относительных сопротивлений, 2) необходимость при введении проводимостей прибегать еще к ряду дополнительных преобразований и 3) преимущества для расчета базисных сопротивлений. Выявляется неправильность решения тов. Ракушевым уравнений для трех параллельных линий, доказываются принципиальные ошибки при определении мощности к. з. от двух параллельно работающих генераторов и при расчете треугольника данной сети.

Инж. Е. Н. Приклонский—Допустимые падения напряжения в низковольтных осветительных сетях, „Эл-во“, 1933, № 6—7, стр. 54.

Для определения допустимых падений напряжения имеется формула проф. Хрущова, но она сложна и требует метода последовательного приближения для ее решения. Кроме того, формула проф. Хрущова не учитывает практических и технических требований, предъявляемых к установке, а решает вопрос лишь с точки зрения экономики. Настоящая статья подходит к вопросу выбора падения напряжения не только с экономической точки зрения, но одновременно учитывает практические и технические требования. При этом выведенная формула получает более упрощенный вид, не влияющий все же на точность решения задачи.

Инж. Е. К. Попов—Необходим ли для промышленного предприятия отдельный световой трансформатор? „Эл-во“, № 6—7, 1933, стр. 57.

Выяснив преимущества отдельного светового трансформатора и общего, обслуживающего световую и силовую нагрузку, одновременно автор останавливается подробнее на таких вопросах, как мигание света, падение напряжения в сети, экономия на удельной стоимости трансформаторов, увеличение к. п. д. подстанции и коэффициента мощности. Выводы автора сводятся к тому, что система с общим трансформатором более экономична, нежели при отдельном трансформаторе, что экономия на энергии должна составить для Союза сотни тысяч рублей в год.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Редактор Н. Н. Дьяконов

РЕДКОЛЛЕГИЯ: инж. Е. С. Аватков, проф. В. И. Вейц, инж. В. Н. Глазов, инж. И. Н. Грановская, инж. Я. А. Климовицкий, акад. Г. М. Кржижановский, инж. И. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, инж. Н. А. Савонов, проф. М. А. Шателен, проф. Я. Н. Шильдрайн.

ВРИД. ОТВ. РЕДАКТОР инж. Н. А. Савонов

изд. № 6/III—33 г., подписано к печати 29/IV—33 г. Бумага 62×94. Печатных листов 81/2. Печатных знаков в листе 78 800

изд. В-53190

Москва, типография Госбанка СССР, Юшков пер., 10. Зак. 1656 Тираж 12000

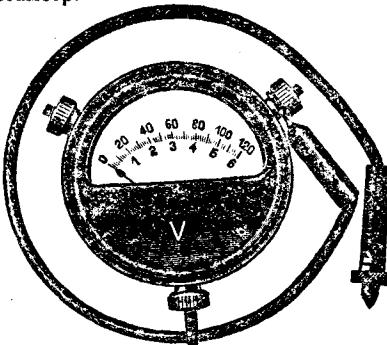
Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

НОВОСТИ!

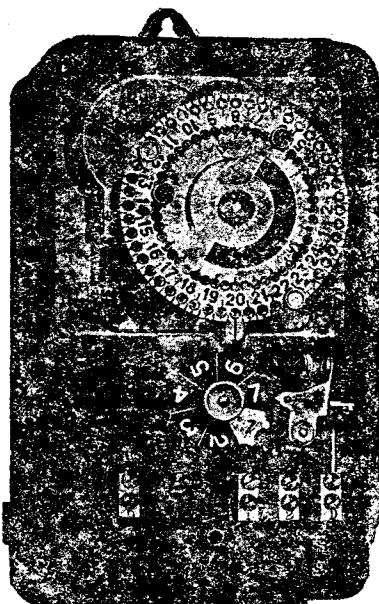
Мы выпустили на рынок большое количество всевозможных новинок:
Лабораторные измерительные приборы в изолированных коробках высокого качества, небольшие дешевые инструменты с вращающимся сердечником или вращающейся катушкой, прибор для проверки радио-ламп, дешевый прибор для радио-измерений, пантаметр.

Требуйте от нас бесплатной присылки новых проспектов!



GOSSEN
ERLANGEN / BAY.

