

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Е. УСАЧЕВ

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ:
ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Учебное пособие

Казань 2014

УДК 621.373(075.8)

ББК 31.24

У74

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник Приволжского федерального университета
им. В.И. Ульянова-Ленина *В.А. Иваньшин*;
доцент Казанского государственного
энергетического университета *Н.В. Денисова*

Усачев А.Е.

У74

Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: получение высоких напряжений: учеб. пособие / А.Е. Усачев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 103 с.

В пособии приводятся: описание принципа действия и схемы установок для получения высоких напряжений промышленной частоты, схемы и установки для получения постоянных высоких напряжений, импульсные испытательные и электрофизические установки.

Пособие предназначено для успешного освоения дисциплины «Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения» студентами направления подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и будет полезно инженерам, занимающимся вопросами испытаний высоковольтного оборудования и его использования в различных технологических процессах.

УДК 621.373(075.8)

ББК 31.24

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие основано на курсе лекций, которые читаются более 10 лет в Казанском государственном энергетическом университете по дисциплине «Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения», относящейся к вариативной части профессионального цикла ООП подготовки бакалавров по профилю «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника», направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Развитие электроэнергетики и удаленность энергетических ресурсов от мест их потребления привело к созданию обширной и протяженной системы электропередач высокого напряжения. Надежность работы установок высокого напряжения и их устойчивость к воздействию как внешних (грозовых) так и внутренних перенапряжений напрямую связана с системой контроля и испытания изоляционных конструкций.

В пособии рассматриваются принципы получения высоких напряжений, схемы и конструкции установок трех типов: установки промышленной частоты (50 Гц), установки постоянного напряжения, установки для получения импульсных напряжений и токов различной формы и длительности.

Пособие может использоваться в учебном процессе при проведении лекционных, практических занятий, при выполнении студентами лабораторных и курсовых работ по дисциплине «Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения»; при выполнении выпускных квалификационных работ по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также может быть интересно специалистам, занимающимся испытанием и эксплуатацией установок высокого напряжения.

ГЛАВА 1. УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

§ 1.1. Общие вопросы и определения

Одним из видов испытаний электрооборудования высокого напряжения являются испытания повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение превышает рабочее и его приложение создает в испытываемой изоляции повышенную напряженность электрического поля. Это позволяет обнаруживать дефекты, вызвавшие недопустимое для дальнейшей эксплуатации объекта снижение электрической прочности изоляции. При конструировании и выборе испытательных установок промышленной частоты важным моментом является правильный выбор источника переменного напряжения. На выбор параметров источника переменного напряжения оказывает существенное влияние его назначение. В отличие от силовых трансформаторов промышленной частоты или генераторов высокого напряжения, используемых в энергетике, в процессе разработки и испытаний изоляции электротехнического оборудования требуются при относительно малой мощности источника лишь высокие напряжения. Частота переменного напряжения изменяется от 16,75 Гц в электротяговых системах, до 50 или 60 Гц в электроэнергетических системах, и до 100÷200 Гц при испытаниях обмоток аппаратов с ферромагнитными сердечниками для предотвращения их насыщения. Эти испытательные переменные напряжения получают, как правило, от специально разработанных однофазных трансформаторов. Так как при испытаниях изоляции, представляющей собой емкостную нагрузку, потребляется небольшая активная мощность, то широко применяются также резонансные схемы.

Важную роль при испытаниях напряжением промышленной частоты имеет качество синусоиды напряжения. Общие требования к качеству электроэнергии определяются международными нормами [1] и ГОСТ 13109-97 [2]. Так, согласно МЭК и ГОСТ, фактическое максимальное значение $U_{\text{макс}}$ не должно отличаться более чем на $\pm 5\%$ от эффективного значения $U_{\text{эфф}}$, умноженного на $\sqrt{2}$. Это условие достигается при вкладе высших гармоник (3, 5 и 7 в основном) не более 5 % для всей испытательной установки. Одной из причин появления таких требований является необходимость сопоставления результатов исследований, проводимых в различных исследовательских лабораториях [3].

Для большинства видов изоляции разрядное напряжение зависит от наибольшего мгновенного значения приложенного напряжения $U_{\text{макс}}$. Требуемое испытательное переменное напряжение определяется во

многим теми электрическими воздействиями, которые испытывает аппарат при работе в сети. Действующие значения испытательных напряжений нормированы [2] и меняются в широких пределах от 5 кВ до 1,5 МВ. Испытательные напряжения различаются по величине:

- а) в сухом состоянии (сухоразрядное) и под дождем (мокроразрядное);
- б) относительно земли и между фазами;
- в) с требованием проверки на отсутствие частичных разрядов и без проверки частичных разрядов;
- г) между контактами (разомкнутыми) коммутационных аппаратов.

Величина испытательного напряжения зависит также от типа аппарата высокого напряжения и типа его изоляции. Длительность воздействия испытательного напряжения обычно составляет одну минуту, но иногда пять минут. С помощью кратковременных испытательных воздействий должно быть получено подтверждение, способен ли аппарат выдержать длительные воздействия номинального напряжения при эксплуатации в течение десятков лет, а также кратковременно возникающие перенапряжения. Так как у большинства применяемых жидких и твердых изоляционных материалов в большей или меньшей степени изоляционные свойства ухудшаются в зависимости от времени эксплуатации, а их электрическая прочность снижается со временем, т.е. изоляция стареет, то испытательное напряжение должно быть существенно выше, чем рабочее. При разработке изоляции нового электрооборудования испытания проводятся еще большими напряжениями, чтобы оценить степень надежности изоляции. Для этого в лабораториях имеются специальные испытательные трансформаторы, номинальное напряжение которых в 2–5 раз в зависимости от вида оборудования и класса напряжения превышает рабочее напряжение трехфазных линий электропередач и номинальное напряжение аппаратов высокого напряжения.

Общая схема установки с элементами управления приведена на рис. 1.1.

На рисунке используются следующие условные обозначения [4, 5]:

а) А – общий рубильник; К1 и К2 – магнитные пускатели; РН – регулятор напряжения; РМ – реле максимального тока; ИТ – испытательный трансформатор; R_0 – ограничивающее сопротивление; 1 – объект испытания; 2 – стабилизирующая емкость; 3 – измерительное устройство;

б) КП1, КС1, К1 и Р1 – кнопки пуск, стоп, контакты и обмотка магнитного пускателя К1; КП2, КС2, К2 и Р2 – кнопки пуск, стоп, контакты и обмотка магнитного пускателя К2; РМ – контакты реле максимального тока; ДК – дверной контакт.

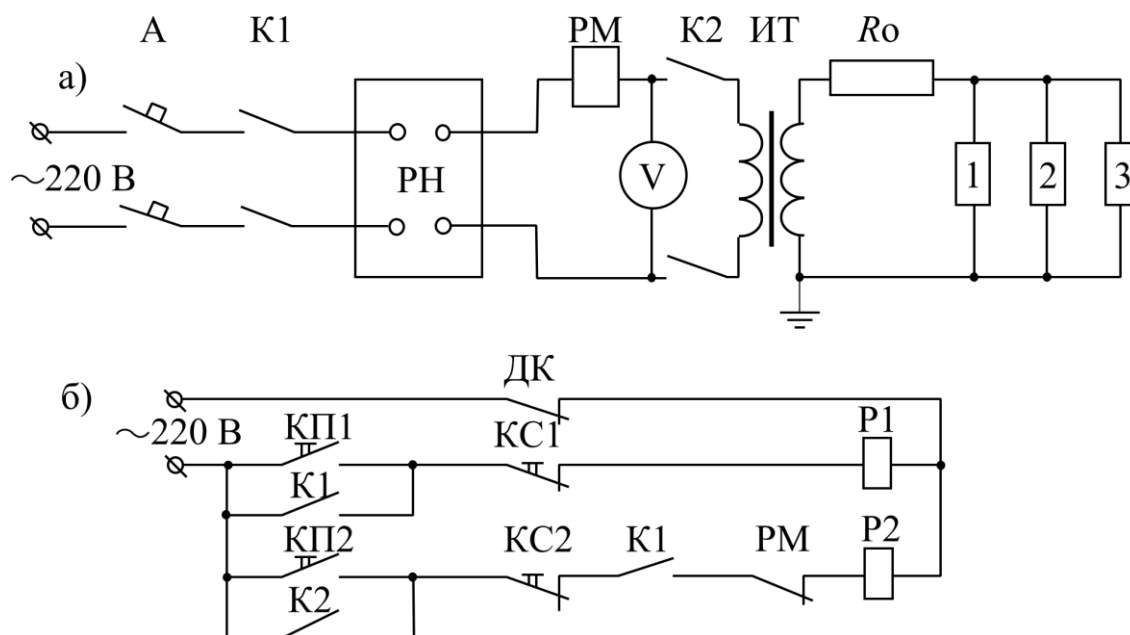


Рис. 1.1. Общая схема испытательной установки переменного напряжения промышленной частоты а) и ее схема управления б)

При включении рубильника A и замкнутом дверном контакте $ДК$ подготовлена цепь для подачи напряжения на регулятор напряжения RH . При нажатии кнопки пуск пускателя 1 цепь управления замыкается и ток, протекающий по обмотке $P1$, притягивает якорь пускателя, а контакты $K1$ замыкаются, блокируя кнопку пуск $KП1$ и подготавливая цепь для подачи напряжения на испытательный трансформатор. После подачи напряжения на RH по показаниям вольтметра следует убедиться, что напряжение на выходе регулятора не превышает 30 % от максимального первичного напряжения $ИТ$, требуемого при испытаниях. Нажатие кнопки пуск пускателя 2 приводит к подаче напряжения на $ИТ$ и, соответственно, высокого напряжения на объект испытания. **Запрещается** включение $ИТ$ при первичном напряжении более 30 % от максимального первичного напряжения $ИТ$. Дальнейший подъем напряжения должен быть быстрым и плавным, допускающим снятие показаний измерительного прибора при напряжениях более $\frac{3}{4}$ от максимального. После достижения требуемого значения напряжение должно быть плавно снижено до нуля или до значения, меньшего $\frac{1}{3}$ испытательного. Только после этого может быть произведено отключение высокого напряжения.

Ограничивающее сопротивление R_0 (защитный резистор) предназначено для ограничения тока короткого замыкания и защиты испытательного трансформатора при крутых срезах напряжения после пробоя испытуемой изоляции. При проведении испытаний «под дождем»

из-за сравнительно большого поверхностного тока утечки изоляторов падение напряжения на защитном резисторе становится большим и сравнимым с падением напряжения на объекте испытаний. По этой причине этот тип испытаний в ряде случаев допускается проводить с отключенным ограничивающим сопротивлением.

Контрольные вопросы

1. Какие требования по МЭК и ГОСТ накладываются на форму синусоидального напряжения в испытательных установках промышленной частоты?
2. Как работает схема управления испытательной установки?
3. Для каких целей устанавливается дверной контакт установки?
4. Для каких целей служит защитное сопротивление?
5. Для каких целей служит вольтметр на низкой стороне установки?
6. Для каких целей служит регулятор напряжения?
7. Для каких целей служит реле максимального тока?
8. С какой скоростью осуществляется подъем напряжения?

§ 1.2. Регуляторы напряжения

Регуляторы напряжения служат для плавной регулировки амплитуды, частоты или фазы напряжения, подаваемого на первичную обмотку испытательного трансформатора [3-8]. Регулирование должно быть практически плавным (со ступенями, не превышающими 1,5% от испытательного напряжения). Разрывы цепи при регулировании недопустимы. В простейшем случае это реостатные схемы или автотрансформаторы, изображенные на рис 1.2.

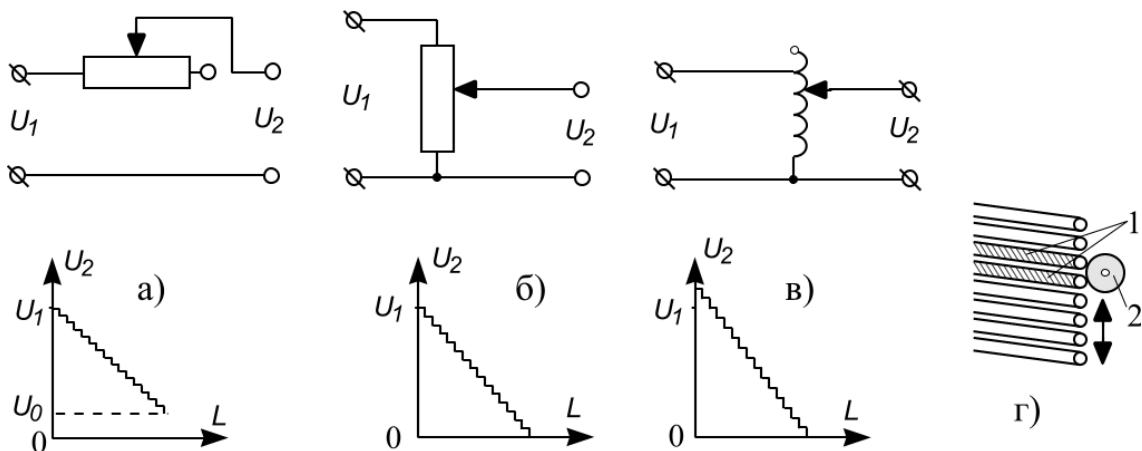


Рис. 1.2. Регуляторы напряжения: а) реостат; б) потенциометр; в) автотрансформатор; г) короткозамкнутый виток

Подключение переменных сопротивлений может быть как последовательным (рис. 2, а), так и параллельным. Использование сопротивлений по последовательной схеме (реостат) приводит к искажениям формы напряжения и не позволяет производить регулировку выходного напряжения U_2 от максимального напряжения U_1 до нулевого значения, а только до некоторого U_0 , зависящего от соотношения сопротивления регулятора и остальной схемы. При параллельной схеме включения (рис. 2, а) искажения формы меньше чем при последовательной, а регулировка возможна от максимального до нулевого значения. В обоих случаях такие регуляторы напряжения можно использовать только при малой мощности испытательного трансформатора с обязательной проверкой формы испытательного напряжения. В общем случае использование реостатов или регулируемых дросселей, включенных последовательно в цепь питания испытательного трансформатора, нецелесообразно из-за возможных скачков испытательного напряжения вследствие резонансных явлений в испытательной схеме.

Автотрансформаторная схема регулятора напряжения (рис. 1.2, в) нашла применение при большей мощности испытательных трансформаторов. Такая схема позволяет получать напряжения $U_2 > U_1$. Искажения формы кривой напряжения в автотрансформаторе практически не происходит и дополнительная проверка формы испытательного напряжения не требуется. Однако, при регулировке напряжения автотрансформаторами, так же как и при использовании переменных проволочных сопротивлений, изменение выходного напряжения U_2 производится не плавно, а в виде ступенчатого графика (рис 1.2, а–1.2, в). Величина ступенек на рис. 1.2 зависит от числа витков. Кроме этого, во всех трех схемах регуляторов иногда возникает короткозамкнутый виток в месте контакта подвижного контакта 2 с двумя витками 1 сопротивления или автотрансформатора (рис. 1.2, г). Подвижной контакт 2 обычно изготавливается в виде графитового ролика, который двигается по зачищенному от изоляции участку обмотки автотрансформатора или переменного сопротивления. Возникновение короткозамкнутого витка приводит к повышенному износу регулятора в этом месте, возникновению искрения и ограничивает мощность регулятора. Так мощность автотрансформаторов не превышает 50÷100 кВА, а при мощности 10 кВА и выше автотрансформаторы помещают в баки с трансформаторным маслом.

Плавное регулирование под нагрузкой (без ступенек) в установках большой мощности можно производить трансформатором с подвижными обмотками (рис. 1.3). Вторичная обмотка трансформатора располагается в середине стержня С, а первичная на ярме Я. Ярмо закрепляется на раме и

может перемещаться приводом относительно стержня. Первичная обмотка состоит из одинаковых частей, которые включаются в сеть параллельно. Магнитные потоки, создаваемые двумя частями первичной обмотки, направлены навстречу друг другу. Такая конструкция регулятора напряжения позволяет получать на выходе плавно меняющееся напряжение U_2 в диапазоне от U_1 до $-U_1$, если коэффициент трансформации $k = 1$.

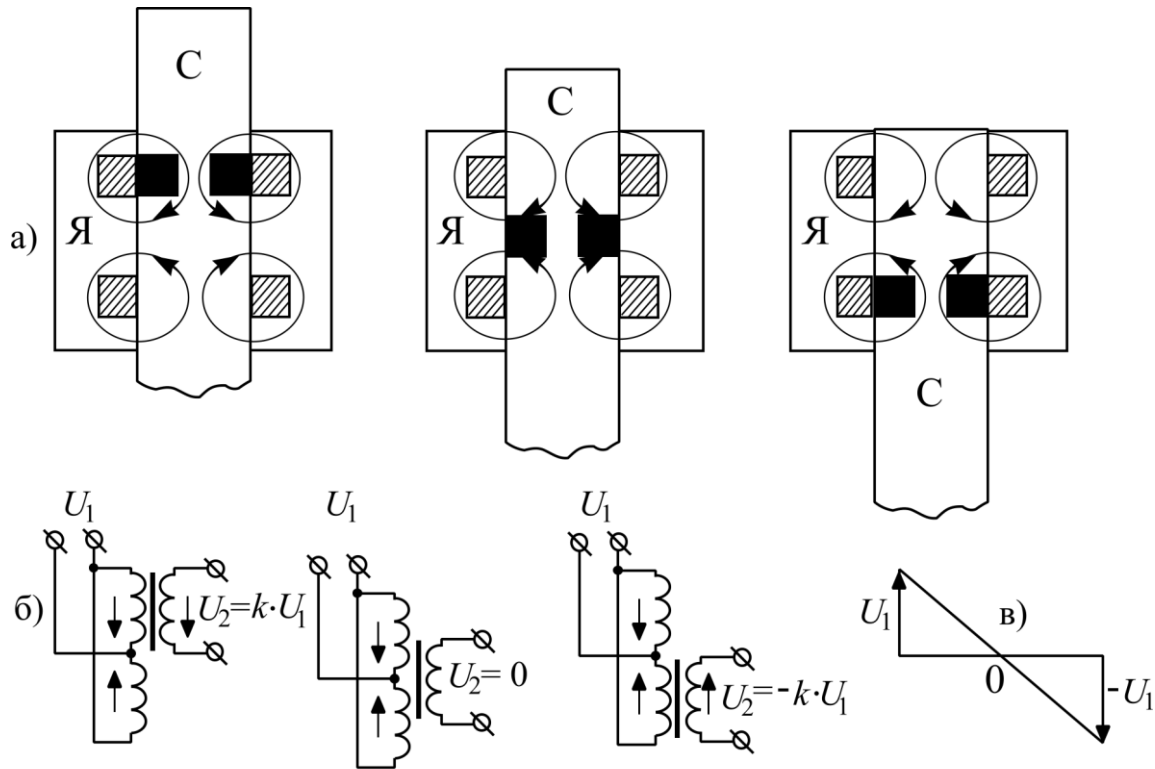


Рис.1.3. Трансформатор с подвижными обмотками: а) расположение обмоток; б) принципиальные схемы; в) напряжение на выходе

Наиболее часто применяется схема с двумя трансформаторами, вторичные обмотки которых соединены последовательно. Схема такого подключения показана на рис. 1.4. Верхний из них представляет собой трансформатор с постоянным коэффициентом трансформации k , а нижний – регулировочный трансформатор с подвижными обмотками, с пределами регулирования от $+U_2$ до $-U_2$. Результирующее напряжение на выходе схемы изменяется от 0 до $+U_2$

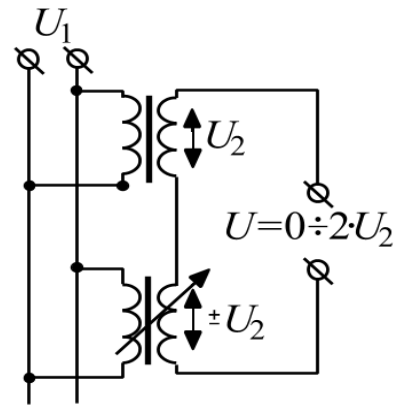


Рис. 1.4. Последовательное включение вторичных обмоток трансформаторов

При проведении испытаний, требующих особой точности и синусоидальности напряжения, в установках большой мощности в качестве регулятора напряжения применяется система двигатель-генератор, состоящая из синхронного трехфазного генератора и двигателя постоянного или переменного тока, смонтированного на одном валу с генератором. Регулирование напряжения производится изменением возбуждения генератора. Преимущества такой системы – плавная регулировка напряжения, его синусоидальность и независимость напряжения в испытательной установке от напряжения питающей сети. Основной недостаток – высокая стоимость регуляторов этой системы.

Контрольные вопросы

1. Какие типы регуляторов напряжения используются в испытательных установках промышленной частоты?
2. Какие требования предъявляются к регуляторам напряжения?
3. Какие преимущества, недостатки, область применения и схемы подключения у регуляторов напряжения типа «реостат»?
4. Какие преимущества, недостатки, область применения и схемы подключения у регуляторов напряжения типа «лабораторный автотрансформатор» (ЛАТР)?
5. Какие преимущества, недостатки, область применения и схемы подключения у регуляторов напряжения типа «трансформатор с подвижными обмотками»?
6. Какие преимущества, недостатки, область применения и схемы подключения у регуляторов напряжения типа «двигатель-генератор»?

§ 1.3. Испытательные трансформаторы

1.3.1. Выбор параметров

Испытательные трансформаторы (ИТ) являются одним из основных элементов испытательной установки. Они выбираются по номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$ и номинальной мощности $S_{\text{ном}}$. Выбор ИТ по номинальному напряжению однозначно определяется требованиями ГОСТ по испытанию оборудования переменным напряжением промышленной частоты и достаточно прост (см табл. П1 приложения). Выбор ИТ по мощности зависит от типа объектов испытания. Перед началом испытаний каждого нового типа высоковольтного оборудования должен быть

проведен анализ нагрузки ИТ. При проведении испытаний нагрузка ИТ носит в основном чисто емкостной характер. Типовая или номинальная мощность пропорциональна емкостной реактивной мощности [3]:

$$S_{\text{НОМ}} = k \cdot Q_{\text{НОМ}} = k \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot \omega \cdot C_c, \quad (1.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, C_c – наибольшая емкость объектов испытания.

Емкости объектов испытаний

№ п/п	Наименование объекта испытаний	Емкость, пф
1	Подвесные и опорные изоляторы	10–50
2	Вводы	100–500
3	Проходные изоляторы, индуктивные трансформаторы тока и напряжения	200–400
4	Разъединители	30–80
5	Выключатели	200–800
6	Кабели высокого напряжения: с газовой изоляцией (например, с SF6) с бумажно-масляной или масляной изоляцией	60 200–700
7	Силовые трансформаторы мощностью: до 1 МВА до 1000 МВА	до 3000 до 25000
8	Элегазовые распределительные устройства (РУЭ)	1000–10000

Как видно, емкость объектов может существенно различаться. Это учитывается при выборе коэффициента пропорциональности k , который задает запас по мощности. При его выборе следует учитывать, что параллельно объекту испытаний подключены емкости соединительных проводников, измерительных и срезающих шаровых разрядников, емкостных трансформаторов напряжения и делителей, дополнительно подключаемые емкости. Пробой изоляции в большинстве случаев происходит в момент достижения напряжением максимального значения. Из-за емкостного характера нагрузки фазовый угол между напряжением и током близок к $\pi/2$, т.е. мгновенное значение тока в момент пробоя (КЗ) трансформатора очень мало. Испытательный трансформатор из-за своей высокой индуктивности рассеяния L_0 не в состоянии за короткое время обеспечить номинальный ток через пробитый объект. Большая часть необходимой для пробоя энергии поступает от емкости, включенной на стороне высокого напряжения. Если же для завершения пробоя требуется существенно большая энергия, то напряжение резко понижается, что сказывается на процессе пробоя. Напряжение источника не должно упасть больше чем на 5 %, поэтому при испытаниях загрязненной изоляции

необходимо выбирать трансформатор большей мощности. На практике при высоких напряжениях выбирается $k \leq 2$, в то время как для небольших установок предпочтительно, чтобы $k = 5 \div 10$.

Испытательные трансформаторы (см. табл. 1–3) редко работают в длительном режиме, при котором существуют границы допустимой нагрузки по условиям нагрева обмоток возбуждения или низкого напряжения. Параметры обмоток высокого напряжения определяются по соображениям механической прочности, и они обычно нагреваются незначительно. Тепловая постоянная времени обмоток велика, и поэтому возможна значительная кратковременная перегрузка по мощности. Обычно параметры трансформатора выбираются с учетом их кратковременной работы (например, в течение 15 мин). Не создают, как правило, тепловых проблем и токи КЗ, которые обычно отключаются с помощью токовой защиты, время срабатывания которой согласовано с параметрами трансформатора [6]. Короткие замыкания на стороне высокого напряжения из-за малых токов не вызывают также опасности механических повреждений обмоток под действием электродинамических сил. Опасность для ИТ представляют быстрые изменения напряжения du/dt при пробое объекта или даже при ЧР в изоляции с большими токами. При больших скоростях изменения приложенного напряжения [6] и при кратковременных скачках напряжения возникают перенапряжения в контуре, образованном последовательно соединенными емкостью нагрузки и индуктивностью рассеяния трансформатора. По этой причине небезопасно испытательный трансформатор толчком включать при напряжении, большем половины номинального. Напряжение на первичной обмотке должно плавно подниматься с помощью регулятора, а включение ИТ должно производиться на напряжение не большее 30 % от $U_{ном}$. По этой же причине многие изготовители ИТ рекомендуют (настаивают) на включении демпфирующего резистора между трансформатором и объектом, который должен как устранять резонансные явления, так и снижать скорость изменения напряжения в обмотке при пробоях. Сопротивление демпфирующего резистора выбирается в пределах от 10 до 100 кОм с постоянной времени разряда емкости обмотки не менее 10 мкс.

При применении в качестве ИТ трансформаторы напряжения типа НОМ могут быть перевозбуждены на 30–50 % (при токе, не превышающем допустимый по условиям нагрева). Силовые трансформаторы допускают по условиям нагрева кратковременную трехкратную перегрузку по току. Внешний вид некоторых испытательных трансформаторов приведен на рис. 1.5, 1.6.

Таблица 1

Характеристики силовых трансформаторов,
используемых в качестве испытательных

Тип	Номинальное напряжение, кВ, на стороне		Мощность, кВ·А	$U_{кз}$, %
	ВН	НН		
ОМ- 4/6	6	0,23; 0,4	4	4
ОМ- 4/10	10	0,23; 0,4	4	4
ОМ- 5/15	15	0,22; 0,4	5	7,5
ОМ- 10/6	6	0,23; 0,4	10	4
ОМ- 10/10	10	0,23; 0,4	10	4
ОМ- 10/27,5	25	0,23	10	10
ОМ- 35/35	35	0,4	20	5
ОМ- 66/35	35	0,22; 0,4	50	4,5

Таблица 2

Основные данные испытательных трансформаторов

Тип	Номинальное напряжение, кВ, на стороне		Мощность, кВ·А, в режиме		$U_{кз}$, %
	ВН	НН	длительный	испытательный	
ИОМ 15/10	15	0,2	5	10	3
ИОМ 35-70/30	35/70	0,2	15	30	7
ИОМ 35-70/100	35/70	0,2	25	100	7
ИОМ 100/20	100	0,2	10	20	9
ИОМ 100/25	100	0,2/0,38	15	25	10
ИОМ 100/100	100	0,2/0,38	60	100	10
<i>HV 9105 (Terco)</i>	100	0,2	5	10	4
ТВО 140/50	140	0,19	-	5	-
ИОМ 500/500	500	3/6	-	500	-
Мессвандлербай	550	-	750	1500	3
<i>TUR 600/2400</i>	600	-	2000	6000	7
<i>TUR 750</i>	750	-	1500	-	7,7
<i>TUR 1200</i>	1200	-	3600	-	11

Таблица 3

Нагрузочные характеристики трансформаторов напряжения

Тип	Номинальный коэффициент трансформации	Максимальная мощность, кВ·А, в режиме		Максимальный ток обмотки НН, А, в режиме	
		длительный	испытательный	длительный	испытательный
НОМ-6	6000/100	0,6	1,5	6	15
НОМ-10	10000/100	0,72	3,5	7,2	35
НОМ-15	15000/100	0,84	4	8,4	40
НОМ-35	35000/100	1,2	6,0	12	60
НКФ-110	$\frac{110000}{\sqrt{3}}/100$	-	11	-	-
T 35 (HIGHVOLT)	35000/230 17500/230	4,4	-	19	-
T 50i	50000/230	4,4	-	19	-
T 100i	100000/230	6,6	-	28	-

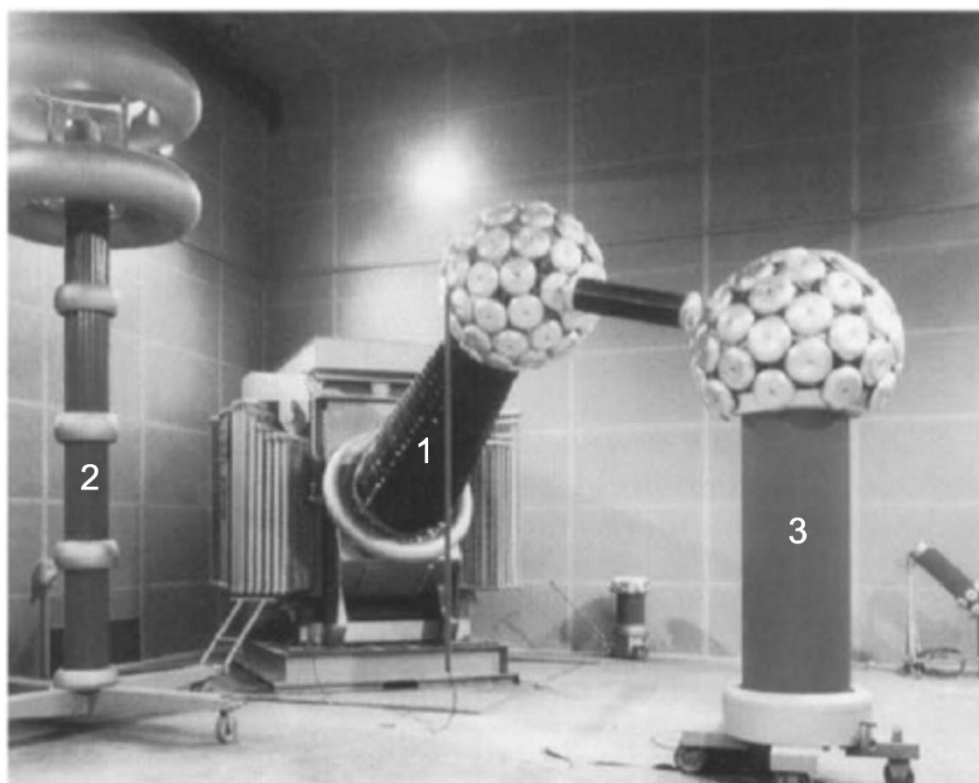


Рис. 1.5. Оборудование высоковольтного зала *LGA* (Барселона):
 1 – испытательный трансформатор *TUR*-600 кВ/2400 кВА фирмы *HIGHVOLT (TUR)*, 2 – демпфированный емкостной делитель напряжения, 3 – конденсатор

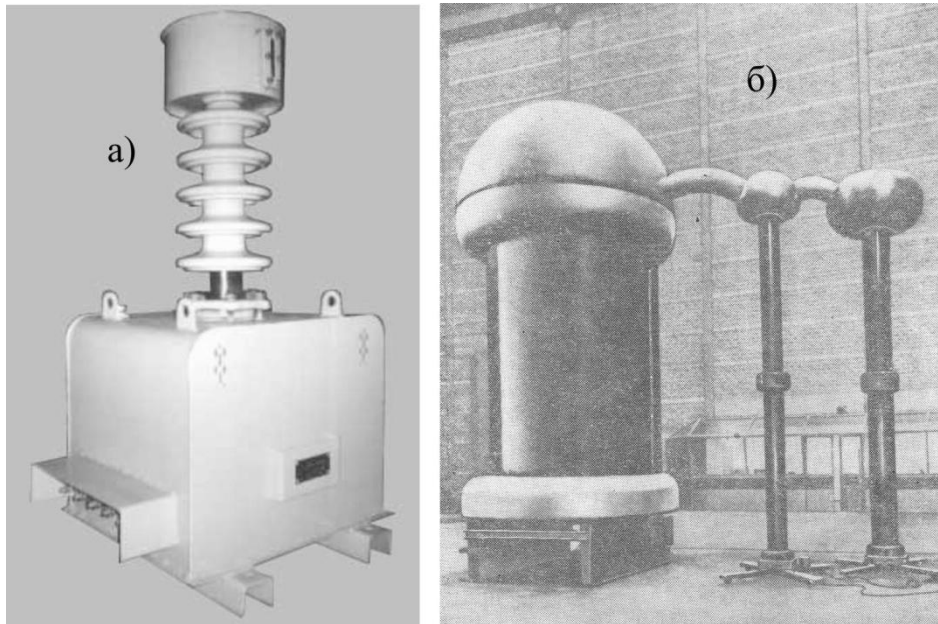


Рис. 1.6. Трансформаторы испытательные:
а) ИОМ-20/100 УЗ; б) – фирма Мессвандлербау

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать мощность испытательного трансформатора (ИТ)?
2. Для каких целей параллельно объекту испытаний подключается емкость на стороне высокого напряжения?
3. Что нужно проверить перед подачей напряжения на ИТ?
4. С какой скоростью следует поднимать напряжение на ИТ?
5. Для каких целей между трансформатором и объектом устанавливается демпфирующий резистор?
6. Как долго обычно работает ИТ между выключениями?
7. Является ли режим короткого замыкания аварийным режимом в работе ИТ?
8. Какая перегрузка по мощности допускается при эксплуатации ИТ и почему?
9. Какая величина перенапряжения допускается для ИТ?
10. Можно ли использовать измерительные трансформаторы напряжения в качестве испытательных трансформаторов?

