

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В. А. Лавринович

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ**
Лабораторные работы

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621.3.027.3(07)

Л12

Лавринович В.А.

Л12 Высоковольтные испытательные установки и измерения: учебное пособие по лабораторным работам / В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 50 с.

В учебном пособии, в соответствии с программой по курсу "Высоковольтные испытательные установки и измерения", рассмотрены вопросы высоковольтных измерений, методы испытаний и способы получения высоковольтных постоянных и импульсных напряжений с учетом особенностей электроэнергетики. Описаны цели, основы теории и методы проведения лабораторных работ по высоковольтным испытательным установкам.

Учебное пособие подготовлено на кафедре Электроэнергетических систем и высоковольтной техники и предназначено для студентов направления 140200 «Электроэнергетика», может быть полезно инженерно-техническим работникам заводов, энергосистем и проектных институтов.

УДК 621.3.027.3(07)

Рецензенты:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник ИСЭ СО РАН

Э. Н. Абдуллин

Начальник отдела диагностики филиала ОАО ЕЭС «Томское ПМЭС»

Ю. Г. Конев

© ГОУ ВПО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", 2010

© Лавринович В. А., 2010

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2010

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Содержание

1. Калибровка электростатического вольтметра с помощью шарового измерительного разрядника.....	5
1.1. Методы и устройства для измерения высоких напряжений.....	5
1.2. Измерение шаровым разрядником	5
1.3. Измерение электростатическим киловольтметром.....	9
1.4. Измерение напряжения с использованием делителей	11
1.4.1. Омический делитель для измерения постоянных напряжений.....	12
1.4.2. Омический делитель для измерения переменного и импульсного напряжения	13
1.4.3. Емкостный делитель	15
1.4.4. Емкостно-омические делители	15
1.5. Описание экспериментальной установки	16
1.6. Порядок выполнения работы	16
1.6.1. Калибровка киловольтметра на переменном напряжении.....	16
1.6.2. Калибровка киловольтметра на постоянном напряжении.....	17
1.7. Контрольные вопросы.....	18
2. Определение собственного времени включения и отключения высоковольтного выключателя	20
2.1. Краткие сведения.....	20
2.1.1. Выключатели баковые масляные.....	21
2.1.2. Выключатели маломасляные	22
2.1.3. Выключатели воздушные	22
2.1.4. Выключатели электромагнитные.....	23
2.1.5. Выключатели элегазовые.....	23
2.1.6. Выключатели вакуумные.....	24
2.2. Принципиальная схема установки.....	27
2.3. Порядок работы	28
2.4. Содержание отчета	28
2.5. Контрольные вопросы.....	28

3. Исследование работы схем выпрямления напряжения	30
3.1. Общие сведения	30
3.2. Схемы выпрямления.....	31
3.2.1. Однополупериодная однофазная схема выпрямления	31
3.2.2 Двухполупериодная мостовая схема выпрямления (схема Герца).....	33
3.2.3 Трехфазная однополупериодная схема выпрямления	34
3.2.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова)	36
3.3. Порядок работы	37
3.4. Содержание отчета	37
3.5. Контрольные вопросы.....	38
4. Исследование работы схем умножения напряжения.....	39
4.1. Общие сведения	39
4.2. Схемы выпрямления с умножением напряжения	40
4.2.1. Однополупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения	41
4.2.2. Двухполупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения	41
4.2.3 Однокаскадная схема удвоения напряжения.....	43
4.2.4. Однополупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения.....	43
4.3. Порядок работы	44
4.4. Содержание отчета	44
4.5. Контрольные вопросы.....	45
Список Литературы	45
Приложения.....	46

1. КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ШАРОВОГО ИЗ- МЕРИТЕЛЬНОГО РАЗРЯДНИКА

Цель работы

Ознакомиться с методами и устройствами для измерения высоких напряжений.

1.1. Методы и устройства для измерения высоких напряжений

Измерение высоких напряжений является одной из сложных проблем в высоковольтной технике. Сложность измерения высоких напряжений обусловлена тем, что на точность измерения оказывают влияние факторы, имеющие сложные и случайные зависимости от частоты, напряжения, тепловых явлений и внешних условий. Влияние этих факторов не представляется возможным полностью исключить, поэтому их необходимо уметь учитывать. К основным неопределенным априори мешающим факторам относятся емкостные связи между элементами измерительной системы, сопротивление утечки, коронный разряд, частичные разряды в изоляционных конструкциях, зависимость значения сопротивления резисторов от напряжения и температуры. Выполнение конструкции измерительных устройств и приборов в соответствии с требованиями техники высоких напряжений позволяет уменьшить влияние мешающих факторов и тем самым обеспечить достаточно высокую точность получения измеряемой величины и формы напряжения.

Существующие высоковольтные измерительные устройства и методы измерения можно разбить на две основные группы.

1. Методы и устройства, позволяющие измерять (как в п.2) полную величину напряжения.

2. Методы и устройства, позволяющие измерять часть напряжения и определять полное напряжение по коэффициенту пропорциональности устройства.

Наиболее широкое распространение при измерении переменных, постоянных и импульсных напряжений в научно-исследовательских и промышленных лабораториях получили шаровые измерительные разрядники, электростатические киловольтметры и делители напряжений в сочетании с низковольтными регистрирующими и измерительными приборами.

1.2. Измерение шаровым разрядником

Шаровой измерительный разрядник весьма широко используется для измерения высокого напряжения благодаря простоте устройства и приемлемой для практики точности, которую можно получить при правильной методике измерения с соблюдением требований, определенных ГОСТ 17512-82 "Электро-

оборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением". Измерение высокого напряжения шаровыми разрядниками основано на использовании зависимости значения пробивного напряжения воздушного промежутка между электродами от расстояния между ними. Для измерения следует использовать промежутки с однородным или слабонеоднородным полем, в которых значение напряжения возникновения условия самостоятельного разряда и напряжения искрового пробоя близки и имеют линейную зависимость от расстояния. Шаровые разрядники позволяют измерить высокие напряжения в широком диапазоне от десятков киловольт до нескольких мегавольт.

Разрядное напряжение шарового разрядника является функцией расстояния между шаровыми электродами и их диаметром. Значение напряжения, при котором происходит пробой, определяется по специальным таблицам разрядных напряжений шаровых промежутков (ГОСТ 17512 – 82, см. таблицу П1 – П2). В таблицах приводятся амплитудные значения пробивных напряжений в зависимости от диаметра шаровых электродов и расстояния между ними для нормальных атмосферных условий. За нормальные атмосферные условия принято: давление воздуха 760 мм рт. ст. и температура 20 °С. Влияние влажности воздуха на разрядное напряжение в однородных и слабонеоднородных полях незначительно, поэтому влажность воздуха при определении пробивного напряжения шарового разрядника не учитывается. При измерении импульсных напряжений учитывается эффект полярности измеряемого напряжения. Соблюдение нормированных ГОСТ 17512 – 82 условий измерения шаровыми разрядниками обеспечивает достаточно высокую точность измерения постоянных, переменных и импульсных напряжений с длительностью фронта не менее 10^{-6} с. Погрешность измерения высоких напряжений не превышает $\pm 3\%$ при условии, что расстояние между шаровыми электродами находится в пределах $S \leq 0,5D$, где D – диаметр шаров. При соотношении $0,5D < S \leq 0,75D$ стандартом ГОСТ 17512 – 82 не гарантируется указанная погрешность, и поэтому значения пробивных напряжений в таблице даны в скобках (табл.1.1.)

В практике измерения применяются горизонтальное и вертикальное расположения шаровых разрядников (рис. 1.1).

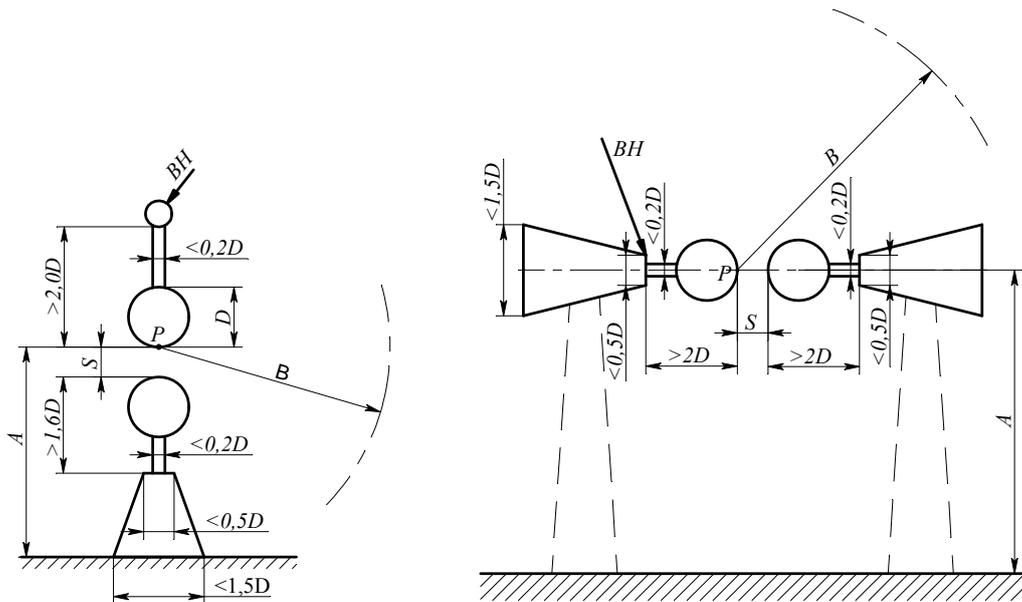


Рис. 1.1. Эскиз стандартных измерительных шаров. Указанные на чертеже размеры должны удовлетворять требованиям табл. 1: BH – провод от источника измеряемого напряжения; P – точка максимальной напряженности на поверхности незаземленного шара

Таблица 1.1

Расстояния от измерительных шаров до поверхности земли и до
посторонних предметов

Диаметр шаров D , см	Наименьшее значение A	Наибольшее значение A	Наименьшее значение B
6,25	$7D$	$9D$	$14D$
10-15	$6D$	$8D$	$12D$
25	$5D$	$7D$	$10D$
50	$4D$	$6D$	$8D$
75	$4D$	$6D$	$8D$
100	$3,5D$	$5D$	$7D$
150	$3D$	$4D$	$6D$
200	$3D$	$4D$	$6D$

При вертикальном расположении один шар всегда заземлен, а при горизонтальном расположении возможны два варианта:

- 1) заземлен один шар;
- 2) оба шара незаземлены.

При измерении напряжений с амплитудой меньше 50 кВ разрядниками любого диаметра и любых напряжений шаровым разрядником диаметром меньше 12,5 см рекомендуется облучение межэлектродного промежутка. Облучение может осуществляться радиоактивными препаратами или кварцевыми ртутными лампами.

Измерение постоянных и переменных напряжений шаровыми разрядниками осуществляется двумя способами.

1. Устанавливается нужное расстояние S между электродами шарового разрядника, при котором измеряемое напряжение может пробить промежуток, а затем плавно (за время не менее 30 с) поднимается до пробоя измеряемое напряжение. По таблицам разрядных напряжений шаровых промежутков (табл. П1 – П2) определяется значение напряжения, при котором возник разряд.