(Германия)



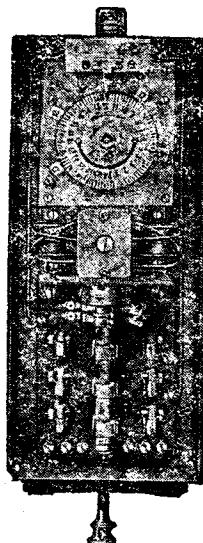
Fr. Ghielmetti & Cie.
Solothurn (Швейцария)

Периодические и стопорные выключатели с часовым механизмом и математические выключатели для уличных фонарей

6672

ФАБРИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ **Фр. САУТЕР, Акц. общ. в БАЗЕЛЕ**

Fabrik elektrischer Apparate Fr. SAUTER, A.-G., BASEL



Автоматический часовой выключатель с электрическим заводом.

6678

Мы строим:

1. **Астрономические** электрические часовые выключатели для автоматического зажигания и тушения уличного освещения для силы тока от 2 до 600 А и для напряжения от 100 до 8000 В.
2. **Автоматические** выключатели, действующие на расстоянии (реле: ртутные, магнитные и моторные).
3. **Электрические** автоматы для счетчиков 2 и 3-го тарифа, холодильных машин, насосных установок, фабричной сигнализации, регулирования уличного освещения, зарядки аккумуляторов и т. п.

Наши изделия выставлены на постоянной выставке "Техпромимпорта".

Поставщики Электроимпорта.

Запросы могут быть составлены и на русском языке.

ЭШЕР ВИС

ЦЮРИХ (Швейцария)



Водоводъемный насос для станции Лак Нуар производительностью $13 \text{ м}^3/\text{сек.}$ и мощностью 27000 л. с., в цеху завода Эшер-Вис

РАВЕНСБУРГ (Вюртемберг)

ВОДЯНЫЕ
ТУРБИНЫ
ТРУБОПРОВОДЫ
ПАРОВЫЕ
ТУРБИНЫ
ТУРБОНАСОСЫ
ТУРБО-
КОМПРЕССОРЫ
ЦЕНТРОФУГИ

ESCHER WYSS

ZURICH (Schweiz)

RAVENSBURG (Württemberg)

6683

Электро-аппаратура

Аппаратура.

Трехполюсные масляные выключатели разовой мощности для напряжений до 150.000 вольт с управлением от руки и электрическое на расстоянии.

Трехшальтеры до 3000 ампер и рабочего напряжения до 150.000 вольт, управление от руки или непосредственное.

Одно и трехполюсные металлические сопротивления в масле для разрядников до 60.000 вольт рабочего напряжения.

Измерительные приборы.

С подвижной катушкой для постоянного тока в распределительных досках. С подвижной катушкой для постоянного тока — переносного типа: для контроля и весьма точные для лабораторий.

Электромагнитические апериодические для переменного тока — переносные а также для распределительных досок.

Электродинамические для постоянного и переменного тока — переносные и для распределительных досок, большой точности.

ЗАВОДЫ ГАЛИЛЕО ФЛОРЕНЦИЯ (Италия)

Сплавы и металлы, плавленные при вакууме

Хромо-никелевая проволока для нагревательных элементов для отапливаемых электрическим калильных печей для промышленности и предметов домашнего хозяйства, с содержанием хрома от 11—33%.

Тянутые без швов трубы из хромо-никеля, плавленного в вакууме, как-то защитные трубы для пирометров и для химической промышленности.

Сплавы высшей теплостойкости для машинных частей, которые должны выдерживать длительные рабочие температуры до 1000°.

Антикатоды из меди, подвернутой плавко в вакууме, для рентгеновских трубок. Свободная от газа чистая никелевая проволока и лента для ламп накаливания, усиленных и передаточных трубок. Свободная от газа токоподводящая проволока для ламп накаливания из сплава железо-никеля.

Термоэлементы из плавленных при вакууме неблагородных металлов с постоянной кривой градуировкой, измерение температур от 800—1100°.

Геренс-Вакуумшмельце

А. О.