§ 1.3.2. Конструкция трансформаторов

В конструкциях силовых трансформаторов высокого напряжения помимо решения изоляционных проблем должны быть предусмотрены многочисленные каналы для охлаждения обмотки и обеспечена электродинамическая прочность при токах КЗ. В противоположность этому в испытательных трансформаторах проблем охлаждения и электродинамической стойкости не возникает, и изоляция обмотки полностью определяется конструкцией трансформатора. Особенности схем и конструкций трансформаторов обусловлены тем, что из экономических соображений целесообразно выполнять обмотку высокого напряжения в виде единой катушки лишь при напряжениях до нескольких сотен киловольт. При больших напряжениях и мощностях используются несколько секций обмотки (рис. 1.7, а), и общие изоляционные проблемы решаются путем обеспечения изоляции отдельных секций. При напряжениях до $100 \div 200$ кВ обмотка высокого напряжения выполняется слоевой и сплошной. Емкости между отдельными слоями приблизительно одинаковы. Общее сечение обмотки имеет трапецевидную форму типа трансформаторного ввода (рис. 1.7, б). Такая конструкция обмотки выбирается для выравнивания напряжения между отдельными частями обмотки при срезах напряжения. Испытание изоляции ИТ проводят при напряжении $1,1 \div 1,2 U_{\text{ном}}$, т.е. запас по электрической прочности ИТ существенно ниже, чем у силовых трансформаторов. Коэффициент трансформации ИТ выше, чем у силовых трансформаторов (см. табл. 2). Это связано со значительно большим числом витков обмотки ВН и, как следствие, высокой собственной индуктивностью рассеивания ИТ. Это приводит к тому, что даже на частоте 50 Гц возможно возникновение резонанса в контуре высокого напряжения, состоящем из индуктивности, емкости ИТ и емкости объекта испытаний. Параметры обмоток должны быть такими, чтобы исключить возникновение резонанса. В ИТ должны отсутствовать частичные разряды вплоть до номинального напряжения. Это является важным требованием, предъявляемым к ИТ.

Испытательные трансформаторы выполняются однофазными и имеют следующие основные типы конструктивного исполнения:

- 1) ИТ с одним выводом ВН в металлическом или изоляционном корпусе;
- 2) ИТ с двумя выводами ВН в металлическом или изоляционном корпусе.

Испытательные трансформаторы, показанные на рис. 1.5, 1.6 относятся к типу 1.

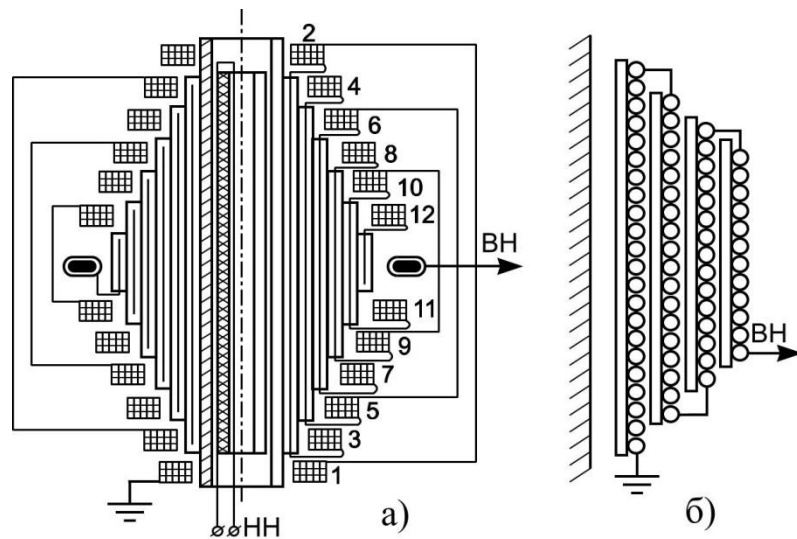


Рис. 1.7. Обмотка высокого напряжения испытательного трансформатора: а) секционированная дисковая; б) слоевая

В испытательных трансформаторах с одним выводом высокого напряжения секция или слой (рис. 1.7) обмотки ВН, ближайшие к сердечнику, с одного конца соединены с сердечником трансформатора и заземлены. Такая конструкция позволяет выполнять изоляцию на полное напряжение только с одного конца обмотки. Отдельные слои располагаются на изоляционных (бакелитовых) цилиндрах с изоляцией, выполненной из кабельной бумаги. Высоковольтный конец обмотки ВН присоединяется к специальному экрану для уменьшения напряженности электрического поля. Между обмотками высшего и низшего напряжения располагают разрезной проводящий металлический экран, соединенный с сердечником (показан штриховкой на рис. 1.7, а). Экран ставится для того, чтобы при срезах напряжения импульсы с обмотки ВН не передавались в обмотку низшего напряжения.

При напряжениях меньше 100 кВ в качестве изоляции можно использовать эпоксидную смолу, но в этом случае на полном напряжении трудно избежать появления частичных разрядов. При более высоких напряжениях в трансформаторах применяется бумажно-масляная изоляция. Трансформаторы с металлическим корпусом имеют лучшие условия охлаждения по сравнению с ИТ с изоляционным корпусом. Для улучшения отвода тепла корпус изготавливают с охлаждающими ребрами или трубами. При наружной установке используются исключительно

трансформаторы с металлическими корпусами. Для вывода высокого напряжения в них требуется высоковольтный ввод. Трансформаторы с металлическим корпусом и одним высоковольтным выводом являются наиболее надежными и распространенными для наружной установки при напряжениях до $600 \div 800$ кВ. Для внутренней установки могут применяться ИТ с изоляционным корпусом, которые специального высоковольтного ввода не требуют. Из-за большого объема трансформаторного масла они имеют большую термическую постоянную времени. Однако отвод тепла в окружающее пространство существенно хуже, чем у ИТ с металлическим корпусом. При больших мощностях для улучшения условий охлаждения в них применяют принудительную циркуляцию масла с использованием теплообменника, находящегося вне трансформатора. Другим вариантом конструкции испытательных трансформаторов является ИТ в металлическом корпусе с двумя высоковольтными выводами и сердечником, находящимся под половинным потенциалом. Схема расположения обмоток и разрез такого трансформатора представлены на рис. 1.8.

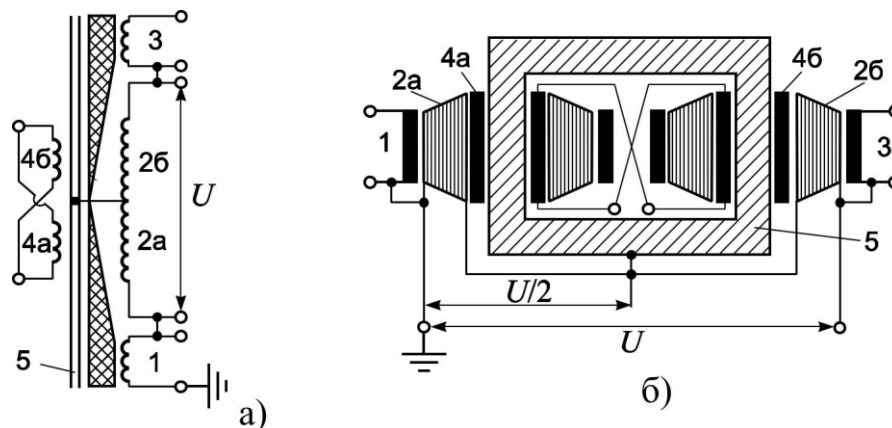


Рис. 1.8. Испытательный трансформатор с двумя выводами ВН: а) схема; б) разрез: 1 – первичная обмотка возбуждения; 2а, 2б – секции обмотки ВН; 3 – обмотка связи; 4а, 4б – успокоительные обмотки; 5 – сердечник

Обмотки 1 (3) являются обмотками низшего напряжения и служат для питания трансформатора. Они изолируются от бака трансформатора на половинное напряжение и имеют одинаковое число витков. Если питание трансформатора происходит через обмотку 1, то обмотка 3 называется **обмоткой связи** и служит для подачи напряжения на следующий трансформатор в каскадной схеме. Обмотки 2, а и 2, б являются частями обмотки высшего напряжения. Они расположены на двух разных стержнях

магнитопровода и в средней точке соединяются с сердечником и баком. Такое расположение обмоток ВН уменьшает связь с обмоткой низшего напряжения (1) и ведет к увеличению рассеивания магнитного потока. Большое число витков обмоток 2, а и 2, б приводит к большой индуктивности ИТ. Для снижения общей индуктивности ИТ применяются **встречная** и **бифилярная** конструкция обмоток 2, а и 2, б, которая позволяет существенно уменьшить индуктивность трансформатора и снизить напряжение короткого замыкания.

Для того, чтобы выровнять магнитные потоки в левой и правой частях магнитопровода, применяют специальные обмотки – уравнивательные (успокоительные, демпферные или шуб-обмотки 4, а и 4, б на рис. 1.8, б), которые располагаются непосредственно на магнитопроводе. Они имеют одинаковое число витков и включаются встречно, чтобы при одинаковых магнитных потоках в стержнях компенсировать индуцируемые в них напряжения. Протекающий по обмоткам 4, а и 4, б уравнивательный ток создает магнитный поток, который в левой половине сердечника направлен против основного магнитного потока, а в правой половине совпадает с ним. Такое включение обмоток сглаживает резкие изменения тока и магнитного потока. Как и в трансформаторах с одним выводом между обмотками высшего (2) и низшего (1, 3) напряжений размещается разрезанный металлический экран (на рис. 1.8, б не показан). Он препятствует передаче импульсов с обмотки ВН, возникающих в ней при пробое или перекрытии испытуемой изоляционной конструкции, в обмотку низшего напряжения. Трансформатор данной конструкции может использоваться в двух вариантах. При заземлении бака трансформатора на выводах получаются симметричные относительно земли напряжения величиной $U/2$ и со сдвинутыми на 180° фазами. При заземлении одного из выводов корпус трансформатора оказывается под напряжением $U/2$ и требует изоляции от земли, т.е. должен располагаться на опорных изоляторах. На другом выводе получают напряжение U . Если трансформатор такого типа располагается в изоляционном корпусе, то сердечник располагается на опорных изоляторах внутри корпуса, а по внешнему виду трансформатор очень похож на трансформатор с одним выводом.

Контрольные вопросы

1. Выпускаются ли трехфазные испытательные трансформаторы?
2. Сколько выводов высокого напряжения в ИТ?

3. Чем отличается изоляция высоковольтных обмоток ИТ с различным числом выводов ВН?

4. Какие материалы используются для корпуса ИТ наружной и внутренней установки?

5. Какие типы конструкций обмоток ВН бывают в ИТ?

6. Сколько различных типов обмоток в ИТ?

7. Каково назначение обмоток связи?

8. Каково назначение успокоительных обмоток (шуб-обмоток)?

9. Какая из обмоток расположена ближе всего к сердечнику ИТ?

10. Можно ли заземлять один из выводов ВН в ИТ с двумя высоковольтными выводами?

11. Под каким напряжением будет находиться корпус ИТ при заземлении одной из высоковольтных обмоток?

12. Как следует изолировать корпус ИТ при заземлении одного из двух выводов высокого напряжения?

13. Есть ли разница, какой из двух выводов ВН заземлять?

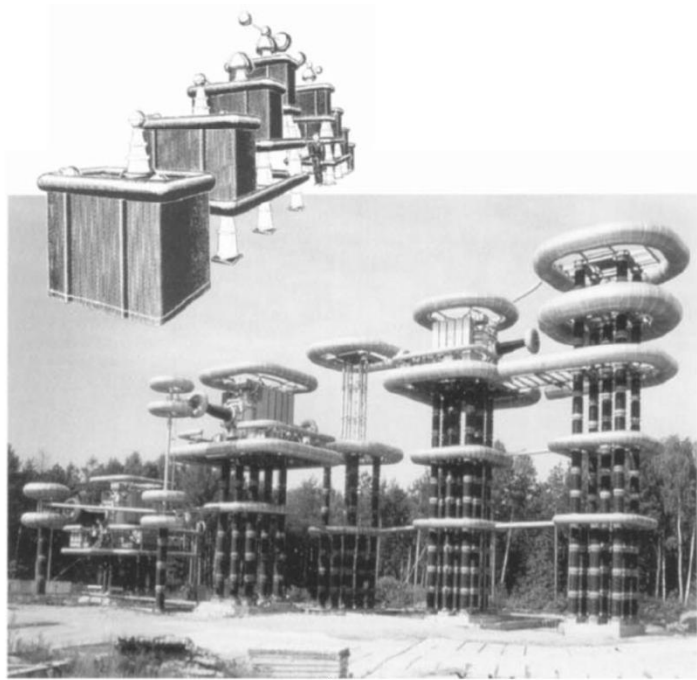
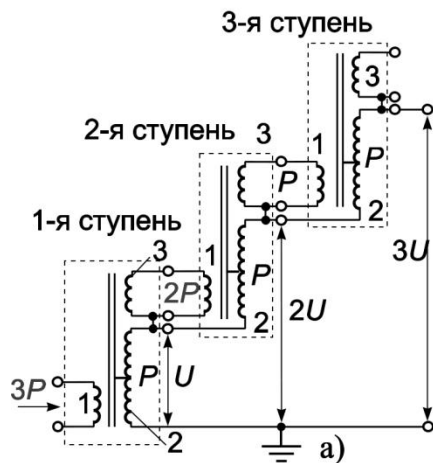
14. Какие коэффициенты трансформации у ИТ?

15. Какой коэффициент трансформации между обмоткой низкого напряжения (питающей обмоткой) и обмоткой связи?

16. Какова величина ВН у серийных ИТ и «фирменных» ИТ?

§ 1.3.3. Каскадные схемы включения трансформаторов

Для получения испытательных напряжений выше 400 кВ экономически не целесообразно использовать одиночные трансформаторы. Для получения таких напряжений применяют каскадное включение трансформаторов. На рис. 1.9, а показана принципиальная схема трехступенчатого каскада, а схемы отдельных трансформаторов упрощены. Изображены лишь имеющие значение и показанные на рис. 1.8 обмотки возбуждения и связи со следующей ступенью. Необходимая изоляция относительно земли трансформаторов второй и третьей ступеней обеспечивается их расположением на изоляционных подставках с опорными изоляторами. При этом, как правило, достигается минимальная высота, так как такая изоляция относительно земли может быть оптимизирована. Каскады с таким расположением трансформаторов называются **лестничными** каскадами. В таких схемах велики потребности в площади, т.к. пространство под каскадами второй и третьей ступенями остается пустым и фактически не используется.



б)

Рис. 1.9. Каскадное включение испытательных трансформаторов с последовательным питанием: а) – принципиальная схема каскада (1, 2, 3 – обмотки возбуждения, высокого напряжения и связи);
 б) – каскад ВНИЦ ВЭИ ($U_{\text{исп}} = 0 \div 3,3 \text{ МВ}$, $P_{\text{исп}} = 12 \text{ МВА}$, $U_1 = 10 \text{ кВ}$, ток нагрузки $I = 4 \text{ А}$)

Другим вариантом расположения трансформаторов, позволяющим резко сократить площадь каскада, является схема **колонного** типа, когда отдельные трансформаторы ставятся друг на друга (рис. 1.10). В таких схемах могут использоваться как трансформаторы с металлическим корпусом и двумя выводами ВН, так и трансформаторы в изоляционном корпусе. В этих случаях необходимо учитывать механическую прочность трансформаторов, в особенности первого каскада. Как правило, число каскадов не превышает трех или четырех. На рис. 1.9, а схематически показана загруженность питающих обмоток. Наиболее загруженной является питающая обмотка 1-го каскада. При проектировании каскадной схемы такое распределение нагрузки необходимо учитывать для того, чтобы избежать их перегрева. С этой целью иногда в первую ступень каскадной схемы ставят параллельно два трансформатора (рис. 1.10, в).

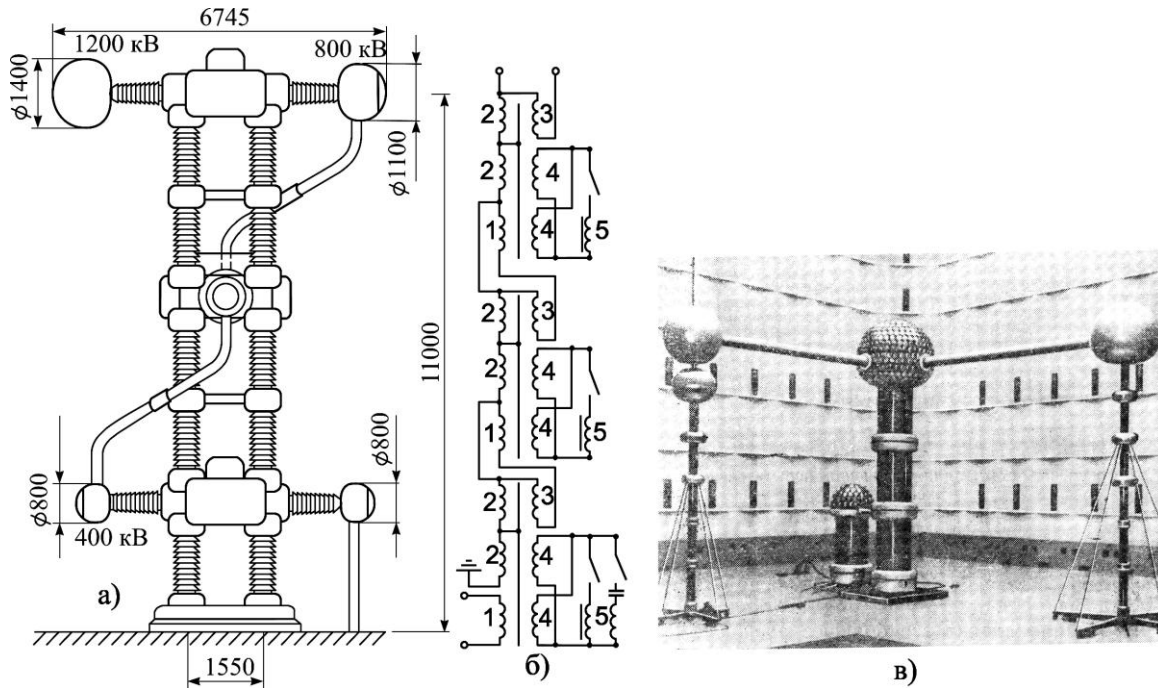


Рис. 1.10. Каскады ИТ колонного типа: а) – каскад с тремя ИТ в металлических корпусах с двумя выводами ВН; б) – схема соединений обмоток каскада; в) – каскад ИТ с изолирующими корпусами в зале Ренардые с двумя ИТ в первой ступени, включенными параллельно (напряжение до 1650 кВ)

При этом загруженность первичной питающей обмотки уменьшается с $3P$ до $1,5P$ и наиболее загруженной обмоткой при трехкаскадной схеме остается обмотка возбуждения (1) второго каскада ($2P$). Суммарная мощность трансформаторов каскада существенно превышает мощность всего каскада. Другой особенностью каскадных схем является быстрое увеличение напряжения короткого замыкания каскада, которое превышает сумму напряжений коротких замыканий отдельных трансформаторов. При учете только реактивных сопротивлений обмоток 1, 2, 3, которые определяются из трех опытов КЗ, реактивное сопротивление всего каскада может быть вычислено по формуле 9.7 [3]:

$$X_{\kappa} = \sum_{i=1}^n \left[X_{2i} + (n+i)^2 \cdot X_{3i} + (n+1-i)^2 \cdot X_{1i} \right], \quad (1.2)$$

где X_{κ} – реактивное сопротивление каскада; X_{1i} , X_{2i} , X_{3i} – реактивные сопротивления обмоток 1, 2, 3, соответственно; i – номер каскада; n – число каскадов.

Тогда напряжение короткого замыкания определится по формуле:

$$U_{кз} = \frac{I_H \cdot X_k}{U_H}, \quad (1.3)$$

где I_H , U_H – номинальный ток и напряжение.

Напряжение короткого замыкания не должно превышать 30 %. Для его уменьшения, а также снижения составляющих высших гармоник применяются реакторы и фильтры 5, которые присоединяются к шуб-обмоткам (рис. 1.10, б). В принципе, компенсирующие устройства можно подключать и к обмоткам высшего напряжения параллельно объекту испытаний. Такое подключение позволяет разгрузить по току обмотки ВН, однако такое подключение не нашло широкого распространения по экономическим причинам. В результате возбуждения контуров, образованных собственными емкостями, емкостью нагрузки и индуктивностью рассеяния трансформаторов, а также индуктивностями устройств регулирования в каскадных схемах возникают высшие гармоники. Кроме того, они могут возбуждаться за счет нелинейной характеристики сердечника. Все они не должны превышать допустимых пределов и должны быть (по крайней мере, третья гармоника на 150 Гц) отфильтрованы.

Кроме описанных выше схем, которые можно назвать каскадными схемами с последовательным питанием, применяются также каскадные схемы с параллельным питанием. Они, как правило, строятся по лестничной схеме, а питание каждого каскада осуществляется от отдельных трансформаторов или последовательно соединенных трансформаторов.

Контрольные вопросы

1. Для чего используют каскадные схемы включения ИТ?
2. Сколько каскадов может быть в каскадной схеме подключения ИТ?
3. Какая из обмоток загружена больше всего в каскадной схеме с последовательным питанием, если в первом каскаде один ИТ?
4. Какая из обмоток ИТ наиболее загружена в каскадной схеме с последовательным питанием обмоток при двух ИТ в первом каскаде?
5. Как рассчитать мощность всего каскада из трех и четырех (два ИТ в 1-м каскаде) однотипных испытательных трансформаторов?
6. Как изменяется напряжение короткого замыкания каскада в зависимости от числа ИТ в каскаде?
7. Чем ограничивается число каскадов в каскадной схеме?
8. Какие типы питания отдельных ИТ бывают в каскадных схемах?

§ 1.3.4. Особенности эксплуатации

В современных испытательных установках при соблюдении рекомендаций по выбору их элементов резонансные явления маловероятны. Однако даже при отсутствии объекта испытаний ток первичной обмотки трансформатора опережает напряжение, так как ток намагничивания мал, а вторичная обмотка обладает значительной собственной емкостью. Объект испытаний представляет собой, как правило, конденсатор с высокой добротностью, и емкостная нагрузка трансформатора при подключении объекта, становится еще больше. Емкостный характер нагрузки принципиально приводит к повышению вторичного напряжения, так как сопротивление КЗ или рассеяния образует с емкостью нагрузки слабо демпфированный последовательный резонансный контур. В результате напряжение на объекте испытания становится больше первичного, умноженного на коэффициент трансформации. Это явление необходимо учитывать при проведении испытаний, поскольку запас по электрической прочности обмоток ИТ не превышает $10 \div 15 \%$, а превышение напряжения по сравнению с напряжением, измеренным по стороне низкого напряжения и умноженным на коэффициент трансформации, может достигать 30% и в отсутствие резонанса. Отсутствие контроля на стороне высокого напряжения ($U_{ВН}$) недопустимо при проведении испытаний, а измерения по стороне низкого напряжения ($U_{НН}$) могут носить лишь ориентировочный характер. При одном и том же напряжении $U_{НН}$ при различных объектах испытаний, емкость которых увеличивается, напряжение $U_{ВН}$ будет возрастать. Еще большее возрастание напряжения произойдет в случае постоянной емкости объекта и увеличении частоты. Отношение вторичного напряжения $U_{ВН}$ к первичному напряжению $U_{НН}$, умноженному на коэффициент трансформации, определится следующим образом:

$$\frac{U_{ВН}}{k \cdot U_{НН}} = \frac{1}{1 - X_k \cdot \omega \cdot C}, \quad (1.4)$$

где X_k – индуктивность ИТ или каскада, ω – частота питающего напряжения, $C = C_i + C_{ВН}$ – суммарная емкость; C_i – емкость трансформатора; $C_{ВН}$ – емкость, подключенная к обмоткам высокого напряжения трансформатора, k – номинальный коэффициент трансформации. Тогда, обозначая символом $C_{НОМ}$ емкость вторичной цепи, при которой мощность ИТ равна его номинальной мощности, $U_{ВН}$ можно оценить по формуле:

$$U_{\text{ВН}} = \frac{k \cdot U_{\text{НН}}}{1 - U_{\text{кз}} \cdot \frac{C}{C_{\text{НОМ}}}}. \quad (1.5)$$

Оценка по формуле (1.5) носит только ориентировочный характер и неприменима для измерения напряжения $U_{\text{ВН}}$. При подготовке к экспериментам все параметры трансформатора и объектов испытаний должны быть проверены и оценены на отсутствие опасных перенапряжений. Для защиты ИТ от повреждений рекомендуется ставить на стороне ВН шаровой разрядник, настроенный на напряжение $1,1 \cdot U_{\text{НОМ}}$ и служащий в качестве ограничителя перенапряжений.

Контрольные вопросы

1. Каков запас электрической прочности ИТ?
2. Для какой цели к высоковольтным выводам ИТ подключают шаровой разрядник, и при каком напряжении он пробивается?
3. Почему нельзя определять высокое напряжение на объекте испытания, измеряя напряжение на низкой стороне ИТ и умножая его на коэффициент трансформации?
4. Для чего следует проводить измерения напряжения как на стороне НН, так и на стороне ВН при проведении испытаний?
5. В чем заключаются различия испытательных и силовых трансформаторов (назвать не менее 8 существенных различий)?

§ 1.4. Резонансные схемы

Как отмечалось в предыдущем параграфе, объекты испытаний представляют собой конденсаторы с высокой добротностью и при эксплуатации ИТ на стороне ВН возможно возникновение повышенного напряжения за счет приближения к резонансу даже без специальных настроек. Это явление может быть применено для получения высоких переменных напряжений промышленной частоты. Для получения ВН следует настроить в резонанс вторичную цепь, образующую последовательный резонансный контур и состоящую из индуктивности рассеивания трансформатора L_p и суммарной емкости вторичной цепи C . Преимущества использования резонансных схем перед обычными состоят в следующем:

- 1) для получения напряжения $U_{\text{ВН}}$ достаточно мало зависящего от резонансной частоты переменного напряжения

$$U_{\text{нн}} = U_{\text{вн}} / (Q \cdot k),$$

где k – коэффициент трансформации ИТ, а Q – добротность резонансного контура (как правило, $Q > 5$);

2) поскольку резонанс наступает на основной частоте, то гармоники, содержащиеся в первичном напряжении, во вторичной цепи резко уменьшаются; требования к синусоидальности питающего напряжения в резонансных схемах существенно мягче и практически всегда удовлетворяется;

3) мощность, необходимая для возбуждения резонансного контура, очень мала, поскольку емкостная мощность объекта $U_{\text{вн}}^2 \cdot \omega C$ в резонансном контуре компенсируется индуктивной мощностью $U_{\text{вн}}^2 / (\omega L_p)$. Мощность источника возбуждения должна перекрывать лишь активные потери, составляющие обычно менее 5 % емкостной мощности;

4) при пробое объекта изменяется суммарная емкость вторичной цепи C , что немедленно приводит к исчезновению резонанса и снижению напряжения на объекте испытаний. Повреждения объекта в месте пробоя сводятся к минимальным повреждениям, поскольку в канал разряда не поступает никакой энергии, кроме энергии, накопленной в емкости объекта.

Резонансные схемы целесообразно использовать, прежде всего, при испытаниях объектов с большой емкостью (кабелей высокого напряжения, элегазовых устройств или шинопроводов). Настройка в резонанс осуществляется последовательным включением реактора во вторичную цепь ВН. Реакторы высокого напряжения имеют гораздо меньшие размеры и массы (примерно в три раза легче), чем испытательные трансформаторы такой же мощности. Такие установки удобно использовать в передвижных лабораториях и при проведении испытаний аппаратов высокого напряжения на месте монтажа. Однако для получения резонанса при любой емкости нагрузки необходимо иметь реактор с плавно регулируемой индуктивностью (рис. 1.11, б). На высоком напряжении это не тривиальная техническая проблема. В этом случае можно отказаться от использования испытательного трансформатора. Для снижения стоимости установки применяют также регулируемые реакторы на низком напряжении (рис. 1.11, а). В этом случае испытательный трансформатор разгружается лишь частично, но снижаются затраты на систему регулирования напряжения.

Для проведения испытаний высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на заводе «Таткабель» объединения «Инвент» применяется схема, показанная на рис. 11, б. Испытательный трансформатор 2 имеет высшее напряжение 17,5 кВ, а напряжение на объекте испытаний 6 (высоковольтный кабель) может достигать до 350 кВ. Между дросселем 5 и

кабелем 6 ставится несколько высоковольтных фильтров для уменьшения величины частичных разрядов, которые могут возникать в дросселе 5.

