

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

160600, г. Вологда, ГСП,  
ул. М. И. Ульяновой, дом 1  
Вологодская областная  
библиотека им. Н. В. Гоголя



1957

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека  
[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

5

## СОДЕРЖАНИЕ

Б. З. Уманский, Н. И. Федотов и И. М. Чалидзе — Иркутская гидроэлектростанция . . . . .	1
С. И. Рабинович — Высоковольтные автотрансформаторы для энергетических систем . . . . .	6
О. В. Слежановский — Управление станом с индивидуальным приводом валков . . . . .	12
А. И. Ванеев — Новые требования к автотракторному электрооборудованию . . . . .	20
Н. И. Соколов — Статическая устойчивость передачи с регулируемыми синхронными компенсаторами на промежуточных подстанциях . . . . .	25
Н. Н. Беляков — Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью . . . . .	31
Вацлав Гуса и Ярослав Цигелка — Процессы гашения дуги в воздушных выключателях . . . . .	37
М. О. Каменецкий — Определение токов подпитки при коротких замыканиях в сетях низкого напряжения . . . . .	40
Г. Е. Пухов, О. В. Ильенко и П. М. Чеголин — Электрические модели изгибаемого стержня . . . . .	45
В. В. Бургсдорф — Ветровые нагрузки проводов воздушных линий . . . . .	47
А. Н. Кожин — Защита регулировочного трансформатора . . . . .	52
М. И. Сысов — $\alpha$ , $\beta$ - и $\gamma$ -излучения и электрическая прочность сжатого воздуха . . . . .	56
С. Р. Глинтерник — Расчет электромагнитных процессов в ионных преобразователях . . . . .	60
И. Т. Жердев — Ток шихтовых материалов ферросилициевой печи . . . . .	65
Г. П. Жариков — Магнитоэлектрический гальванометр с круглой рамкой . . . . .	67
Р. П. Жежерин, Г. Н. Крупышев и А. М. Мартынов — Параметрический генератор . . . . .	69
Б. Б. Тимофеев — Прибор для исследования магнитной анизотропии . . . . .	72
К. А. Зайцев — К анализу падения напряжения в каскадной схеме . . . . .	74
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
Ю. Д. Видинеев — Автоматический ионный привод дозатора цемента . . . . .	77
Э. П. Страшинин — Соотношения токов и напряжений при замыкании на корпус в якоре машины постоянного тока . . . . .	78
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b>	
К статье Н. С. Помилуйко и П. Н. Шляхто „Пути улучшения тяговых двигателей постоянного тока“. Безиндукционный конденсатор для емкостного делителя импульсных напряжений . . . . .	81
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Режимы эксплуатации турбогенераторов с водородным охлаждением. Городской рельсовый электро-транспорт за рубежом. Газонаполненные трансформаторы . . . . .	83
<b>ХРОНИКА</b>	
Открытие памятника В. И. Ленину в деревне Кашино. Сессия МЭК в Москве. 100-летний юбилей „Военно-инженерного журнала“. Павел Петрович Копняев. В Техническом управлении МЭС. В комитете по электроэнергии Организации Объединенных Наций. <b>Г. М. Городецкий</b> . . . . .	91
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
В. Н. Голоушкин и А. А. Елисеев — Книга Л. Д. Белькинда, И. Я. Конфедератова, Я. А. Шнейберга „История техники“ . . . . .	95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике . . . . .	96

## CONTENTS

The Irkutsk Hydroelectric Station — B. Z. Umanski, N. I. Fedotov, I. M. Chalidze . . . . .	1
High-voltage Autotransformers for Power Systems — S. I. Rabinovitch . . . . .	6
Controlling a Mill with Separately Driven Rollers — O. V. Slezhanovski . . . . .	12
New Requirements for Automotive and Tractor Electrical Equipment — A. I. Vaneev . . . . .	20
Steady-state Stability of a Transmission System with Regulated Synchronous Condensers at the Sectionalizing Substations — N. I. Sokolov . . . . .	25
A Study of Overvoltages During Arcing Ground Faults in 6 and 10 kV Circuits with Insulated Neutrals — N. N. Belyakov . . . . .	31
Arc Extinguishing Processes in Air Breakers — Vatslav Guza, Jaroslav Tsigelka . . . . .	37
Determining Feed in Currents During Faults in Low Voltage Circuits — M. O. Kamenetski . . . . .	40
Electrical Models for a Bendable Beam — G. E. Pukhov, V. V. Ilyenko, P. M. Chegolin . . . . .	45
Wind Loads on Conductors of Overhead Lines — V. V. Burgsdorf . . . . .	47
Relay Protection of a Regulating Autotransformer — A. N. Kozhin . . . . .	52
$\alpha$ , $\beta$ - and $\gamma$ -radiation and the Dielectric Strength of Compressed Air — M. I. Sisoev . . . . .	56
Calculating Electromagnetic Processes in Electronic Converters — S. R. Glinternick . . . . .	60
Current in the Charge Materials of a Ferrosilicon Furnace — I. I. Jerdiev . . . . .	65
A Permanent-magnet Moving Coil Galvanometer with a Round Frame — G. P. Djarikov . . . . .	67
A Parametric Generator — R. P. Jejerin, G. N. Krupishev, A. M. Martinov . . . . .	69
An Instrument for Investigating Magnetic Anisotropy — B. B. Timofeev . . . . .	72
On Analysing the Voltage Drop in a Cascade Scheme — K. A. Zaitsev . . . . .	74
<b>FROM OPERATING EXPERIENCE</b>	
An Automatic Electronic Drive for a Cement Dosing Tank — U. D. Vidineev . . . . .	77
Current and Voltage Relationships for Frame Faults in the Armature of a D. C. Machine — E. P. Strashinin . . . . .	78
Notes and Letters . . . . .	81
In Other Engineering Journals . . . . .	83
Chronicle . . . . .	91
Bibliography . . . . .	95

# Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью

Кандидат техн. наук Н. Н. БЕЛЯКОВ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Несмотря на длительную историю вопроса, механизм возникновения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной или заземленной через большое активное или индуктивное сопротивление нейтралью и возможная кратность этих перенапряжений остаются недостаточно выясненными. Существуют мнения, согласно которым дуговые перенапряжения могут достигать  $4 \dots 5 U_{\phi}$  и даже больше.

В энергосистемах Советского Союза перенапряжения при дуговых замыканиях на землю считаются безопасными для нормальной изоляции, т. е. изоляции, выдерживающей эксплуатационные испытательные напряжения [Л. 1]. Действительно, опыт эксплуатации показывает, что при систематически проводимых профилактических испытаниях и плано-предупредительных ремонтах сети замыкание одной из фаз на землю не сопровождается пробоями изоляции других фаз [Л. 2]. Однако судить о величине перенапряжений по пробитой или перекрытой в эксплуатации изоляции следует весьма осторожно. При плохом состоянии изоляции сетей, особенно кабельных, и отсутствии профилактических испытаний, в частности, повышенным напряжением может создаваться неправильное мнение о величине дуговых перенапряжений и об их повышенной опасности [Л. 3].

Сущность образования дуговых перенапряжений была вскрыта Петерсеном [Л. 4], который оценил также их максимальные кратности с учетом большинства влияющих факторов, в том числе междуфазной емкости и затухания.

При установлении реальных величин перенапряжений решающее значение имеет поведение дуги, в частности моменты ее гашения и зажигания. Теории образования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, предложенные отдельными авторами [Л. 4...7], основаны именно на различных предположениях о конкретных свойствах дуги. Петерсен полагает, что дуга гаснет при первом прохождении через нуль тока собственных колебаний ( $i_k = 0$ ) и зажигается при прохождении напряжения промышленной частоты на промежутке через ближайший максимум. При такой идеализации свойств дуги приняты самые тяжелые предположения из всех возможных, и поэтому полученный Петерсеном предел перенапряжений безупречно точен.

Однако ни одна из предложенных теорий не получила экспериментального подтверждения. Часто на одной и той же осциллограмме можно наблюдать гашения дуги в соответствии как с теорией Петерсена ( $i_k = 0$ ), так и с теорией Петерса-Слепяна (при прохождении через нуль тока промышленной частоты  $i_{np}$ ). Например, на осциллограмме рис. 1 видно, что дуга

несколько раз гаснет при  $i_{np} = 0$  (точки 1, 3, 6), один раз при  $i_k = 0$  (точка 5). Кроме того, наблюдаются гашения после нескольких переходов тока колебаний через нуль (точка 4).

Таким образом, формы поведения емкостной дуги весьма многообразны и существующие теории не объясняют происходящие в действительности явления. Их общий недостаток заключается в том, что они не учитывают реальных свойств дугового промежутка. Остается невыясненной закономерность гашения перемежающейся дуги.

При измерениях, проведенных в ЦНИЭЛ, Ч. М. Джуварлы не получил перенапряжений, больших  $3U_{\phi}$  [Л. 8], но данное им теоретическое обоснование ограниченности дуговых перенапряжений неубедительно.

Цель настоящей работы посредством систематических опытов определить свойства и поведение емкостной дуги замыкания на землю в сетях 6 и 10 кВ и на основании полученных материалов установить уровень перенапряжений.

Исследования дуги и перенапряжений проводились на моделях сетей, собранных из сосредоточенных емкостей. В основном использовалась модель сети 6 кВ, получающая питание от трансформатора 5 600 кВА, 35/6 кВ. Были проведены также опыты в кабельной сети 6 кВ без нагрузки.

Модели позволяют в широких пределах варьировать условия опытов, и полученные на них величины перенапряжений имеют некоторый за-

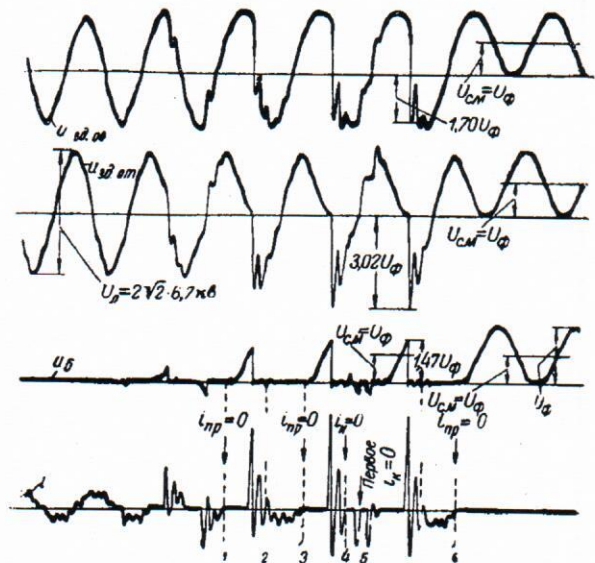


Рис. 1. Дуговое замыкание в трехфазной схеме с изолированной нейтралью.