Ганау и. М. (Германия)

26253

В наших запросах в иностранные фирмы о присыпке каталога, образцов и проспектов просим ссылаться на № нашего журнала. Издания заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

ВО ВСЕМ МИРЕ

специалистами признано, что

РЕДЗ БУХГОЛЬД

является надежным устройством для защиты

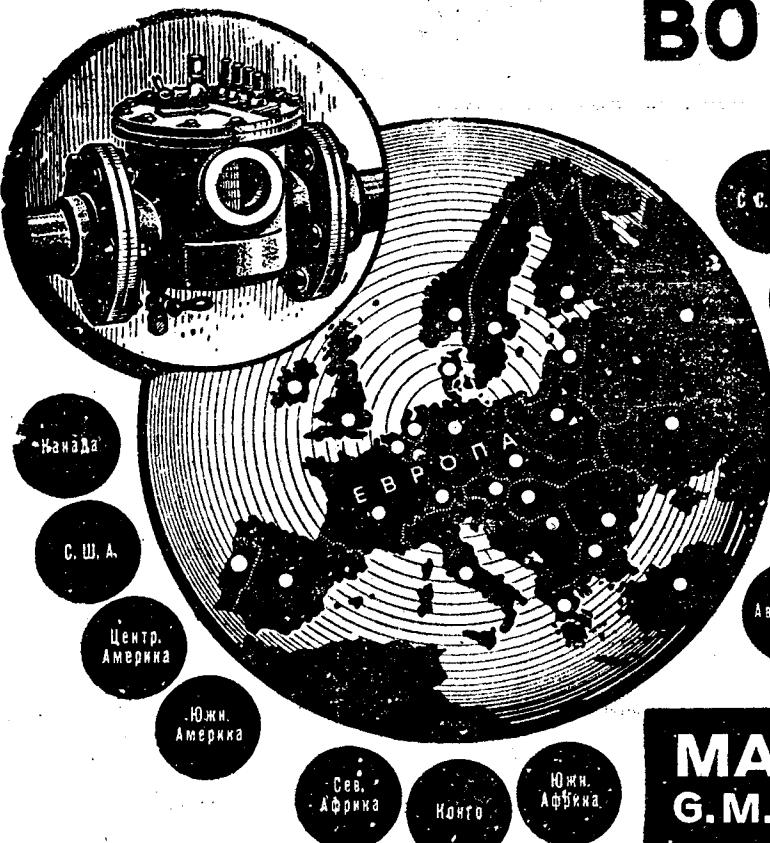
ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время выпущено

11 000 шт.

таких устройств защищены трансформаторы общей мощностью

ок. 45 МИЛЛИОНОВ kVA



MAX BUCHHOLZ
G.M.B.H. KASSEL (ГЕРМАНИЯ)
AMALIENSTRASSE 1

ОНТИ

Энергомиздат

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1933 г. на ЖУРНАЛ

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Год издания 54-й

Орган союзных электро-
энергетических учрежде-
ний и организаций (ВЭО,
Главэнерго НКТП СССР,
Энергетического инсти-
тута, Академии наук
СССР)

20 номеров в год

Подписная цена:

на 12 мес. 24 р.
на 6 мес. 12 р.
Отдельный номер 1 р. 20 к.

В группе энергетических журналов СССР „Электричество“ является основным руководящим научно-техническим органом, рассчитанным на квалифицированных работников электропромышленности и электрохозяйства.

Программа журнала: Современные научно-исследовательские, теоретические и практические проблемы электротехники и в частности вопросы электро- машино- и аппаратостроения и техники высоких напряжений. Наиболее важные технические и технико-экономические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации электростанций и вопросы электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Освещение работы электротехнических научно-исследовательских институтов и крупнейших лабораторий. Освещение работы важнейших энергетических съездов, конференций и ВЭНИТО. Основные вопросы подготовки кадров, рационализация и стандартизация в электроэнергетике и электрохозяйстве. Критическая библиография о вновь выходящей электротехнической литературе. Обзоры электрификации СССР и капиталистических стран. Рефераты на статьи в иностранной электротехнической печати.

Подписка принимается во всех магазинах и отделениях Книгоцентра, у письмоносыцев и на ПОЧТЕ. Розничная продажа производится во всех киосках Союзпечати

При всех запросах к иностранным фирмам с присыпкой каталога, образцов и проспектов просят ссылаться на № нашего журнала. Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.