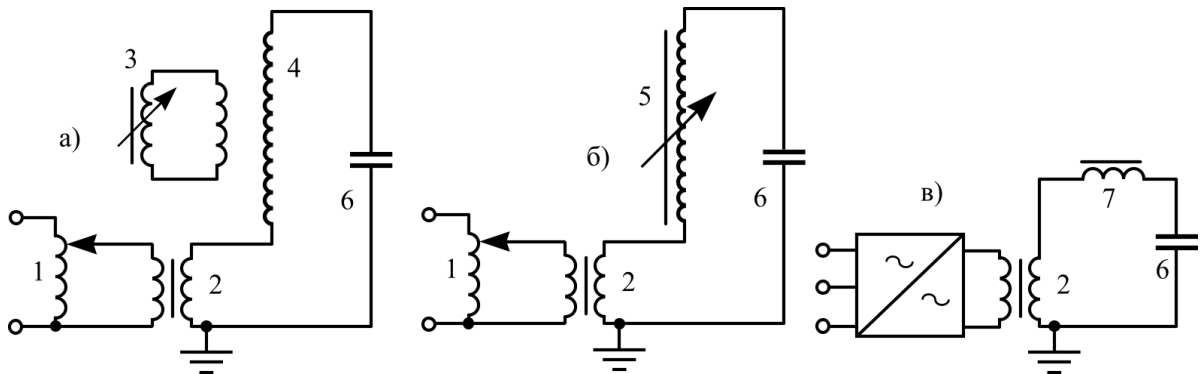


Рис. 1.11. Резонансные схемы получения высокого испытательного напряжения: а) с регулируемым дросселем (3) на стороне НН; б) регулируемый дроссель (5) на стороне ВН; в) нерегулируемый дроссель (7) на стороне ВН; 1 – регулятор напряжения; 2 – испытательный трансформатор; 4 – дроссель ВН; 6 – емкость объекта испытаний

Другой возможностью достижения резонанса на ВН является регулировка частоты возбуждающего напряжения. В этом случае используются реакторы 7 (рис. 1.11, в) с постоянной индуктивностью L . Согласно выражениям (1.4) и (1.5) при постоянных L и C , изменяя частоту, можно регулировать напряжение на объекте испытаний. При высокой добротности колебательного контура напряжение возбуждения оказывается относительно небольшим. Для регулировки частоты можно использовать специальный преобразователь, созданный на базе силовой электроники, который должен покрывать активные потери в резонансном контуре. Работа этих устройств возможна в диапазоне частот от 30 Гц до 1 кГц. Резонансные устройства такого типа целесообразно применять, если не требуется строго поддерживать заданную частоту испытательного напряжения, или если необходимо исследовать пробой при различных частотах.

Одной из самых старых, но по-прежнему используемых резонансных схем являются трансформаторы Тесла, изобретенные Николой Тесла еще в 1891 г. С их помощью создаются часто повторяющиеся колебательные затухающие импульсы частотой более 100 кГц и амплитудой выше 1 МВ. Схема трансформатора содержит два колебательных контура со слабой взаимной магнитной связью. Индуктивности контуров образуются катушками без сердечника, имеющими сильно различающиеся числа витков, чтобы относительно низкое напряжение возбуждаемого первичного контура трансформировать в высокое напряжение вторичного контура.

Такие трансформаторы в настоящее время используются лишь для испытаний тарельчатых фарфоровых изоляторов, во время которых с высокой чувствительностью устанавливается наличие высокочастотных скользящих разрядов в пустотах фарфора.

Контрольные вопросы

1. Для чего нужны резонансные схемы испытательных установок высокого напряжения промышленной частоты?
2. Какие преимущества и недостатки имеют установки с резонансными схемами получения высоких напряжений по сравнению с другими испытательными установками промышленной частоты?
3. Как осуществляется настройка в резонанс в установках со схемами, показанными на рис. 1.11?
4. Для испытаний каких объектов наиболее целесообразно применять испытательные установки с резонансными схемами?
5. Как работают схемы с трансформаторами (катушками) Тесла?

ГЛАВА 2. УСТАНОВКИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

§ 2.1. Общие вопросы получения и применения постоянного высокого напряжения

Постоянные высокие напряжения находят применение в различных областях техники. В электроэнергетике они применяются для испытания изоляции оборудования для линий электропередач постоянного тока, газонаполненных кабелей и кабелей с обеднено-пропитанной изоляцией, конденсаторов, вращающихся машин, исследования различных процессов пробоя различных изоляционных сред и конструкций. При испытаниях изоляции высоким постоянным напряжением существенно уменьшается вероятность повреждения бездефектной изоляции и практически полностью исключено появление мощных частичных разрядов. Кроме того, появляется возможность измерения тока утечки, тока абсорбции, снятие кривых восстанавливающегося («возвратного») напряжения слоистой изоляции, кривых саморазряда, что дает дополнительную информацию о состоянии изоляционной конструкции. Постоянные высокие напряжения широко применяются в физических экспериментах (ускорители заряженных частиц, источники нейтронов, электронные микроскопы, электронно-оптические преобразователи, фотоумножители, установки ионного легирования и т.п.), медицине (рентгеновская техника, электротерапевтические установки) и различных электротехнологиях (дымовые электрофильтры, установки для флокирования текстильных материалов, электроокраска, сепарации порошков, электропечать). Общими характеристиками для всех источников постоянного ВН являются:

- 1) кратковременная и длительная стабильность напряжения;
- 2) накопленная в нем энергия;
- 3) постоянная времени регулирования при быстрых колебаниях нагрузки или напряжения сети;
- 4) возможность быстро изменить полярность напряжения;
- 5) содержание пульсаций в постоянном ВН (полярность пульсаций, среднее арифметическое значение амплитуды, коэффициент пульсаций и относительное отклонение от среднего значения).

Средним значением пульсирующего унipoлярного напряжения $u(t)$ с периодом пульсаций T является:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot dt. \quad (2.1)$$

Периодические отклонения от среднего значения называются **наложенными** пульсациями или волнистостью:

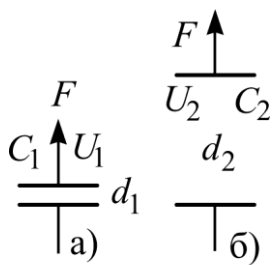
$$\delta u = 0,5 \cdot (U_{\max} - U_{\min}), \quad (2.2)$$

где $U_{\max}$ и $U_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значения $u(t)$.

Пульсации обычно задаются в процентах от среднего значения и по требованиям МЭК их значение не должно превышать 5 %.

§ 2.2. Электростатические генераторы

Электростатические генераторы являются устройствами, в которых механическая энергия непосредственно превращается в электрическую



энергию. Первые электростатические генераторы появились еще в 17 веке и с тех пор непрерывно развиваются и совершенствуются. Принцип действия электростатических генераторов заключается в том, что носители зарядов перемещают в направлении, противоположном направлению сил электрического

Рис. 2.1

поля. Пусть мы имеем плоский конденсатор с расстоянием между пластинами d_1 и емкостью C_1 (рис. 2.1) заряженный до некоторой разности потенциалов U_1 . Приложим силу F и раздвинем пластины на расстояние d_2 . Пренебрегая утечкой заряда с пластин конденсатора в процессе перемещения пластин, можно записать:

$$C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2 \rightarrow U_2 = \frac{C_1}{C_2} \cdot U_1 = \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1. \quad (2.3)$$

Напряжение на обкладках конденсатора после раздвижения пластин становится больше, поскольку емкость конденсатора уменьшается. Механическая энергия W , затраченная на перемещение пластин, непосредственно переходит в электрическую энергию заряженного конденсатора:

$$W = W_2 - W_1 = \frac{C_2 \cdot U_2^2}{2} - \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2} = \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) = W_1 \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right). \quad (2.4)$$

Такой способ превращения механической энергии в электрическую энергию лежит в основе принципа действия всех электростатических генераторов. Нет принципиальных ограничений на величину высокого напряжения U_2 и накопленную энергию W . Однако, практические ограничения, связанные с утечкой заряда с высоковольтного электрода и электрической прочностью изоляции, не позволяют пока получать напряжения выше 35 МВ.

§ 2.2.1. Электрофорные машины

Электрофорные машины представляют собой самый многочисленный по разнообразию и количеству класс источников постоянного высокого напряжения. Чаще всего они служат демонстрационными установками в учебных заведениях различного уровня и действующими музейными экспонатами университетов и колледжей. Описание конструкций таких установок приводится в [11, 12]. Электростатическая электрофорная машина (рис. 2.2) состоит из следующих элементов:

а) 1, 2 или 3 диска с нанесенными на них электродами, часть дисков может быть неподвижными;

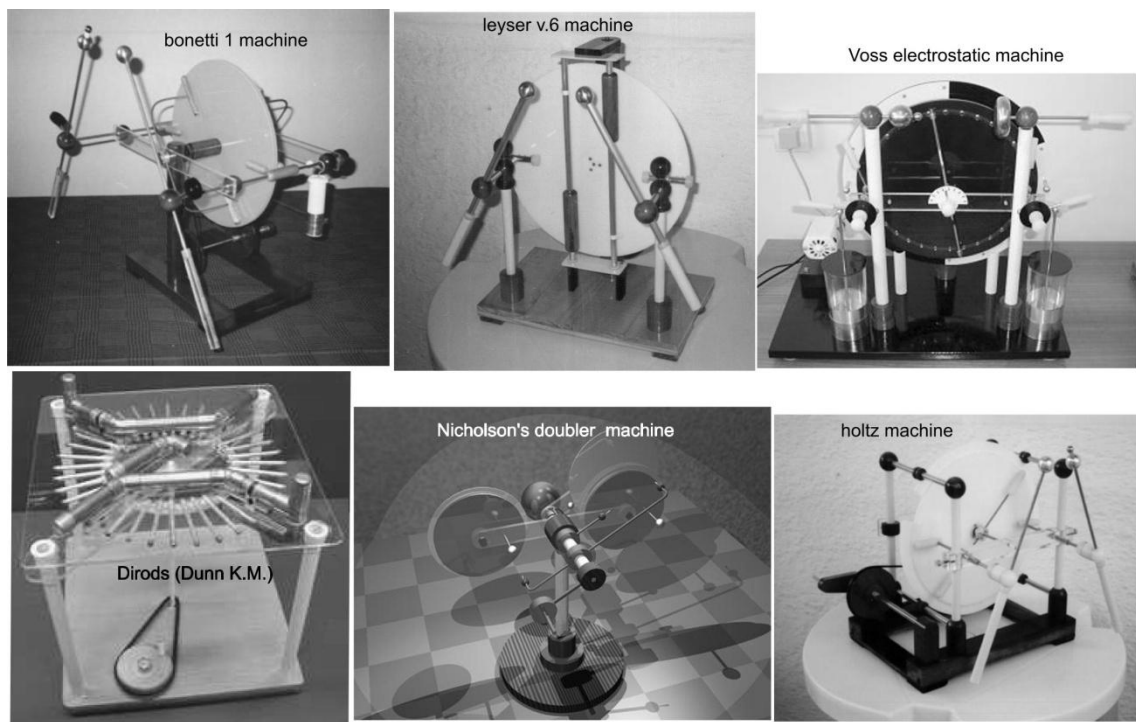


Рис. 2.2. Электрофорные машины различного исполнения

- б) зарядный электрод (1 или несколько). Электрические заряды получаются за счет трения двух диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ϵ (трибоэлектричество);
- в) съемный электрод (1 или несколько);
- г) приводной механизм вращения дисков;
- д) емкостные накопители (обычно лейденские банки);
- е) шаровые разрядники для демонстрации искры при пробое воздушного промежутка.

§ 2.2.2. Ленточный генератор Ван де Граафа

Высоковольтный электростатический генератор, изобретенный в 1931 году Робертом Дж. ван-де-Граафом в Массачусетстском технологическом институте, используется для ускорения заряженных частиц (электронов, протонов, ионов и т.д.). Схема устройства генератора изображена на рис. 2.3.

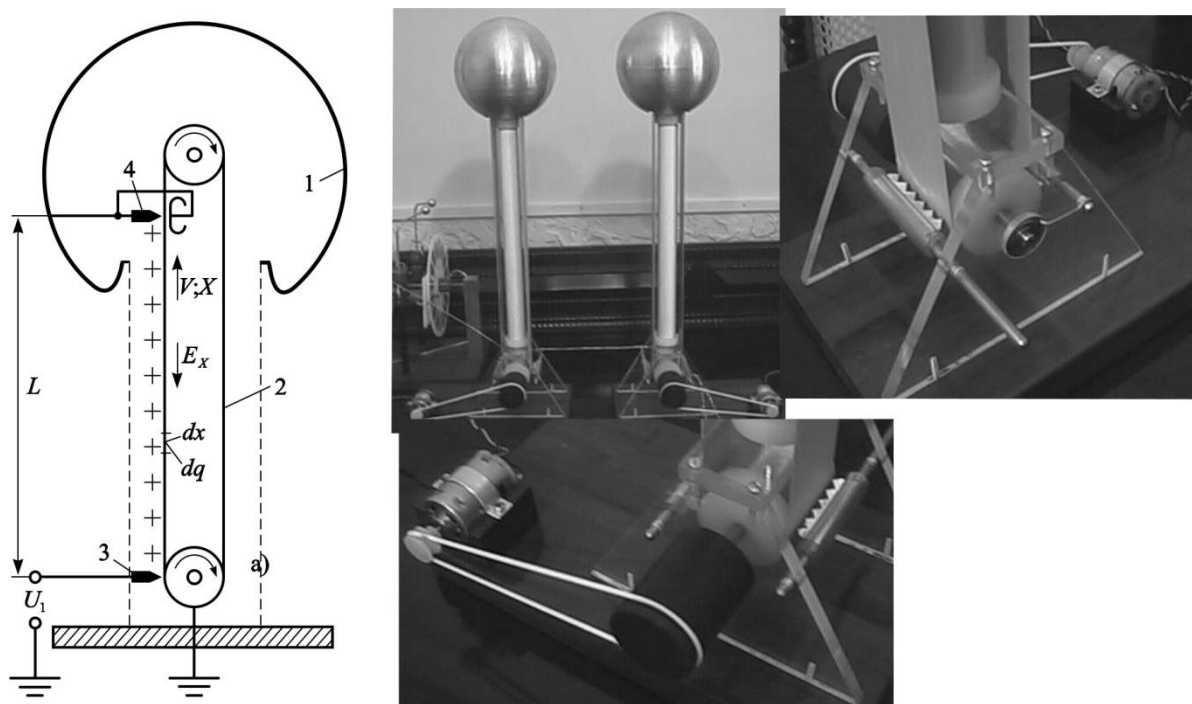


Рис. 2.3. Генератор Ван де Граафа: а) принципиальная схема; б), в), г) лабораторная модель

Большой полый металлический электрод, имеющий вид полусферического купола, установлен на высоковольтной изолирующей колонне. В полость электрода заходит верхний конец ленточного транспортера электрических зарядов 2, представляющий собой бесконечный

резиновый ремень на текстильной основе, натянутый на два металлических шкива и движущийся обычно со скоростью $20 \div 40$ м/сек. Нижний шкив, установленный на металлической плите, вращается электродвигателем. Верхний шкив размещается под высоковольтным электродом-куполом и находится под полным напряжением машины. Нижний конец ленты проходит мимо электрода 3 (тонкой стальной пластинки или заостренной шайбы) и противоположным электродом (заземленным приводным цилиндром или специальным плоским электродом). На электрод 3 подается от высоковольтного источника постоянное напряжение с высоким относительно земли потенциалом 10–100 кВ.

В коронном разряде в зависимости от полярности напряжения U_1 образуются положительно или отрицательно заряженные заряды, которые осаждаются на изоляционной ленте и транспортируются вовнутрь сферического электрода 1 высокого напряжения. Внутри электрода 1 находится съемное устройство 4, предназначенное для передачи зарядов с ленты на электрод 1. Можно электродную систему 4 дополнить источником напряжения противоположной полярности и перезарядить ленту, тем самым удвоить снимаемый с генератора ток (тандемный генератор).

Достижимая мощность зависит от скорости движения ленты и ее ширины b , поверхностной плотности заряда σ и тангенциальной составляющей напряженности поля $E(x)$ на поверхности ленты. Эта напряженность зависит от координаты x в направлении скорости V , если конструктивными мерами не обеспечено равномерное распределение поля.

На участке dx ленты содержится заряд $dq = \sigma \cdot b \cdot dx$.

На всю ленту действует сила:

$$F(x) = \int_L dF(x) = \int_L E(x) \cdot dq = \sigma \cdot b \cdot \int_L E(x) \cdot dx. \quad (2.5)$$

Для обеспечения движения ленты против сил электрического поля с постоянной скоростью $v = dx/dt$ требуется мощность

$$P = F(x) \cdot v = \sigma b v \int_L E(x) dx. \quad (2.6)$$

Учитывая, что

$$I = \frac{dq}{dt} = \sigma b v; \quad U = \int_L E(x) dx, \quad (2.7)$$

получим $P = I \cdot U$. Предельная токовая нагрузка I зависит от максимально возможной плотности поверхностного заряда σ , а также от поверхности ленты, проходящей под коронирующей системой в единицу времени, а напряжение U – от активной поверхности ленты и допустимой напряженности поля $E(x)$, зависящей от диэлектрических свойств окружающего ленту газа. По мере зарядки высоковольтного электрода возрастает ток утечки $I_{\text{ут}}$. Поскольку зарядный ток I постоянен (зависит от конструкции генератора), то возрастание напряжения на высоковольтном электроде прекратится в момент равенства зарядного тока и тока утечки $I = I_{\text{ут}}$.

При большой мощности генераторов возникают механические и электроизоляционные проблемы. К ленточным генераторам предъявляются жесткие требования в отношении механической прочности ленты, так как при больших скоростях возможно возникновение вибраций. По этой причине скорость движения ленты, как правило, ограничена скоростью 30 м/с. Электростатические ленточные генераторы, предназначенные для ускорения ионов (часто в виде tandemных генераторов с зарядкой обеих сторон ленты), работают при заполнении их элегазом, азотом или смесью азота и углекислого газа под давлением до 3 МПа. Подходящей формой экранов обеспечивается наилучшее распределение поля. В таких генераторах получают напряжения до 30 МВ, хотя и при малых токах (менее 1 мА). Предельную нагрузку по току легко оценить по (2.7). При допустимой напряженности E на изоляционной ленте и зависящей от нее плотности заряда $\sigma \approx \epsilon E$ вряд ли удастся для работающей в атмосферном воздухе коронирующей системы получить плотность выше $2 \cdot 10^{-5}$ Кл/м² (т.е. $E \approx 20$ кВ/см), так как прочность воздуха не превышает 30 кВ/см. Если $b = 1$ м, $V = 30$ м/с, то ток $I = 600$ мкА. Таким образом, электростатические генераторы имеют малые предельные токи [18]. На рис. 2.4 показаны tandemные генераторы Ван де Граафа, выполненные в баках с газом под давлением. Такие установки пригодны для исследования пробоя в газах, так как генератор заполняется исследуемым газом, а его предельное напряжение согласуется с прочностью газа [6]. Малые предельные токи затрудняют исследования при очень высоких напряжениях, так как соединительные электроды должны быть абсолютно свободными от ЧР, что достижимо лишь при очень высоких затратах.

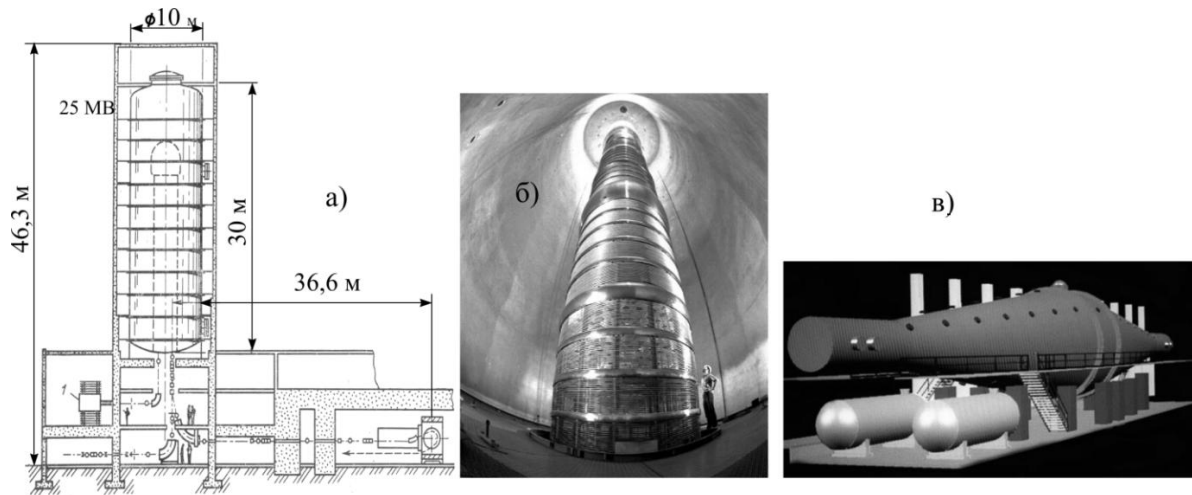


Рис. 2.4. Тандемные ускорители на основе генератора Ван де Граафа: а), б) вертикальной компоновки с $U_{\text{макс}} = 25 \text{ MV}$ в лаборатории *Oak Ridge* (ORNL); в) горизонтальной компоновки – *Vivitron* с $U_{\text{макс}} = 35 \text{ MV}$

Некоторое улучшение характеристик генератора Ван де Граафа достигается за счет изменения конструкции ремня. Ремень разделяется на ряд отдельных участков (палетт). Каждый такой участок содержит проводящие шарики, изолированные друг от друга изоляционным материалом. Такая конструкция ремня позволяет добиться более высокой износостойчивости и более высокой плотности заряда на ленте. Генератор Ван де Графа с такой конструкцией ремня получил название пеллетрон [15].

§ 2.2.3. Роторный генератор

Из предыдущего параграфа следует, что для увеличения тока зарядки, а значит и величин напряжения, следует увеличить скорость движения ленты. Поскольку для гибких лент эта скорость ограничена $\sim 30 \text{ м/с}$, дальнейшее увеличение скорости движения возможно при замене гибкой ленты на жесткую. В роторных генераторах вместо гибкой ленты применяют жесткий барабан из изоляционного материала. Такую конструкцию можно рассматривать как сочетание электрофорной машины и генератора Ван де Графа. Принципиальная схема роторного (барабанного) генератора с двумя парами полюсов показана на рис. 2.5.

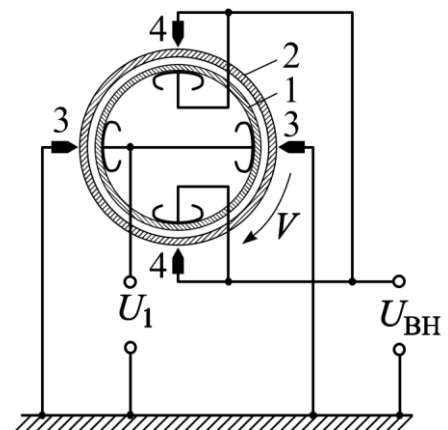


Рис. 2.5. Роторный генератор

При изменении количества полюсов мощность остается неизменной, а ток пропорционален числу полюсов. Устройства для зарядки 3 и съема заряда 4 в поле коронного разряда представляют собой разрядные промежутки типа острый коронирующий электрод – плоскость (индукторный электрод). Индукторные электроды жестко закреплены на изоляционном статоре 1. Материал статора 1 обладает электропроводностью, которая гарантирует однородное распределение потенциала между заземленными и высоковольтными электродами индукторов. Подходящим материалом является обыкновенное хорошо обработанное стекло. Вокруг статора 1 вращается ротор 2 из изоляционного материала, причем воздушный зазор между ротором и статором равен примерно 0,3 мм. Коронирующие электроды (пластины) неподвижны и закреплены в генераторах на изоляционном каркасе. Напряжение возбуждения U_1 регулируется в зависимости от значения выходного напряжения $U_{ВН}$. Очевидно принципиальное отличие такого генератора от ленточного – механическая осевая симметрия конструкции, которая состоит из прочных материалов и позволяет получить высокую частоту вращения барабана (скорость до 45 м/с) без заметного износа деталей, и поэтому становится возможной длительная непрерывная работа. Барабан может иметь ширину несколько десятков сантиметров. При большом числе полюсов получаются токи до 10 мА. Однако напряжение, зависящее от диаметра барабана и числа пар полюсов, ограничено, так как нельзя беспредельно увеличивать диаметр барабана. Таким образом, рабочий диапазон напряжений роторного генератора составляет от 50 до 750 кВ, причем верхняя граница достижима только при закрытом исполнении генератора с газом (в большинстве случаев азотом) под давлением. Удельная мощность на единицу площади активной поверхности барабана может достигать нескольких ватт на один квадратный сантиметр.

§ 2.2.4. Регулировка напряжения электростатических генераторов

Электростатические генераторы при постоянных напряжениях возбуждения U_1 , частотах вращения барабана или скоростях движения ленты являются генераторами постоянного тока. Поэтому напряжение холостого хода $U_{ВН}$ возрастает до тех пор, пока не установится равновесие генерируемого тока и тока утечки. Ток генератора ограничен и в принципе не зависит от напряжения. В генераторах малой мощности с не очень сильным коронированием регулирование напряжения (или тока) может быть осуществлено, например, путем стабилизации коронирующего промежутка.

Во всех остальных случаях в настоящее время используется эффективное электронное регулирование, при котором пониженное с помощью делителя выходное напряжение является входным параметром системы регулирования. Однако даже в случае очень качественного контура регулирования с отличными динамическими свойствами не устраняются полностью колебания напряжения, так как интервал времени, необходимый для транспортировки заряда от устройства зарядки до системы съема заряда, относительно велик. При быстрых колебаниях напряжения отношение пульсаций к среднему значению напряжения может быть менее 10^{-4} . Возможна длительная стабильная работа с пульсациями менее 10^{-3} . В этом случае отпадает необходимость в фильтрующих конденсаторах большой емкости, а электростатические генераторы являются источниками высокого напряжения с очень малой накопленной в них энергией. Схема полярности в таких генераторах принципиально возможна, однако при быстром изменении полярности (в пределах нескольких минут) должны быть решены проблемы изоляции внутри генератора, особенно роторного. В более простом и не таком компактном устройстве ленточного генератора возникает гораздо меньше проблем, и с его помощью удастся получить даже переменное напряжение низкой частоты (менее 1 Гц).

Контрольные вопросы

1. Как получают высокие напряжения (ВН) в электростатических генераторах (ЭСГ)?
2. Чем ограничена величина ВН в ЭСГ?
3. За счет чего возникает электрическая энергия в ЭСГ?
4. Как устроена электрофорная машина?
5. Где применяются и электрофорные машины?
6. Как работает генератор Ван-де-Граафа?
7. Как работает тандемный генератор Ван-де-Граафа?
8. Какие характеристики имеет генератор Ван-де-Граафа и от каких параметров они зависят?
9. Как работает роторный генератор?
10. Каковы особенности конструкции пеллетрона?
11. Как регулируется напряжение в ЭСГ?
12. Где применяются генераторы Ван-де-Граафа?

§ 2.3. Выпрямители

Для получения постоянных токов более 1–10 мА используют принцип преобразования переменного тока в постоянный ток. Устройства, в которых осуществляется такое преобразование, называются **выпрямителями**. Существует много различных схем выпрямителей, например, однополупериодная, двухполупериодная, мостиковая схемы. Основным элементом всех схем выпрямителей является нелинейный элемент (диод, вентиль). В настоящее время в качестве нелинейных элементов в схемах выпрямителей применяются полупроводниковые элементы на основе селена, германия или кремния. Обратное напряжение отдельного полупроводникового диода невысоко (селеновые шайбы – 45–65 В, германиевые диоды – 300–500 В, кремниевые – 1–2 кВ) и поэтому для самых высоких напряжений используют цепочки последовательно соединенных диодов (выпрямительные столбы). Наличие большого числа последовательно соединенных диодов приводит к необходимости выравнивать обратное напряжение на каждом из диодов. Для выравнивания напряжения используют цепочки сопротивлений и конденсаторов, подключаемых параллельно диодам. Селеновые диоды, изготовленные в виде шайб, имеют довольно большую емкость запорного слоя и сравнительно большие токи утечки. При изготовлении выпрямительных столбов из них, число элементов доходит до нескольких сотен и даже тысяч элементов. Принудительного выравнивания обратного напряжения в этом случае не требуется. Предельная плотность тока селенового диода составляет $0,1 \div 0,5 \text{ А/см}^2$. Поэтому, отдельный селеновый выпрямительный столб имеет небольшой выпрямленный ток, который составляет единицы или десятки миллиампер. Для получения больших токов требуется параллельное соединение нескольких таких выпрямительных столбов. Технические данные выпрямительных столбов и некоторых кремниевых диодов приведены в таблице ПЗ.

Переменное напряжение после прохождения через выпрямитель оказывается пульсирующим и требует сглаживания. Для сглаживания пульсаций на выходе из выпрямителя ставятся сглаживающие фильтры. Обычно фильтры состоят из конденсаторов, подключаемых параллельно выходу выпрямителя и индуктивностей (дресселей), включаемых последовательно. Минимальное число элементов фильтра – один конденсатор. При увеличении числа элементов коэффициент пульсаций уменьшается.

§ 2.3.1. Однокаскадные схемы выпрямления

Чтобы преобразовать периодически меняющееся напряжение в постоянное напряжение, необходимы три элемента (рис. 2.6, а): источник переменного напряжения $u_1(t)$, выпрямитель VD (диод), работающий в качестве переключателя напряжения, и конденсатор C , накапливающий заряд. При этом неважно, является ли напряжение синусоидальным или содержит высшие гармоники. Каждый из этих трех элементов схемы принципиально может иметь заземленную точку, и изменение во времени снимаемого напряжения зависит от выбора точек съема. При получении высокого напряжения целесообразно проводить заземление точек 1 или 2 источника переменного напряжения, в качестве которого обычно используется трансформатор высокого напряжения со слабой на одном конце изоляцией относительно заземленных сердечника или первичной обмотки. Если заземлена точка 2 (вывод ВН), то требуется дополнительная изоляция источника переменного напряжения (например, установка трансформатора на опорных изоляторах).

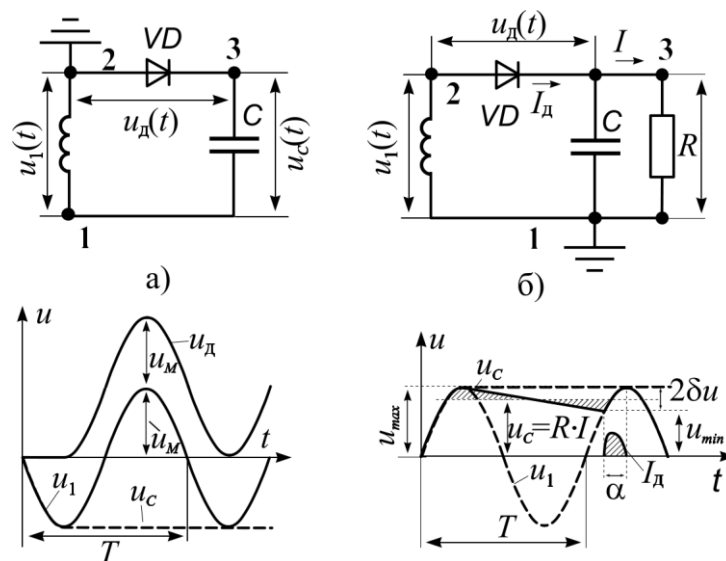


Рис. 2.6. Однополупериодный выпрямитель с накопительным конденсатором: а) без активной нагрузки; б) с нагрузкой

Схема без нагрузки. Для понимания любых схем выпрямления важно уяснить, как изменяются напряжения на всех трех элементах во времени, при этом диод считается идеальным коммутатором.