2. Между электродами устанавливается расстояние заведомо большее расстояния, при котором может произойти пробой промежутка и подается напряжение на шаровой разрядник. Затем электроды плавно (со скоростью примерно 0,01 S в секунду) сближаются до возникновения разряда между ними. Определяется расстояние S , при котором произошел пробой, и по табл. П1 – П2 определяется искомое напряжение.

Значение напряжения определяется как среднее из пяти последовательных измерений с интервалом не менее 1 мин. Перед началом измерения рекомендуется произвести несколько предварительных разрядов. В тех случаях, когда измерения производятся в нестандартных атмосферных условиях, для получения истинного значения пробивного напряжения, соответствующего данным атмосферным условиям, необходимо ввести поправку K в зависимости от относительной плотности воздуха δ :

$$\delta = \frac{0,386 \cdot P}{273 + t}, \quad (1)$$

где P – давление воздуха, мм рт. ст.; t – температура воздуха в градусах Цельсия.

Истинное значение пробивного напряжения в этом случае будет равно

$$U_{ис} = K \cdot U_{таб}, \quad (2)$$

где $U_{таб}$ – значение разрядного напряжения, взятое из таблиц, а $K=f(\delta)$ приводится в том же стандарте ГОСТ 17512 – 82. Для значений относительной плотности в пределах от 0,95 до 1,05 коэффициент $K = \delta$ и истинное значение напряжения можно определить как

$$U_{ис} = \delta \cdot U_{таб}. \quad (3)$$

При измерении амплитуды импульсных напряжений определяют так называемое 50% импульсное напряжение. Изменение вероятности пробоя между ша-

рами от 0 до 100% происходит в сравнительно узком диапазоне изменения амплитуд, подаваемых на электроды импульсов, поэтому принято измерение амплитуд импульсных напряжений производить при 50% вероятности пробоя. Измерение импульсных напряжений можно проводить двумя путями.

1. Для получения 50% пробивного импульсного напряжения изменяют расстояние между шаровыми электродами (при $U_{\max} = const$) или изменяют напряжение ГИН (при $S = const$). Изменение проводят ступенями – не более 2% ожидаемого значения расстояния, при котором должен произойти пробой, или пробивного напряжения. На каждой ступени делают шесть приложений импульсных напряжений с интервалом не менее 5 с. Значение разрядного напряжения, дающего 50% вероятность пробоя, определяют интерполяцией между двумя отсчетами расстояния или напряжения. Один отсчет соответствует одному или двум пробоям из шести приложений, а второй отсчет – четырем или пяти пробоям из шести приложений.

2. Для получения 50% пробивного импульсного напряжения изменяют расстояние между шаровыми электродами или напряжение ГИН таким образом, чтобы между электродами возникало от четырех до шести пробоев из 10 приложений импульсного напряжения. В этом случае амплитудное значение напряжения соответствует 50% разрядному напряжению и может быть определено из стандартных таблиц разрядных напряжений шаровых промежутков.

При измерении импульсных напряжений с использованием стандартных таблиц минимальная погрешность достигается при импульсах напряжения длительностью не менее 5 мкс с временем нарастания напряжения не менее 1 мкс.

1.3. Измерение электростатическим киловольтметром

Для прямого измерения высокого напряжения применяют электростатические киловольтметры. Принцип измерения напряжения электростатическим киловольтметром основан на измерении сил, возникающих между заряженными электродами (рис. 1.2).

Может быть, вот так: Между пластинами 1 и 2, образующими плоский конденсатор, под воздействием приложенного к ним напряжения возникает сила электростатического взаимодействия, стремящаяся сблизить их. В отверстии одной из пластин устанавливается дополнительная подвижная пластина 3, на которую также действует электростатическая сила, пропорциональная площади S пластины 3. Перемещение подвижной пластины 3 уравнивается механической силой системы ее крепления. Эта сила пропорциональна квадрату напряжения и может быть выражена как

$$F = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{2 \cdot l^2} \cdot U^2 = K \cdot U^2, \quad (4)$$

где S – площадь электродов, образующих плоский конденсатор, l – расстояние между электродами.

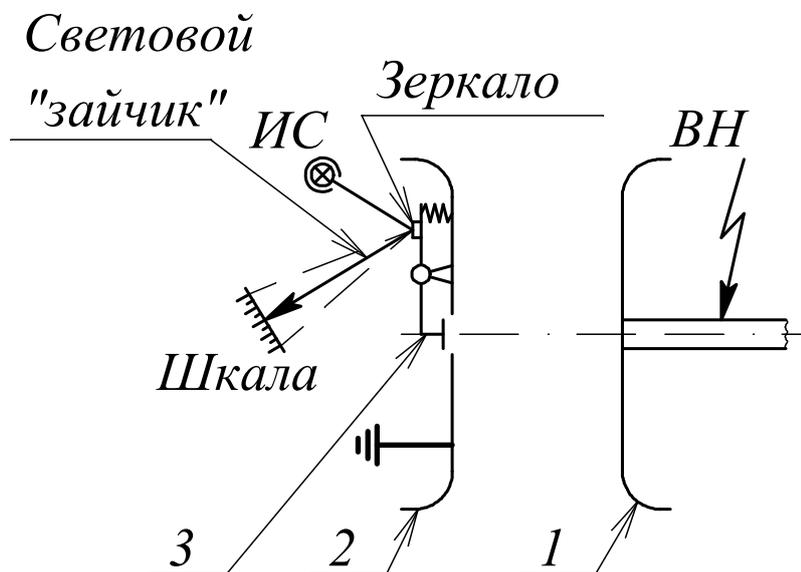


Рис. 1.2. Схема устройства электростатического киловольтметра: 1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленный электрод-экран; 3 – подвижный электрод; ИС – источник света

Система крепления подвижного электрода позволяет измерить силу, которая пропорциональна действующему значению напряжения, при помощи специального оптического устройства, регистрирующего отклонение подвижного электрода от положения равновесия.

Приборы, в которых измеряется абсолютная величина силы F и определяется, таким образом, напряжение, получили название абсолютных электростатических киловольтметров. В практике технических измерений используются относительные электростатические киловольтметры непосредственного отсчета измеряемого напряжения. К этому классу киловольтметров относятся приборы, типы которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Типы отечественных электростатических киловольтметров

Тип киловольтметра	Пределы измерений, кВ			Примечание
	0...7	0...15	0...30	
С-196	0...7	0...15	0...30	
С-100	0...25	0...50	0...75	Симметричный
С-100	0...100	0...200	0...300	

Для получения достаточной равномерности шкалы киловольтметра подвижный электрод 3 и отверстие в электроде-экране 2 имеют специальную форму.

Электростатические киловольтметры имеют относительно малую погрешность $\pm (1,0 \div 1,5)\%$, небольшую входную емкость порядка 18 пФ и позволяют измерять постоянное и переменное напряжения с частотой от 45 до 500 000 Гц. При измерении необходимо следить за тем, чтобы окружающие заземленные предметы находились на расстоянии, установленном нормативами, чтобы исключить их влияние на точность измерения.

1.4. Измерение напряжения с использованием делителей

Делитель напряжения (ДН) – это измерительное устройство, состоящее из цепочки последовательно соединенных элементов, имеющих активное или реактивное сопротивление. Один конец измерительной цепочки заземляется, а на другой подается измеряемое напряжение. Делитель напряжения содержит низковольтное плечо, к которому присоединяется измерительный прибор, и высоковольтное плечо, которое с одной стороны присоединяется к объекту, а с другой стороны – к низковольтному плечу. Делители характеризуются коэффициентом деления K_d – отношение значения напряжения на делителе к напряжению на низковольтном плече с учетом передающего кабеля Z_k и измерительного устройства.

Делитель должен удовлетворять основному требованию: напряжение на низковольтном плече должно по форме повторять измеряемое напряжение, приложенное к высоковольтному плечу. Для этого необходимо, чтобы:

- коэффициент деления не зависел от частоты;
- коэффициент деления не зависел от значения и полярности измеряемого напряжения;
- значения сопротивлений делителя не зависели от напряжения, температуры;
- подключение делителя к объекту, на котором измеряется напряжение, не должно оказывать влияния на измеряемое напряжение.

Делители напряжения используются для измерения постоянных, переменных и импульсных напряжений. Из-за существенного различия в требованиях к делителям при напряжениях различного вида обычно делители изготавливают для измерения какого-либо одного вида напряжения: постоянного, переменного или импульсного. Делители изготавливаются

- омическими;
- емкостными;
- емкостно-омическими.

Делители напряжения позволяют не только измерять напряжение, но и зафиксировать форму воздействующего сигнала при помощи электронного ос-

циллографа. Общая принципиальная схема измерения с помощью ДН приведена на рис 1.3.

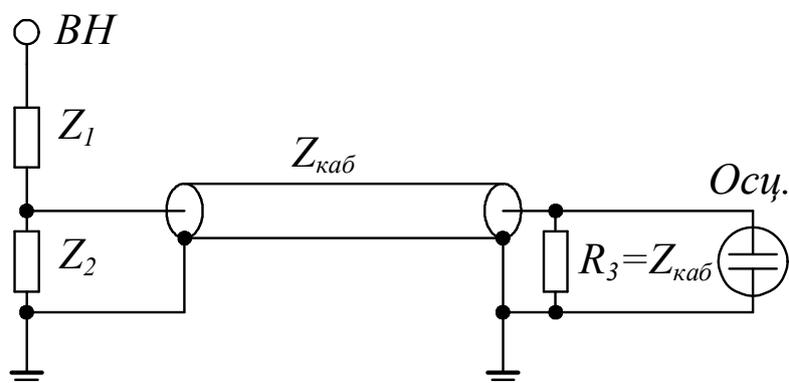


Рис. 1.3. Схема измерения высокого напряжения посредством делителя напряжения: Z_1 – сопротивление высоковольтного плеча делителя; Z_2 – сопротивление низковольтного плеча делителя; $Z_{каб}$ – волновое сопротивление кабеля, подводящего напряжение от низковольтного плеча делителя к осциллографу; R_3 – согласующее сопротивление (необходимо для устранения отражений в кабеле); ЭО – электронный осциллограф

1.4.1. Омический делитель для измерения постоянных напряжений.

Схема замещения омического ДН представлена на рис. 1.4.

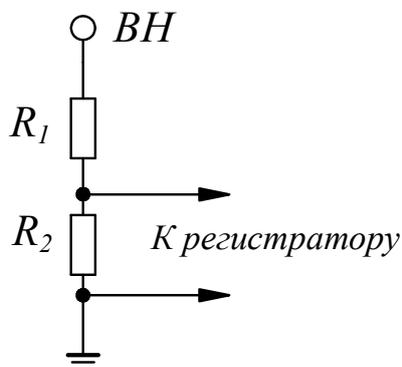


Рис. 1.4. Схема замещения омического делителя: $ВН$ – высокое напряжение; R_1 – сопротивление высоковольтного плеча делителя; R_2 – сопротивление низковольтного плеча делителя

Погрешность измерения напряжения омическим делителем будет определяться зависимостью сопротивления резисторов от температуры; наличием токов утечки по изоляционной части конструкции, зависимостью сопротивления

резисторов и изоляционной части конструкции от напряжения; влиянием коронного разряда возможного с элементов конструкции ДН.