Напряжение 6 кВ, емкостный ток  $I_C = 105$  А, емкость фазы на землю  $C = 28,8$  мкФ, междуфазная емкость  $C_m = 0$ . Трансформатор 5,6 МВА, 35/6 кВ.  $u_{зд.от}$  — напряжение относительно земли здоровой фазы, опережающей большую;  $u_{зд.от}$  — напряжение относительно земли отстающей от большой;  $u_{\phi}$  — напряжение относительно земли большой фазы;  $i$  — ток дуги.

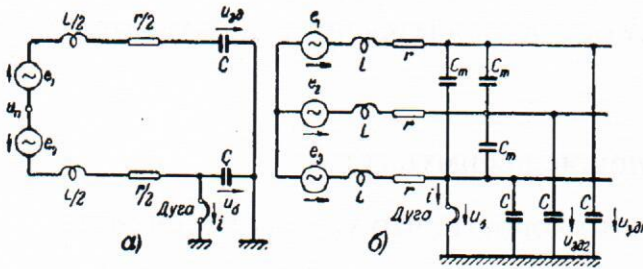


Рис. 2. Схемы сети с изолированной нейтралью. а — однофазная,  $e_1 = U_{\phi} \sin(\omega t + \psi)$ ,  $e_2 = -U_{\phi} \sin(\omega t + \psi)$ ; б — трехфазная,  $e_3 = -U_{\phi} \sin(\omega t + \psi) - \text{э. д. с. большой фазы}$ ,  $e_1 = -U_{\phi}(\omega t + \psi - 120^\circ)$ ,  $e_2 = -U_{\phi} \sin(\omega t + \psi + 120^\circ) - \text{э. д. с. здоровых фаз}$ .

пас, поскольку в реальных условиях распределенная емкость и затухание будут способствовать дополнительному ограничению перенапряжений.

Наибольшее внимание было уделено систематическим опытам с дугой в воздухе, растягиваемой разъединителем. Кроме того, были проведены опыты с дугой на опорном изоляторе, в пазу машины, в кабеле, в масле, в кабельной муфте и др.

**Условия гашения емкостной дуги.** Характер восстановления напряжения в емкостных цепях оказывает большое влияние на поведение дуги. Рассмотрим явления, связанные с гашением емкостной заземляющей дуги, на примере однофазной схемы (рис. 2,а).

Пусть в момент прохождения тока дуги через нуль, когда происходит гашение, напряжение на здоровой емкости равно  $U_0$ . После гашения нейтраль системы смещается на величину  $U_{см} = \frac{U_0}{2}$ . На  $U_{см}$  накладывается напряжение, задаваемое источником. Однако переход к такому установившемуся режиму от начального состояния ( $U_0 = 0$ ) совершается путем «колебаний гашения» с частотой  $\omega_{к.з} = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C}{2}}}$ . Спустя полупериод таких колеба-

ний ( $\frac{T_{к.з}}{2}$ ), после перехода тока через нуль, напряжение на дуговом промежутке достигает первого высокочастотного максимума  $U_{н.з}$  (рис. 3). Второго максимума напряжение достигает в результате изменения э. д. с. с рабочей частотой сети.

Величина высокочастотного максимума восстанавливающегося напряжения равна удвоенной разности между напряжением смещения и мгновенным значением э. д. с. большой фазы. При гашении в момент максимума э. д. с.

$$U_{н.з} = 2(U_{см} - U_{\phi}). \quad (1)$$

Как видно из рис. 2,а, напряжение на емкости здоровой фазы в момент гашения отличается от э. д. с. источника на падение напряжения в индуктивности цепи, поэтому

$$U_{см} = \frac{U_0}{2} = \frac{2U_{\phi} + L \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0}}{2}$$

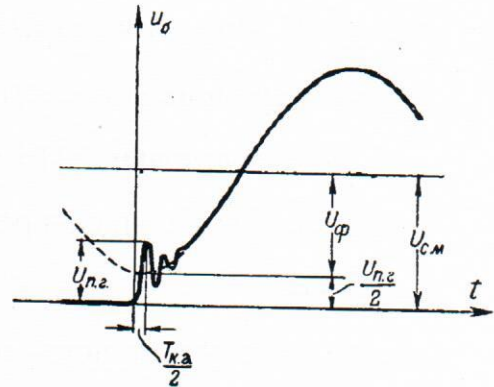


Рис. 3. Восстановление напряжения на поврежденной фазе при гашении емкостной дуги.