При заземлении точки 1 получается хорошо известная в технике низких напряжений и широко применяемая во многих электронных устройствах однополупериодная схема. На рис. 2.6 показаны изменения во

времени напряжений U_1 (напряжение между точками 1 и 2), U_C (пунктир, напряжение между точками 1 и 3) и U_d (напряжение между точками 2 и 3), а также тока через диод I_d при идеальном синусоидальном напряжении U_1 . В схеме без нагрузки ток проходит через диод только в период нарастания напряжения в первый полупериод. После достижения максимального напряжения конденсатор полностью заряжен и при дальнейшем уменьшении напряжения диод оказывается заперт. На конденсаторе остается постоянное напряжение U_C , если не меняется максимальное значение переменного напряжения во времени и конденсатор не разряжается. Напряжение на диоде U_d является синусоидальным (с колебаниями вокруг напряжения U_C) и, в то же время, пульсирующим с двойной амплитудой относительно точки 2 рис. 2.6, а. Выходным напряжением схемы является выпрямленное напряжение U_C .

При заземлении точки 2 изменение напряжения во времени показаны на рис. 2.6, а. Потенциал точки 2 равен нулю. Эта схема, в которой выходное напряжение снимается с VD (U_d), входит в схему удвоения и является существенной частью каскадных схем.

В обоих вариантах схемы воздействующее напряжение одинаково, на конденсаторе напряжение равно амплитудному $U_C = U_M$, а обратное напряжение на диоде равно удвоенному амплитудному $2U_M$.

Схема с нагрузкой. При нагрузке однополупериодного выпрямителя (рис. 2.6, б) в выходном напряжении содержатся пульсации, так как через нагрузку R протекает ток I , который обеспечивается током источника переменного напряжения лишь в течение короткого времени α (рис. 2.6). Выходное напряжение U_C изменяется в пределах от U_M до $U_M - 2\delta U$.

Пульсации $\delta U = \frac{I \cdot T}{2C} = \frac{I}{2fC}$ выходного напряжения могут быть уменьшены при увеличении частоты питающего напряжения f и при увеличении емкости C .

При практическом определении параметров устройств высокого напряжения с такой схемой необходимо также учитывать падение напряжения как на диоде, так и в трансформаторе. Технические характеристики выпрямительных элементов приведены в таблице 3 приложения.

Схемы удвоения напряжения

Для получения выпрямленных напряжений, которые превышают напряжение питающего трансформатора, используются схемы удвоения напряжения. Схема удвоения напряжения является сочетанием схем 2.6, а и 2.6, б и представлена на рис. 2.7.

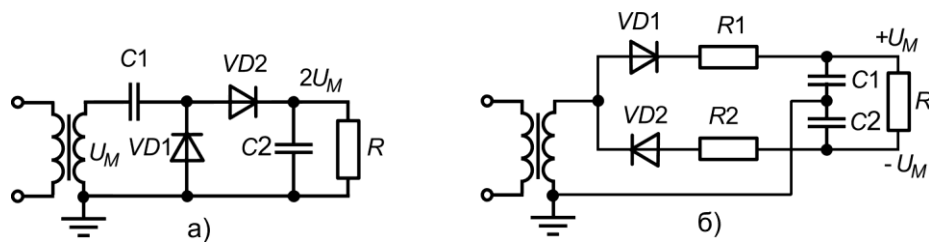


Рис. 2.7. Схемы с удвоением напряжения: а) удвоение напряжения относительно земли; б) удвоение с симметричным выходом

В схеме (рис. 2.7, а) конденсатор C_1 и вентиль $VD1$ образуют схему рис. 2.6, а, в которой конденсатор заряжается до почти максимального амплитудного значения напряжения в те полупериоды, когда вентиль открыт. На вентиле $VD1$ синусоида смещена на U_M и максимальное значение пульсирующего напряжения равно $2U_M$. Это напряжение подается на вторую часть схемы удвоения, которая состоит из вентиле $VD2$ и конденсатора C_2 , образующих схему однополупериодного выпрямителя (рис. 2.6, б). В полупериоды противоположной полярности открывается вентиль $VD2$ и конденсатор C_2 оказывается заряжен до двойного амплитудного значения напряжения $2U_M$. На выходе схемы получается несимметричное относительно земли почти удвоенное амплитудное значение напряжения.

В схеме с симметричным выводом напряжения конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через соответствующие вентили $VD1$ и $VD2$ в полупериоды противоположной полярности до почти амплитудного значения напряжения. Напряжение на выходе является симметричным по отношению к земле и равно сумме напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 .

Отметим, что все вентили в схемах, представленных на рис. 2.6 и рис. 2.7, должны выдерживать двойное обратное амплитудное напряжение $2U_M$.

§ 2.3.2. Каскадные схемы умножения

Для получения постоянных напряжений свыше 200 кВ применяют схемы умножения, которые позволяют уменьшить габариты и массу испытательной установки по сравнению с однокаскадными схемами выпрямления.

На рис. 2.8 представлена каскадная схема умножения на основе схемы, представленной на рис. 2.7, а. Ненагруженная каскадная схема, состоящая из n каскадов, позволяет получить на выходе напряжение, равное $2nU_M$. Емкости всех конденсаторов C_1 и C_2 обычно выбираются одинаковыми. Все конденсаторы заряжены до потенциала $2U_M$, за исключением конденсатора C_1 , ближайшего к трансформатору, который заряжен до U_M . Все вентили (диоды) находятся под двойным обратным напряжением $2U_M$. Такие схемы строятся по модульному принципу, поскольку элементы всех ступеней находятся под одинаковым воздействующим напряжением. При наличии нагрузки с током i напряжение на выходе меньше максимально возможного напряжения $2nU_M$ на величину Δu . Кроме этого на выходе схемы возникают пульсации δu . Они могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned}\delta u &= \frac{i}{2fC} \cdot n \cdot (n-1); \\ \Delta u &= \frac{i}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right) + \delta u = \frac{i}{fC} \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12},\end{aligned}\quad (2.8)$$

где f – частота питающего напряжения.

Снижение напряжения Δu и пульсации δu могут быть объяснены падением напряжения на элементах схемы и процессами обмена зарядами конденсаторов C_1 и C_2 . На участке, соответствующем одному периоду T , можно выделить 4 участка изменения напряжения. Относительно плавное уменьшение напряжения на участках 1 и 3 вызывается разрядом конденсаторов C_2 током нагрузки i . Участок резкого уменьшения напряжения 2 связан с передачей части зарядов конденсаторам C_1 левой части схемы от конденсаторов C_2 правой части схемы перед моментом времени t .

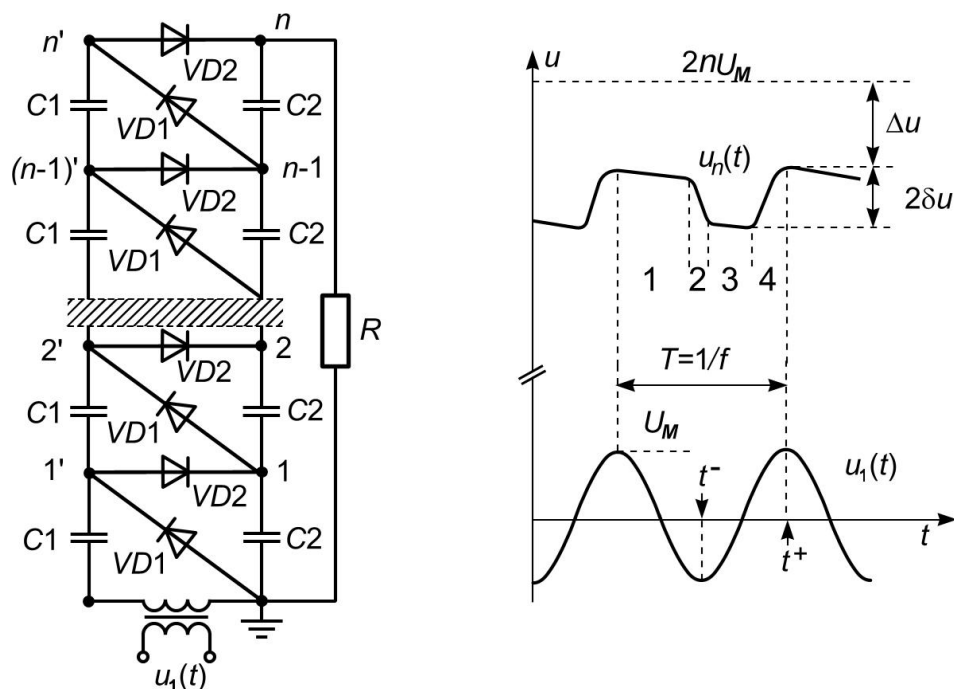


Рис. 2.8. Каскадная схема получения постоянного высокого напряжения

Только один конденсатор C_1 , ближайший к трансформатору, заряжается непосредственно от источника переменного напряжения. Участок быстрого подъема напряжения 4 соответствует подзарядке конденсаторов C_2 правой части схемы. Рост напряжения происходит короткое время перед достижением положительного максимума t^+ , поскольку только в течение этого времени потенциалы точек $1', 2' \dots$ левой части схемы выше потенциалов точек $1, 2 \dots$ правой части и вентили VD_2 открыты. Выходное напряжение каскадной схемы определяется выражением:

$$U_n(t) = 2nU_M - \frac{i}{fC} \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12}. \quad (2.9)$$

Из уравнений (2.8) и (2.9) видно, что с увеличением тока нагрузки i и числа ступеней n быстро растут как падение напряжения Δu , так и пульсации δu . По этой причине каскадные схемы применяют при небольших токах нагрузки и ограничивают число ступеней. Уменьшить Δu и δu можно при увеличении частоты питающего напряжения f и (или) величины емкости конденсаторов C . На рис. 2.9 представлена схема умножения напряжения с питанием от трансформатора с заземленной средней точкой.

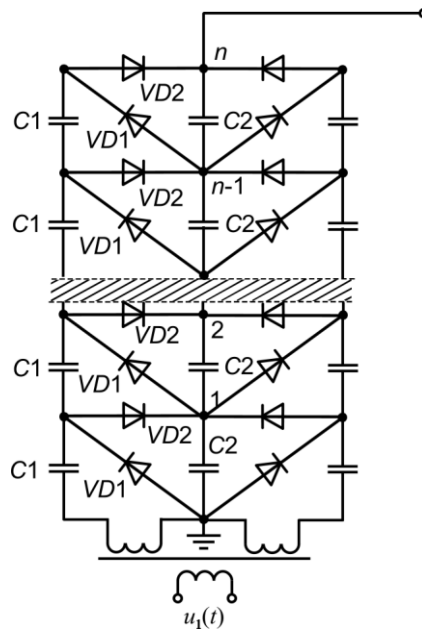


Рис. 2.9. Двухполупериодная схема умножения напряжения

Поскольку подзарядка конденсаторов $C2$ происходит в оба полупериода питающего напряжения, такая схема получила название двухполупериодной схемы умножения напряжения. Падение напряжения Δu и пульсации δu в схеме (рис. 2.9) существенно меньше, чем в схеме (рис. 2.8). При числе степеней, например, 3 они уменьшаются в 8 раз при увеличении конденсаторов в 1,5 раза и числа вентилях в 2 раза.

$$\begin{aligned} \delta u &= \frac{i \cdot n}{4 f C}; \\ \Delta u &= \frac{i}{f C} \frac{2n^3 + 3n^2 + 4n}{12}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Еще большее уменьшение Δu и δu достигается при использовании параллельного включения трех схем рис. 2.8 при питании каждой схемы от различных фаз трехфазной сети.

Каскадные схемы, приведенные на рис. 2.8 и рис. 2.9, применяются при сравнительно небольших токах, не превышающих обычно десятков миллиампер, а число степеней редко превышает 10. При питающих напряжениях порядка сотен киловольт от каскадных выпрямителей получают напряжения до 3÷5 МВ. Для ускорения процесса зарядки в каскадных схемах часто значение конденсатора C_1 первой ступени выбирают больше емкостей остальных конденсаторов. При разработке каскадных схем необходимо, прежде всего, установить, что является более

предпочтительным: увеличение емкости или увеличение питающей частоты. В крупных установках необходимо учитывать падение напряжения в трансформаторах и на вентилях, что не было сделано при выводе формул (2.8), (2.9) и (2.10). Необходимо также учитывать паразитные емкости колонн конденсаторов C_1 и C_2 между собой и относительно земли.

Каскадные выпрямители на большие токи (от нескольких десятков миллиампер до единиц ампер) выполняются с питанием каждой ступени от отдельного трансформатора. Нижняя граница токов обеспечивается при ступенях с удвоением напряжения, а верхняя при мостиковых многофазных схемах соединения выпрямителей каждой ступени напряжения. На рис. 2.10 представлены схемы, характерные для мощных каскадных выпрямителей. Питание каждой ступени каскада осуществляется от отдельного трансформатора. Цифрой 1 на рис. 2.10 обозначена питающая обмотка, цифрой 2 – вторичная (высоковольтная) обмотка и цифрой 3 – обмотка связи. Иногда схемы, представленные на рис. 2.10, называют схемами с трансформаторным подпором.

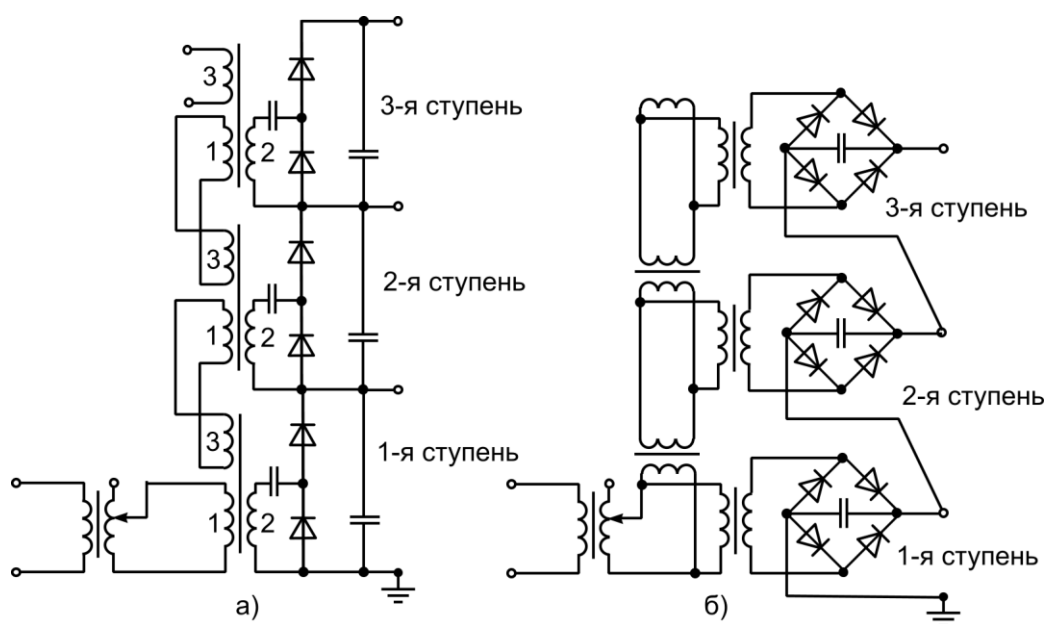


Рис. 2.10. Схемы мощных каскадных выпрямителей:

а) ступень с удвоением напряжения; б) ступень с мостиковой схемой

На рис. 2.11 представлена реализация схемы умножения в НИИ постоянного тока (Санкт-Петербург) с питанием от трансформатора с $U_{\text{ном}} = 500$ кВ, в которой получают постоянное напряжение 1200 кВ.

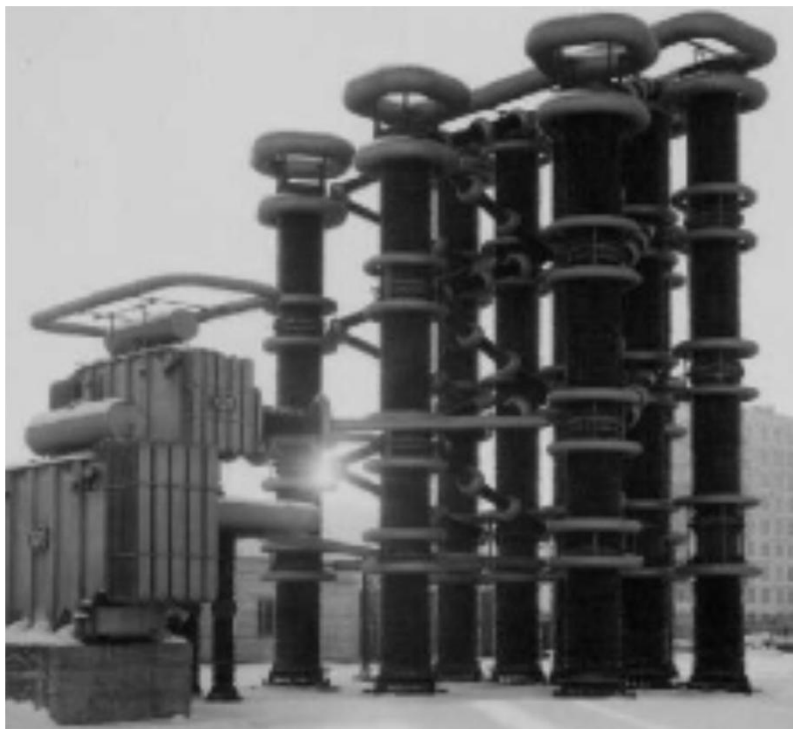


Рис. 2.11. Установка постоянного напряжения 1200 кВ НИИ ПТ

Вариантом каскадных схем являются дельтатроны (энгетроны), которые построены по принципу модернизированного трансформаторного подпора [6] с использованием в каскаде специальных трансформаторов без сердечников и компенсацией реактивной мощности системой конденсаторов.

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называются выпрямителями?
2. На какое напряжение изготавливаются полупроводниковые диоды из селена?
3. На какое напряжение изготавливаются полупроводниковые диоды из германия?
4. На какое напряжение изготавливаются полупроводниковые диоды из кремния?
5. С какой целью в высоковольтных выпрямительных столбах, состоящих из нескольких последовательно соединенных диодов, параллельно диодам подключаются емкости?
6. Нужны ли выравнивающие емкости в селеновых выпрямителях?
7. Нужны ли выравнивающие емкости в германиевых выпрямителях?
8. Нужны ли выравнивающие емкости в кремниевых выпрямителях?

9. На какое напряжение должны выбираться диоды в выпрямителях с однополупериодной схемой при питающем напряжении U ?

10. Какое напряжение получается в однополупериодной схеме выпрямителя с конденсатором без активного сопротивления на конденсаторе?

11. Какое напряжение получается в однополупериодной схеме выпрямителя без конденсатора с активным сопротивлением на сопротивлении?

12. Какое напряжение получается в однополупериодной схеме выпрямителя на диоде?

13. Как работает схема удвоения напряжения?

14. Как работает каскадная схема?

15. Как работает каскадная схема с трансформаторным подпором?

ГЛАВА 3. УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

§ 3.1. Общие вопросы получения и применения импульсного высокого напряжения

В процессе эксплуатации аппаратов высокого напряжения (АВН) они, кроме воздействия переменных или высоких постоянных напряжений, подвержены влиянию импульсных ВН. Последние возникают при коммутациях оборудования (коммутационные перенапряжения) или при воздействии ударов молний (грозовые перенапряжения). Амплитуды импульсных ВН во много раз превышают номинальное напряжение, при котором работают АВН, и называются **перенапряжениями**. Для обеспечения надежности работы АВН в условиях реальной эксплуатации оборудование должно пройти испытания на устойчивость к этим видам перенапряжений. Испытания АВН проводятся в специальных высоковольтных лабораториях и залах, оснащенных установками (генераторами) импульсных напряжений, которые генерируют грозовые и коммутационные импульсы. По своей природе как грозовые, так и коммутационные импульсы имеют различную форму, амплитуду и длительность. Для воспроизведения результатов опытов в различных лабораториях и сопоставления их с реальными импульсными перенапряжениями были введены стандартные характеристики импульсов. Импульсы, которыми испытывается АВН, называют **испытательными импульсами**.

§ 3.1.1. Грозовые импульсы

На рис. 3.1 представлены формы грозовых апериодических испытательных импульсов в соответствии с требованиями ГОСТ.

Одна из основных характеристик импульсного напряжения – амплитуда импульса (испытательное напряжение), т.е. максимальное значение напряжения в импульсе. На рис. 3.1 оно принято за единицу. Часто на гладкую кривую (рис. 3.1) накладываются высокочастотные колебания переходного процесса. При наличии вблизи максимума импульса наложенных колебаний или одиночных выбросов за значение испытательного напряжения принимают: а) максимальное значение средней кривой, если частота колебаний выше 500 кГц (рис. 3.2, в) или длительность выброса $t \leq 1$ мкс (рис. 3.2, а);

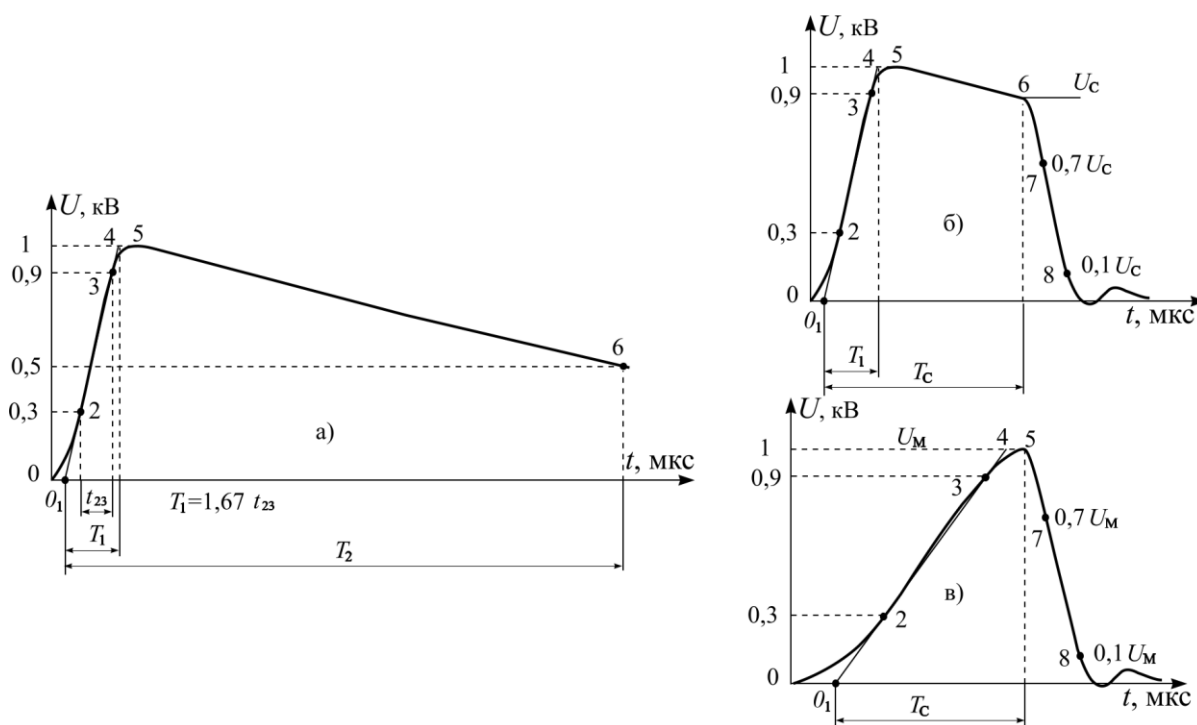


Рис. 3.1. Формы импульсов грозových перенапряжений: а) полный импульс; б) срезанный на спаде; в) срезанный на фронте импульс; O_1 – условное начало импульса; T_1 – длительность фронта импульса; T_2 – длительность импульса; T_c – время среза импульса; U_c – напряжение в момент среза

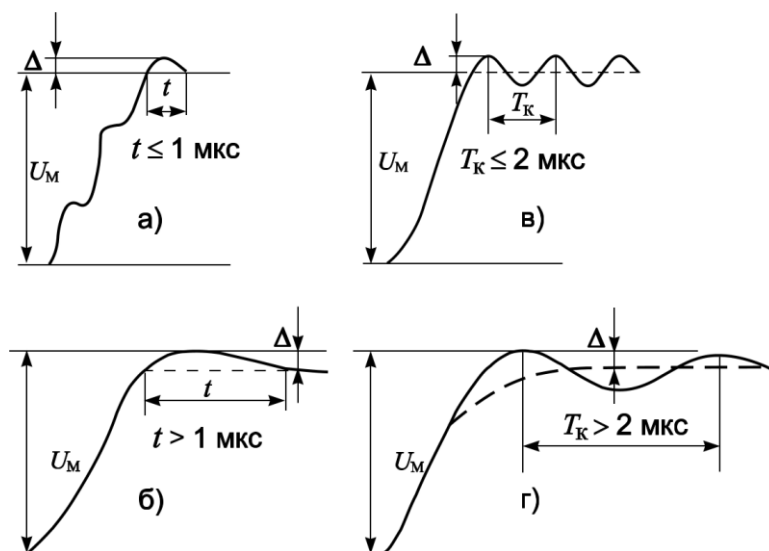


Рис. 3.2. Определение максимального значения аperiodического импульса: а), б) – с одиночными выбросами; в), г) – с наложенными колебаниями

б) максимальное значение импульса, если частота колебаний ниже 500 кГц (рис. 3.2, г) или длительность выброса $t > 1$ мкс (рис. 3.2, б). Амплитуда колебаний Δ (рис. 3.2) не должна составлять более 5 %

максимального значения, в том числе и при частоте колебаний менее 500 кГц. При проведении испытаний АВН максимальное напряжение зависит от класса напряжения и вида испытываемого оборудования. Оно меняется от нескольких десятков киловольт для оборудования класса 3 кВ до мегавольт для сверхвысоковольтного оборудования. В соответствии с ГОСТ [2] максимальное напряжение не должно отличаться от табличного значения более чем на $\pm 3 \%$.

Следующей важной характеристикой является форма импульса. Она характеризуется длительностью фронта импульса T_1 и длительностью импульса T_2 . Длительность фронта импульса определяется следующим образом:

а) на зависимости напряжения импульса от времени находятся точки 2 и 3, соответствующие значениям напряжения 30 % и 90 % от максимального. Точка 2 выбрана потому, что в начале импульса имеются искажения, вызванные помехами.

б) через точки 2 и 3 (рис. 3.1) проводится прямая и находятся точки ее пересечения с осью абсцисс (точка O_1 – условное начало импульса) и прямой, параллельной оси абсцисс, проходящей через точку максимального напряжения (точка 4);

в) находится интервал времени t_{23} ;

г) длительность фронта импульса T_1 находится умножением времени t_{23} на 1,67. Коэффициент 1,67 получается из решения треугольника рис. 3.1, а.

Стандартный грозовой импульс имеет $T_1 = 1,2 \pm 0,36$ мкс [1, 18].

За длительность импульса принимается интервал времени между условным началом импульса и точкой 6, соответствующей амплитуде 50 % от максимального значения (напряжение в точке 5). Стандартный грозовой импульс имеет $T_2 = 50 \pm 10$ мкс [1, 2]. Условное обозначение полного стандартного грозового импульса 1,2/50.

Кроме полных импульсов применяются также срезанные импульсы (рис. 3.1, б, в). Срезанные импульсы напряжения возникают, в основном, при грозовых перекрытиях наружной изоляции или при срабатывании разрядников и защитных стержневых промежутков. Для срезанных импульсов вводится дополнительная характеристика – время среза импульса T_c , определяемое пересечением прямой, проведенной через точки 7 и 8 и кривой полного импульса, а также длительность среза, равная 1,67 интервала времени между точками 7 и 8 [3, 6]. Однако длительность среза, которая обычно определяется минимальными размерами петли срезающей цепи, находится с большими погрешностями, и поэтому она редко используется в качестве характеристики

импульса. Наиболее часто нормируется время среза, которое обычно отстоит от точки O_1 на $2 \div 5$ мкс. Допускается применять апериодические импульсы с наложенными колебаниями и единичными выбросами напряжения при условии, что максимальное отклонение напряжения Δ от средней кривой не превышает вблизи максимума импульса 5 % от максимального значения.

§ 3.1.2. Коммутационные импульсы

Импульсы коммутационных напряжений называют также **внутренними перенапряжениями** и отличаются от грозовых импульсов гораздо большей длительностью. В соответствии с ГОСТ 1516.2-97 [1] при испытаниях электрооборудования классов напряжения 330 кВ и выше, применяют следующие виды коммутационных импульсов: а) апериодический (рис. 3.3, а); б) колебательный, с затуханием около нулевого значения напряжения (рис. 3.3, б); в) колебательный, затухающий вокруг составляющей более низкой частоты (рис. 3.3, в). Импульс коммутационных перенапряжений, как и кривая грозовых импульсов, описывается временем спада $T_{\text{и}}$ (T_2) до половины максимального значения напряжения и временем подъема $T_{\text{п}}$, которое легко, хотя и с большой погрешностью, находится из осциллограммы. Поэтому часто вместо $T_{\text{п}}$ используют длительность фронта, определяемую так же, как и для грозового импульса, или в качестве дополнительного параметра вводят время T_{90} , в течение которого напряжение превышает $0,9U_{\text{М}}$. Нормированным коммутационным импульсом часто является импульс 250/2500 мкс, при котором время подъема $T_{\text{п}} = 250 \pm 50$ мкс, а длительность импульса $T_{\text{и}} = 2500 \pm 750$ мкс. В целом ряде исследований используют и другие, значительно отличающиеся от приведенных параметров импульсы – апериодические импульсы 100/2500, 500/2500, 1000/5000 с допусками на время подъема ± 20 %, длительность ± 30 % и максимальное значение ± 3 %. Необходимость применения этих импульсов должна быть указана в нормативных документах на электрооборудование отдельных типов.

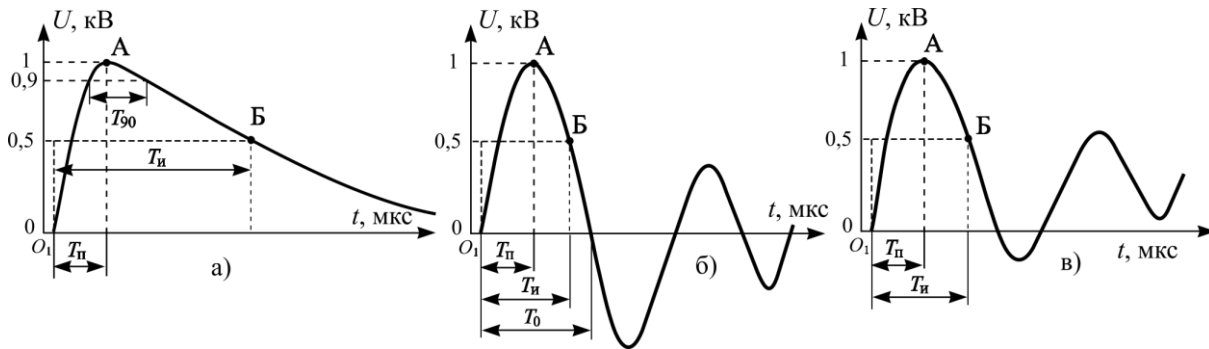


Рис. 3.3. Формы и характеристики коммутационных импульсов

Стандартный колебательный коммутационный импульс (рис. 3.3, б) применяется как для испытания внутренней изоляции газонаполненного оборудования (испытываемой отдельно от внешней), так и для испытаний линейной изоляции, в том числе гирлянд изоляторов [3]. Он должен иметь время подъема $T_{\pi} = 4000 \pm 1000$ мкс, длительность импульса $T_{и} = 7500 \pm 2500$ мкс и допуск на максимальное значение $\pm 3\%$. Обозначение импульса – 4000/7500. Полярность импульса определяется полярностью первого полупериода. Допускается применение импульса как на рис. 3.3, в. При этом его параметры должны быть такими, как для стандартного колебательного импульса (рис. 3.3, б).