Омические делители для измерения постоянных напряжений могут быть выполнены намоткой из проволоки с высоким удельным сопротивлением (нихром, константан и др.) или из керамических поверхностных и объемных резисторов. Отечественная промышленность выпускает стабильные проволочные резисторы (МВСГ, МРГЧ, МРХ) и высоковольтные резисторы типа С5-23, С5-24, С5-24А, С5-50, С5-51 с большим значением сопротивления (несколько мегаом), пригодные для создания точных делителей. Там, где не требуется высокая точность, можно использовать и другие типы поверхностных и объемных резисторов.

1.4.2. Омический делитель для измерения переменного и импульсного напряжения

В схеме замещения таких делителей необходимо учитывать емкость отдельных конструктивных элементов относительно друг друга и относительно "земли", индуктивность соединительных проводов и элементов конструкции. Схема замещения омического делителя для измерения переменного и импульсного напряжений приведена на рис. 1.5.

Для изготовления могут быть использованы проволочные и керамические резисторы. Проволочные резисторы обладают существенной индуктивностью. Снижение индуктивности в этом случае можно добиться, выполняя бифилярную намотку провода, образующего сопротивление резистора.

На характер передачи напряжения решающее влияние оказывают паразитная емкость на землю C_{zi} и индуктивность L_0 , определяемые конструктивными элементами делителя. Наличие паразитных параметров C_{zi} и L_0 приводит к многочастотным колебательным процессам в ветви делителя, искажению формы измеряемого сигнала, зависимости коэффициента деления делителя от частоты.

Паразитная емкость на землю C_{zi} приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль его длины из-за токов, утекающих на землю. Это приводит к изменению коэффициента деления. Для уменьшения влияния паразитной емкости на землю делители снабжают экранами (колоколообразными, тороидальными или цилиндрическими). Колоколообразные и тороидальные экраны подсоединяются к высоковольтному концу делителя, а цилиндрические экраны соединяются с землей.

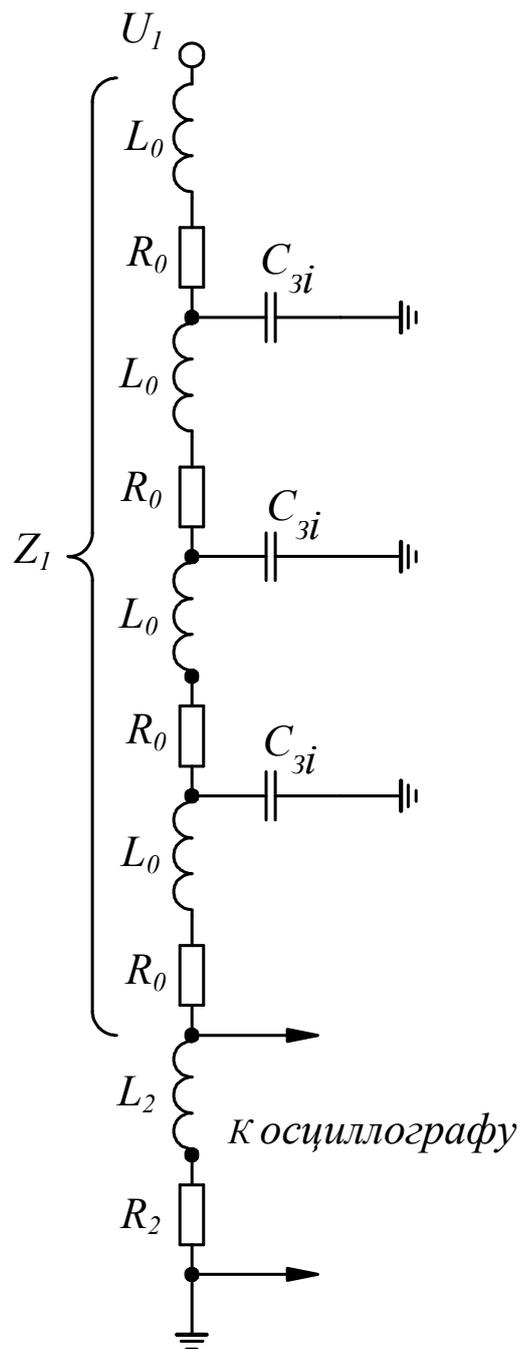


Рис. 1.5. Схема замещения омического делителя при измерении переменных и импульсных напряжений: Z_1 – эквивалентное сопротивление высоковольтного плеча; R_0 – активное сопротивление резисторов, из которых собран делитель; L_0 – индуктивность отдельных резисторов и их соединительных проводников; R_2 – сопротивление низковольтного плеча делителя; L_2 – индуктивность низковольтного плеча делителя; C_{3i} – усредненная емкость отдельных конструктивных элементов делителя относительно земли

При измерении синусоидального напряжения из-за наличия паразитной емкости и индуктивности делителя возникают погрешности, которые определяются в основном произведением $R_0 C_{zi}$. Применение делителей малого сопротивления и малого габарита (C_{zi} мало) позволяет уменьшить погрешности. Но низкоомный делитель на высокие напряжения выполнить затруднительно. Обычно такие делители изготавливаются на напряжение до 100 кВ.

Измерение импульсных напряжений омическим делителем затруднено сильным влиянием паразитных емкостей и индуктивностей резисторов делителя на коэффициент деления при высоких скоростях изменения напряжения.

1.4.3. Емкостный делитель

Схему емкостного делителя (рис. 1.6) можно получить, полагая в общей схеме замещения ДН (рис. 1.3.) $L = 0$ (индуктивность конденсаторов, из которых собран ДН), $R = 0$ (активное сопротивление соединительных проводников и обкладок конденсаторов). Реальные емкостные делители имеют конкретные значения индуктивности и сопротивления, которые приводят к повышенным погрешностям при измерении переменных и импульсных напряжений с крутым фронтом.

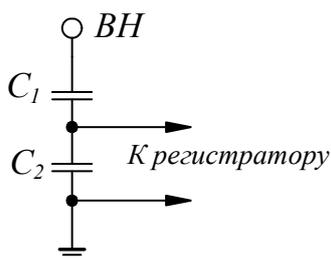


Рис. 1.6. Схема замещения емкостного делителя напряжения

1.4.4. Емкостно-омические делители

Схема замещения емкостно-омического ДН приведена на рис. 1.7.

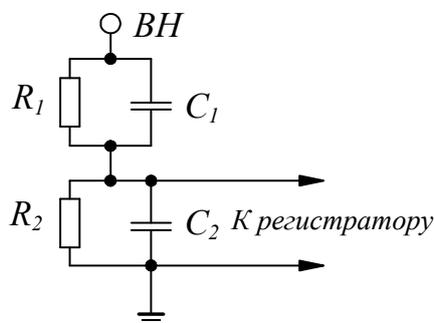


Рис. 1.7. Схема замещения смешанного (емкостно-омического) делителя напряжения

Емкостно-омические делители при соответствующем подборе параметров могут передавать с малой погрешностью постоянное, переменное и импульсное напряжения. Передаточная характеристика емкостно-омического делителя не зависит от частоты, если постоянные времени плеч высокого и низкого напряжений равны. Наряду с выполнением условия $R_1C_1=R_2C_2$ должны быть обеспечены соотношения $L_1C_1=L_2C_2$, т. е. должны быть равны собственные частоты плеч высокого и низкого напряжений. В общем виде для любого делителя должны выполняться равенства:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{C_2}{C_1}.$$

Такие делители называют компенсированными.

1.5. Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка для выполнения данной работы содержит высоковольтный трансформатор типа ИОМ-100/20, защитный резистор, высоковольтные вентили и шаровой измерительный разрядник с диаметром шаров 100 мм и возможностью плавной регулировки расстояния между шарами, киловольтметр типа С-100. Таким образом, используя данные элементы, можно провести калибровку киловольтметра на постоянном и переменном напряжениях.

1.6. Порядок выполнения работы

1.6.1. Калибровка киловольтметра на переменном напряжении

1.6.1.1. Собрать схему калибровки вольтметра на переменном напряжении согласно рис. 1.8.

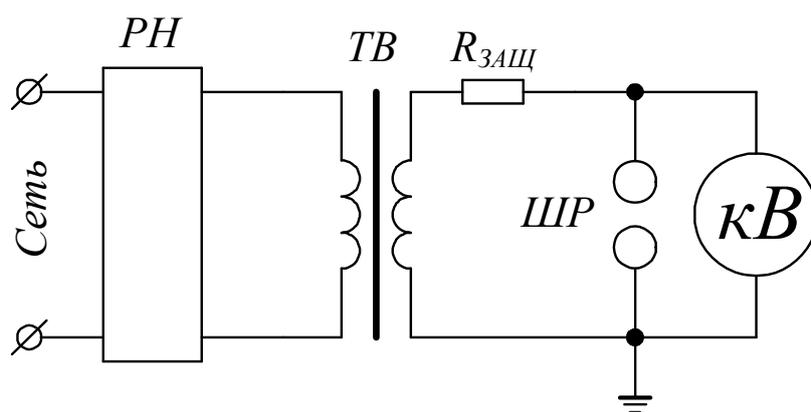


Рис. 1.8. Схема калибровки киловольтметра типа С-100 на переменном напряжении: РН – регулятор напряжения; ТВ – трансформатор высоковольтный; $R_{ЗАЩ}$ – защитный резистор; ШР – шаровой разрядник; кВ – киловольтметр

1.6.1.2. Установить расстояние между электродами шарового разрядника 5 мм.

1.6.1.3. Плавно поднимая напряжение, добиться пробоя шарового разрядника. Значение пробивного напряжения по киловольтметру занести в таблицу. Опыт повторить 5-6 раз.

1.6.1.4. Установить расстояние между электродами шарового разрядника 10 мм.

1.6.1.5. Повторить эксперимент, как описано в п. 1.6.1.3.

1.6.1.6. Установить расстояние между электродами шарового разрядника 15 мм.

1.6.1.7. Повторить эксперимент с расстояниями между электродами шарового разрядника от 20 до 35 мм с шагом 5 мм, как описано в п. 1.6.1.3.

1.6.1.8. Введя поправку на плотность воздуха, определить пробивные напряжения по таблицам разрядных напряжений для шаровых промежутков при диаметре шаров 100 мм.

1.6.1.9. Построить градуировочную кривую (зависимость истинного напряжения от показаний киловольтметра) для измерения переменного напряжения посредством данного киловольтметра.

1.6.2. Калибровка киловольтметра на постоянном напряжении

1.6.2.1. Собрать схему для калибровки киловольтметра на постоянном напряжении согласно рис. 1.9.

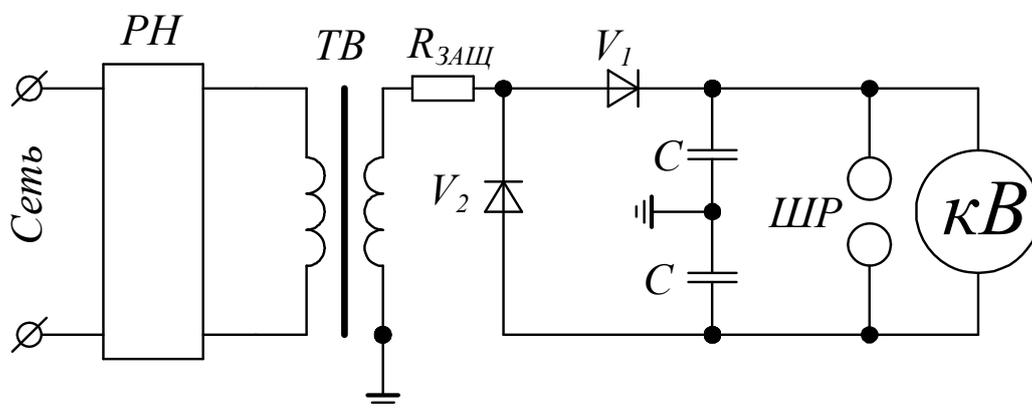


Рис. 1.9. Схема калибровки киловольтметра типа С-100 на постоянном напряжении: РН – регулятор напряжения; ТВ – трансформатор высоковольтный; $R_{ЗАЩ}$ – защитный резистор; V_1 , V_2 – вентили; С – конденсатор; ШР – шаровой разрядник; кВ – киловольтметр

1.6.2.2. Установить шкалу киловольтметра на 25 кВ. Развести электроды шарового разрядника на расстояние более 30-40 мм.