Подставив  $U_{см}$  в выражение (1), получим:

$$U_{н.з} = L \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0}, \quad (2)$$

т. е. высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения равен падению напряжения на индуктивности цепи в момент, когда ток достигает нулевого значения. Соотношение (2) остается справедливым при любой фазе э. д. с. источника в момент гашения.

Восстановление напряжения при гашении дуги замыкания на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью (рис. 2,б) также имеет характер, указанный на рис. 3.

Более тщательное исследование процесса гашения дуги при помощи катодного осциллографа позволило установить следующий существенный факт: гашение открытой емкостной дуги замыкания на землю имеет место при каждом прохождении тока дуги через нуль, однако через малую долю периода собственных колебаний дуга восстанавливается вновь. Восстановление дуги происходит вследствие пробоя промежутка во время восстановления напряжения на нем до первого максимума (рис. 4, точки 1...5). При большой

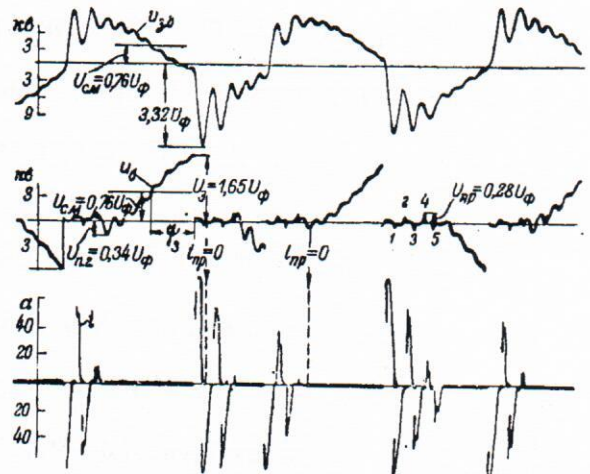


Рис. 4. Дуговое замыкание в однофазной схеме с изолированной нейтралью.

Дуга на разъединителе,  $I_c = 4,4 \text{ а}$ ,  $C = 2 \text{ мкф}$ ;  $C_m = 0$ . Трансформатор 5,6 Мва, 35/6 кв.

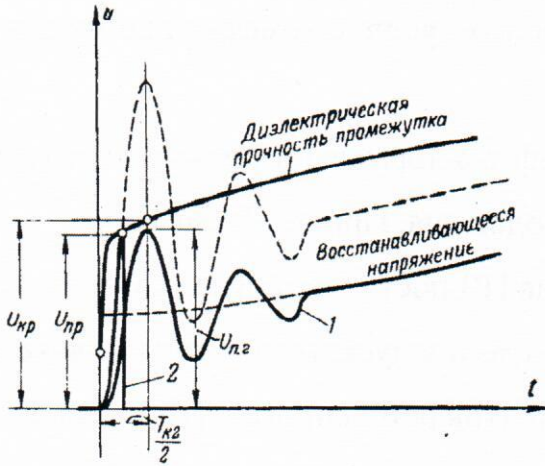


Рис. 5. Гашение и восстановление дуги.  
1 — завершившееся гашение; 2 — незавершившееся гашение.

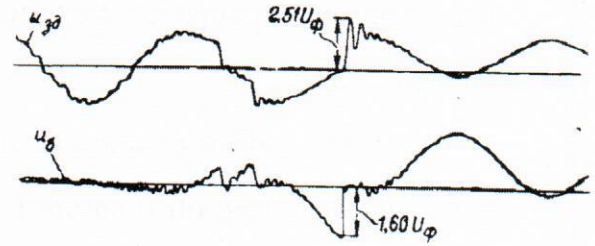


Рис. 7. Дуговое замыкание в однофазной схеме с изолированной нейтралью (дуга в масле).  
 $I_C - 11$  а;  $C - 5$  мкф;  $C_m - 0$ . Трансформатор 3,2 Мва, 35/6 кв.  $u_{зд}$  — напряжение здоровой фазы;  $u_b$  — напряжение больной фазы.

крутизне тока пробой происходит задолго до достижения восстанавливающимся напряжением своего первого максимума. Напряжение такого пробоя обозначим  $U_{пр}$ . О наличии гашения и быстро следующего за ним пробоя говорит также то, что в каждый новый полупериод ток высокой частоты имеет на осциллограммах «размытый» фронт, что объясняется «броском» разрядного тока емкости больной фазы.

Основной интерес представляют условия, при которых емкостная дуга гаснет на более длительное время (на часть периода промышленной частоты). Опыт показывает, что такое гашение возможно лишь в том случае, если первый максимум восстанавливающегося напряжения не превосходит определенной критической величины:

$$U_{н.г} \leq U_{кр}. \quad (3)$$

Величина  $U_{кр}$ , очевидно, характеризует диэлектрическую прочность промежутка для времени, равного полупериоду колебаний гашения. При несоблюдении условия (3) гашение не завершается, т. е. дуга восстанавливается вновь (рис. 5).