Для испытания внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов применяется коммутационный импульс 20/500 с временем подъема T_{π} не менее 20 мкс, длительностью импульса $T_{и}$ не менее 500 мкс, с временем свыше 90 % от U_M не менее 200 мкс и допуском на максимальное значение импульса $\pm 3\%$.

Форма и параметры коммутационного импульса, которым должна испытываться та или иная изоляция, а также отношение максимального значения второго полупериода к максимальному значению первого и время свыше 90 %, если они влияют на результаты испытания, должны быть указаны в нормативных документах на электрооборудование отдельных видов.

Требования к значениям суммарной емкости объекта и дополнительной емкости испытательных установок такие же, как и при испытании изоляции оборудования напряжением промышленной частоты.

При испытании объектов с емкостной характеристикой (выключатели, разъединители, вводы, трансформаторы тока, конденсаторы и т.д.) апериодическим коммутационным импульсом напряжения рекомендуется использовать ГИН, а при испытании приложением

колебательного импульса напряжения – применять схемы на основе испытательного трансформатора (каскада трансформаторов).

При испытании трансформаторов индуктированным колебательным импульсом напряжения рекомендуется применять схемы, основанные на принципе разряда конденсаторной батареи на обмотку низшего напряжения испытуемого трансформатора.

Одной из задач исследований, которые проводятся в высоковольтных лабораториях, является исследование пробоя длинных воздушных промежутков в воздухе и других изоляционных средах. Она достаточно актуальна в связи с разработкой изоляции ЛЭП и проблемой их грозоупорности. Такие исследования проводятся не только со стандартными импульсами, описанными выше, но также и, например, с импульсами с косоугольным фронтом, с предельно коротким фронтом и медленным спадом, с регулируемой длительностью фронта [3].

§ 3.1.3. Импульсные токи

Оборудование линий электропередачи подвергается воздействиям сильных токов, вызванных различными причинами. Следует упомянуть, прежде всего, токи КЗ с частотой сети, предельное значение которых может намного превышать 50 кА. Однако эти токи нельзя рассматривать как импульсные в узком значении этого слова, так как они оказывают сильные термические и механические воздействия на оборудование. Воспроизведение этих токов в лабораторных условиях производится с помощью ударных генераторов – специально сконструированных машинных генераторов высокого напряжения большой мощности, которые обеспечивают примерно в течение 1 с мощность в несколько тысяч мегавольт-ампер [12, 20].

Под импульсными токами в узком смысле понимают существенно более кратковременные токи, непосредственно или косвенно связанные с воздействием молнии. Так, непосредственные удары молнии в воздушные линии электропередачи или оборудование линий очень часто приводят к перекрытию изоляторов или срабатыванию грозозащитного оборудования, и ток молнии может непосредственно воздействовать на пораженное устройство. Токи молнии имеют сильный статистический разброс, как по форме импульса, так и по его амплитуде, которая может превышать 100 кА. Поэтому устройства, прежде всего грозозащитные, должны быть испытаны импульсами экспоненциальной формы (рис. 3.4) для того, чтобы определить термическое, механическое и электрическое воздействие на них молнии.

На грозозащитную аппаратуру длительно воздействует рабочее напряжение сети. После срабатывания разрядника через него начинает разряжаться емкость линии, к которой он подключен, до тех пор, пока напряжение на линии не снизится до рабочего напряжения, и в момент изменения полярности напряжения станет возможным гашение дуги в разряднике. Разряд линии можно приблизительно описать прямоугольным импульсом тока (рис. 3.5), амплитуда которого в основном определяется рабочим напряжением и волновым сопротивлением линии.

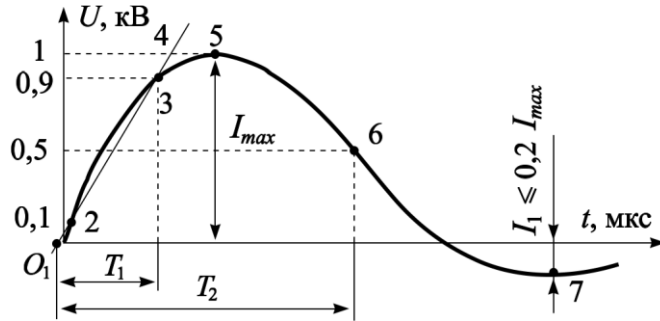


Рис. 3.4. Двухэкспоненциальный импульс

Подобный импульс представляет большую нагрузку на разрядник, если велика длительность прямоугольного по форме тока и выделяющаяся в разряднике энергия.

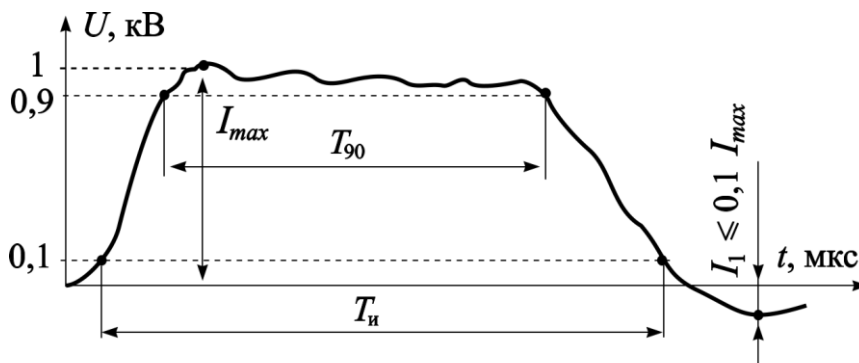


Рис. 3.5. Прямоугольный импульс

Импульсные токи применяются также при исследованиях высокотемпературной плазмы (управляемые термоядерные реакции), обработке металлов ударными волнами или магнитным импульсным полем, создании импульсных источников света. Параметры импульсов токов, как и импульсных напряжений, нормируются.

У импульса, образованного двойной экспонентой (рис. 3.4), нормируется длительность фронта и длительность импульса T_2 , равная времени спада тока до половины его максимального значения. T_1 определяется подобно определению длительности фронта импульса напряжения на рис. 3.1, но прямая проводится через точки 0,1 и 0,9 I_{max} . Часто используются импульсы 8/20 мкс или 4/10 мкс с допусками на длительности фронта и импульса $\pm 10\%$. Допускается переход тока через

нулевую линию и изменение полярности, причем выброс обратной полярности не должен превышать 20 %, а наложенные колебания – 5 % от максимального значения тока.

Прямоугольные импульсы тока (рис. 3.5) обычно получают от искусственных формирующих линий. Форма импульса тока помимо «полки», определяемой временем T_{90} , в течение которого ток превышает $0,9 I_{\max}$, задается временем «основания» $T_{\text{и}}$, в течение которого ток больше $0,1 I_{\max}$. Допуски на характеристики импульса следующие: максимальное значение $I_{\max}$, время T_{90} (-10 % - +20 %), время $T_{\text{и}} < 1,5 T_{90}$. Допустимый выброс обратной полярности не должен превышать $0,1 I_{\max}$. Номинальные значения T_{90} – 500; 1000; 2000; 3200 мкс.

§ 3.2. Генераторы импульсных напряжений (ГИН)

Грозовые (рис. 3.1) и коммутационные (рис. 3.3) импульсы напряжения можно воспроизвести наложением двух затухающих экспоненциальных функций разных полярностей (рис. 3.4). Это означает, что схема для получения этих импульсов должна содержать, по крайней мере, два накопителя энергии, чтобы обеспечить требуемую двухэкспоненциальную форму кривой. Обычно в качестве накопителей энергии используются индуктивности и емкости. Индуктивный накопитель с большой накапливаемой энергией не пригоден для быстрого разряда в микросекундном диапазоне. Испытуемый объект чаще всего представляет собой емкостную нагрузку, а в качестве генераторов используют обычно схемы с емкостным накопителем энергии. Индуктивность схемы генератора ограничивает минимально возможную длительность фронта импульса T_1 . С помощью специальных конструктивных решений можно добиться существенного снижения индуктивности схемы и ее можно рассматривать как паразитную, а в схемах генератора ею вообще пренебрегают. Для получения очень высоких напряжений используются, как правило, многоступенчатые схемы генераторов. Работу таких генераторов лучше всего пояснить с помощью одноступенчатой принципиальной схемы.

§ 3.2.1. Схема одноступенчатого ГИН

При напряжениях менее 100 кВ применяются одноступенчатые схемы. Один вариант такой схемы показан на рис. 3.6. Накопительный конденсатор C_1 медленно, за время более 5 с, заряжается от источника постоянного напряжения до напряжения U_0 и затем через коммутатор SF разряжается на емкость нагрузки C_2 . Сопротивления R_2 (разрядное сопротивление), R_1' и R_1'' (фронтовые сопротивления) служат для получения требуемой формы импульса. При $U_0 > 10$ кВ в качестве коммутатора SF может быть использован простейший шаровой разрядник, работающий в атмосферном воздухе и срабатывающий без дополнительной

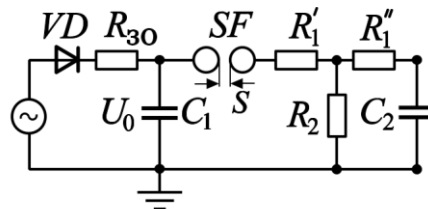


Рис. 3.6. Схема одноступенчатого ГИН

системы управления при малых разбросах напряжения пробоя. Уровень требуемого напряжения регулируется расстоянием S между шарами. Время коммутации такого простейшего искрового промежутка при больших напряжениях ~ 10 нс, поэтому процесс коммутации незначительно влияет на изменение напряжения $u(t)$ на емкости C_2 . Сам элемент SF можно рассматривать как идеальный коммутатор при получении грозowych импульсов (малое падение напряжения в проводящем состоянии). Следует отметить, что в качестве коммутаторов применяются также и другие типы управляемых и неуправляемых коммутаторов. Электронные коммутаторы (транзисторы, тиристоры, тиратроны) находят применение лишь при низких напряжениях.

Нагрузка C_2 состоит из параллельно соединенных: емкости испытуемого объекта $C_{об}$; емкости измерительной аппаратуры $C_{и}$, включая емкости измерительного и срезающего шаровых разрядников; емкости генератора и всех соединительных проводников на стороне высокого напряжения $C_{пр}$; дополнительной (стабилизирующей) емкости $C_{ст}$.

$$C_2 = C_{об} + C_{и} + C_{пр} + C_{ст}. \quad (3.1)$$

При компактном исполнении испытательной схемы величиной $C_{пр}$ можно пренебречь. Стабилизирующая дополнительная емкость $C_{ст}$ ставится в схему для того, чтобы при изменении емкости объектов испытаний $C_{об}$ не возникало необходимости в замене фронтовых и разрядных сопротивлений. Часто эта емкость используется как

высоковольтное плечо емкостного делителя напряжения. Сопротивление R_{30} , через которое происходит зарядка накопительной емкости C_1 определяет время заряда ГИН и служит для ограничения зарядных токов.

Работа генератора, схема которого представлена на рис. 3.6, состоит из двух этапов. На первом этапе происходит зарядка накопительной емкости C_1 от источника напряжения U_0 через зарядное сопротивление R_{30} . Время заряда определяется постоянной времени заряда $\tau_{зар} = R_{30} \cdot C_1$ и зависит от типа питающего напряжения. На рис. 3.7. представлены графики изменения напряжения на емкости C_1 . График 2 соответствует зарядке от источника постоянного напряжения. График 1 соответствует зарядке от источника переменного напряжения с однополупериодным выпрямлением при условии, что $\tau_{зар} \gg 5$ мс, т.е. значительно больше четверти периода переменного напряжения промышленной частоты. Обычно для ГИН, предназначенных для проведения высоковольтных испытаний это условие выполняется.

Отрезки времени зарядки емкости t_1 , t_2 и t_3 (рис. 3.7, б) определяются временем открытия вентиля VD (рис. 3.6) из условия $U > U_{C1}$. По мере зарядки емкости C_1 эти отрезки уменьшаются. Если постоянная времени заряда $\tau_{зар} \ll 5$ мс, то зарядка емкости C_1 происходит в первую четверть периода, т.е. $t_1 = 5$ мс, а $t_2 = t_3 = 0$.

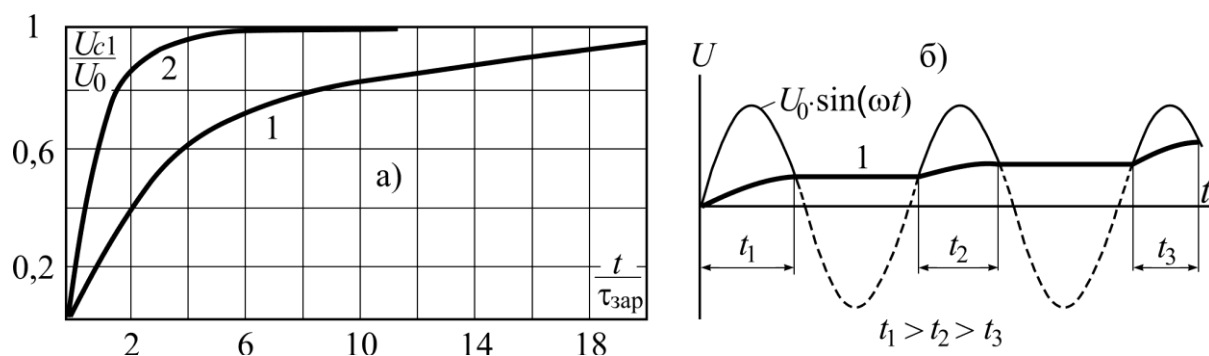


Рис. 3.7. Зарядка емкости: а) от источника с однополупериодным выпрямлением (1) и постоянным напряжением (2); б) график изменения напряжения 1

После зарядки емкости C_1 происходит срабатывание коммутатора SF , пробивное напряжение которого выбирается равным напряжению U_0 . Если в качестве коммутатора SF выбирается управляемый коммутатор, то время его срабатывания определяется временем подачи управляющего

импульса со специального запускающего генератора (ЗГ). Начинается зарядка емкости C_2 через фронтовые сопротивления R_1'' и R_1' . Напряжение на объекте испытаний (емкости C_2) возрастает до некоторого максимального значения, после чего начинается его уменьшение. Малая длительность фронта T_1 импульса $u(t)$ (зарядка C_2) обеспечивается соответствующим подбором фронтовых сопротивлений. Параллельно с зарядкой C_2 емкость C_1 разряжается через разрядное сопротивление R_2 , однако, в силу того, что разрядное сопротивление значительно больше фронтовых, этим процессом при оценочных расчетах можно пренебречь. Эти процессы представлены на рис. 3.8.

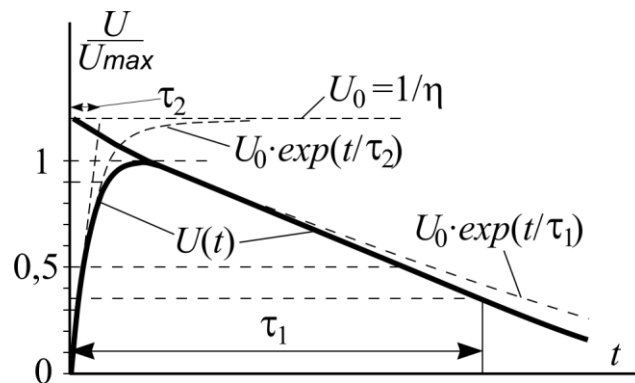


Рис. 3.8. Импульс ГИН

Максимальное напряжение на объекте испытаний ($U_{\max}$) оказывается меньше, чем напряжение U_0 , до которого была заряжена накопительная емкость C_1 до срабатывания коммутатора. Это объясняется по меньшей мере двумя причинами: а) сопротивления R_2 и R_1' образуют делитель напряжения и поэтому напряжение на C_2 будет несколько меньше чем на накопительной емкости $U_{C2} = \frac{R_2}{R_2 + R_1'} \cdot U_{C1}$; б) зарядка емкости C_2 осуществляется за счет зарядов, накопленных на C_1 (происходит перераспределение зарядов), что приводит к ее разряду и уменьшению напряжения до величины $U_{C1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_0$. После достижения максимального напряжения на объекте испытаний (C_2) начинается процесс совместной разрядки емкостей C_1 и C_2 , обеспечивая (подбором разрядного сопротивления R_2) требуемую длительность импульса T_2 . Импульс может быть количественно описан с помощью

постоянных времени τ_1 , τ_2 и коэффициента использования по напряжению η . Максимальное значение выходного напряжения регулируется за счет изменения напряжения пробоя коммутатора SF . В простых разрядниках, работающих в атмосферном воздухе, необходима бесступенчатая регулировка расстояния между электродами. Такая регулировка осуществляется дистанционно, обычно электроприводом. Если используются управляемые разрядники, то нужно измерять зарядное напряжение U_0 с помощью специальных делителей напряжения и по достижению требуемого значения напряжения подавать сигнал на запускающий (поджигающий) генератор. При необходимости работы генератора в режиме повторяющихся импульсов с постоянной амплитудой нельзя воспользоваться напряжением пробоя разрядников, так как на его значение влияют предшествующие разряды. В этом случае следует поддерживать постоянным время зарядки емкости C_1 . Важнейшей характеристикой генератора является накопленная в конденсаторе C_1 энергия, кДж, при максимальном рабочем напряжении U_0 :

$$W = \frac{C_1 \cdot U_0^2}{2}. \quad (3.2)$$

Энергия W определяет также и стоимость генератора.

Напряжение на емкости C_2 (объекте испытаний) имеет вид:

$$U(t) = \eta \cdot U_0 \cdot \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (3.3)$$

где $\eta = U_{\max} / U_0$ – коэффициент использования по напряжению

$$\eta = \frac{R_2 \cdot C_1}{\sqrt{B^2 - 4A}}; \quad (3.4)$$

$$\tau_1 = \frac{2A}{B - \sqrt{B^2 - 4A}}; \quad \tau_2 = \frac{2A}{B + \sqrt{B^2 - 4A}}; \quad (3.5)$$

$$A = C_1 \cdot C_2 (R_2 \cdot R_1' + R_2 \cdot R_1'' + R_1' \cdot R_1''); \quad (3.6)$$

$$B = C_2 (R_2 + R_1'') + C_1 (R_2 + R_1'). \quad (3.7)$$

Время достижения максимального напряжения на объекте испытаний можно определить, если взять производную по t от $U(t)$ в выражении (3.3) и приравнять ее нулю:

$$t_{\max} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right). \quad (3.8)$$

При оценках параметров ГИН можно использовать упрощенные формулы постоянных заряда соответствующих RC цепочек:

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}; \quad \tau_1 = R_2 \cdot (C_1 + C_2); \quad \tau_2 = C_2 \cdot (R_1' + R_1''). \quad (3.9)$$

Связь между постоянными времени τ_1 и τ_2 и параметрами импульса T_1 и T_2 можно оценить по следующим соотношениям:

$$\tau_1 = a \cdot T_2; \quad \tau_2 = \frac{b}{2} \cdot T_1 = \frac{c}{2} \cdot T_1, \quad (3.10)$$

где коэффициенты a, b, c можно оценить из графиков рис. 3.9.

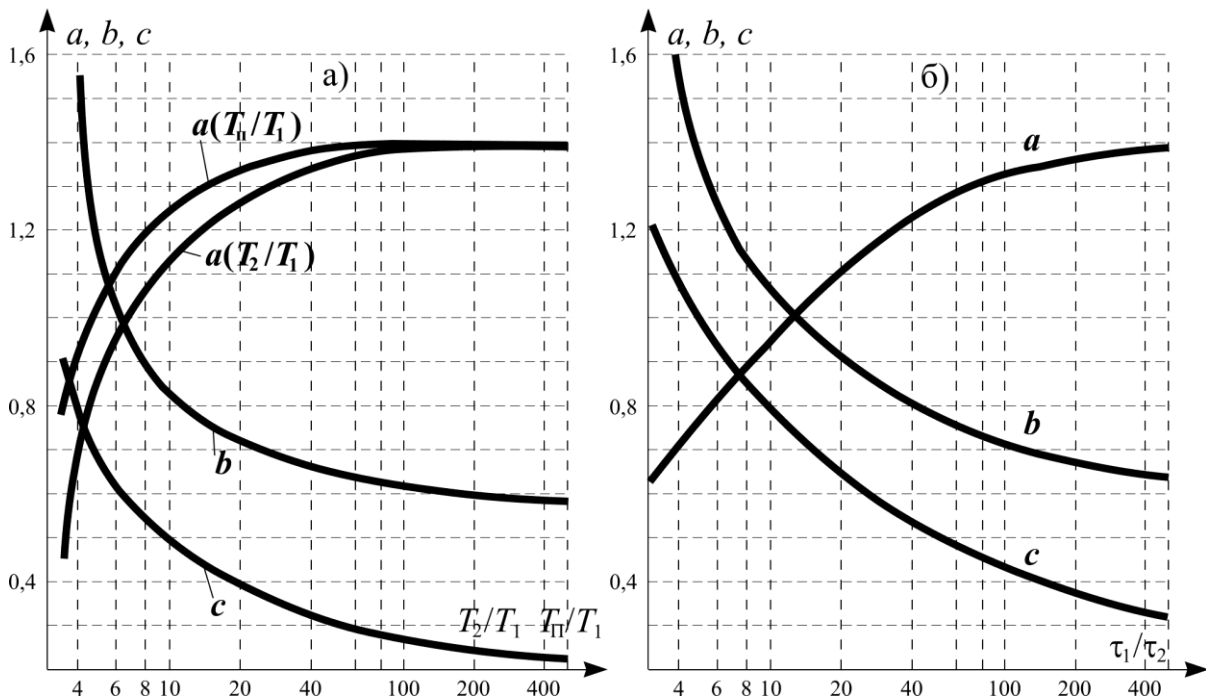


Рис. 3.9. Зависимость коэффициентов a, b, c в уравнении (3.10)

§ 3.2.2. Схемы ГИН (Аркадьева-Маркса) с умножением напряжения

Одноступенчатые схемы (рис. 3.6) при напряжениях более 250÷300 кВ становятся неприемлемыми, так как затраты на создание источника высокого зарядного напряжения оказываются чрезмерно большими, а значительные размеры элементов не позволяют изготовить генератор компактным.

Для получения компактных генераторов используют схемы умножения напряжения. Однорядные и двухрядные схемы ГИН приведены на рис. 3.10 и рис. 3.11. Кроме того, максимальное рабочее напряжение современных импульсных конденсаторов не превышает 400 кВ.

Основной принцип работы многоступенчатых ГИН с умножением напряжения состоит в том, что накопительные конденсаторы C'_{01} , C'_{02} заряжаются параллельно до напряжения U_0 , а в момент коммутации соединяются последовательно. Суммарное напряжение на таком сборном конденсаторе C_1 (емкость «в ударе») увеличивается в n раз, где n – число накопительных конденсаторов.

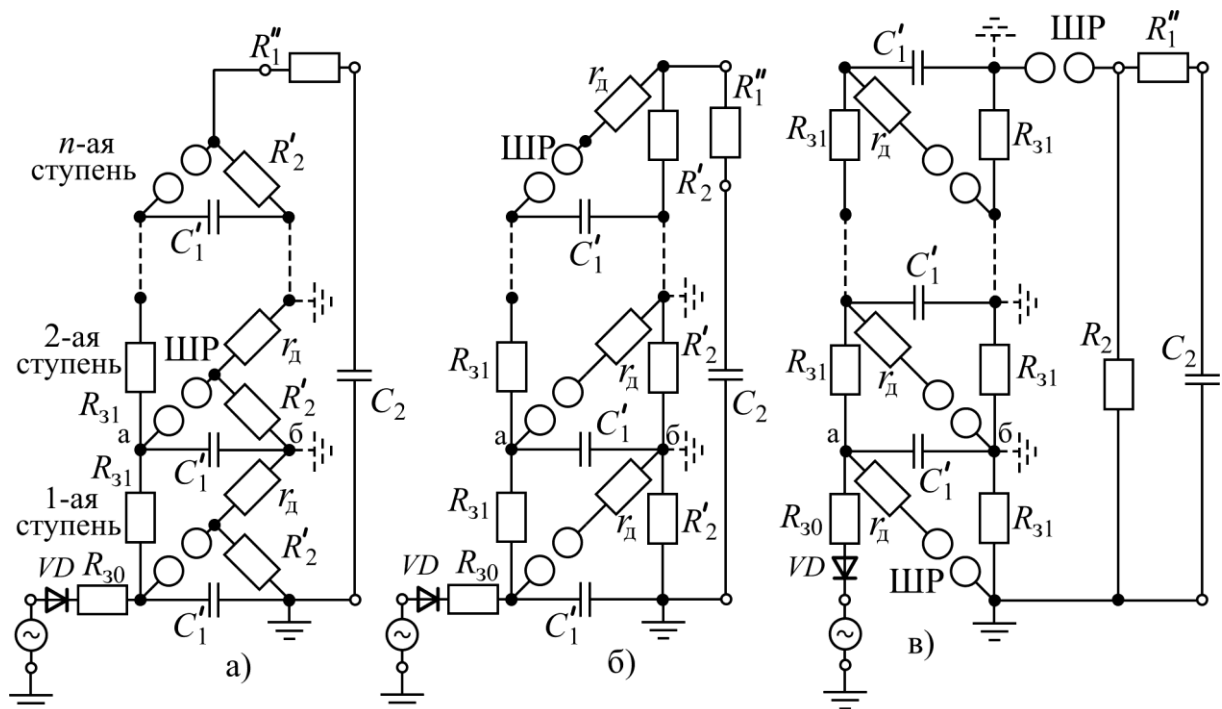


Рис. 3.10. Однорядные схемы ГИН с умножением напряжения

Времена зарядки отдельных конденсаторов многоступенчатых ГИН несколько отличаются друг от друга, поскольку в цепях зарядки стоит разное число зарядных сопротивлений R_{31} . Для снижения различий времен

зарядки в первой ступени обычно ставится зарядное сопротивление $R_{30} \gg R_{31}$. При таком выборе зарядных сопротивлений постоянная времени всех конденсаторов практически будет равна $\tau_{\text{зар}} = R_{30} \cdot C'_{01}$. Время заряда определяется по графикам (рис. 3.7) и обычно выбирается равным 10÷30 с.

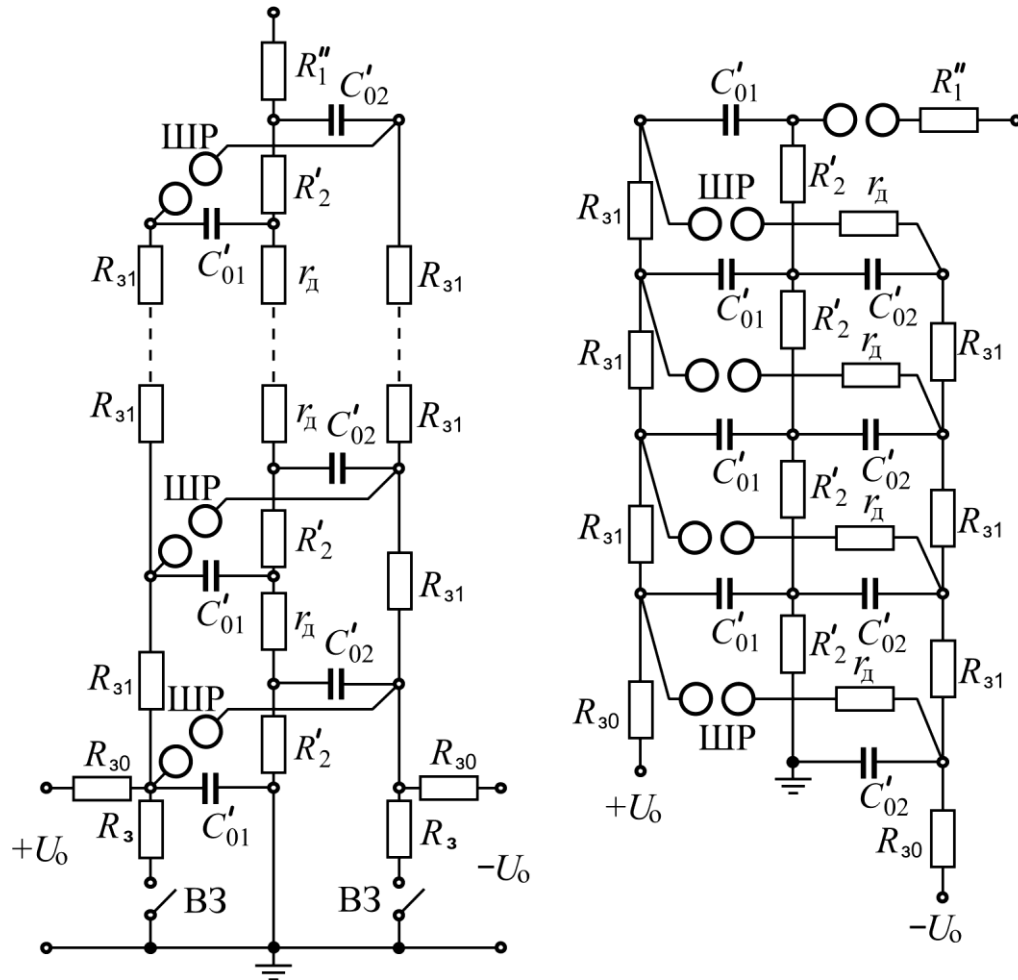


Рис. 3.11. Двухрядные схемы ГИН с умножением напряжения

Поскольку конденсатор C'_{02} заряжен до напряжения U_0 и U_4 больше на 100 кВ, чем U_7 , напряжение в точках 4 и 5 становится равным 200 кВ. Для сглаживания переходных процессов при коммутации разрядников между точками 4 и 5 ставятся демпфирующие сопротивления r_d , которые одновременно являются составляющими фронтового сопротивления R'_1 . Потенциал в точке 2 на 100 кВ больше, чем в точке 5 и становится равным 300 кВ. На шаровом разряднике второй ступени (между точками 2 и 8) возникает разность потенциалов в 300 кВ, вследствие чего он пробивается. В

точке 8 потенциал также становится 300 кВ. Поскольку в точке 6 потенциал на 100 кВ больше, чем в точке 8 (конденсатор заряжен), то он становится равным 400 кВ. Процесс продолжается до пробоя всех шаровых разрядников ступеней и соединения всех конденсаторов ГИН последовательно. Суммарная емкость всех накопительных конденсаторов C'_{01} , C'_{02} образует емкость C_1 схемы (рис. 3.6). Обычно в ГИН выбираются одинаковые по емкости накопительные конденсаторы, так что $C'_{01} = C'_{02} = C_1 \cdot n$.

На рис. 3.12 представлена схема двух первых каскадов ГИН 120/2400 (120 кДж, 2400 кВ) серии G фирмы High Volt. Поперечный разрез и внешний вид этого ГИН показан на рис. 3.13 и 3.14, на рис. 3.15 – ГИН ВЭИ.