1.6.2.3. Поднять напряжение до 7,0-7,5 кВ (напряжение контролировать по киловольтметру).

1.6.2.4. Медленно сближая шары, добиться пробоя. Определить расстояние между шарами и по таблицам разрядных напряжений для шаровых промежутков с учетом плотности воздуха определить разрядное напряжение. Опыт повторить 5-6 раз.

1.6.2.5. Поднять напряжение на 5-7 кВ (напряжение контролировать по киловольтметру).

1.6.2.6. Провести опыт в соответствии с п. 1.6.2.4.

1.6.2.7. Поднять напряжение на 5-7 кВ.

1.6.2.8. Провести опыт в соответствии с п. 1.6.2.4.

1.6.2.9. Повторить опыты в соответствии с п. 1.6.2.4 на напряжении, примерно, на 1-2 кВ ниже верхнего уровня установленной шкалы киловольтметра.

1.6.2.10. Переключить киловольтметр на предел 50 кВ и провести его калибровку аналогично пп. 1.6.2.2 - 1.6.2.9.

1.6.2.11. Переключить киловольтметр на предел 75 кВ и провести его калибровку аналогично пп. 1.6.2.2 - 1.6.2.9.

1.6.2.12. Построить градуировочную кривую для измерения постоянного напряжения посредством данного киловольтметра.

1.7. Контрольные вопросы

1.7.1. Какой принцип лежит в основе работы электростатического вольтметра?

1.7.2. Какой принцип лежит в основе измерения высокого напряжения с помощью шарового разрядника?

1.7.3. Какой принцип лежит в основе измерения высокого напряжения с помощью делителя напряжения?

1.7.4. Какие виды напряжений можно измерить электростатическим киловольтметром?

1.7.5. Какие значения напряжения (среднее, действующее, мгновенное, амплитудное) можно измерить перечисленными измерительными устройствами?

1.7.6. Какие требования предъявляются к делителям напряжений при измерении высокого постоянного напряжения?

1.7.7. Какие требования предъявляются к делителям напряжений при измерении высокого переменного напряжения?

1.7.8. Какие требования предъявляются к делителям напряжений при измерении высокого импульсного напряжения?

1.7.9. Какие требования предъявляются к шаровым разрядникам при измерении высокого напряжения?

1.7.10. Каковы преимущества измерения высокого напряжения с помощью шарового измерительного разрядника по сравнению с делителем напряжения?

1.7.11. Какие преимущества измерения высокого напряжения делителем напряжения по сравнению с электростатическим вольтметром?

1.7.12. Какие преимущества измерения высокого напряжения электростатическим вольтметром по сравнению с шаровым измерительным разрядником?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ И ОТКЛЮЧЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Цель работы

Ознакомление с методикой измерения собственного времени включения и отключения высоковольтного выключателя.

2.1. Краткие сведения

К высоковольтному выключателю предъявляются многочисленные требования, которые в основном изложены в ГОСТ Р687. Для определения соответствия выключателя предъявляемым требованиям производятся необходимые испытания.

Выключатель является элементом энергосистемы и энергоснабжения, от его работы зависит надежность и безопасность функционирования участка энергосистемы, на котором он установлен. Отказ выключателя в процессе работы ведет к расширению аварии и большим материальным потерям, поэтому к надежности выключателя предъявляются высокие требования.

Из основных технических параметров выключателя важными являются собственное время включения и собственное время отключения выключателя.

Собственное время отключения выключателя – это интервал времени от момента подачи команды на отключение до момента прекращения (размыкания) дугогасительных контактов. Под " моментом подачи команды на отключение" понимают:

– для выключателей, отключаемых от постороннего вспомогательного источника тока, – момент приложения напряжения к зажимам цепи управления импульса напряжения (начала протекания тока), равного номинальному;

– для выключателей, отключаемых от встроенных в привод максимальных расцепителей тока, – момент начала прохождения через обмотки этих расцепителей тока, равного току срабатывания, при установке механизма выдержки времени (при его наличии) на нуль;

– для выключателей, отключаемых от встроенных в привод минимальных расцепителей напряжения, – момент понижения напряжения до значения, равного напряжению срабатывания, при уставке механизма выдержки времени (при его наличии) на нуль.

Под "моментом прекращения соприкосновения (размыкания) дугогасительных контактов" понимают момент прекращения соприкосновения (размыкания) контактов полюса, размыкающегося последним, а для полюса выключа-

теля с многоразрывным дугогасительным устройством – момент прекращения прекращения соприкосновения контактов разрыва, разрывающегося первым.

Собственное время отключения выключателя принимается равным измеренному при отсутствии токовой нагрузки в цепи выключателя.

Полное время отключения выключателя определяется как интервал времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах.

Собственное время включения выключателя – это интервал времени от момента подачи команды на включение выключателя до момента соприкосновения (замыкания) контактов, замыкающих цепь тока.

Под "моментом подачи команды на включение" понимают момент приложения к зажимам цепи управления импульса напряжения, равного номинальному.

Под "моментом соприкосновения (замыкания) контактов" понимают момент соприкосновения (замыкания) контактов в полюсе, включающемся последним. Собственное время включения принимают равным измеренному при отсутствии высокого напряжения в цепи выключателя.

Собственное время отключения выключателя должно быть наименьшим. Это позволяет уменьшить последствия аварийного режима и сократить материальные потери, связанные с отключением потребителей. Сокращение времени отключения выключателя увеличивает запас устойчивости параллельной работы станций и пропускную способность линий электропередачи.

Повышение коммутационного ресурса позволяет упростить эксплуатацию и сократить расход на ремонт и ревизию.

Сокращение габаритных размеров и массы выключателя позволяет уменьшить размеры распределительного устройства (РУ) и удешевить установку. Желательно уменьшение стоимости самих выключателей.

В современных условиях при выборе выключателя следует учитывать его технические параметры. Однако, особое внимание необходимо обращать на пожаробезопасность выключателей, а также их воздействие на окружающую среду в процессе эксплуатации и при утилизации.

2.1.1. Выключатели баковые масляные

Баковые выключатели просты в изготовлении, относительно недорогие. Выключатели имеют, как правило, электромагнитные или пружинные приводы. Трансформаторы тока встроены в выключатель, что позволяет упростить РУ и сократить стоимость и габариты всей установки.

Недостатки баковых выключателей обусловлены большим объемом масла, что требует содержания специальной службы и оборудования для сушки и очистки трансформаторного масла. Размещение камер в баке с маслом затрудняет их ремонт и осмотр. В процессе работы выключателя возникают большие удар-

ные нагрузки на фундамент, что требует создания мощных фундаментов. Надежность масляных выключателей приближается к надежности воздушных выключателей.

В настоящее время выпускаются баковые выключатели на номинальное напряжение 6 – 110 кВ.

2.1.2. Выключатели маломасляные

В этих выключателях трансформаторное масло используется в основном для гашения электрической дуги. Выключатели имеют малые размеры, малую массу, достаточно высокие технические данные. Это определило их широкое применение при номинальном напряжении до 35 кВ в сборных распределительных устройствах, комплектных распределительных устройствах для внутренней (КРУ) и наружной установок (КРУН).

Маломасляные выключатели по конструктивным особенностям можно разбить на следующие основные группы:

- маломасляные подвешного типа;
- маломасляные горшкового типа;
- маломасляные выключатели для наружных установок.

2.1.3. Выключатели воздушные

В воздушных выключателях для гашения дуги отключаемого тока используется осушенный сжатый до 2-4 МПа атмосферный воздух. Воздушные выключатели можно разделить на две большие группы.

Первая группа — генераторные выключатели серии ВВОА-15 и ВВГ-20. Номинальное напряжение до 20 кВ, номинальный ток до 20 000 А, номинальный ток отключения до 160 кА.

Вторая группа — выключатели, на номинальное напряжение 35 кВ и выше.

Для работы воздушных выключателей необходимо компрессорное хозяйство и система осушки воздуха.

Преимущества воздушных выключателей перед другими типами выключателей заключаются в следующем:

- наращивание номинального напряжения, вплоть до 750 кВ, осуществляется последовательным соединением модулей;
- повышенная надежность работы изоляции выключателя достигается за счет непрерывной вентиляции полостей модуля;
- имеется большой коммутационный ресурс при номинальном токе (особенно в выключателях для электротермических установок);
- время отключения доведено до 0,04 с;
- высокая пожаробезопасность.

К недостаткам воздушных выключателей следует отнести:

- сложность и большую стоимость по сравнению с масляными;
- потребность в чистом осушенном сжатом воздухе для надежной работы, что, в свою очередь, требует наличия сложного и дорогого компрессорного хозяйства;
- отключение сопровождается сильными хлопками типа взрыва.

2.1.4. Выключатели электромагнитные

В ряде установок требуется частая коммутация номинальных токов при напряжении до 10-15 кВ. К этим установкам относятся: электротермические устройства, оборудование собственных нужд электростанций. В этих случаях применяются электромагнитные выключатели. Основная серия этих выключателей ВЭ-10 на номинальное напряжение до 10 кВ, номинальный ток до 3600 А, номинальный ток отключения до 40 кА. Время включения электромагнитного выключателя типа ВЭ-10 не превышает 0,08 с. Механический ресурс в цикле ВО до 25000-120000 циклов в зависимости от назначения выключателя. Коммутационный ресурс электромагнитного выключателя при номинальном токе и $\cos\varphi \geq 0,7$ от 5000 до 10000 циклов ВО (в зависимости от $I_{\text{ном}}$ выключателя).

К преимуществам электромагнитных выключателей следует отнести взрывобезопасность; большой коммутационный ресурс номинального тока; большой механический ресурс; ограничение тока при отключении; слабая зависимость процесса отключения от скорости восстановления напряжения сети.

Основной недостаток электромагнитных выключателей заключается в ограниченном значении номинального напряжения ($U_{\text{ном}} \leq 15$ кВ).

2.1.5. Выключатели элегазовые

Элегазовые выключатели принципиально отличаются от воздушных тем, что у них в качестве дугогасительной среды вместо воздуха используется элегаз, обладающий повышенной по сравнению с воздухом электрической прочностью и отключающей способностью при прочих равных условиях.

Элегазовые выключатели обладают следующими достоинствами: высокая электрическая прочность и дугогасящая способность элегаза позволяют создать дугогасительное устройство на ток отключения 40 кА при напряжении 220 кВ на один разрыв при высокой скорости восстановления напряжения сети. Элегаз позволяет повысить нагрузку токоведущих частей и уменьшить их массу за счет своих охлаждающих свойств.