Чтобы из осциллограмм определить численное значение  $U_{кр}$ , необходимо для каждого прохождения тока через нуль определить величину  $U_{н.г}$  или  $U_{пр}$ . На рис. 6 дано распреде-

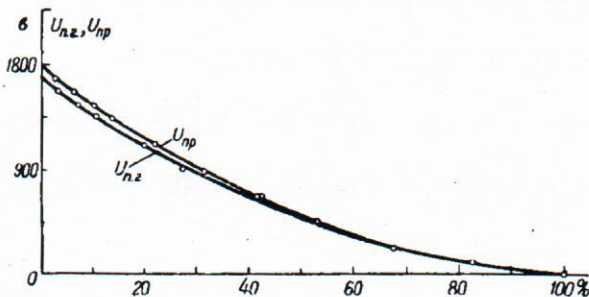


Рис. 6. Кривые распределения величин  $U_{н.г}$  и  $U_{пр}$  (построены на основании 2800 гашений).

ление повторяемости этих величин, общее для всех емкостных токов, так как величина тока на это распределение практически не влияет. Максимальные значения  $U_{н.г}$  и  $U_{пр}$  мало отличаются одно от другого и можно указать их общую верхнюю границу, равную 1800 в. Эта граница и определяет  $U_{кр}$ .

Опыт показывает, что скорость растяжения дуги разъединителем влияет только на рост напряжений зажигания, но не на условия гашения. Отсутствие влияния величины тока и скорости растяжения на условия гашения емкостной дуги обусловлено одинаковым ростом во всех случаях диэлектрической прочности промежутка при малых временах, что возможно объясняется значительной ролью приэлектродных участков и термической инерционностью столба дуги.

При обработке результатов опытов были использованы все осциллограммы со сравнительно большими значениями  $U_{н.г}$  и  $U_{пр}$ . Кроме этого, в нашем распоряжении имеются осциллограммы, на которых зарегистрировано свыше 12 тыс. гашений, с величинами  $U_{н.г}$  и  $U_{пр}$ , меньшими полученного максимума.

Задача сводится к тому, чтобы определить верхнюю границу  $U_{кр}$ . Поэтому следует исходить из наименее возможной на практике частоты колебаний гашений. Установленное выше значение  $U_{кр}$  получено в результате опытов, в которых эта частота изменялась вплоть до  $\omega_{к.г} = 5\omega$ , в то время как в реальных сетях она в 10 и более раз превосходит промышленную.

Установленная выше величина  $U_{кр}$  равна  $0,37U_{\phi}$  для сетей 6 кв и  $0,22U_{\phi}$  для сетей 10 кв. Для единообразия расчетов, а также желая иметь некоторый запас при оценке возможных перенапряжений, примем<sup>1</sup> для сетей 6 и 10 кв  $U_{кр} = 0,4U_{\phi}$ . Таким образом,

$$U_{н.г} \leq 0,4U_{\phi}. \quad (4)$$

Опыты с дугой на опорном изоляторе, в пазу машины, в кабеле, в масле и в кабель-

<sup>1</sup> Принятое нами округление приводит в случае сетей 10 кв к преувеличению кратности дуговых перенапряжений примерно на 3%.

ной муфте дают соотношения между  $U_{п.з}$  и  $U_{\phi}$ , близкие к установленному для дуги на разъединителе. Следовательно, величина высокочастотного максимума восстанавливающегося напряжения  $U_{п.з}$  при различных способах зажигания дуги остается ограниченной (рис. 7), а максимальное перенапряжение таким же, как при дуге на разъединителе.

Особенностью дуги в кабеле и в пазу машины является малое напряжение зажигания ( $U_s < U_{\phi}$ ), величина его в процессе горения почти не меняется. Дуга может гореть очень долго.

**Максимальные перенапряжения.** Чрезвычайно важной величиной является напряжение смещения нейтрали (общий потенциал сети относительно земли после гашения дуги), которое в силу ограниченности напряжения  $U_{п.з}$  также ограничено. Действительно, из рис. 3 видно, что

$$U_{см} = U_{\phi} + \frac{U_{п.з}}{2}. \quad (5)$$

А так как  $U_{п.з} \leq 0,4U_{\phi}$ , то всегда

$$U_{см} \leq 1,2U_{\phi}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) справедливы как для однофазной, так и трехфазной схемы.

Величину перенапряжения можно определить по формуле

$$U_{пер} = U_{кон} + (U_{кон} - U_{нач}) \frac{C}{C + C_m} (1 - d), \quad (7)$$

где  $U_{кон}$  и  $U_{нач}$  — конечное и начальное напряжения;

$C$  и  $C_m$  — емкости соответственно между фазой и землей и между фазами;

$\frac{C}{C + C_m} (1 - d)$  — коэффициент, учитывающий уменьшение амплитуды колебаний из-за междуфазной емкости и затухания.

Эксперименты показывают, что главной причиной затухания являются не потери в дуге, как считалось некоторыми исследователями [Л. 8], а потери в остальной цепи. При металлическом замыкании не наблюдалось уменьшения затухания по сравнению с затуханием при повторных зажиганиях дуги. Очень часто при растяжении дуги падение напряжения в ней даже к моменту окончательного гашения (обрыва) значительно меньше э. д. с. источника (50 ... 100 в против 6 000 в). При этом коэффициент  $1 - d$  может быть равен 0,98 ... 0,99 [Л. 7, стр. 530]. При измерениях на моделях наибольшее значение коэффициента ( $1 - d$ ) получилось равным 0,9. Из этой величины и следует исходить при определении максимальных перенапряжений, так как в реальной сети затухание больше.