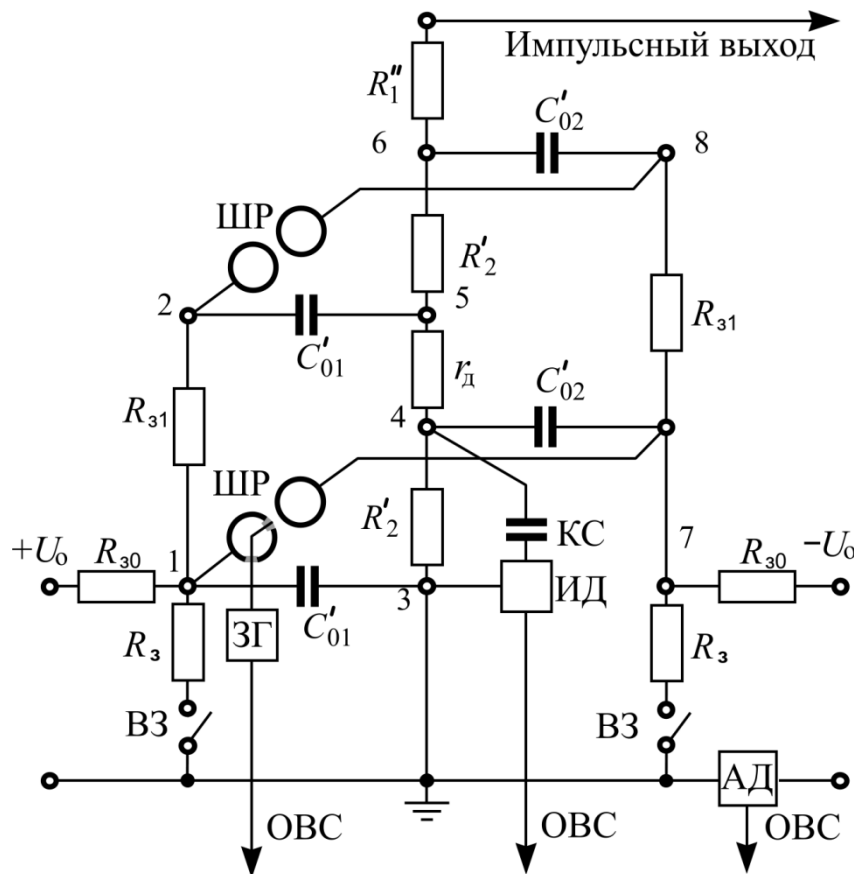


Рис. 3.12. Схема каскада ГИН

В качестве коммутатора в первой ступени выбран управляемый шаровой разрядник (тригatron). Запуск генератора осуществляется подачей на тригatron поджигающего импульса от запускающего генератора (ЗГ). Управляющий сигнал на запускающий генератор подается по оптоволоконным линиям связи (ОВС) с пульта управления. По ОВС на пульт поступает информация через конденсатор связи (КС) с импульсного

детектора (ИД) и с аварийного детектора (АД). После зарядки накопительных конденсаторов C'_{01} , C'_{02} устанавливаются следующие напряжения: в точках 1, 2 $U_1 = U_2 = U_0 = 100$ кВ. В точках 3÷6 $U_3 = U_4 = U_5 = U_6 = 0$. В точках 7, 8 $U_7 = U_8 = -U_0 = -100$ кВ. После коммутации и пробоя разрядного промежутка тригatronа потенциал точки 7 становится равным потенциалу точки 1, т.е. $U_1 = U_7 = 100$ кВ.

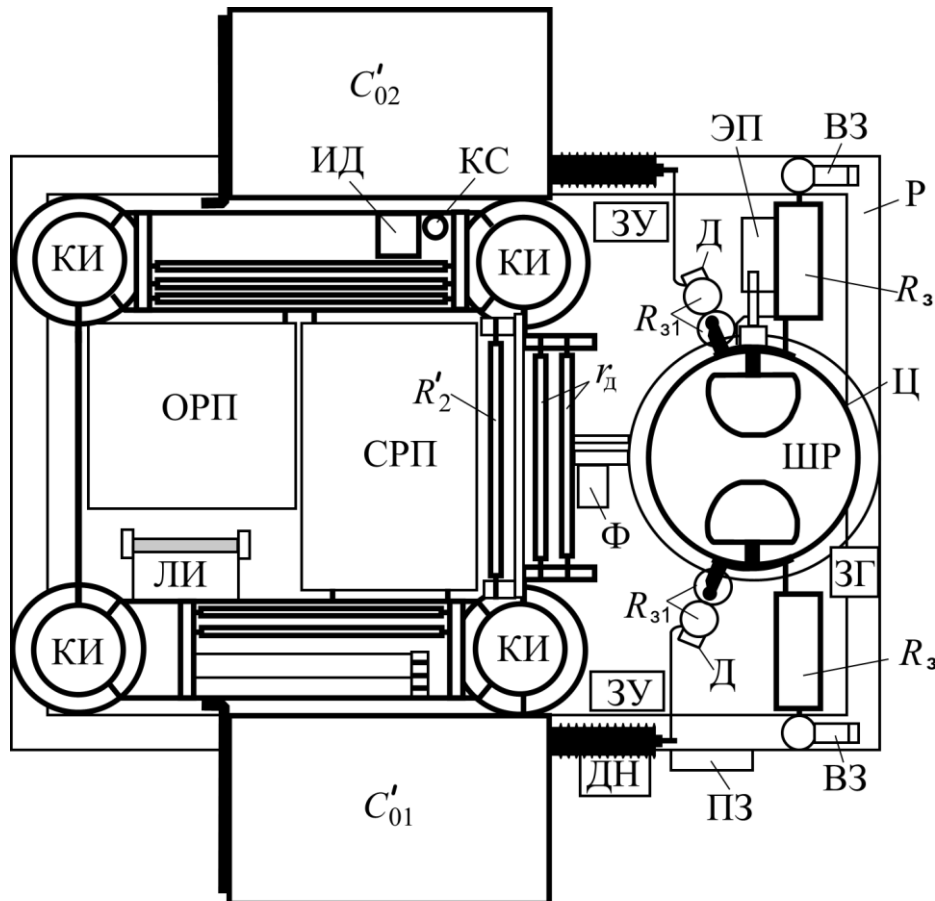


Рис. 3.13. Разрез ГИН серии G фирмы HighVolt

По конструктивному исполнению ГИН делятся на генераторы этажерочного (рис. 3.14, 3.15), башенного (рис. 3.16) и колонного (рис. 3.17) типа. Генераторы лестничного типа практически не используются из-за больших габаритов, нерационально используемого объема установки и малой величины объемной энергии.

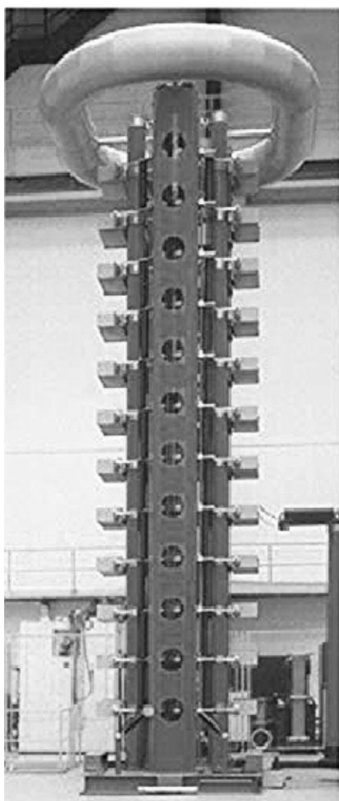


Рис. 3.14. ГИН 120/2400 серии G



Рис. 3.15. ГИН ВЭИ 1300/9000



Рис. 3.16. Башенный ГИН 400/4000

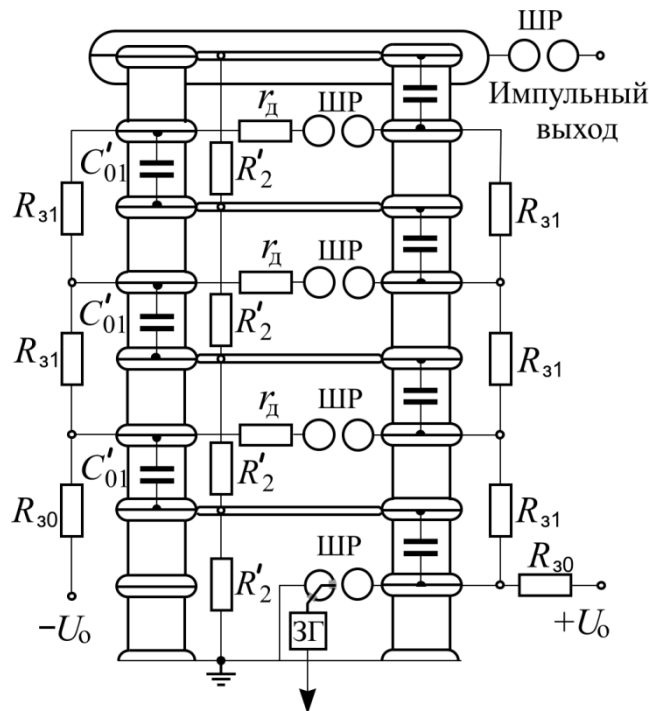


Рис. 3.17. Эскиз колонного ГИН

Для более качественного контроля за формой импульса используют ГИН Фитца, схема и режим работы которого показаны на рис. 3.18. Как и в ГИН Аркадьева-Маркса зарядка конденсаторов осуществляется параллельно через зарядные сопротивления R_{30} и R_{31} . Высоковольтные вентили $VD1$ и $VD2$ открыты. При выполнении условия $R_{30} \gg R_{31}$ зарядка всех емкостей C'_{01} и C'_{02} заканчивается практически одновременно.

Потенциалы в точках 1 и 3 достигнут величины $U_1 = U_3 = +U_0$. В точках 0, 2 и 4 они будут равны нулю. Напряжение на выходе с парных конденсаторов C'_{01} и C'_{02} будет равно нулю, т.е. $U_{02} = U_{04} = U_{24} = 0$. Следующая стадия работы ГИН – подача поджигающего импульса на шаровые разрядники (ШР). Шаровые разрядники пробиваются (рис. 3.18, в) и образуется разрядный колебательный контур из конденсатора C'_{02} , индуктивности $L1$, вентили $VD2$ и ШР. Начинается колебательный процесс в этом контуре, который приводит к перезарядке емкости C'_{02} и гашению дуги в ШР. Конечная стадия этой перезарядки показана на рис. 3.18, г. После перезарядки все конденсаторы выстраиваются последовательно, как и в ГИН Аркадьева-Маркса.

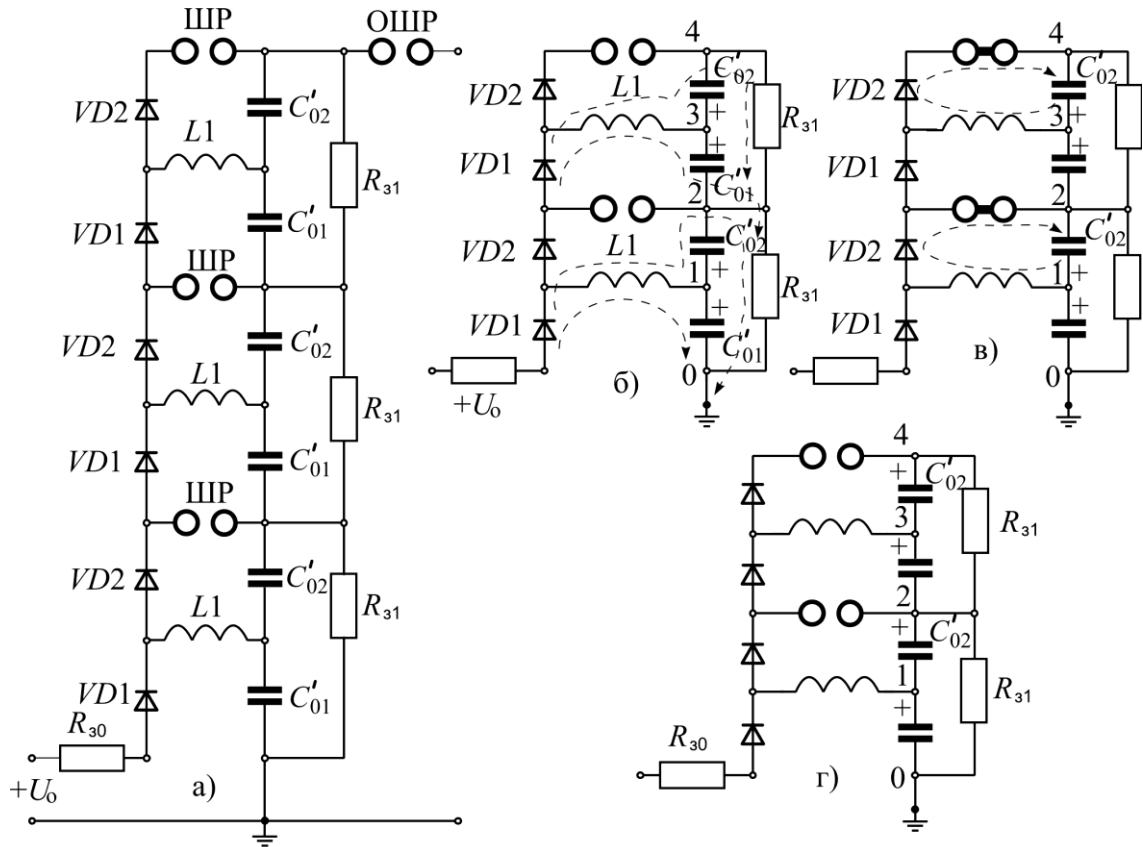


Рис. 3.18. ГИН по схеме Фитца: а), б) зарядка; в), г) перезарядка C'_{02}

Процессами разрядки конденсаторов можно пренебречь, поскольку в этой схеме постоянная времени разряда будет определяться большими величинами зарядных сопротивлений R_{31} , которые значительно (в сотни тысяч раз) превышают величины разрядных сопротивлений R'_2 (схемы на рис. 3.10, 3.11). Выбор величины индуктивности $L1$ определяется предельно допустимым импульсным током ($I_{\text{имп.макс}}$), который может пропустить клапан $VD2$ и условием, что вся запасенная в емкости C'_{02} энергия будет сохранена в индуктивности:

$$E_{C'_{02}} = \frac{C'_{02} \cdot U_0^2}{2} = E_{L1} = \frac{L1 \cdot I_{\text{имп.макс}}^2}{2}. \quad (3.11)$$

Пусть емкость $C'_{02} = 0,5$ мкф, а напряжение $U_0 = 100$ кВ. Допустимый импульсный ток $I_{\text{имп.макс}}$ клапанов может превышать их допустимый ток в стационарном режиме в несколько десятков раз и достигать сотен ампер.

Пусть $I_{\text{имп.макс}} = 500 \text{ А}$. Тогда выбор величины $L1$ по формуле (3.11) даст величину $L1 = 20 \text{ мГн}$. Время перезарядки (t') C'_{02} будет определяться половиной периода колебаний в контуре, образованном C'_{02} и $L1$, для которого $\omega^2 = \frac{1}{L1 \cdot C'_{02}}$, т.е. $t' = \pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C'_{02}} \approx 0,3 \text{ мс}$. Постоянная времени разряда этой же емкости через зарядное сопротивление $R'_{31} = 1 \text{ Мом}$ равна $\tau = R'_{31} \cdot C'_{02} = 0,5 \text{ с}$, т.е. более чем в 1000 раз больше t' . После выстраивания всех емкостей последовательно подается поджигающий импульс на основной шаровой разрядник (ОШР).

§ 3.2.3. Схемы ГИН для получения коммутационных импульсов

Допускается применение аperiодических импульсов «100/2500», «500/2500» и «1000/5000» с допусками на время подъема $\pm 20 \%$, на длительность импульса $\pm 30 \%$ и на максимальное значение $\pm 3 \%$. Необходимость применения этих импульсов должна быть указана в нормативных документах на электрооборудование отдельных типов.

Стандартный колебательный коммутационный импульс (см. рис. 3.3) применяется для испытания внутренней (испытываемой отдельно от внешней) изоляции газонаполненного оборудования и для линейной изоляции, в том числе гирлянд изоляторов. Он должен иметь время подъема $T_1 = 4000 \pm 1000 \text{ мкс}$, длительность импульса $T_2 = 7500 \pm 2500 \text{ мкс}$ и допуск на максимальное значение $\pm 3 \%$. Обозначение импульса – «4000/7500». Полярность импульса определяется полярностью первого полупериода. Допускается применение импульса как на рис. 3.3, в. Параметры должны быть такими, как для стандартного колебательного импульса (см. рис. 3.3, б).

Для испытания внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов применяется коммутационный импульс «20/500» со временем подъема T_1 не менее 20 мкс, длительностью импульса T_2 не менее 500 мкс, с временем свывше 90 % от U_M не менее 200 мкс и допуском на максимальное значение импульса $\pm 3 \%$.

Форма и параметры коммутационного импульса, которым должна испытываться та или иная изоляция, а также отношение максимального значения второго полупериода к максимальному значению первого, время свывше 90 %, если они влияют на результаты испытания, должны быть указаны в нормативных документах на электрооборудование отдельных видов.

Требования к значениям суммарной емкости объекта и дополнительной емкости испытательных установок такие же, как и при испытании изоляции электрооборудования напряжением промышленной частоты.

При испытании объектов с емкостной характеристикой (выключатели, разъединители, вводы, трансформаторы тока, конденсаторы и т.д.) апериодическим коммутационным импульсом напряжения рекомендуется использовать ГИН, а при испытании приложением колебательного импульса напряжения – применять схемы на основе испытательного трансформатора (каскада трансформаторов).

При испытании трансформаторов индуктированным колебательным импульсом напряжения рекомендуется применять схемы, основанные на принципе разряда конденсаторной батареи на обмотку низшего напряжения испытуемого трансформатора.

§ 3.3. Генераторы импульсных токов (ГИТ)

При разработке высоковольтных аппаратов возникает необходимость проводить их испытания значительными импульсными токами. Такие токи в условиях эксплуатации появляются в результате грозных разрядов и коротких замыканий в энергосистемах. В лабораторных условиях их получают с помощью накопителей энергии, т. е. устройств, в которых в течение длительного времени происходит накопление энергии от источника ограниченной мощности. Разряд за короткий промежуток времени приводит к резкому увеличению мощности, выделяющейся в нагрузке, и протекающего через него тока. Наиболее распространены следующие виды накопителей энергии: емкостные (конденсаторные батареи), индуктивные (катушки с током), механические (большие вращающиеся маховики) и химические (аккумуляторы). При ударах молнии в линии электропередачи и подстанции оборудование подвергается воздействию униполярных импульсов тока с амплитудой порядка $10^4 \div 10^5$ А и длительностью в несколько десятков микросекунд.

Для имитации токов молнии в лабораторных условиях применяют установки с емкостными накопителями энергии, называемые **генераторами импульсных токов (ГИТ)**. Униполярный импульс тока с заданными параметрами может быть получен при разряде емкости C на активное сопротивление R через индуктивность L (рис. 3.19). Емкость C представляет собой суммарную емкость всех накопительных конденсаторов ГИТ; индуктивность L – суммарная индуктивность схемы ГИТ (конденсаторов, коаксиальных кабелей, шин, объекта испытаний,

разрядника SF и т.п.); сопротивление R – суммарное активное сопротивление схемы ГИТ.

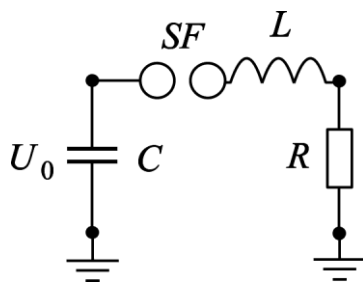


Рис. 3.19. Расчетная схема ГИТ

Характер разряда в схеме, представленной на рис. 3.19, зависит от величин параметров L , R , C , соотношение между которыми обычно обозначают символом γ (см. 3.15).

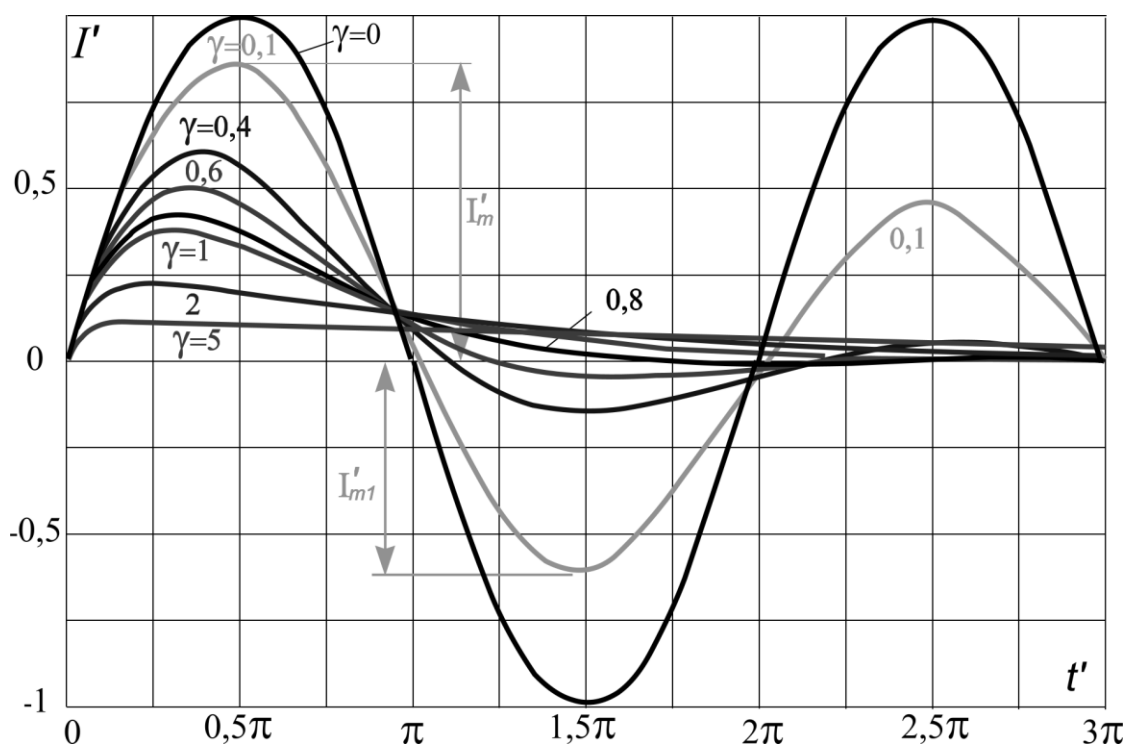


Рис. 3.20. Изменение тока ГИТ во времени при различных значениях γ

При расчетах параметров ГИТ используются следующие соотношения.
Характеристическое сопротивление схемы

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.12)$$

Максимальный ток при $R = 0$

$$I_{0m} = \frac{U_0}{Z}. \quad (3.13)$$

Постоянная времени схемы (период колебаний при $R = 0/2\pi$):

$$T_0 = \sqrt{LC}. \quad (3.14)$$

Показатель характера разряда ГИТ

$$\gamma = \frac{R}{R_{кр}} = \frac{R}{2Z}. \quad (3.15)$$

При значении $\gamma < 1$ разряд накопительных конденсаторов ГИТ и, соответственно, протекающий через объект испытаний ток, носят колебательный характер (рис. 3.20), при $\gamma = 1$ – критический и при $\gamma > 1$ форма импульса тока становится аperiодической. При $R \neq 0$ максимальное значение тока через нагрузку $I_m < I_{0m}$. Вводится коэффициент использования ГИТ по току:

$$\eta \equiv I'_m = \frac{I_m}{I_{0m}}. \quad (3.16)$$

Используются приведенные величины тока

$$I' = \frac{I}{I_{0m}} \quad (3.17)$$

и времени

$$t' = \frac{t}{T_0}. \quad (3.18)$$

Максимальная мощность в сопротивлении R :

$$P'_m = \frac{P_m}{P_0}, \quad (3.19)$$

где характеристическая мощность

$$P_0 = \frac{U_0^2}{Z} \quad (3.20)$$

и максимальная мощность в сопротивлении

$$P_m = I_m^2 \cdot R. \quad (3.21)$$

Максимальное значение тока после первого перехода через нуль:

$$I'_{m1} = \frac{I_{m1}}{I_{0m}}. \quad (3.22)$$

В колебательном режиме ($0 < \gamma < 1$) выполняются соотношения:

$$I' = \frac{\exp(-\gamma \cdot t')}{\sqrt{1-\gamma^2}} \cdot \sin\left(t' \cdot \sqrt{1-\gamma^2}\right); \quad (3.23)$$

$$\eta = \exp\left(-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \cdot \arcsin\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)\right); \quad (3.24)$$

$$P'_m = 2\gamma \cdot \exp\left(-\frac{2\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \cdot \arcsin\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)\right); \quad (3.25)$$

$$I'_{m1} = \exp\left(-\frac{\pi \cdot \gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\right). \quad (3.26)$$

Время подъема тока до максимума

$$t'_m = \frac{\arctg\left(\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{\gamma^2}}\right)}{\sqrt{1-\gamma^2}}. \quad (3.27)$$

В апериодическом режиме ($\gamma > 1$) выполняются:

$$I' = \frac{\exp(-\gamma \cdot t')}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \cdot \operatorname{sh}\left(t' \cdot \sqrt{\gamma^2 - 1}\right); \quad (3.28)$$

$$\eta = \left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1} \right)^{-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}}; \quad (3.29)$$

$$P_m' = 2\gamma \left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1} \right)^{-\frac{2\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}}; \quad (3.30)$$

$$I_{m1}' = 0; \quad (3.31)$$

$$t_m' = \frac{\ln \left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1} \right)}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}. \quad (3.32)$$

Изменение параметров уравнений (3.23 ÷ 3.32) показано на рис. 3.21 в зависимости от показателя характера разряда ГИТ (γ) и от отношения времени длительности импульса (T_2 , рис. 3.3) к времени подъема импульса (T_1) на рис. 3.22. Приведенное время подъема тока импульса (длительность фронта):

$$T_1' = \frac{T_1}{T_0}. \quad (3.33)$$

Коэффициент использования по току (η), амплитуда после первого прохождения через нуль (I_m') и мощность в нагрузке (P_m') зависят от параметра γ существенным образом (рис. 3.21). Сам же параметр γ , характеризующий соотношение между активным и реактивным сопротивлениями схемы (3.15), однозначно связан с параметрами импульса T_1 и T_2 (рис. 3.22).

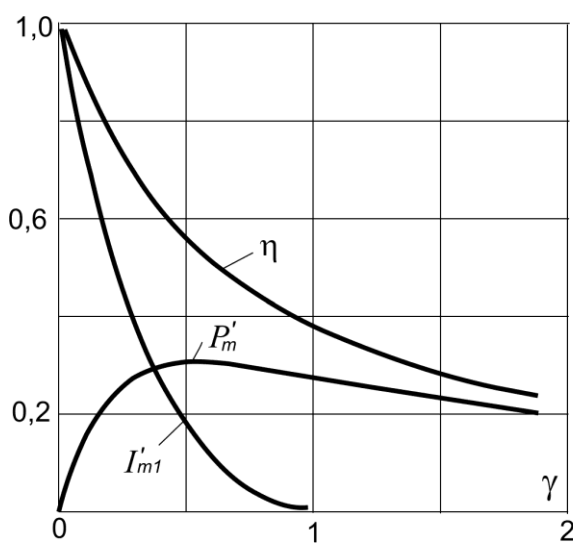


Рис. 3.21. Зависимости η , I_{m1}' , P_m' от γ

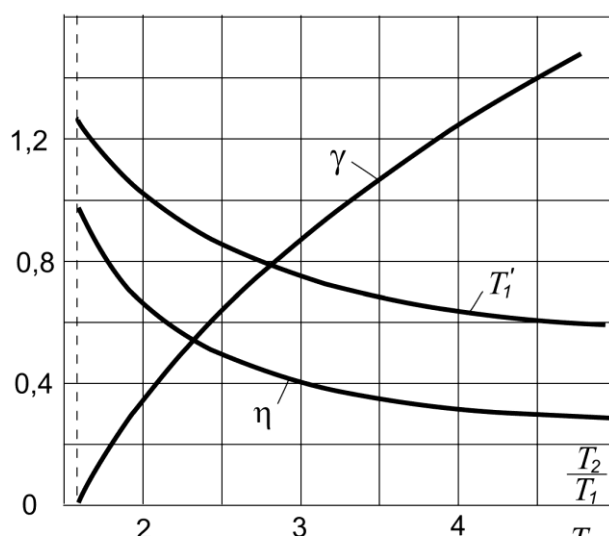


Рис. 3.22. Зависимости η , γ и T_1' от $\frac{T_2}{T_1}$

Оценку параметров схемы ГИТ (рис. 3.19) можно проводить в следующей последовательности:

1) по заданным характеристикам импульса T_1 и T_2 определить их отношение и по рис. 3.22 найти η , γ и T_1' ;

2) по значению T_1' и заданному T_1 по (3.33) определить T_0 и по (3.14) найти соотношение $\sqrt{LC}$;

3) по значению γ найти (3.15) соотношение $\frac{R}{2Z}$;

4) по значению η и заданной величине максимального тока I_m из (3.16) определить I_{0m} ;

5) по выбранной величине зарядного напряжения U_0 и найденной величине I_{0m} определить по (3.13) характеристическое сопротивление Z ;

6) по суммарной емкости накопительных конденсаторов C и величинам Z , T_0 и γ определить требуемые дополнительно индуктивности и активные сопротивления.

Принципиальная схема ГИТ показана на рис. 3.23: 1 – объект испытания; SF – высоковольтный коммутатор (тригатрон); R_3 – зарядное сопротивление, определяющее время зарядки накопительных конденсаторов C ; L – индуктивность схемы, в которую входят индуктивность кабелей связи конденсаторов и разрядника, индуктивность самих импульсных конденсаторов, индуктивность разрядника и контура с объектом испытаний, дополнительные катушки индуктивности для получения импульса тока требуемой формы; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, служащего для измерения импульсного тока; r – защитные сопротивления (для предотвращения взрыва C при повреждениях и КЗ).

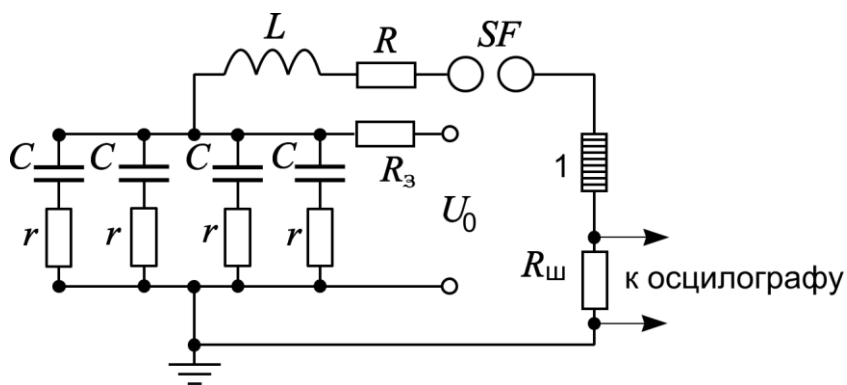


Рис. 3.23. Принципиальная схема ГИТ

При конструировании ГИТ стремятся уменьшить собственные индуктивности схемы. Для этого накопительные конденсаторы соединяют

в батарее параллельно и располагают симметрично на кратчайшем возможном расстоянии от объекта испытаний. Сами импульсные конденсаторы должны обладать малой индуктивностью, а связи выполняться малоиндуктивными (коаксиальными кабелями, шинами). Нормированными импульсами являются импульсы 4/10 мкс и 8/20 мкс. Для получения таких импульсов, как правило, достаточно конденсаторы расположить вокруг объекта испытаний и создать несколько параллельных цепочек к разряднику. Как пример такой компоновки ГИТ на рис. 3.24 приведен снимок ГИТ *IP 250/100 S* фирмы *HighVolt* с напряжением зарядки $U_0 = 100$ кВ и величиной, запасенной в конденсаторах энергии $W = 250$ кДж [20, 22]. Максимальный ток в такой схеме достигает 200 кА. Вертикально расположенные катушки L предназначены для получения импульсов тока большой длительности. Коммутатор SF представляет собой управляемый разрядник – тригatron.