Недостатки элегазовых выключателей выражаются в высоких требованиях к качеству элегаза и его способности сжижаться при определенных условиях, реализуемых в климатических зонах Российской Федерации. Работоспособность выключателя зависит от температуры окружающей среды, и при понижении температуры ниже определенного значения выключатель может отказать в га-

шении дуги отключаемого тока из-за перехода элегаза из газообразного состояния в жидкое. Так при давлении 0,35 МПа и плотности элегаза 28 кг/м³ предельная температура, при которой элегаз сохраняет свои дугогасительные свойства, составляет минус 40 °С. Это затрудняет применение элегазовых выключателей при более низких температурах окружающего воздуха.

2.1.6. Выключатели вакуумные

Принцип работы вакуумного выключателя основан на гашении электрической дуги, возникающей между контактами, в вакууме. Ввиду высокой электрической прочности вакуумного промежутка и отсутствия среды, поддерживающей горение дуги, время горения дуги минимальное.

Основные преимущества вакуумных выключателей по сравнению со всеми другими типами выключателей следующие: небольшие габариты; простота конструкции; взрыво- пожаробезопасность; малое время включения (0,05-0,075 с); высокая скорость восстановления прочности дугогасительного промежутка; способность отключения емкостной нагрузки; бесшумность работы; отсутствие выбросов в атмосферу (полная герметизация дугогасительного устройства); значительный ресурс при коммутации номинального тока $(30-50) \times 10^3$ коммутаций; отсутствие ударной нагрузки на фундамент; экологическая безопасность при эксплуатации и при утилизации.

В пределах коммутационного ресурса камера не ремонтируется. Механический ресурс и коммутационный ресурс вакуумной дугогасительной камеры при номинальном токе выключателя достигает $(30-150) \times 10^3$ циклов ВО или 50-100 циклов при коммутации номинальных токов отключения (токов короткого замыкания). Срок службы вакуумных выключателей составляет 25 лет. На протяжении всего срока службы не требуется капитальный ремонт вакуумного выключателя, достаточно текущего обслуживания привода выключателя через 5-7 лет эксплуатации. Малые ход и скорость контактов вакуумной дугогасительной камеры позволяют применить небольшие пружинные или электромагнитные приводы. Вакуумные выключатели работают без выброса пламени и газов (экологически чистые). Малые габариты выключателя и его привода позволяют создать малогабаритные (многоэтажные) КРУ. В настоящее время разработаны выключатели с числом коммутаций до $1,5 \times 10^6$.

Идея использовать вакуум в качестве дугогасительной среды возникла примерно в конце 19 века, но первые вакуумные аппараты были созданы лишь в 1923 году. Быстрое создание вакуумных выключателей затянулось из-за возникших трудностей технологического характера, связанных с получением особо чистых металлов, работающих в высоком вакууме при воздействии высоких температур электрической дуги.

При выборе выключателя в настоящее время преимущество отдают именно вакуумным выключателям по причине их значительного преимущества по сравнению с другими типами выключателей по большинству технических параметров.

К недостаткам вакуумных выключателей следует отнести явление среза тока, которое приводит к перенапряжениям опасным для изоляции оборудования.

Ток среза в вакуумных выключателях представляет большую опасность, чем в маломасляных выключателях, потому что при возникновении повторных пробоев возможна эскалация напряжения с большей степенью вероятности, чем с применением маломасляных выключателей. В связи с этим вакуумные выключатели должны комплектоваться средствами ограничения коммутационных перенапряжений, например, ОПН или конденсаторно-резистивными цепочками.

Общий вид типичного вакуумного выключателя показан на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Внешний вид выключателя ВВТЭ-М

Технические характеристики типичного вакуумного выключателя типа ВВТЭ приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Технические характеристики высоковольтного вакуумного выключателя типа
ВВТЭ-М-10-20

Наименование параметра	Норма
1. Климатическое исполнение и категория размещения	У3 ТЗ
2. Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ:	10
3. Наибольшее рабочее напряжение $U_{н.р.}$, кВ	12
4. Номинальный ток отключения $I_{о.ном.}$, кА	20
5. Номинальный ток $I_{ном}$, А	
При частоте 50 Гц, для исполнения УЗ	630,1000,1600
При частоте 60 Гц, для исполнения ТЗ	630,1000,1250
6. Ток термической стойкости, I_T , в течение 3 с, кА	20
8. Ток электродинамической стойкости I_d , кА	51
9. Ток включения, $I_{вкл}$, кА,	20
10. Полное время отключения $t_{откл}$, с, не более	0,04
11. Собственное время отключения $t_{откл}$, с, не более	0,02
12. Собственное время включения $t_{вкл}$, с, не более	0,1
13. Циклы операций по ГОСТ 687-78	
Цикл I:	0-0,3 с-ВО-180 с -ВО
Цикл Ia:	0-0,3 с-ВО-20 с -ВО
14. Номинальное напряжение электромагнитов управления и вспомогат. цепей для постоянного (выпрямленного) тока, В	220
16. Габаритные размеры выключателя:	
длина, мм	560
ширина, мм	270
высота, мм	662
17. Масса выключателя, кг, не более (зависит от комплектации)	91/75
18. Ход подвижного контакта, мм	8+1
24. Допустимый износ контактов, мм, не более	3
25. Полный ход изоляционных тяг, мм	14-1,5
26. Электрическое сопротивление полюсов главной цепи, мкОм, не более:	
с розеточными контактами на номинальные токи	
630 А	80
1000 А	75
1600 А	48
1250 А	48
без розеточных контактов на номинальные токи	
630, А	50
1000, А	45
1600, А	28
1250, А	28

2.2. Принципиальная схема установки

В данной работе используется выключатель типа ВБТ производства фирмы "Таврида-Электрик". Особенностью выключателя является использование "магнитной защелки" для удержания выключателя во включенном положении. Принципиальная схема установки для определения собственного времени включения и отключения выключателя приведена на рис. 2.2.

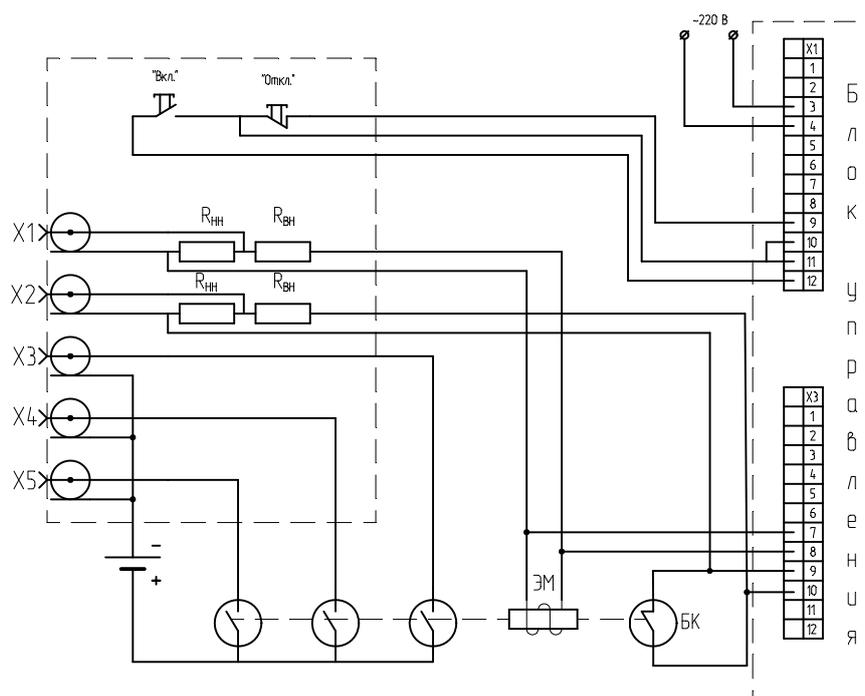


Рис. 2.2. Схема установки

Последовательно с каждым силовым контактом выключателя включен питающий элемент типа "Крона", при замкнутых силовых контактах напряжение батареи подключается к разъемам X3, X4, X5 типа СР-50. Сигнал с этих разъемов можно подать на осциллограф, например, Тектроникс. Включение и отключение выключателя осуществляется контактами кнопок "Вкл." и "Откл.". При нажатии на кнопку "Вкл." замыкаются ее контакты, и напряжение от блока управления выключателем подается на катушку электромагнита включения ЭМ. Напряжение на электромагните включения можно регистрировать на осциллографе посредством делителя напряжения ДН₁, состоящего из двух резисторов $R_{ВН}$ и $R_{НН}$. При нажатии кнопки "Откл." размыкаются ее контакты, и на катушку включения от блока управления выключателем подается напряжение, которое

размагничивает магнитопровод электромагнита отключения. Под действием пружины отключения силовые контакты выключателя размыкаются.

Определить собственное время включения (отключения) выключателя можно, измерив интервал времени от момента прихода сигнала на катушку электромагнита выключателя ЭМ до замыкания (размыкания) дугогасительных контактов выключателя.

2.3. Порядок работы

2.3.1. Ознакомиться с описанием установки и схемой эксперимента (рис. 2.2).

2.3.2. Включить осциллограф и настроить его на измерение в импульсном режиме на развертке длительностью 20 мс/деление.

2.3.3. Собрать установку по схеме (подключить осциллограф к датчикам).

2.3.4. Произвести включение выключателя.

2.3.5. Зарегистрировать форму импульсов.

2.3.6. Произвести отключение выключателя.

2.3.7. Зарегистрировать форму импульсов.

2.3.8. Повторить п. 2.3.4 – 2.3.7 12-13 раз.

2.3.9. Повторить пп. 2.3.4 – 2.3.8 для другого полюса выключателя.

2.3.10. Повторить пп. 2.3.4 – 2.3.8 для третьего полюса выключателя.

2.3.11. Обработать полученные данные и представить их в виде таблицы.

2.4. Содержание отчета

2.4.1. Отчет оформить в соответствии с установленными требованиями.

2.4.2. По полученным экспериментальным данным рассчитать собственное время включения и отключение выключателя.

2.4.3. Определить разновременность включения полюсов.

2.4.4. На основании анализа результатов сделать выводы по проделанной работе. Сравнить полученные данные с нормативными.

2.4.5. Ответить на контрольные вопросы.

2.5. Контрольные вопросы

2.5.1. Для чего необходимо определять собственное время включения и отключения выключателя?

2.5.2. При помощи какой аппаратуры измеряют время включения и отключения выключателя?

2.5.3. Почему необходимо настраивать работу выключателя на одновременное замыкание главных силовых контактов с разбросом не более 1 мс?

2.5.4. От чего зависит погрешность при определении разброса замыкания контактов разных полюсов?

2.5.5. Какой стандарт нормирует испытание электротехнической аппаратуры на одновременность замыкания главных контактов выключателя?

2.5.6. В чем отличие между полным временем включения выключателя и собственным временем включения?

2.5.7. В чем отличие между полным временем отключения выключателя и собственным временем отключения?

2.5.8. Чем отличается номинальный ток выключателя от номинального тока отключения?

2.5.9. Почему вакуумные камеры не требуют обслуживания в процессе эксплуатации?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Целью данной работы является исследование параметров схем выпрямления напряжения, используемых в высоковольтной технике.