Опыт показывает, что следует считаться с возможностью зажигания в любой момент, в том

числе в момент, когда перенапряжение получается наибольшим.

Таким образом, зная величину напряжения смещения и коэффициента затухания и исходя из того, что зажигание произошло в момент, когда перенапряжение получается наибольшим, можно определить максимальное перенапряжение.

Исходя из того, что зажигание произошло в момент максимума, э. д. с. больной фазы, знак которого совпадает со знаком напряжения смещения, для однофазной схемы и при  $C_m = 0$  будем иметь:

$$U_{нач} = U_{\phi} - 1,2U_{\phi} = -0,2U_{\phi}$$

и

$$U_{пер} = 2U_{\phi} + [2U_{\phi} - (-0,2U_{\phi})] 0,9 \approx 4U_{\phi}.$$

Применим формулу (7) к трехфазной сети. Считаем, что э. д. с. больной фазы изменяется по закону  $e_3 = -U_{\phi} \sin(\omega t + \psi_3)$ , причем отсчет времени ведется от момента зажигания. Определим величину положительного перенапряжения ( $U_{пер} > 0$ ) на здоровой фазе, отстающей от поврежденной. Учтя, что для возникновения такого перенапряжения необходимо зажигание при отрицательном значении э. д. с. больной фазы и при наличии в сети отрицательного смещения ( $U_{см} < 0$ ), имеем:

$$\begin{aligned} U_{нач} &= -U_{\phi} \sin(\psi_3 - 120^\circ) + U_{см} = \\ &= U_{\phi} \cos(30 - \psi_3) + U_{см}; \\ U_{кон} &= \sqrt{3}U_{\phi} \sin(\psi_3 + 30^\circ); \\ U_{пер} &= \sqrt{3}U_{\phi} \sin(\psi_3 + 30^\circ) + \\ &+ (U_{\phi} \sin \psi_3 - U_{см}) \frac{C}{C + C_m} (1 - d). \quad (8) \end{aligned}$$

Максимальное перенапряжение получается в случае зажигания при

$$\psi_3 = \arctg \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{C}{C + C_m} (1 - d) + \sqrt{3} \right].$$

При  $C_m = 1/3C$ , что характерно для кабельных сетей 3 и 10 кВ, и  $1 - d = 0,9$  наибольшие перенапряжения будут иметь место при  $\psi_3 = 68^\circ$ , т. е. в том случае, когда зажигание несколько опережает максимум напряжения. Подставляя в формулу (8) величины:  $1 - d = 0,9$ ,  $C = 3C_m$ ,  $\psi_3 = 68^\circ$  и  $U_{см} = -1,2U_{\phi}$ , определяющие максимум перенапряжения, получим:

$$U_{пер.б} = 3,2U_{\phi}.$$

На больной фазе перенапряжения могут достигать величины

$$U_{пер.б} = U_{см} + U_{\phi} = 2,2U_{\phi}.$$

Образование максимального перенапряжения в трехфазной системе иллюстрируется рис. 8.

Для проверки расчетных максимальных перенапряжений были произведены массовые измерения при помощи катодного осциллографа при очень малой скорости развертки. Осциллограмма, полученная таким образом на однофазной схеме, дана на рис. 9.

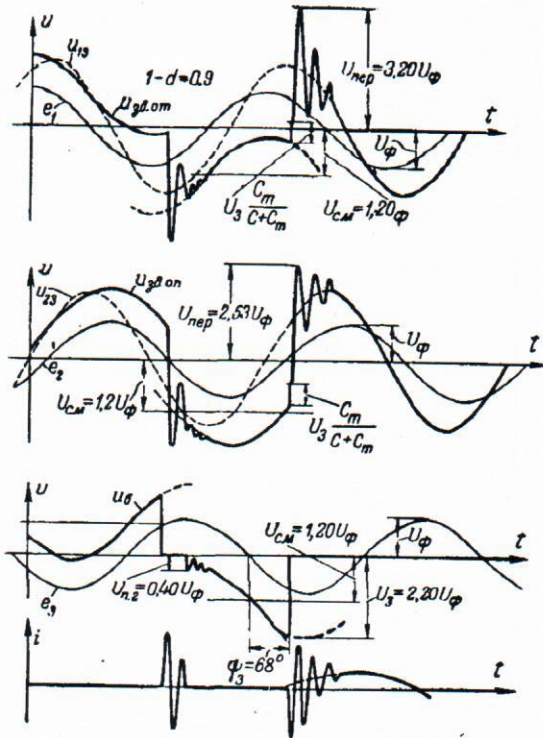


Рис. 8. Образование максимальной кратности перенапряжений в трехфазной сети с изолированной нейтралью.  $u_{зд.ом}$  — напряжение отстающей здоровой фазы;  $u_{зд.з}$  — напряжение опережающей здоровой фазы;  $u_б$  — напряжение большой фазы;  $i$  — ток дуги.