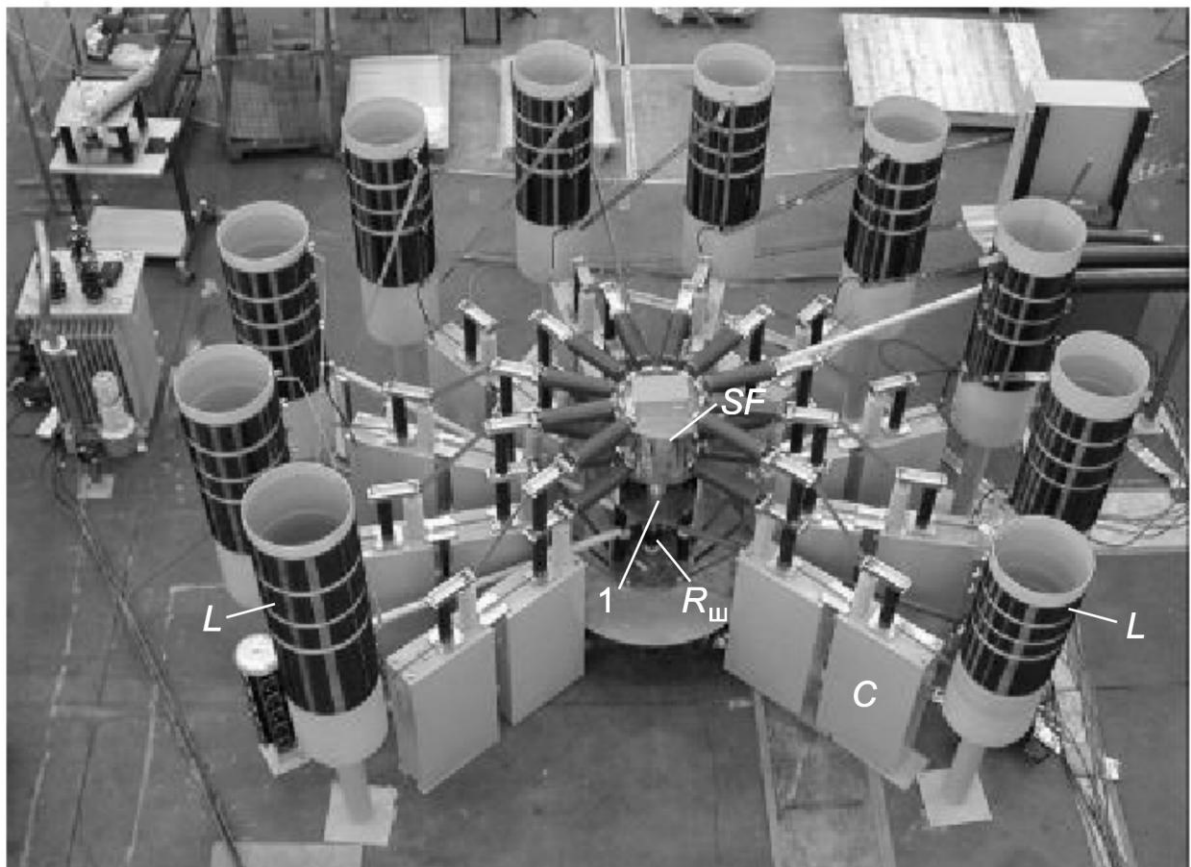


Рис. 3.24. ГИТ *IP 250/100 S*. $W = 250$ кДж, $U_0 = 100$ кВ, $I_m = 200$ кА

Центральная часть установки более крупным планом показана на рис 3.25.

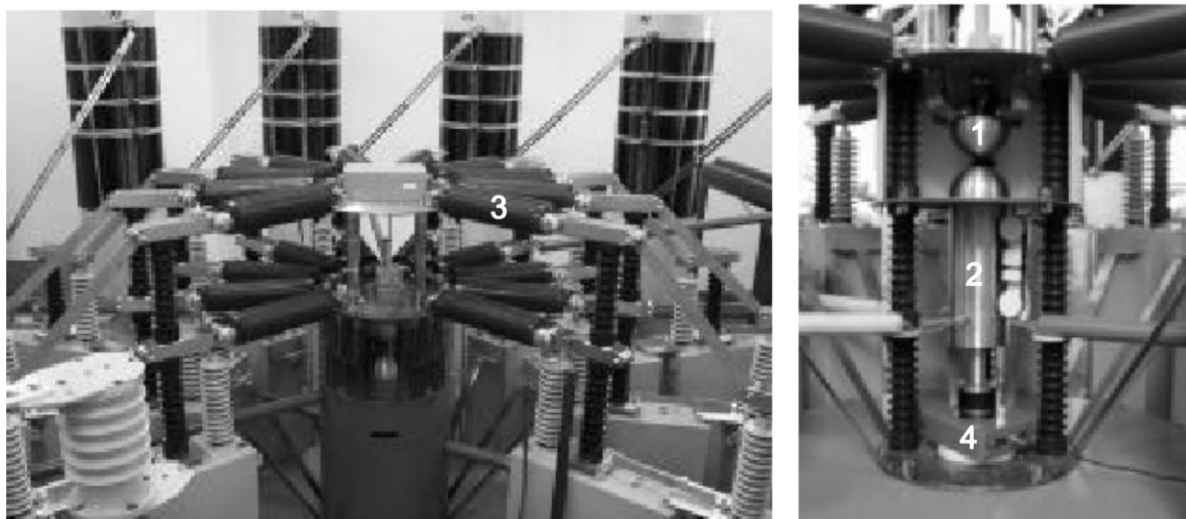


Рис. 3.25. Центральная часть ГИТ *IP 250/100 S*: 1 – тригатрон; 2 – ОПН; 3 – дополнительные индуктивности для получения импульса 30/80 мкс; 4 – измеритель тока с кабелем

§ 3.4. Генераторы прямоугольных импульсов тока

Большое распространение в различных электрофизических установках высокого напряжения получили схемы, создающие прямоугольные импульсы тока типа рис. 3.5. Импульсы такой формы применяют при магнитной штамповке, импульсном дроблении твердых материалов, упрочении поверхностей металлов и т.п. В электроэнергетике воздействию импульсов тока прямоугольной формы подвергаются вентильные разрядники и ОПН после срабатывания, когда через них происходит разрядка линий электропередач, к которым эти аппараты подключены. Существует большое количество различных схем получения импульсов тока, близких к прямоугольной форме, представленной на рис. 3.5. Высокую крутизну фронта импульса, определяемую лишь характеристиками коммутатора, можно получить при разряде двухпроводной линии электропередачи, коаксиального конденсатора (кабеля) или полосковой линии.

Одна из простейших схем получения прямоугольных импульсов тока (схема двухпроводной симметричной линии) представлена на рис. 3.26 [6].

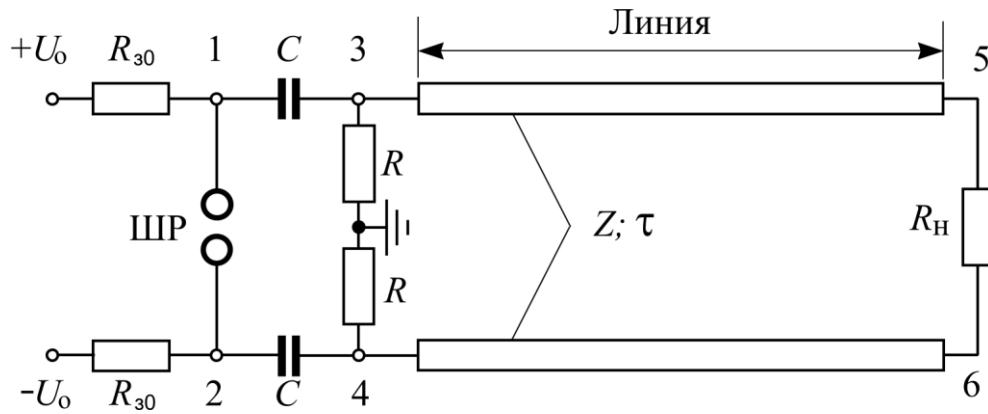


Рис. 3.26. Двухпроводная линия

Принцип работы установки двухпроводной линии состоит в следующем: вначале происходит зарядка конденсаторов C от источников постоянного напряжения $\pm U_0$ через зарядные сопротивления R_{30} и сопротивления R . Потенциал в точке 1 становится равным $+U_0$, а в точке 2 – $-U_0$. В точках 3 и 4 потенциал равен нулю. При подаче поджигающего импульса шаровой разрядник (ШР) пробивается, а потенциалы в точках 1 и 2 выравниваются и становятся равными нулю. Поскольку конденсаторы C заряжены до разности потенциалов $\pm U_0$, потенциал в точке 3 становится равным $-U_0$, а в точке 4 – $+U_0$. Двухпроводная линия фактически подключается к двойному напряжению U_0 . По линии начнет распространяться бегущая волна с амплитудой $2U_0$, которая экспоненциально затухает с постоянной времени $\tau = \frac{LC}{2}$. Форма импульса в начале линии (между точками 3 и 4) и в конце линии (между точками 5 и 6) зависит от соотношения волнового сопротивления линии Z и сопротивления нагрузки линии R_H . При $R_H \gg Z$ («разомкнутая» линии) отражение от конца линии происходит без переверота импульса и напряжение удваивается. При $R_H = Z$ (согласованная нагрузка) отражения от конца линии не происходит и вся энергия, запасенная в конденсаторах C , выделяется на нагрузке. Волновое сопротивление линии составляет ~ 300 Ом, т.е. достаточно велико. К недостаткам такой простой схемы следует отнести возникновение высокочастотного колебательного процесса в контуре 1-3-4-2 в момент срабатывания коммутатора, рассеивание энергии и возникающие при коммутации высокочастотные помехи. Кроме того, сама двухпроводная линия, подключенная к точкам 3 и 4, является нагрузкой для источника импульсного питания, состоящего из конденсаторов, ШР и сопротивлений R . Внутреннее сопротивление этого источника не равно волновому

сопротивлению линии и в момент коммутации ШР возникают дополнительные искажения фронта сигнала.

Длительность импульса равна удвоенному времени пробега электромагнитных волн по линии. При скорости распространения импульса по линии (скорость света) $c = 300$ м/мкс и длине линии, например, 3 м длительность импульса составит величину ~ 20 нс.

Более хорошие результаты получаются при использовании в качестве накопителей коаксиальных конденсаторов или коаксиальных кабелей. Схема коаксиального генератора для получения прямоугольных импульсов представлена на рис. 3.27 [6]. В этом случае в качестве накопительной емкости используется емкость коаксиального кабеля, который заряжается от источника постоянного напряжения через зарядное сопротивление.

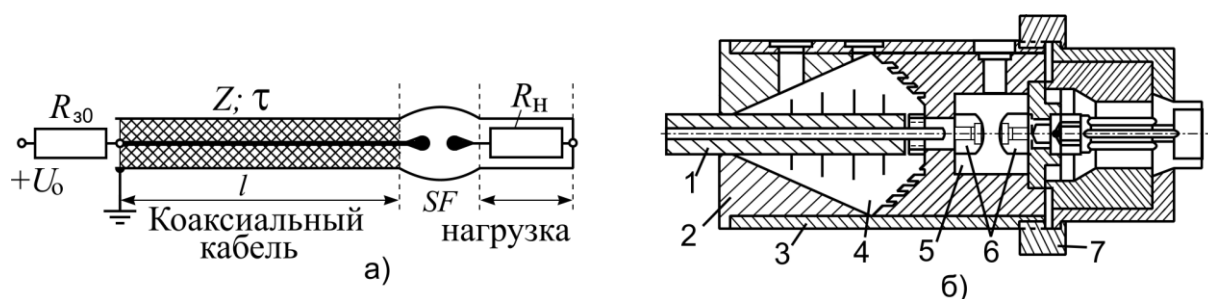


Рис. 3.27. Коаксиальный генератор: а) эскиз; б) коммутатор (SF);

1 – кабель ВН; 2 – конический переход; 3 – корпус разрядника

(коммутатора); 4 – литая изоляция; 5 – разрядная камера;

6 – электроды; 7 – накидная гайка

Коммутатор, вариант конструктивного исполнения которого показан на рис. 3.27, б, выполняется в металлическом корпусе. Волновое сопротивление коммутатора подбирается выбором диаметра электродов 6 и корпуса 3, равным волновому сопротивлению кабеля, а металл корпуса препятствует излучению электромагнитных волн в окружающее пространство. Длительность импульса тока определяется, как и в двухпроводной линии, двойным временем пробега по кабелю и, обычно, составляет десятки наносекунд. Волновое сопротивление кабелей $Z = 30 \div 75$ Ом, а в случаях специального исполнения кабелей ВН может быть уменьшено до 5 Ом. К недостаткам такой схемы можно отнести невысокое питающее напряжение, которое ограничено электрической прочностью изоляции кабеля. Оно редко превышает 100 кВ. Длительность импульса ($T_{и}$, рис. 3.5) можно определить по следующей формуле:

$$T_u = 2\tau = 2l\sqrt{L'C'}, \quad (3.34)$$

где l – длина кабеля, L' и C' – его погонная индуктивность и емкость. Максимальное значение тока в согласованной нагрузке без учета потерь равно:

$$I_{\max} = \frac{U_0}{2Z} = \frac{U_0}{2l\sqrt{L'C'}}. \quad (3.35)$$

Увеличить напряжение в импульсе можно при соединении кабелей или линий так, как показано на рис. 3.28 и 3.29. Длина линий, как и в предыдущих случаях (рис. 3.26 и 3.27) задает длительность импульса.

При зарядке полосковых линий (рис. 3.28) от источника постоянного напряжения U_0 напряжение в точках 2, 4, 6 становится равным U_0 . Полосы 1, 3, 5, 7 заземлены и имеют потенциал равный нулю. Стрелками показаны напряженности поля между различными проводниками. Выходное напряжение схемы между точками 1 и 7 равно нулю. В начале каждой пары линий 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, стоят коммутаторы SF . При их одновременном срабатывании по каждой паре линий начинают распространяться импульсы напряжения. Поскольку каждая пара линий разомкнута, то отражение от разомкнутого конца происходит с тем же знаком, и векторы напряженностей переворачиваются.

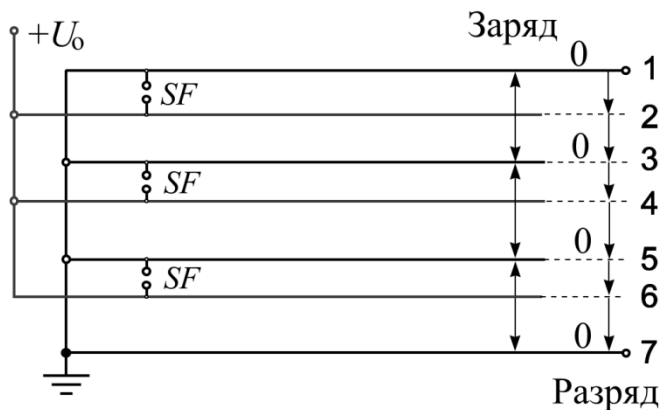


Рис. 3.28. Полосковая линия

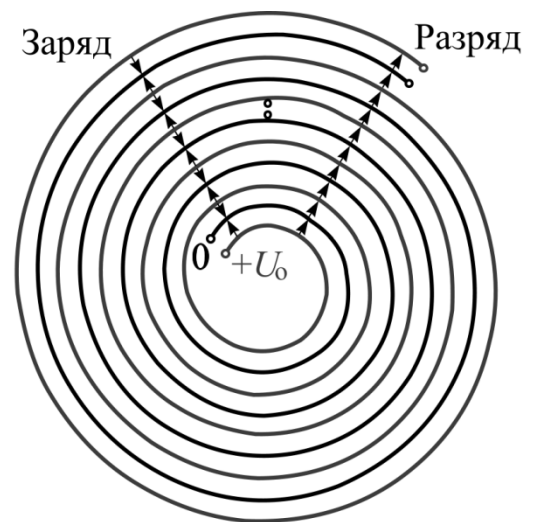


Рис. 3.29. Спиральный генератор

Потенциал в конце линии 1 (U_1) становится выше, чем в линии 2 (U_2), $U_3 > U_4$ и $U_5 > U_6$. Напряженности поля между точками 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7 остаются такими же, как и до коммутации, поскольку пары 1-2, 3-4 и 5-6 фактически в это время включены последовательно. Суммарное

выходное напряжение между точками 1 и 7 становится равным $6U_0$. В качестве коммутаторов обычно используются тригatronы и их индуктивность должна быть предельно низкой. Электромагнитной связью между линиями пренебрегают.

Такой же принцип параллельной зарядки различных пар линий и последовательного их включения при коммутации используется в спиральных генераторах (рис. 3.29). Реальные процессы в таких спиральных генераторах весьма сложны из-за сильной электромагнитной связи различных витков, а упрощенное представление можно получить по рис. 3.29 и аналогии с полосковыми линиями. Следует отметить, что впервые процессы резкого возрастания выходного напряжения по сравнению с зарядным напряжением были обнаружены при пробоях нескольких секций высоковольтных конденсаторов.

Как вариант полосковой линии можно рассматривать схему (рис. 3.30), которая часто используется в различных физических экспериментах. В немецкой литературе эта схема известна под именем линии Блюмляйна.

Она состоит из двух линий с одинаковым волновым сопротивлением Z , одинаковой длины, т.е. с одинаковым временем пробега τ . На конце одного из плеч линии ставится коммутатор. После зарядки линии от источника постоянного напряжения U_0 через зарядное сопротивление R_{30} подается управляющий сигнал на коммутатор. Через время τ после срабатывания коммутатора SF на сопротивлении нагрузки R_H формируется импульс с удвоенной амплитудой $2U_0$ и длительностью 2τ .

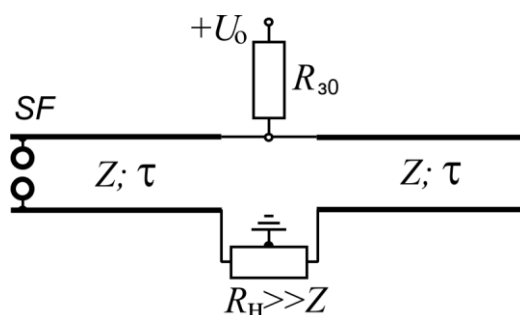


Рис. 3.30. Линия Блюмляйна

Подобный принцип получения прямоугольных импульсов тока с амплитудой до 400 кА и длительностью 50 нс используется в установке Томского политехнического университета «Темп». В качестве накопительных элементов для создания прямоугольных импульсов тока в

установке используются коаксиальные конденсаторы с водной изоляцией между обкладками, а в качестве источника их зарядки применяется ГИН со стандартным полным грозовым импульсом 1,2/50 и амплитудой 350 кВ.

Приведенные в данном параграфе установки создают импульсы длительностью до сотни наносекунд. Получение более длительных импульсов связано с трудностями создания длинных кабельных линий. Вместе с тем, в реальных условиях эксплуатации энергосистемы при срабатывании РВ и ОПН на них разряжаются ЛЭП, длина которых может достигать сотен километров, а длительность импульса тока – нескольких миллисекунд. Для испытаний пропускной способности защитных аппаратов типа РВ, ОПН в лабораторных условиях на стойкость к таким импульсам тока часто применяются искусственные формирующие линии рис. 3.31, которые также называют *LC*-генераторами. Сосредоточенными емкостями и индуктивностями моделируют соответствующие емкость и индуктивность ЛЭП, к которым должны подключаться ограничители перенапряжений. Для того, чтобы получить более близкую к реальной форму импульса тока, используется 8 – 10 звеньев емкостей и индуктивностей.

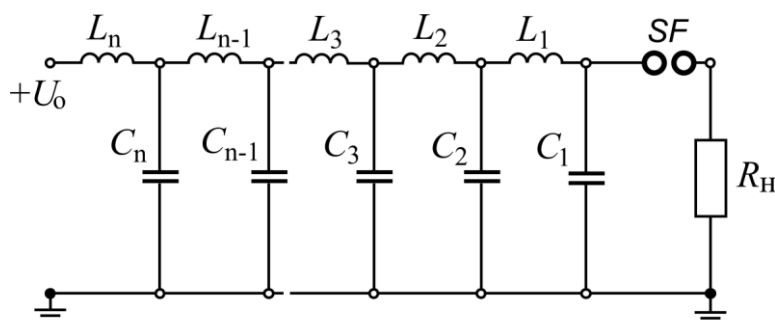


Рис. 3.31. *LC* – генератор для получения импульсов тока большой длительности

В такой схеме при $L_1 = L_2 = L_3 = L_{n-1} = L_n$ и $C_1 = C_2 = C_3 = C_{n-1} = C_n$ параметры импульса (рис. 3.5) можно определить по формулам:

$$T_{90} \approx 2 \frac{n-1}{n} \sqrt{LC}, \quad T_{и} \equiv T_{10} \approx 2 \frac{n+1}{n} \sqrt{LC}, \quad \text{где } L = \sum_{i=1}^n L_i, \quad C = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (3.36)$$

При согласованной нагрузке ($R_H = Z = \sqrt{L/C}$) по заданным параметрам импульса T_{90} и при заданном числе ступеней n можно определить C и L :

$$C \approx \frac{nT_{90}}{2R_H(n-1)}, \quad L \approx CR_H^2. \quad (3.37)$$

Форма импульса в симметричной схеме (3.36) и согласованной нагрузке в зависимости от числа звеньев n показана на рис. 3.32.

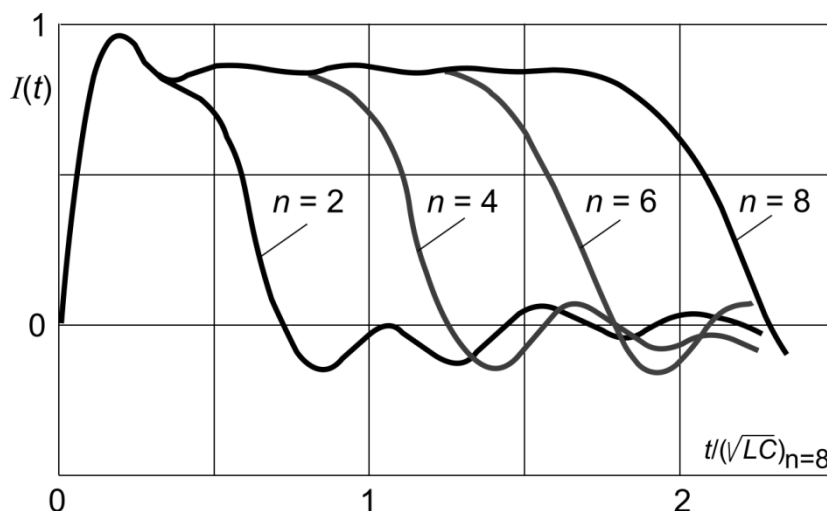


Рис. 3.32. Форма импульса LC – генератора при разных n

По оси абсцисс отложено время в единицах периода колебаний при $n = 1$. Величины суммарной емкости схемы (C) и индуктивности (L) для всех n одинаковы. Схемы искусственных линий с одинаковыми параметрами по (3.37) обычно не удовлетворяют требованиям ГОСТ и МЭК по форме импульса. Расчеты параметров таких схем проводят численными методами на ЭВМ с учетом электромагнитной связи между звеньями и активного сопротивления катушек индуктивности. Обычно выбирают одинаковые емкости и подбором индуктивностей добиваются требуемой формы импульса.

§ 3.5. Коммутаторы высокого напряжения

Коммутаторы (переключатели) – один из основных элементов любой импульсной установки высокого напряжения. Коммутаторы имеют два основных состояния: разомкнутое (ток через коммутатор не течет) и замкнутое (ток течет). В идеальном коммутаторе время переключения между этими состояниями равно нулю; сопротивление и индуктивность в замкнутом состоянии равны нулю, а в разомкнутом сопротивление имеет бесконечную величину; время между подачей управляющего сигнала на переключение состояний равно нулю. В реальных коммутаторах эти идеальные условия не выполняются.

К основным характеристикам реальных коммутаторов относятся:

1. Рабочее напряжение, $U_{\text{ном}}$, кВ.
2. Величина коммутируемого тока, $I_{\text{ном}}$, А.

3. *Время задержки*, t_z – фактическое время между приложением переключающего импульса и началом проводимости между главными электродами коммутатора.

4. *Разброс времени задержки*, Δt_z – различие времен задержки при различных коммутациях одного и того же коммутатора или различие начала времени коммутации различных однотипных коммутаторов при одновременной подачи на них переключающего импульса.

5. *Время коммутации*, $t_{\text{ком}}$ – время от начала проводящего состояния между контактами (конец времени задержки) до максимальной проводимости.

6. *Разброс времени коммутации*, $\Delta t_{\text{ком}}$.

7. *Время восстановления* электрической прочности после коммутации, $t_{\text{вост}}$.

8. *Срок службы* (число коммутаций на максимальном токе).

9. *Частота коммутаций*.

По техническому исполнению коммутаторы бывают следующих типов:

- твердотельные полупроводниковые управляемые коммутаторы (тиристоры);
- электровакуумные и газонаполненные коммутирующие лампы (к этому типу также относятся лампы с заполнением различными газами при давлении значительно ниже атмосферного, порядка $10 \div 100$ Па);
- разрядники с электродами различной формы, работающие при атмосферном или повышенном давлении газа;
- сверхпроводящие коммутаторы;
- взрывающиеся проводники в комбинации с вакуумными выключателями.

§ 3.5.1. Полупроводниковые коммутаторы

Полупроводниковыми коммутаторами являются обычно силовые тиристоры с устройствами управления. Широко используются в установках до 1 кВ. Обычно ток отключения $I < 1$ кА при напряжении $U < 2\text{--}3$ кВ для одного тиристора. Для получения требуемой величины тока и напряжения применяют последовательное и параллельное соединение многих элементов. Основными материалами для изготовления тиристоров служат германий, кремний и селен. Для обеспечения надежной работы всего коммутатора необходимо выравнивать напряжение на отдельных элементах. Эти коммутаторы имеют ограничение по времени, громоздки и дорогостоящи. В импульсных установках с напряжением выше 10 кВ практически не применяются.

§ 3.5.2. Вакуумные и газонаполненные коммутирующие лампы

Имеется очень много различных типов электровакуумных приборов, однако возможно сгруппировать их согласно некоторым основным критериям. Есть две основные черты различия, источник свободных электронов в пределах устройства и наличие газообразного заполнения (или отсутствие его) внутри оболочки трубы. Электровакуумный прибор – устройство, заполненное вакуумом (газ с очень низким давлением). Газонаполненное устройство заполнено газом с давлением несколько выше или ниже атмосферного. Тип использованного газа является важной особенностью, особенно в коммутирующих лампах, где встречается широкое разнообразие заполнений.

Источник свободных электронов проводимости может быть:

- тепловой (термальный), типа нагретой нити, физически связанной с катодом устройства – подогреваемый катод (термокатод);
- холодный катод, в котором выход электронов с катода происходит под действием высокого градиента электрического поля вблизи катода (автоиспускание с катода).

Коммутирующие лампы с холодным катодом (триггерные лампы) имеют невысокие рабочие напряжения (до 1 кВ) и рабочие токи до 1 А. Время коммутации таких устройств составляет $\sim 1\text{--}10$ мс, в разброс времен коммутации доходит до 10 мс. Характеристики значительно зависят от условий освещенности этих ламп. Обычно они предназначены для переключения и подачи переключающего сигнала на другие, более мощные коммутаторы. Основным недостатком таких переключателей является отсутствие свободных электронов вблизи катода до подачи переключающего импульса и, как следствие этого, большое время (и разброс времен) первичной ионизации газа. Большинство триггерных ламп имеет три или четыре электрода, анод, катод и несколько управляющих электродов, т.е. являются управляемыми коммутаторами.

Существенное улучшение характеристик коммутаторов с холодным катодом достигнуто в современных устройствах, названных **криотронами**.

§ 3.5.3. Криотрон

Криотрон (*Krytron*) – это лампа с четырьмя электродами (катод, анод, поджигающий и управляющий электроды), холодным катодом и заполнением газом при давлении до 100 Па (рис. 3.33). Между катодом и поджигающим электродом, расположенным вблизи катода,

поддерживается тлеющий разряд с током несколько десятков мкА. Имеет следующие характеристики: $t_{\text{ком}} \sim 100$ нс, $\Delta t_{\text{ком}} \sim 50$ нс, $U_{\text{ном}}$ до 20 кВ, $I_{\text{ном}}$ до 5 кА.

На управляющий электрод, который расположен за поджигающим электродом, но значительно ближе к катоду, чем к аноду, до требуемого момента коммутации подается отрицательное запирающее напряжение. Создаваемое им поле удерживает плазму тлеющего разряда в области между катодом и поджигающим электродом.

Запускающий положительный импульс с амплитудой порядка 500÷2000 В подается на управляющий электрод, открывая путь для ударной ионизации всего промежутка между катодом и анодом. Наличие уже сформированной плазмы в тлеющем разряде обеспечивает высокие скоростные характеристики коммутации криотронов. Наличие управляющего электрода, удерживающего плазму вблизи катода, позволяет достичь высоких рабочих напряжений. В специальных модификациях криотронов время коммутации удастся сделать меньше 1 нс, а время задержки менее 30 нс. В ряде модификаций у криотрона помещают радиоактивный источник первичной ионизации – слабый бета-излучатель на основе изотопа никель – 63 (^{63}Ni). Этот изотоп излучает «быстрые» электроны (бета – частицы) с энергией 65.9 кэВ, которые, ионизируя газ вблизи катода, создают необходимое для быстрой коммутации число первичных электронов.

Число коммутаций на максимальном токе не превышает 1000. Частота следования импульсов до нескольких герц.



Рис. 3.33. Криотрон

§ 3.5.4. Игнитрон

Игнитрон – электровакуумный коммутатор с катодом из ртути. Поджигающий электрод (игнайтер) выполнен из полупроводящего материала и погружен в ртуть. При подаче импульса на игнайтер вблизи места погружения возникает разряд, приводящий к испарению ртути катода, резкому увеличению числа носителей заряда в пространстве катод-анод и основному разряду. Наличие ртутного катода, дающего большое количество пара, обуславливает высокий срок службы игнитронов или большое число коммутаций (более 10^8). Без особых проблем с их помощью можно коммутировать токи до 100 кА длительностью менее 0,1 с при напряжении до 25 кВ. Сравнительно большие технические затраты на систему управления

(10 А, 200 В), а также большое время запаздывания коммутации (100 нс) и его разброс ограничивают применение игнитронов для точной коммутации в микросекундном диапазоне. Характеристики: число коммутаций до 100 миллионов, $t_{\text{ком}} \sim 100$ нс, $\Delta t_{\text{ком}} \sim 50$ нс, $U_{\text{ном}}$ до 25 кВ, $I_{\text{ном}}$ до 10 кА.

§ 3.5.5. Тиратрон

Тиратрон представляет собой трех-четырёхэлектродный электровакуумный коммутатор с подогреваемым катодом (рис. 3.34, 3.35). Высокая концентрация первичных электронов в около катодном пространстве создается за счет термоэмиссии электронов с катода.

В РФ одним из производителей тиратронов является ОАО «Плазма».

Области применения тиратронов: 1) электрофизические установки; 2) источники питания лазеров; 3) медицинская аппаратура; 4) радары.

Приборы отличаются:

- высокой стабильностью включения;
- высоким КПД и простотой управления;
- устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям.

Выпускаются серии металлокерамических тиратронов с водородным и дейтериевым наполнением. Большинство приборов имеет тетродную конструкцию (4 электрода), что позволяет достигать высокой стабильности времени развития разряда и повышенной скорости коммутации. Применение селективных газопоглотителей в сочетании со специальной вакуумной технологией обеспечивает большой ресурс работы.