3.1. Общие сведения

Во многих областях науки и техники требуются источники энергии постоянного тока. Потребителями энергии постоянного тока являются радиотехнические устройства, ускорители заряженных частиц, установки электронно-ионной технологии, установки для испытания высоковольтной изоляции различного электрооборудования и т.д. Постоянное напряжение для испытания электрооборудования получают преобразованием переменного тока высокого напряжения с помощью выпрямительных устройств, использующих вентильные свойства электровакуумных, газоразрядных и полупроводниковых приборов.

Основными элементами схем выпрямления являются: источник переменного тока высокого напряжения; выпрямительное устройство, преобразующее переменный ток в постоянный; сглаживающий фильтр, предназначенный для уменьшения величины пульсации переменного тока; нагрузка.

Выбор схемы для получения постоянного напряжения в каждом конкретном случае определяется требованиями, предъявляемыми к форме и величине напряжения на нагрузке, и имеющимся в наличии оборудованием (трансформаторы, конденсаторы, выпрямители).

Схемы выпрямления можно классифицировать по следующим признакам:

- по форме выпрямленного напряжения (одно – и двухполупериодные схемы);
- по числу фаз вторичной обмотки трансформатора (одно-, двух- и трехфазные схемы);
- по схеме соединения выпрямителей (мостовая схема, схемы с последовательным или параллельным соединением выпрямителей);
- по соотношению величины выходного напряжения к величине входного напряжения (схемы выпрямления, схемы выпрямления с умножением напряжения).

Выходные характеристики любого выпрямительного устройства определяются схемой их включения и характером нагрузки.

В настоящей работе рассматриваются следующие схемы выпрямления и схемы выпрямления с умножением напряжения: однополупериодная однофазная; двухполупериодная мостовая; трехфазная однополупериодная; трехфазная

двухполупериодная; однополупериодная с удвоением напряжения; двухполупериодная с удвоением напряжения; однокаскадная схема удвоения напряжения; однополупериодная с утроением напряжения.

Анализ и сравнение схем выпрямления целесообразно проводить по следующим параметрам:

- по средним значениям напряжения и тока нагрузки (U_{cp}, I_{cp});
- по действующим (эффективным) значениям напряжения и тока нагрузки ($U_{эф}, I_{эф}$);
- по коэффициенту формы тока

$$K_{cp} = \frac{I_{эф}}{I_{cp}};$$

- по коэффициенту постоянной составляющей тока – K_n ($K_n = I_{cp}/I_{max}$);
- по коэффициенту обратного напряжения – $K_{обр}$ ($K_{обр} = U_{обр}/U_{cp}$);
- по коэффициенту использования обмотки трансформатора по мощности – $K_{тр}$

$$K_{тр} = \frac{P_{cp}}{P_2} = \frac{U_{cp}^2}{nU_{эф2}^2},$$

где n – число фаз трансформатора; $U_{эф2}^2$ – эффективное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

3.2. Схемы выпрямления

3.2.1. Однополупериодная однофазная схема выпрямления

Однополупериодная схема выпрямления для получения постоянного тока в нагрузке представлена на рис. 3.1. На этом же рисунке представлена диаграмма изменения напряжения на сопротивлении нагрузки для схем рис. 3.1, а и рис. 3.1, б. соответственно.

В схеме рис. 3.1, а ток через нагрузку R_H протекает только в течение одного полупериода (когда открыт выпрямитель $V1$) и создает на нагрузке импульс напряжения. В течение второго полупериода выпрямитель закрыт, ток через нагрузку R_H не протекает, и на нагрузке R_H напряжение равно нулю (рис. 3.1, в). Среднее и действующее значения напряжения на нагрузке можно определить интегрированием кривой $U_H(t)$ в пределах периода.

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \cdot \sin \omega t \cdot dt \approx 0,318 U_m;$$

$$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m^2 \sin^2 \omega t \, dt} \approx 0,5 U_m,$$

где T – период переменного напряжения; U_m – амплитудное значение напряжения. Пульсация напряжения равна единице, а значение обратного напряжения на выпрямителе равно $U_{обр} = U_m$.

$$\delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} = 1.$$

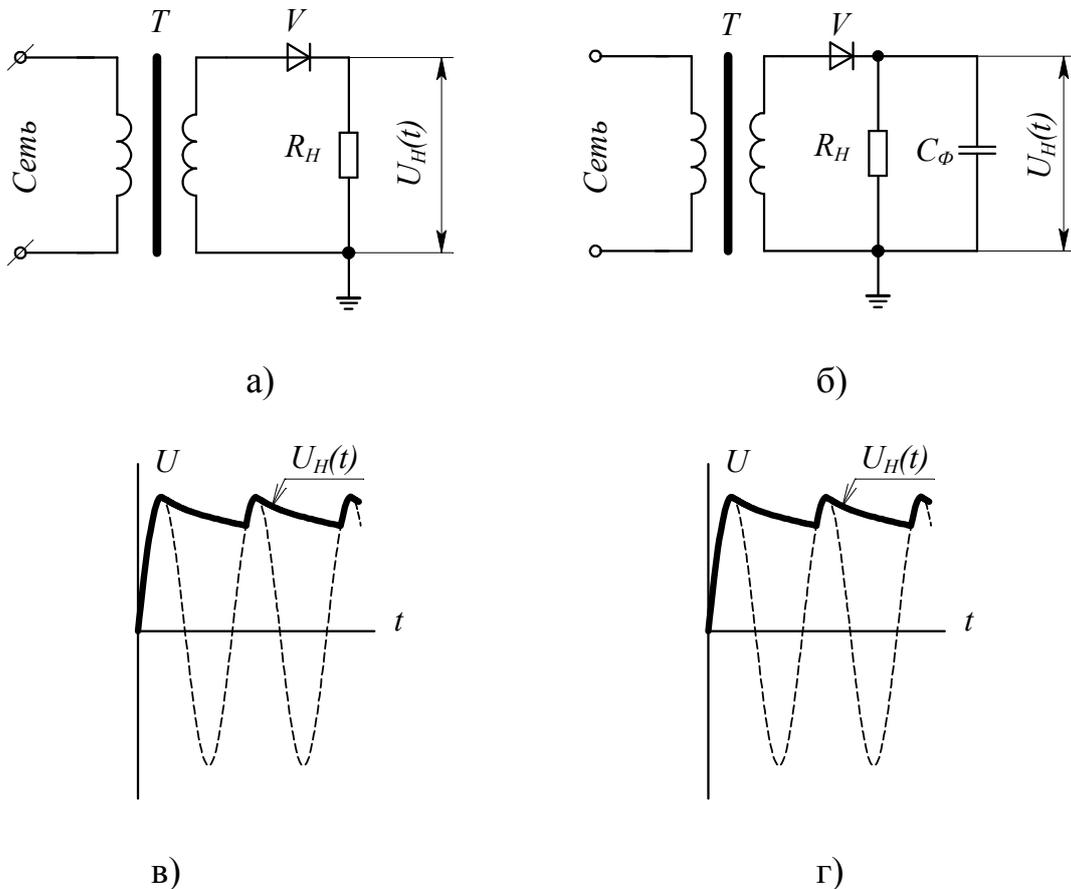


Рис. 3.1. Схемы однополупериодного выпрямления: а – без фильтра; б – с фильтром и, соответственно, диаграммы напряжения (в, г) на нагрузке.

С целью уменьшения пульсации и увеличения среднего и действующего напряжений в схему включается фильтр (рис. 3.1, б). В этом случае в течение второго полупериода, когда выпрямитель закрыт, емкость C_{ϕ} разряжается на $R_{н}$ и создает на нем напряжение

$$U(t) = U_m e^{-\frac{t}{R_{н} C_{\phi}}}.$$

Величина пульсации при наличии сглаживающего фильтра будет меньше, чем в схеме рис. 3.1., а, и зависит от величины R_n и C_ϕ . Обратное напряжение будет равно $U_{обр} \cong 2U_m$. Схемы однополупериодного выпрямления достаточно просты и могут выполняться на напряжение до 100 кВ, но при малом сопротивлении нагрузки для обеспечения малой величины пульсации для фильтра требуются конденсаторы большой емкости.

3.2.2 Двухполупериодная мостовая схема выпрямления (схема Герца)

В схеме двухполупериодного выпрямления четыре выпрямителя образуют мост, в одну диагональ которого включается сопротивление нагрузки R_n и, при необходимости, параллельно нагрузке – сглаживающий фильтр (C_ϕ), а к другой диагонали подключается трансформатор (рис. 3.2).

В течение положительного полупериода переменного напряжения трансформатора выпрямители $V1$ и $V3$ открыты, а выпрямители $V2$ и $V4$ закрыты. Через нагрузку R_n протекает ток и создает на ней напряжение, пропорциональное току. В течение отрицательного полупериода открыты выпрямители $V2$ и $V4$ и закрыты выпрямители $V1$ и $V3$. Через нагрузку R_n протекает ток того же знака, что и в первом случае. Таким образом, через нагрузку протекает ток одного знака в течение всего периода переменного напряжения трансформатора и создает на нагрузке напряжение, пропорциональное току (рис. 3.2, в).

Среднее и действующее значения напряжений на нагрузке будут в этом случае равны:

$$U_{cp} \approx 0,636U_m, \quad U_{эф} \approx 0,709U_m.$$

Однако без фильтра величина пульсаций напряжения будет такой же, как и в схеме однополупериодного выпрямления (рис. 3.1, а). При включении в схему фильтра (рис. 3.2, б) диаграмма напряжения на нагрузке будет иметь вид, показанный на рис. 3.2, г. Величина пульсаций напряжения в этом случае будет меньше, чем в схеме однополупериодного выпрямления (рис. 3.1, б) при одинаковых значениях R_n и C_ϕ . Обратное напряжение выпрямителей в схеме с фильтром (рис. 3.2, б) и без него (рис. 3.2, а) будет одинаковым и равным $U_{обр} \approx U_m$.

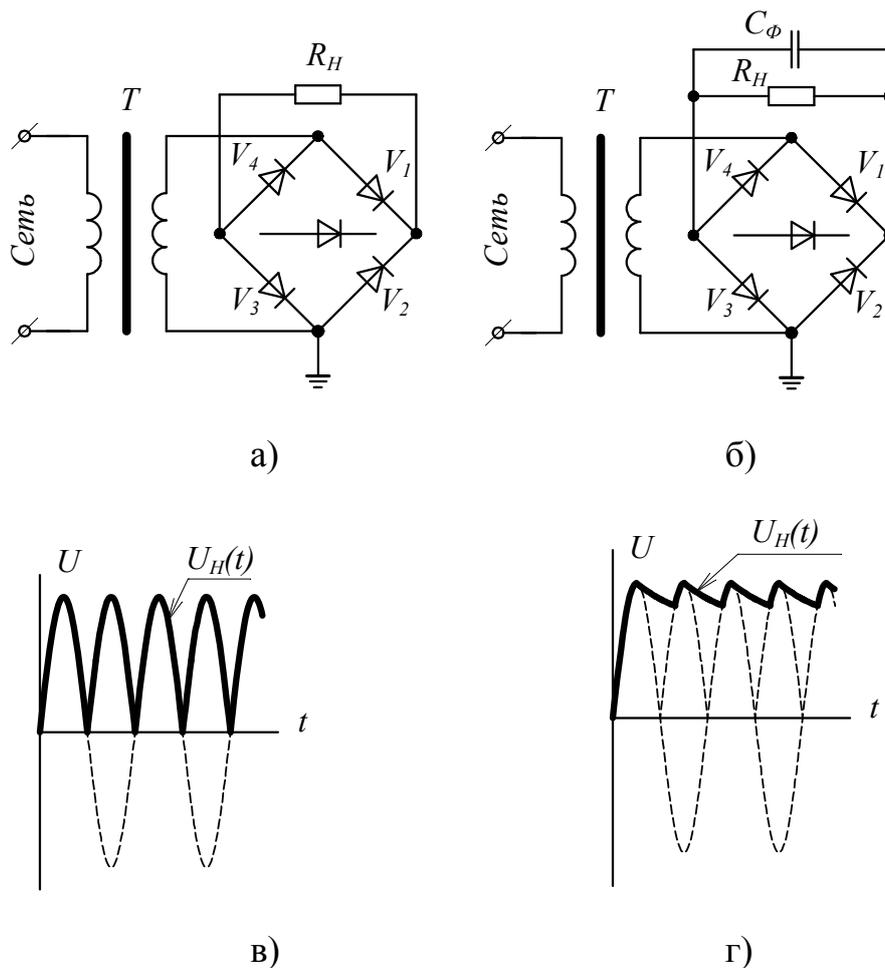


Рис. 3.2. Схемы двухполупериодного выпрямления: а – без фильтра; б – с фильтром, в, г – диаграммы напряжения на нагрузке для схемы без фильтра и с фильтром, соответственно

Преимуществами двухполупериодной схемы являются большой коэффициент использования мощности трансформатора, меньший коэффициент обратного напряжения выпрямителей, меньшая величина пульсаций напряжения при наличии фильтра. Недостатками таких схем являются: большее внутреннее сопротивление схемы, чем однополупериодной, и большее число выпрямителей.