В таблице приведены расчетные и измеренные максимальные перенапряжения для трехфазной схемы. Из таблицы видно, что измеренные величины хорошо согласуются с расчетными. Максимальные перенапряжения практически не зависят от емкостного тока и возникают крайне редко, так как для этого требуется совпадение ряда условий.

Расчетные величины	$C_t$ , мкф	$I_c = 7,5$ а, $C = 2$ мкф		$I_c = 23$ а, $C = 6$ мкф		$I_c = 45$ а, $C = 12$ мкф		$I_c = 100$ а, $C = 30$ мкф		Число замыканий
		$U_{пер}$	$U_{пер.б}$	$U_{пер}$	$U_{пер.б}$	$U_{пер}$	$U_{пер.б}$	$U_{пер}$	$U_{пер.б}$	
3,62	0	3,45	2,00	—	—	—	—	—	—	200
3,62	0	—	—	3,30	2,02	—	—	—	—	100
3,20	2	—	—	2,91	2,15	—	—	—	—	200
3,62	0	—	—	—	—	3,50	2,10	—	—	200
3,20	4	—	—	—	—	3,05	2,14	—	—	300
3,62	0	—	—	—	—	—	—	3,44	2,12	100

Действительный механизм развития перенапряжений. Гашение имеет место в тех случаях, когда высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения достаточно мал, а следовательно, достаточно мала и крутизна тока при переходе через нуль. Это бывает при первом переходе тока колебаний через нуль (обычно при малых напряжениях зажигания) или после неко-

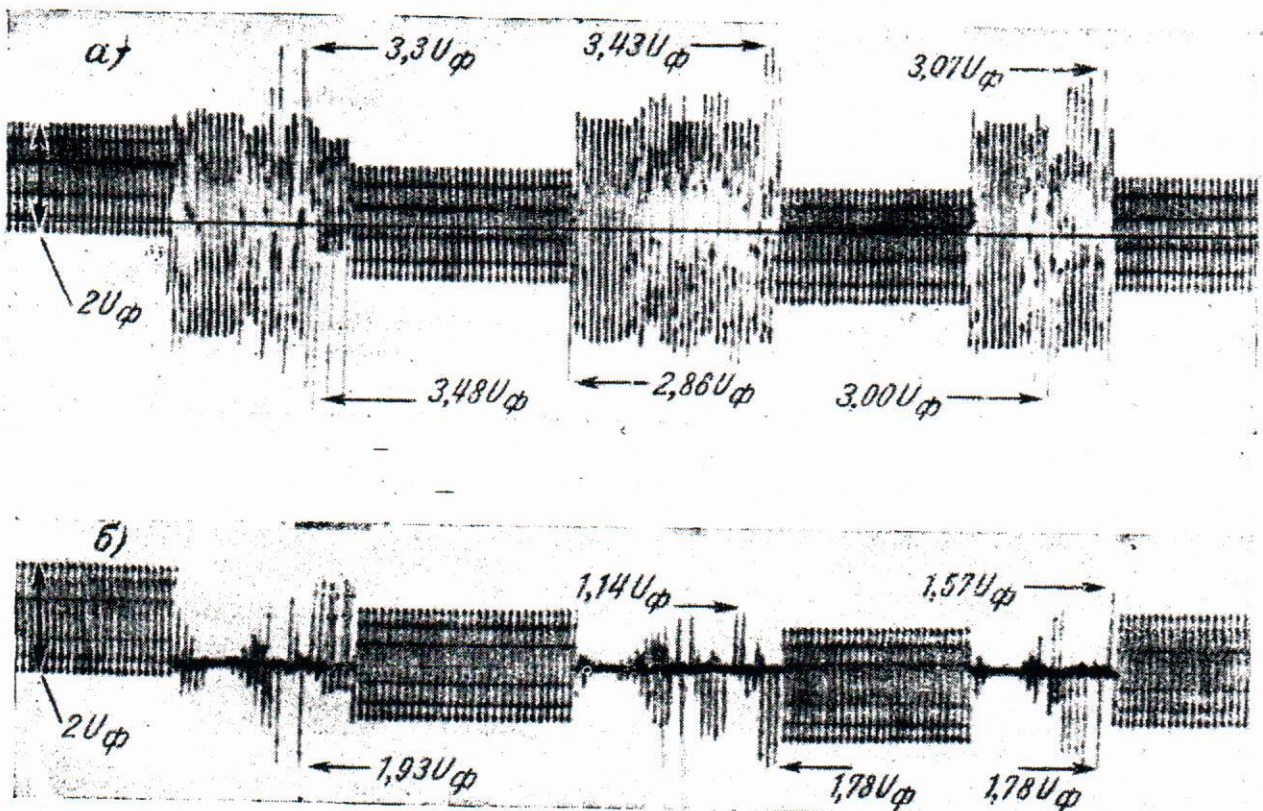


Рис. 9. Кратности перенапряжений при однофазной схеме с изолированной нейтралью.  $I_c = 55$  а,  $C = 25,3$  мкф,  $C_t = 0$ . Трансформатор 3,2 Мва, 35/6 кв. а — напряжение здоровой фазы; б — напряжение большой фазы

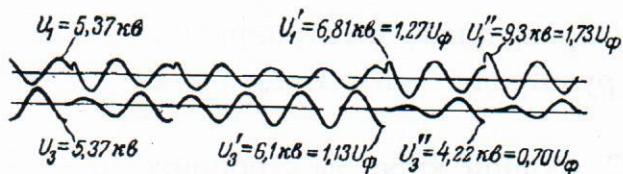


Рис. 10. Дуговое замыкание на изоляторе в компенсированной кабельной сети 6 кВ с нагрузкой.