Управляющий электрод служит для подачи управляющих сигналов. Небольшое отрицательное напряжение на управляющем электроде (сетке) удерживает электронное облако вблизи катода и обеспечивает высокую электрическую прочность промежутка анод-катод. При подаче положительного запускающего импульса электроны, находящиеся около катода, ускоряются, приобретая высокую энергию, и ионизируют газ в пространстве сетка-анод. Это приводит к устойчивому перекрытию промежутка катод-анод, которое поддерживается положительным анодным напряжением после окончания запускающего импульса. Характеристики:

$t_{\text{ком}} \sim 100$ нс, $\Delta t_{\text{ком}} \sim 50$ нс, $U_{\text{ном}}$ до 100 кВ, $I_{\text{ном}}$ до 30 кА.

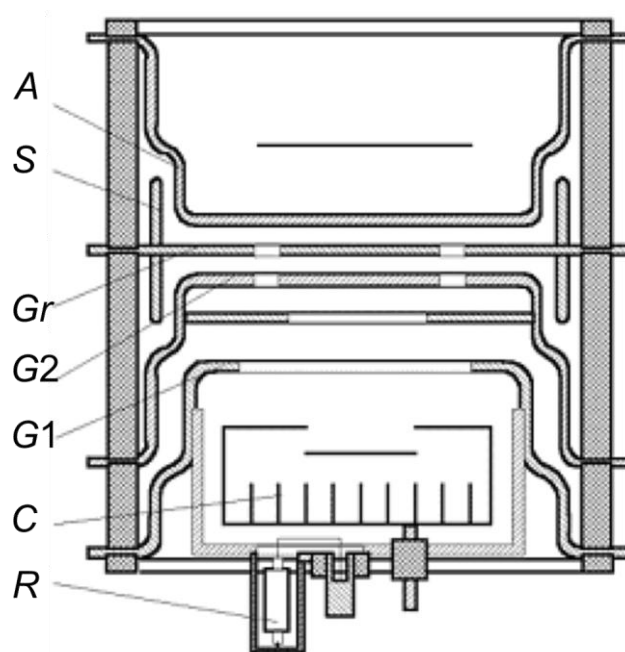


Рис. 3.34. Тетродный двухсекционный тиратрон: *A* – анод, *S* – экран, *Gr* – градиентный электрод, *G2* – вторая решетка (контрольная), *G1* – вспомогательная разрядная решетка, *C* – катод, *R* – водородный резервуар



Рис. 3.35. Тиратроны фирмы «Perkin Elmer»

§ 3.5.6. Газонаполненные управляемые искровые разрядники (ГИР)

Газонаполненные искровые разрядники (ГИР), работающие в диапазоне давлений наполняющих газов от 100 Па до десятков атмосфер, являются главным и успешным конкурентом вакуумным разрядникам с твердым и жидким катодом. В определенных интервалах параметров ГИР (рис. 3.36) обладают более высокой скоростью коммутации (единицы наносекунд), меньшими габаритами, большей стабильностью временных параметров.

Разрядники не содержат ртути и благодаря усовершенствованной конструкции отличаются высокой надежностью и долговечностью, что обусловило их широкое и успешное применение в:

- а) импульсных установках для обработки материалов;
- б) установках плазменного фокуса;
- в) источниках питания импульсных лазеров;
- г) медицинских установках литотрипсии;
- д) системах обработки нефтяных скважин.

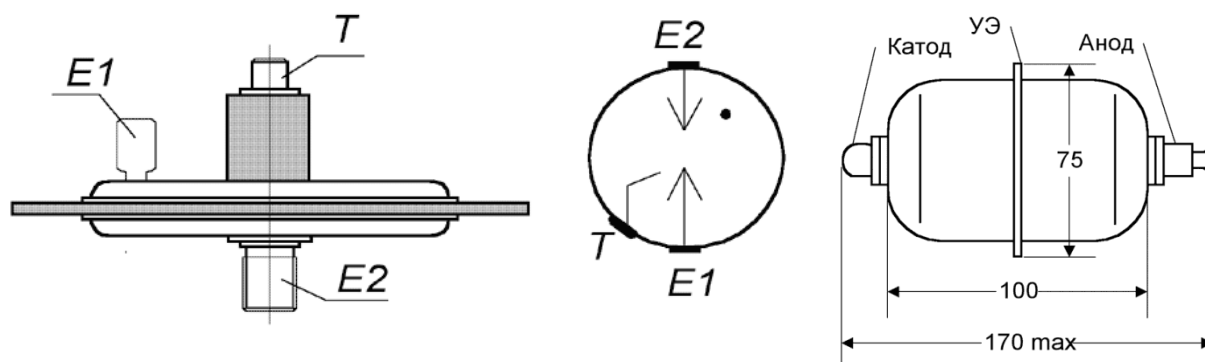


Рис. 3.36. Газонаполненные искровые разрядники ОАО «Плазма»

Разработаны управляемые искровые разрядники на напряжения от 0,6 до 40 кВ при частоте повторения импульсов от 0,1 до 200 Гц.

§ 3.5.7. Шаровые разрядники

Шаровой разрядник – один из наиболее часто употребляемых видов коммутаторов в испытательных и электрофизических установках высокого напряжения. Представляет собой два шара, находящихся на некотором расстоянии между собой. Разрядное напряжение (табл. 3.1) зависит от температуры и давления воздуха и регулируется изменением расстояния между шарами. Погрешность величины разрядного напряжения не превышает 3 %. S – расстояние между шарами.

Таблица 3.1 (начало)

Разрядные напряжения $U_{н.пр}$ шаровых разрядников
при нормальных условиях

S, см	Диаметр шаров D, см											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,05	2,8											
0,1	4,7											
0,15	6,4											
0,2	8	8										
0,25	9,6	9,6										
0,3	11,2	11,2										
0,4	14,4	14,3	14,2									
0,5	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,6	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,7	23,2	23,4	23,2	23	23	23						
0,8	25,8	26,3	26,2	26	26	26						
0,9	28,3	29,2	29,1	28	28,9	28,9						
1	30,7	32	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
	2	3	4	15	6	7	8	9	10	11	12	13
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2		57,5	58,5	59	59	59	59	59	59			
2,2		61,5	63	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70	70	70	70	70			
2,6		(69)	72	74,5	75	75	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76	79,5	80	80,5	81	81	81			
3		(75,5)	79,5	84	85	85,5	86	86	86	86		
3,5		(82,5)	(87,5)	95	97	98	99	99	99	99		
4		(88,5)	(95)	105	108	110	112	112	112	112		
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266

Таблица 3.1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	492	510	510	510
22								489	530	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705
30								(585)	665	710	745	750
32								(605)	695	745	790	795
34								(625)	725	780	835	840
36								(640)	750	815	875	885
38								(655)	(775)	745	915	930
40								(670)	(800)	875	955	975
45									(850)	945	1050	1080
50									(895)	1010	1130	1180
55									(935)	(1060)	1210	1260
60									(970)	(1110)	1280	1340
65										(1160)	1340	1410
70										(1200)	1390	1480
75										(1230)	1440	1540
80											(1490)	1600
85											(1540)	1660
90											(1580)	1720
100											(1660)	1840
110											(1730)	(1940)
120											(1800)	(2020)
130												(2100)
140												(2180)
150												(2180)

В таблице 3.1 представлены пробивные напряжения для переменного синусоидального напряжения промышленной частоты и постоянного напряжения обеих полярностей. Эта же величина соответствует 50 % вероятности пробоя при приложении полных стандартных и более длинных импульсов отрицательной полярности. Цифры в скобках

означают, что погрешность может выйти за нормированную величину, которая составляет 3 %. Если условия проведения экспериментов отличаются от нормальных (температура $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и давление $p_0 = 760$ мм. рт. ст.), то следует произвести пересчет разрядных напряжений таблицы 3.1. по формуле:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{н.пр}} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (3.38)$$

где t – температура ($^\circ\text{C}$) и p – давление (мм. рт. ст.) при измерениях.

При диаметре шаров $D \leq 12,5$ см для снижения погрешности измерений напряжений шаровыми разрядниками (ШР) следует облучать воздушный промежуток между шарами одним из трех способов:

- 1) другим искровым разрядом;
- 2) кварцевой лампой;
- 3) радиоактивными изотопами.

Вероятность пробоя воздушного промежутка зависит от вероятности возникновения в нем первичного электрона. На рис. 3.37 показаны зависимости вероятности пробоя воздушного промежутка между шарами в зависимости от приложенного напряжения для облученного (1) и не облученного промежутка (2).

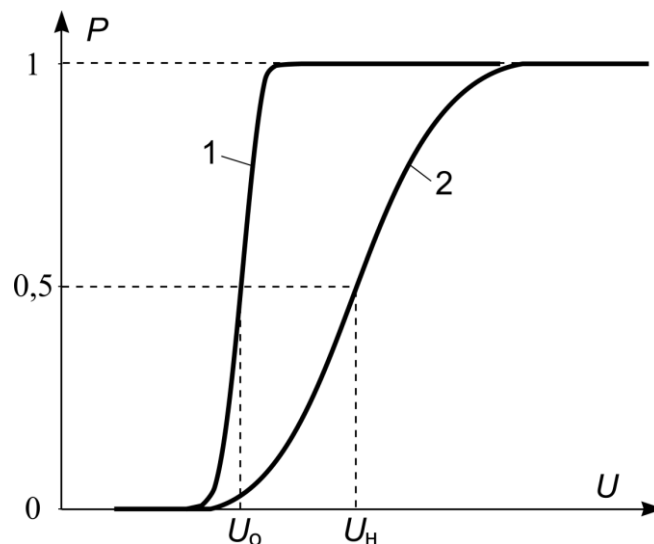


Рис. 3.37. Зависимость вероятности пробоя ШР от напряжения:
а) $D > 12,5$ см или есть облучение; б) $D \leq 12,5$ см, нет облучения

При использовании в установке нескольких шаровых разрядников в качестве коммутаторов их обычно размещают друг над другом. Вместо шаров

иногда применяют полусферы и помещают их в изоляционный корпус. В этом случае для снижения зависимости от внешних условий применяют заполнения газами под небольшим избыточным давлением. В качестве газов-наполнителей чаще всего применяют электротехнический газ SF_6 и азот.

§ 3.5.8. Тригатрон (управляемый шаровой разрядник)

Пробой в газе при относительно высоком давлении (атмосферном или выше) осуществляется очень быстро, если возникают первичные лавины, а в межэлектродном промежутке имеется достаточно высокая напряженность поля. Для достижения предельно малого времени коммутации необходима большая средняя напряженность поля в промежутке, что достигается как при повышении давления, так и при использовании высокопрочных газов, например элегаза.

Однако и в атмосферном воздухе при нормальном давлении можно получить малые времена коммутации, и поэтому часто применяемые в генераторах импульсных напряжений воздушные шаровые разрядники являются идеальными коммутаторами, если удовлетворены требования, предъявляемые к шаровым измерительным разрядникам.

Если на одном из электродов в области наиболее сильного поля установить третий изолированный электрод, то получившийся трехэлектродный разрядник называют **тригatron** (рис. 3.38). В нем поджигающий импульс напряжения вызывает срабатывание разрядника при напряжении между основными электродами $U(t)$, меньшем, чем пробивное напряжение, приведенное в табл. 3.1 (обычно ~ 0.9 от $U_{пр}$) в момент приложения пускового импульса $U_{п}$.

Надежный пробой между основными электродами 1 и 2 (рис. 3.38) может возникать в двух вариантах. Первый реализуется при больших расстояниях S по сравнению с расстоянием между электродом поджига 3 и главным электродом 2, когда под действием поджигающего напряжения $U_{п}$ пробивается только промежуток между электродами 2 и 3 и возникает вспомогательная искра или дуга. За счет искажения поля, вызванного во время быстрого нарастания напряжения $U_{п}$ (обычно крутизна поджигающего напряжения должна быть более 0,5 кВ/нс), но главным образом из-за возникновения вспомогательной искры, создается большое количество свободных носителей заряда, что и приводит к разряду между основными электродами.

Второй вариант пробоя возникает при относительно малых расстояниях S . Разряд начинается с пробоя промежутка между электродом поджига 3 и противоположным электродом 1. Возникший при этом канал быстро перебрасывается на основной электрод 2.

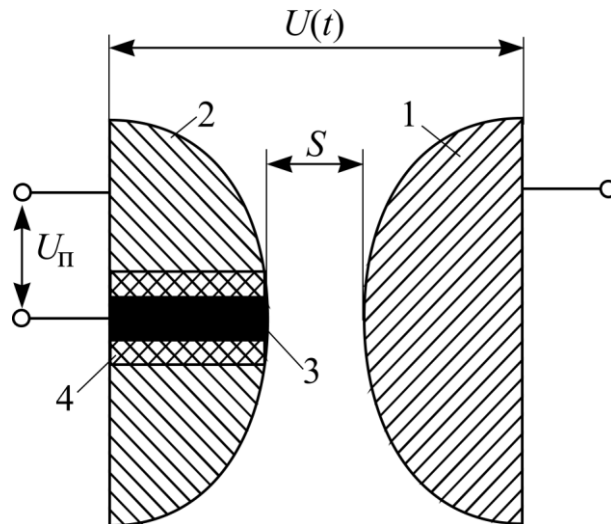


Рис. 3.38. Тригatron: 1, 2 – основные и 3 – поджигающие электроды; 4 – изоляция электрода 3

Полярности рабочего (дежурного) и поджигающего напряжений выбираются противоположными для достижения наименьших времен запаздывания. Конкретная полярность напряжения между электродами практически не оказывает влияния на время запаздывания, поскольку электродная система симметрична.

При рабочем напряжении, близком к пробивному, оба варианта пробоя приводят к малым (менее 40 нс) временам запаздывания t_3 , при этом незначителен также и разброс времени запаздывания, равный примерно $\pm 0,1 \cdot t_3$. Коммутируемые токи могут быть практически любыми и ограничиваются лишь явлениями, связанными с эрозией электродов, а также влиянием собственного магнитного поля на канал разряда, вызывающего развитие его неустойчивостей. Недостатком тригatronов является сравнительно большое время деионизации плазмы (от 10 до 100 мс), что не позволяет получить высокую частоту следования импульсов. Однако тригatronы в целом представляют собой коммутаторы с параметрами, не реализуемыми другими техническими средствами.

Диапазон рабочих напряжений тригatronов может быть расширен как за счет изменения расстояния S , так и за счет давления. Поскольку последнее осуществлять технически сложнее, то прибегают к нему лишь в

особых случаях. Если расстояния между электродами увеличиваются, характеристики коммутатора резко ухудшаются. При напряжениях в несколько сотен киловольт используются тригатроны с пробоем по первому варианту, прежде всего, в генераторах импульсных напряжений. Можно также получать срезанные импульсы с помощью управляемых шаровых разрядников, работающих в атмосферном воздухе. Однако напряжение при этом вряд ли может быть выше 800 кВ (необходимый диаметр шаров 100 см), а большое расстояние между шарами сильно затрудняет управление их срабатыванием. Для получения срезанных импульсов более высокого напряжения применяются многоступенчатые (многоступенчатые) разрядники (рис. 3.39).

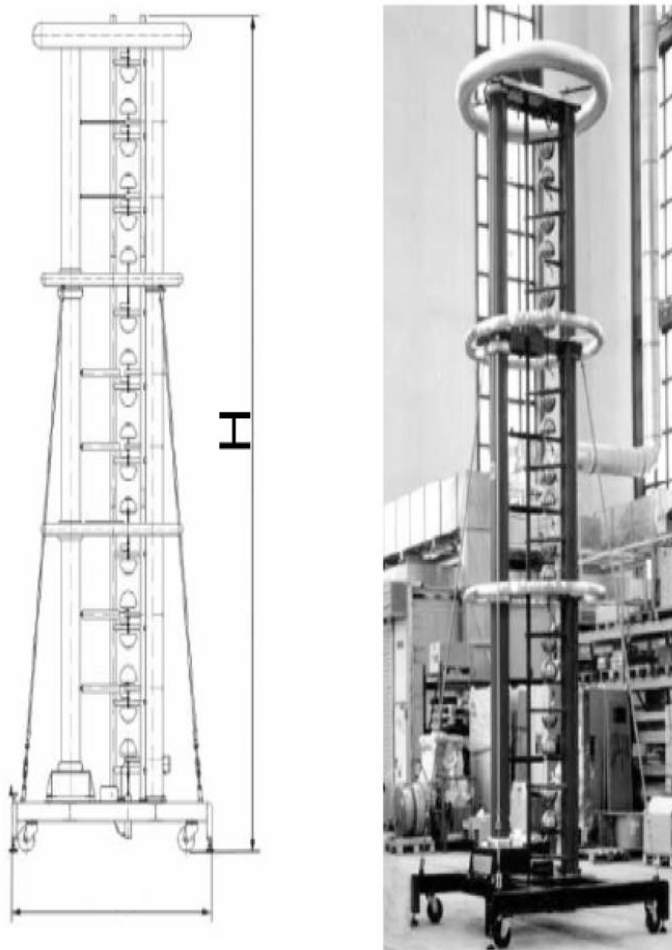


Рис. 3.39. Многоступенчатый разрядник серии *G* на 1800 кВ
фирмы «*HIGHVOLT*» (*Dresden*)

§ 3.5.9. Коммутаторы постоянного тока

Коммутатор постоянного тока по существу представляет собой выключатель постоянного тока с током отключения равным зарядному и напряжением, равным произведению тока на сопротивление нагрузки. Используются следующие коммутирующие устройства:

- а) управляемые полупроводниковые коммутаторы;
- б) сверхпроводящие коммутаторы;
- в) вакуумные выключатели высокого напряжения;
- г) взрывающиеся проводники в комбинации с вакуумными выключателями.

Управляемые полупроводниковые коммутаторы – обычно силовые тиристоры с устройствами управления. Ток отключения $I < 1 \text{ кА}$ при напряжении $U < 2\text{--}3 \text{ кВ}$ для одного тиристора. Для получения требуемой величины тока и напряжения применяют последовательное и параллельное соединение многих элементов. Для обеспечения надежной работы всего коммутатора необходимо выравнивать напряжение на отдельных элементах. Эти коммутаторы имеют ограничение по времени, громоздки и дорогостоящи.

Сверхпроводниковые коммутаторы – тонкая фольга из сверхпроводника, включаемая последовательно с катушкой в зарядную цепь. В сверхпроводящем состоянии сопротивление фольги равно нулю. При коммутации элемент переводится в нормальное состояние. Сопротивление фольги становится конечной величиной. На этом сопротивлении выделяется теплота, приводящая к испарению фольги и прекращению тока. Ток отключения $I < 5 \text{ кА}$ при напряжении $U < 10 \text{ кВ}$.

Вакуумные выключатели высокого напряжения – ток отключения $I < 2\text{--}3 \text{ кА}$ при напряжении $U \sim 50\text{--}100 \text{ кВ}$. Для повышения напряжения на коммутаторе вакуумные выключатели сравнительно легко могут быть соединены последовательно. Для работы требуется вспомогательный колебательный контур для перевода тока через нуль. Контур состоит из включенного параллельно выключателю конденсатора емкостью $0,1 \div 1 \text{ мкф}$ заряженной до напряжения нескольких киловольт, а также индуктивности соединительных проводов. При коммутации емкость разряжается через выключатель, а ток разряда емкости направлен против коммутируемого тока. В результате ток, протекающий через вакуумный выключатель, переходит через нуль и дуга в выключателе гаснет.

Взрывающиеся проводники в комбинации с вакуумными выключателями. Принципиальная схема такого коммутатора приведена на

рис. 3.40. Зарядный ток накопителя протекает через выключатель высокого напряжения Q . При коммутации тока в момент t_1 контакты выключателя начинают расходиться, и между ними загорается дуга. Через некоторое время в момент t_2 , когда контакты выключателя разошлись на достаточное расстояние, срабатывает вспомогательный блок-контакт K , подключающий взрывающийся проводник (ВП). Размеры и сопротивление ВП подобраны так, что ток из выключателя переключается в шунтирующий канал ВП (сопротивление ВП значительно меньше сопротивления горящей в выключателе дуги). Процесс переключения тока требует некоторого времени с t_2 до t_3 , которое определяется сопротивлением дуги и индуктивностью шунтирующей цепи. Дуга в выключателе гаснет. С момента t_3 весь ток протекает через ВП. Спустя некоторое время сопротивление проводника ВП начинает возрастать (проводник нагревается) и, соответственно, растет падение напряжения на нем. В этот момент происходит подключение нагрузки (время t_4). При нагревании проводник ВП разрушается со взрывом. В этот момент возможны превышения напряжения по сравнению с произведением тока на сопротивление нагрузки. Длительность коммутации определяется временем $t_5 - t_4$, т.е. временем между подключением нагрузки и спадом зарядного тока до нуля (набором полного тока нагрузки). Этот интервал составляет 1 – 10 мкс при общем времени $t_5 - t_1 = 1 - 10$ мс.

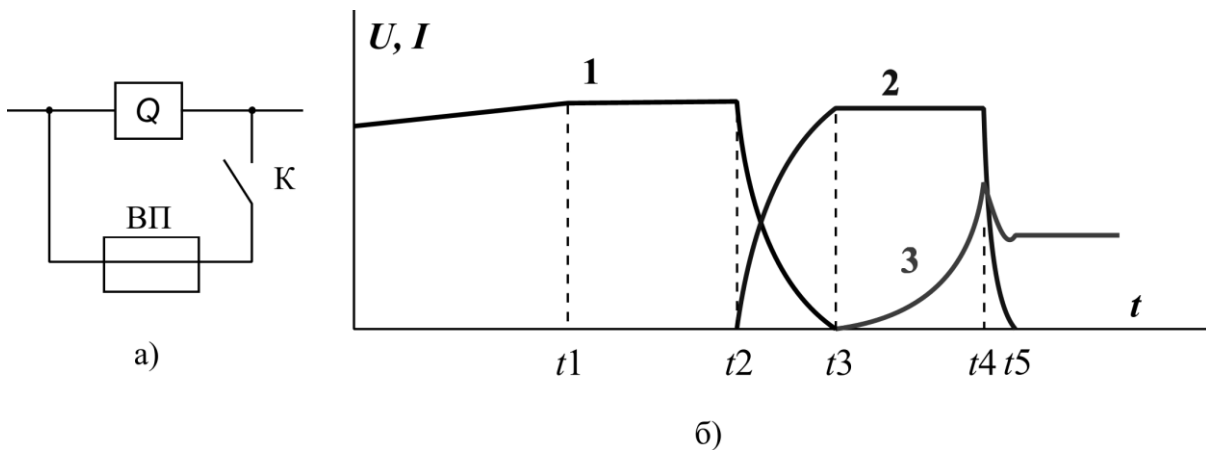


Рис. 3.40. Коммутатор постоянного тока на основе вакуумного выключателя Q и взрывающегося проводника ВП: а) схема коммутатора; б) – зависимость тока и напряжения от времени: 1 – ток в Q ; 2 – ток в ВП; 3 – напряжение на коммутаторе

Особо важным условием работы коммутатора является восстановление электрической прочности промежутка между контактами

выключателя к моменту появления напряжения при взрыве проводника. Для сокращения длины (массы взрывающегося проводника) и увеличения электрической прочности после взрыва, проводник помещают в плотную среду – чаще всего в кварцевый песок. В этом случае шунтирующий элемент напоминает предохранитель высокого напряжения. Разница заключается в том, что если в предохранителе предпринимаются меры по снижению пика перенапряжений в момент разрыва цепи, то в коммутаторе такой пик способствует облегчению условий переключения тока в нагрузку. Основной недостаток – малая скорость разведения контактов (обычно меньше 5 м/с). Следствие этого – долгое горение дуги и низкая скорость восстановления электрической прочности, которая зависит от времени горения дуги. Рассматриваемые коммутаторы работают при токах до 40 кА и напряжениях до 40 кВ. Дальнейшее повышение напряжения возможно с использованием воздушных или элегазовых быстродействующих выключателей, обладающих высоким быстродействием и высокой скоростью восстановления электрической прочности. Для малых времен коммутации используют также взрывные проводники на воздухе. При этом сокращается время возрастания тока в нагрузке (передний фронт импульса тока).

Контрольные вопросы

1. Назовите типы испытательных импульсов.
2. Какие характеристики имеет стандартный полный импульс грозового перенапряжения?
3. Как определяется длительность фронта грозового импульса?
4. Как определяется длительность грозового импульса?
5. Какие характеристики имеет стандартный срезанный импульс грозового перенапряжения?
6. Как определяется момент среза грозового импульса?
7. Как определяется амплитуда апериодического импульса при наличии одиночных выбросов напряжения?
8. Как определяется амплитуда апериодического импульса при наличии колебаний?
9. Назовите формы коммутационных импульсов.
10. Какие характеристики имеют коммутационные импульсы?
11. Оборудование каких классов напряжения испытывается импульсами коммутационных перенапряжений?
12. Какие характеристики имеют прямоугольные импульсы тока?

13. Дайте определение времени «полки» (t_{90}).
14. Дайте определение времени «основания» (t_{10}).
15. При каких соотношениях времени «полки» и времени «основания» импульс считается прямоугольным?
16. Перечислите 5 высоковольтных технологий, в которых применяются прямоугольные импульсы тока.
17. Перечислите типы высоковольтных аппаратов, для испытания которых применяются прямоугольные импульсы тока.
18. Перечислите элементы однокаскадного генератора импульсных напряжений Аркадьева–Маркса и их назначение в схеме.
19. Если зарядное напряжение накопительных конденсаторов равно U_0 , то на какое минимальное обратное напряжение должны быть рассчитаны диодные выпрямительные столбы в ГИН?
20. Как определяется коэффициент использования ГИН по напряжению?
21. В каких случаях используются однорядные и двухрядные схемы ГИН Аркадьева–Маркса?
22. Назовите преимущества и недостатки ГИН схемы Фитца по сравнению с ГИН схемы Аркадьева–Маркса.
23. Назовите типы конструкционного исполнения ГИН схемы Аркадьева–Маркса.
24. Назовите область применения генераторов импульсных токов (ГИТ).
25. Назовите общие принципы компоновки ГИТ.
26. Нарисуйте принципиальную схему ГИТ и назовите назначение отдельных элементов схемы.
27. Нарисуйте принципиальную схему двухпроводной формирующей линии, объясните принцип ее работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.
28. Нарисуйте принципиальную схему коаксиальной формирующей линии, объясните принцип ее работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.
29. Нарисуйте принципиальную схему полосковой формирующей линии, объясните принцип ее работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.
30. Нарисуйте принципиальную схему спирального генератора прямоугольных импульсов, объясните принцип его работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.

31. Нарисуйте принципиальную схему формирующей линии Блюмляйна, объясните принцип ее работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.

32. Нарисуйте принципиальную схему получения прямоугольных импульсов тока большой длительности, объясните принцип ее работы и назовите назначение отдельных элементов схемы.

33. Назовите 8 характеристик коммутаторов высокого напряжения.

34. Назовите типы коммутаторов высокого напряжения.

35. Назовите характеристики коммутатора типа игнитрон.

36. Назовите элементы конструкции современных коммутаторов с холодным катодом?

37. От каких параметров разрядника и внешней среды зависит разрядное напряжение шарового разрядника (ШР)?

38. Назовите элементы конструкции управляемого ШР, их назначение и принцип действия.

39. Перечислите типы коммутаторов постоянного тока.

40. Нарисуйте схему коммутатора постоянного тока, построенного из взрывающегося проводника, высоковольтного выключателя и вспомогательного коммутатора, объясните назначение элементов схемы и принцип ее действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. ГОСТ Р 51317.4.30–2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Госстандарт, 2008.
2. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт, 1997.
3. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытаний электрооборудования. – 6-е издание. – М.: ОРГРЭС 2000, НЦ ЭНАС, 2001.
4. Электроустановки. Сборник нормативных документов. – М.: НЦ ЭНАС, 2012.
5. ГОСТ 1516.2-97–2003. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытания электрической прочности изоляции. – М.: Госстандарт, 2003.

Дополнительная литература

6. Бейер М. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер, К. Меллер, В. Цаенгль; под ред. Ларионова В.П. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
7. Богатенков И.М. Высоковольтные испытательные установки / И.М. Богатенков, Э.И. Янчус. – Л.: ЛПИ, 1985. – 72 с.
8. Адамьян Ю.Э. Электроэнергетика. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения / Ю.Э. Адамьян, Е.П. Бельков, И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Г.С. Кучинский, И.В. Черняев, Э.И. Янчус. – СПб.: СПбГПУ, 2002. – 202 с.
9. Бельков Е.П. Высоковольтные импульсные установки: учеб. пособие / Е.П. Бельков, Ю.Н. Бочаров. – СПб.: СПбГТУ, 1992. – 100 с.
10. Богатенков И.М. Измерение напряжений и токов в высоковольтных установках: учеб. пособие / И.М. Богатенков, Э.И. Янчус. – Л.: ЛПИ, 1986. – 64 с.
11. Кужекин И.П. Генератор импульсных напряжений / И.П. Кужекин. – М.: МЭИ, 1988. – 40 с.
12. Авруцкий В.А. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента: учебное пособие для втузов по специальности «Техника высоких напряжений» / В.А. Авруцкий, И.П. Кужекин, Е.Н. Чернов, Моск. энерг. ин-т (МЭИ). – М.: Изд-во МЭИ, 1983. – 264 с.

13. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Когана. М: ЗАО «Энергосервис», 1998, 2001.
14. Tesla coil handbook. Lindsay publ.inc., 2004 (lindsay @ lindsaybks.com).
15. Noon W. Secrets of building electrostatic lightning bolt generators. Lindsay publ.inc., 2004.
16. Marshall P. Simple electrical working models. Lindsay publ.inc., 2004.
17. Moore A.D. Electrostatics: dirod electrostatic generators. Copyright © 2001 by Kevin M. Dunn.
18. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. – М:Атомиздат, 1975.
19. Herb, R.G. "Pelletron Accelerators for Very High Voltage", Nuclear Instruments and Methods, 1974, v. 122, pp 267–276.
20. Федченко И.К. Техника высоких напряжений. Испытательные установки и методы испытания выключающих аппаратов высокого напряжения / И.К. Федченко. Киев: «Вища Школа», 1969.
21. C.A. Spellman, Ahaddad: A Technique for On-Line Monitoring of ZnO Surge Arresters. ISH 97, Montreal, Canada.
22. M. Modrusan, L. Kehl: Eine universelle Prefanlage for Metalloxid-Uberspannungsableiter ohne Funkenstrecke. Bull. SEV/VSE 11/1998.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	3
Глава 1. Установки промышленной частот.	4
§ 1.1. Общие вопросы и определения.	4
§ 1.2. Регуляторы напряжения.	7
§ 1.3. Испытательные трансформаторы.	10
§ 1.4. Резонансные схемы.	25
Глава 2. Установки постоянного напряжения.	29
§ 2.1. Общие вопросы получения и применения постоянного высокого напряжения.	29
§ 2.2. Электростатические генераторы.	30
§ 2.3. Выпрямители.	38
Глава 3. Установки импульсных напряжений и токов.	48
§ 3.1. Общие вопросы получения и применения импульсного высокого напряжения.	48
§ 3.2. Генераторы импульсных напряжений (ГИН).	55
§ 3.3. Генераторы импульсных токов.	69
§ 3.4. Генераторы прямоугольных импульсов тока	76
§ 3.5. Коммутаторы высокого напряжения.	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	100

Учебное издание

Усачев Александр Евгеньевич

**ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ: ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Учебное пособие

Кафедра электрических станций КГЭУ

Редактор редакционно-издательского отдела *А.В. Заяц*

Компьютерная верстка *А.В. Заяц*

Подписано в печать 17.02.14.

Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 6,10. Уч.-изд. л. 6,77. Тираж 500 экз. Заказ № 4733.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51