3.2.3 Трехфазная однополупериодная схема выпрямления

В трехфазной однополупериодной схеме сопротивление нагрузки, а при необходимости и сглаживающий фильтр, включаются между нулевой точкой обмотки трансформатора, соединенной в звезду, и соединенными вместе анодами или катодами выпрямителей (рис. 3.3). Ток через выпрямители протекает, если потенциал анода выше, чем потенциал катода рассматриваемого выпрямителя. Диаграмма напряжения на трансформаторе показана на рис. 3.3, в, а диа-

грамма напряжения на нагрузке от каждой из фаз и суммарное напряжение показаны на рис. 3.3, г и рис. 3.3, д соответственно.

Среднее и действующие значения напряжений на нагрузке в схеме без фильтра соответственно равны:

$$U_{cp} \approx 0,826U_m, \quad U_{эф} \approx 0,841U_m,$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения трансформатора.

Пульсация напряжения в схеме без фильтра составляет 50 % от амплитудного значения. Использование фильтров в этих схемах позволяет получить практически постоянное напряжение без пульсаций.

Достоинствами этой схемы являются малое значение пульсаций напряжения на нагрузке и высокая частота пульсаций по сравнению с ранее рассмотренными схемами.

К недостаткам следует отнести низкий коэффициент использования выпрямителей по току и низкий коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора по мощности. Обратное напряжение выпрямителей не превышает линейного значения напряжения трансформатора.

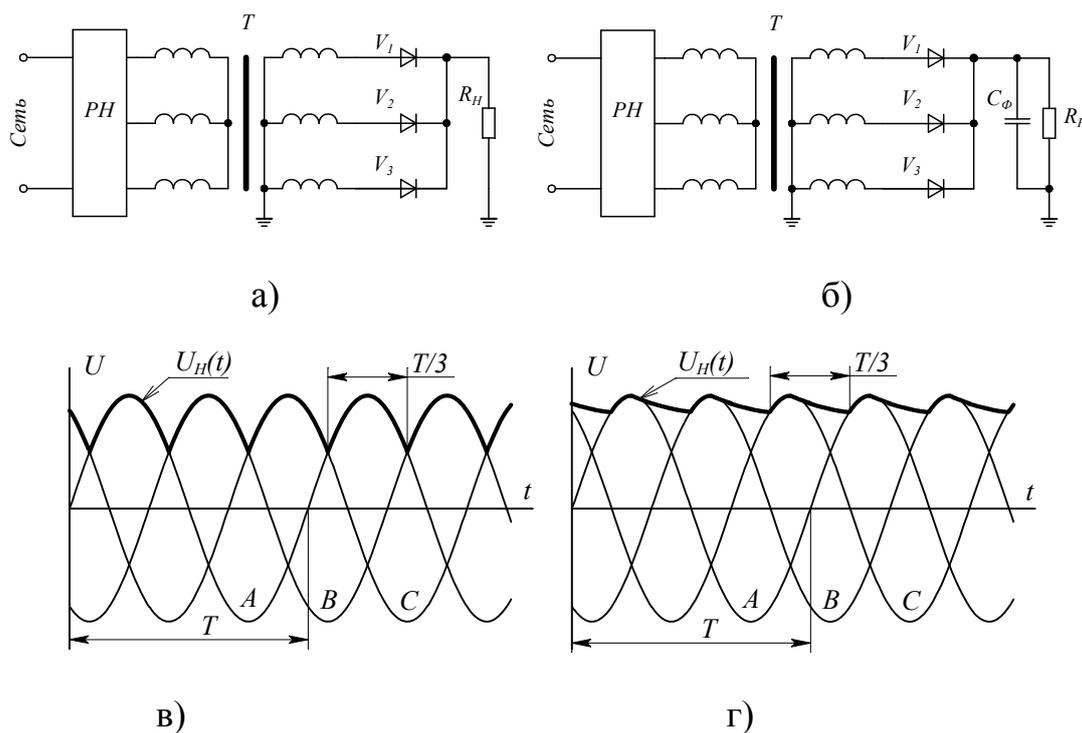
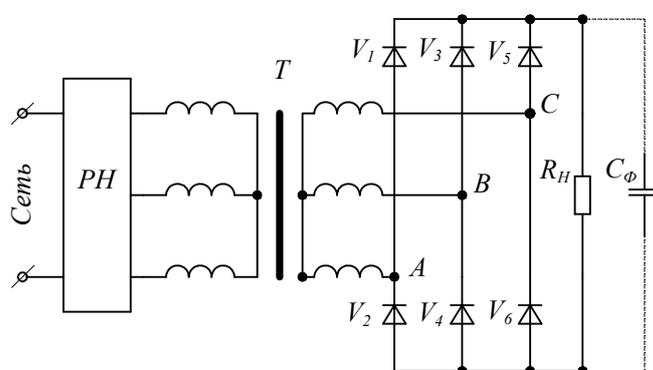


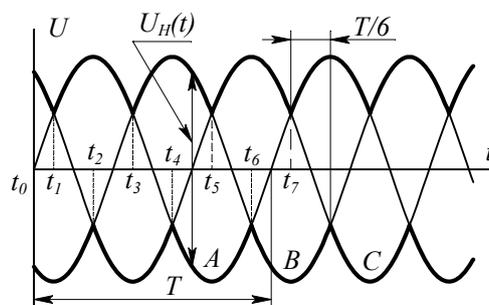
Рис. 3.3. Трехфазная однополупериодная схема выпрямления: а – схема без фильтра; б – с фильтром; в, г – диаграммы напряжения на нагрузке для схемы без фильтра и с фильтром, соответственно

3.2.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова)

С целью снижения пульсаций тока в нагрузке и увеличения его по абсолютной величине можно применять трехфазную мостовую схему (рис. 3.4), пунктиром показано подключение емкости фильтра. Схема допускает соединение вторичной обмотки трансформатора в звезду или треугольник. Ток через нагрузку в течение времени $T/6$ протекает через два выпрямителя. Например, в момент времени t_0 (рис. 3.4, б) ток протекает через открытые выпрямители V_5 и V_4 , а в момент t_1 – через открытые выпрямители V_1 и V_4 и т. д. Выпрямители открываются тогда, когда потенциал анодов в схеме будет более положителен, чем потенциал катодов.



а)



б)

Рис. 3.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления: а – электрическая схема; б – диаграмма напряжения трансформатора, напряжения на нагрузке

Как видно из диаграммы, напряжение на нагрузке в схеме без фильтра пульсирует от $1,5U_m$ до $\sqrt{3}U_m$. Среднее и действующее значения напряжения на нагрузке для этой схемы равны соответственно

$$U_{cp} \approx 1,652U_m, \quad U_{эф} \approx 1,678U_m,$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения трансформатора.

Достоинством схемы является очень малая глубина пульсаций и высокая частота их. Даже при отсутствии сглаживающего фильтра величина пульсаций не превышает 13 % от амплитудного значения напряжения.

Недостатками схемы являются относительно невысокий коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора по мощности и малый коэффициент использования вентиля по току.

3.3. Порядок работы

3.3.1. Собрать схему однополупериодного однофазного выпрямления.

3.3.2. Определить длительность одного полупериода колебаний напряжения при помощи осциллографа.

3.3.3. Определить число пульсаций выпрямленного напряжения за период переменного напряжения.

3.3.4. Собрать однополупериодную схему выпрямления с фильтром.

3.3.5. Определить напряжение на нагрузке при $R=\infty$ (сопротивление отключено от основной схемы).

3.3.6. Подключить нагрузку R и снять напряжение на нагрузке при разных значениях R .

3.3.7. При фиксированном значении сопротивления R подключить фильтрующий конденсатор. Измерить величину пульсаций напряжения $\delta U = f(C)$ при постоянном значении сопротивления нагрузки $R=1-50$ кОм (провести 5-6 измерений). Величину емкости C изменять в пределах от 1 до 10 мкФ. Результаты измерений занести в таблицу.

3.3.8. Собрать двухполупериодную мостовую схему и выполнить требования п. 3.3.2–3.3.7.

3.3.9. Собрать трехфазную однополупериодную схему и выполнить требования п. 3.3.2–3.3.7.

3.3.10. Собрать трехфазную двухполупериодную схему и выполнить требования п. 3.3.2–3.3.7.

3.4. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены схемы выпрямления и соответствующие диаграммы напряжения, полученные экспериментально, значения напряжения трансформатора и на нагрузке, таблицы с результатами измерений.

Построить зависимость $\delta U = f(C_\phi)$ для каждой схемы по пункту 3.3.7.

При построении характеристик напряжение выразить в относительных единицах.

$$U^* = \frac{U_H}{U_6},$$

где $U_6 = U_{max}$.

Сделать выводы по работе, ответить на контрольные вопросы.

3.5. Контрольные вопросы

- 3.5.1. Что такое обратное напряжение и прямой ток выпрямителя?
- 3.5.2. От чего зависит величина и частота пульсаций напряжения на нагрузке?
- 3.5.3. Пути снижения пульсаций напряжения на нагрузке.
- 3.5.4. В чем заключаются трудности использования простейших схем выпрямления для получения высоких напряжений более 100 кВ?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМ УМНОЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Целью данной работы является исследование схем умножения напряжения, используемых в высоковольтной технике.

4.1. Общие сведения

В нескольких областях науки и техники находят применение источники энергии высокого напряжения постоянного тока. Например, в электрофизике разрабатываются установки электронно-ионной технологии на основе высоковольтных источников постоянного тока. В области атомной физики для ряда экспериментов необходимы ускорители заряженных частиц, в основе которых лежат источники высокого напряжения. В энергетике при испытаниях изоляции высоковольтного оборудования необходимы источники высокого напряжения постоянного тока.