$U_1$  — напряжение здоровой фазы;  $U_3$  — напряжение больной фазы. Степень расстройки  $\nu$  — 9%. Ток замыкания на землю  $I_3 = 9,6 \text{ а}$ .

торого затухания переходного процесса. Возможно также гашение дуги после перехода тока колебаний в ток промышленной частоты в момент, когда последний достигнет нуля.

Для возникновения максимального перенапряжения не требуется ряда повторных зажигания. Поэтому при его определении достаточно рассмотреть один цикл гашение — зажигание. В этом цикле гашение должно происходить в момент максимума э. д. с. больной фазы и при максимально допустимой для гашения крутизне тока, а последующее зажигание должно несколько опережать максимум напряжения. Причиной часто наблюдаемого увеличения перенапряжений к концу горения дуги является не кумулятивность (не рост напряжений смещения), а постепенное возрастание напряжений зажигания в силу растягивания дуги.

Повышение напряжения смещения нейтрали связано с одновременным увеличением высокочастотного максимума восстанавливающегося напряжения. Реальный дуговой промежуток не может противостоять быстрому нарастанию напряжения, так что возможный максимум колебаний гашения ограничен, а следовательно, ограничено и напряжение смещения. Таким образом, предел перенапряжений обусловлен конечной и сравнительно небольшой прочностью дугового промежутка, который по самой природе явлений не может деионизироваться мгновенно.

Коэффициент затухания  $(1-d)$ , полученный из опытов в ненагруженной кабельной сети 6 кВ, составляет 0,7...0,75. Он, естественно, меньше, чем на модели. На затухание в реальных сетях может сильно влиять сопротивление пути тока собственных колебаний. Влияние может оказаться столь значительным, что система окажется неспособной к колебаниям. Это бывает в тех случаях, когда замыкание на землю в мощной сети со значительным емкостным током происходит в месте, удаленном от основной системы. Сказанное хорошо иллюстрируется осциллограммой<sup>2</sup> рис. 10, полученной в работающей сети с емкостным током 100 а. Замыкание на землю осуществлялось в месте, электрически удаленном от

<sup>2</sup> Осциллограмма любезно предоставлена Ф. А. Личачевым (ОРГРЭС).

питающих шин. Переходный процесс после зажигания — аperiodический. Напряжение здоровой фазы не превышало линейного напряжения, т. е. перенапряжения отсутствовали.

**Заключение.** Закономерности гашения перемежающейся дуги замыкания на землю и возможные величины перенапряжений при различных условиях ее горения (в том числе и при различных напряжениях сети) следует искать путем определения диэлектрической прочности дугового промежутка непосредственно после гашения и сравнения ее с величиной высокочастотного максимума восстанавливающегося напряжения.

Гашение емкостной дуги не управляется ни частотой собственных колебаний, ни рабочей частотой сети. Гашение происходит, если высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения меньше определенной величины. Условия гашения дуги приводят к ограничению напряжения смещения нейтрали.

Поскольку контрольные опыты при различных условиях образования дуги согласуются с результатами исследования дуги на разъединителе, можно сделать общее заключение о величине перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. Максимальные значения этих перенапряжений не превосходят  $3,2 U_{\phi}$ , не зависят непосредственно от величины емкостного тока и возникают крайне редко, так как для их возникновения требуется совпадение ряда условий. При больших емкостных токах дуга может стать более устойчивой и тем снизить перенапряжения.

Автор выражает глубокую благодарность В. В. Бургсдорфу за ряд ценных указаний, использованных при выполнении настоящей работы.

#### Литература

1. О режиме заземления нулевой точки и защите от замыканий на землю в сетях 6—35 кВ. Решение Технического отдела МЭС № 89/3 от 28 мая 1949 г. Электрические станции, № 10, 1949.
2. И. А. Сыромятников. Режим работы сетей с малым током замыкания на землю. Электрические станции, № 2, 1951.
3. Н. Н. Беляков. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях. Электрические станции, № 6, 1952.
4. W. Petersen. Der aussetzende Erdschluss. ETZ, № 47, стр. 553, № 48, стр. 564, 1917.
5. J. F. Peters, J. Slepian. Voltages Induced by Arcing Grounds. Tr. AIEE, стр. 478, 1923.
6. C. P. Steinmetz. Frequency Conversion by Arcing Class Conductor and Mechanism of the Arcing Ground. Tr. AIEE, стр. 470, 1923.
7. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электрических системах. Издательство иностранной литературы, 1955.
8. Ч. М. Джуварлы. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью. Электричество, № 6, 1953.

[4. 9. 1956]