Источники постоянного тока высокого напряжения в настоящее время создаются на базе схем выпрямления с умножением напряжения. В состав этих источников входят: источник переменного тока высокого напряжения; выпрямительное устройство, преобразующее переменный ток в постоянный, с увеличением его в несколько раз по сравнению с напряжением, источника переменного тока высокого напряжения; сглаживающий фильтр, предназначенный для уменьшения величины пульсации переменного тока; нагрузка.

Выбор схемы умножения для получения высокого постоянного напряжения в каждом конкретном случае определяется требованиями, предъявляемыми к форме и величине напряжения на нагрузке.

Схемы умножения можно классифицировать по следующим признакам:

- по форме выпрямленного напряжения (однополупериодные однофазные, двухполупериодные однофазные);
- по количеству каскадов умножения (однокаскадные и многокаскадные).

Выходные характеристики любого выпрямительного устройства с умножением определяются схемой их включения и характером нагрузки.

В настоящей работе рассматриваются следующие схемы выпрямления с умножением напряжения: однополупериодная с удвоением напряжения; двухполупериодная с удвоением напряжения; однокаскадная схема удвоения напряжения; однополупериодная с утроением напряжения.

Анализ и сравнение схем выпрямления целесообразно проводить по следующим параметрам:

- по средним значениям напряжения и тока нагрузки ($U_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$);

- по действующим (эффективным) значениям напряжения и тока нагрузки ($U_{\text{эф}}, I_{\text{эф}}$);
- по коэффициенту формы тока

$$K_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{эф}}}{I_{\text{ср}}};$$

- по коэффициенту постоянной составляющей тока – $K_{\text{п}}$ ($K_{\text{п}} = I_{\text{ср}}/I_{\text{max}}$);
- по коэффициенту обратного напряжения – $K_{\text{обр}}$ ($K_{\text{обр}} = U_{\text{обр}}/U_{\text{ср}}$);
- по коэффициенту использования обмотки трансформатора по мощности – $K_{\text{тр}}$

$$K_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_2} = \frac{U_{\text{ср}}^2}{nU_{\text{эф}2}^2},$$

где n – число фаз трансформатора; $U_{\text{эф}2}^2$ – эффективное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

4.2. Схемы выпрямления с умножением напряжения

Рассмотренные схемы выпрямления целесообразно использовать при получении постоянного напряжения выше 100 кВ. На более высокие напряжения такие схемы получаются громоздкими, менее надежными и достаточно дорогими по следующим причинам.

Выпрямители не выпускаются на большие напряжения. Использование же последовательного включения нескольких выпрямителей требует применения делителей для выравнивания потенциалов по элементам выпрямительного устройства, что усложняет схему, увеличивает габариты и уменьшает надежность ее работы.

Получение постоянного напряжения с малыми пульсациями требует использования емкостного сглаживающего фильтра. Величина пульсаций тем меньше, чем больше емкость конденсаторов, используемых для фильтров. Изготовление конденсаторов большой емкости на высокое напряжение – дело сложное, поэтому необходимо использовать последовательно-параллельное включение конденсаторов сглаживающего фильтра. Это увеличивает габариты, стоимость схемы и снижает надежность работы.

Значительно проще и дешевле получать высокое напряжение с использованием схем выпрямления с умножением напряжения на нагрузке относительно величины напряжения, получаемого от трансформатора. Принцип создания таких схем основан на преобразовании напряжения, получаемого от трансформатора, в выпрямленное напряжение с последующим его умножением до значе-

ний, превышающих напряжение трансформатора. При этом используются элементы с электрическими параметрами на рабочее напряжение, не превышающее амплитудное значение напряжения трансформатора, работающие при жестко заданных потенциалах в схеме. Различают несколько схем такого типа: схемы выпрямления с удвоением напряжения, схемы выпрямления с утроением напряжения, схемы выпрямления с каскадным умножением напряжения. Основными элементами этих схем являются источник высокого переменного тока (высоковольтный трансформатор), выпрямители и конденсаторы.

4.2.1. Однополупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения

На рис. 4.1, а представлен вариант однополупериодной схемы выпрямления с удвоением напряжения. В данной схеме, если выпрямитель выдерживает броски тока при включении, ограниченные индуктивностью трансформатора, то можно не использовать токоограничивающие сопротивления в цепи выпрямителя. Напряжение на нагрузке получается пульсирующим от 0, когда выпрямитель V открыт, до $2U_{max}$, когда выпрямитель V закрыт.

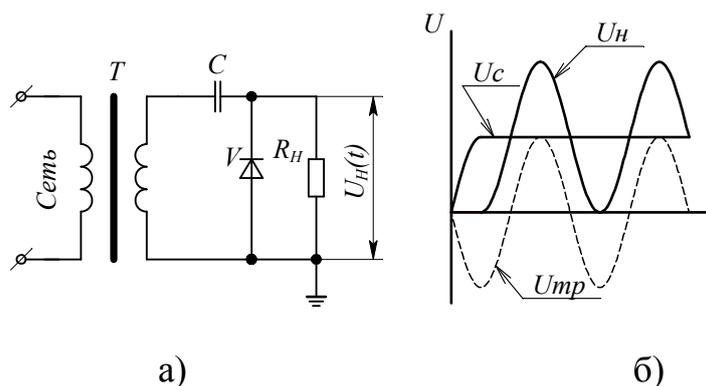


Рис. 4.1. Однополупериодная схема с удвоением напряжения: а – электрическая схема, б – диаграмма напряжения трансформатора U_{mp} и на нагрузке U_H

Диаграмма изменения напряжения трансформатора и на нагрузке приведена на рис. 4.1, б. Обратное напряжение на выпрямителе в закрытый период достигает величины $2U_m$, а напряжение на конденсаторе не превышает U_m .

Недостатками такой схемы являются большая пульсация напряжения на нагрузке и большое внутреннее сопротивление схемы, поэтому нагрузочная характеристика имеет крутопадающий вид.

4.2.2. Двухполупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения

В двухполупериодной схеме (рис. 4.2) в положительный полупериод переменного тока через выпрямитель V_1 заряжается конденсатор C_1 . Одновременно ток протекает по нагрузке R_H и частично разряжается конденсатор C_2 .

В отрицательный полупериод через выпрямитель V_2 подзаряжается конденсатор C_2 . В то же время ток протекает по нагрузке, и частично разряжается конденсатор C_1 . Схема может работать в симметричном режиме (рис. 4.2, а) и несимметричном режиме относительно земли (рис. 4.2, б). В первом случае может использоваться трансформатор с одним высоковольтным выводом, а во втором случае – с двумя.

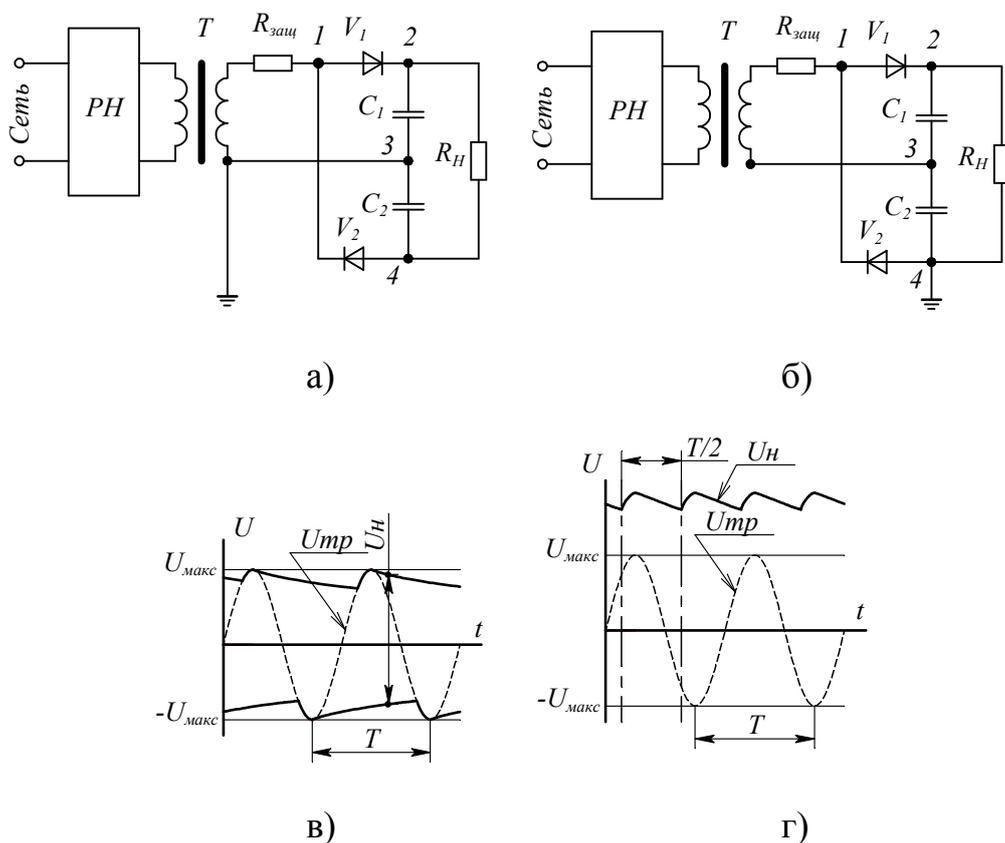


Рис. 4.2. Двухполупериодная схема с удвоением напряжения: а – симметричная схема, б – несимметричная схема, в и г – соответствующие диаграммы напряжения трансформатора $U_{Тр}$ и на нагрузке U_H

Диаграммы напряжения на трансформаторе $U_{Тр}$ и на нагрузке U_H для симметричного и несимметричного режимов даны на рис. 4.2, в и 4.2, г соответственно. Конденсаторы C_1 и C_2 выполняют роль сглаживающего фильтра в схеме и выбираются каждый на напряжение U_m , а вентили должны выбираться в данной схеме на $U_{обр} = 2U_m$. Такая схема позволяет получать удвоенное напряжение на нагрузке относительно входного напряжения при относительно малой величине пульсаций. Основное достоинство этой схемы заключается в том, что она может работать в двух режимах: симметричном и несимметричном.

4.2.3 Однокаскадная схема удвоения напряжения

Данная схема является составным элементом каскадного умножения напряжения при получении сверхвысоких постоянных напряжений (рис. 4.3). Конденсатор C_2 выполняет роль сглаживающего фильтра и заряжается пульсирующим напряжением, изменяющимся от 0 до $2U_m$ через выпрямитель V_2 . Это напряжение достигает своего максимального значения, когда выпрямитель V_1 закрыт, и складывается из напряжения трансформатора и напряжения на конденсаторе C_1 . Пульсация напряжения на нагрузке зависит от величины емкости конденсатора C_2 и величины сопротивления нагрузки R_H . Выпрямители в схеме работают поочередно в положительные и отрицательные полупериоды переменного напряжения трансформатора. Выпрямители должны быть рассчитаны на обратное напряжение, равное $2U_m$. Конденсатор C_1 должен иметь рабочее напряжение, равное U_m , а конденсатор C_2 – равное $2U_m$. Достоинством такой схемы является малая величина пульсаций напряжения на нагрузке. Кроме того, используя пульсирующие напряжения на выпрямителях V_1 и V_2 , которые меняются от 0 до $2U_m$ и сдвинуты относительно друг друга на 180° , данную схему можно использовать для получения каскадного умножения напряжения.

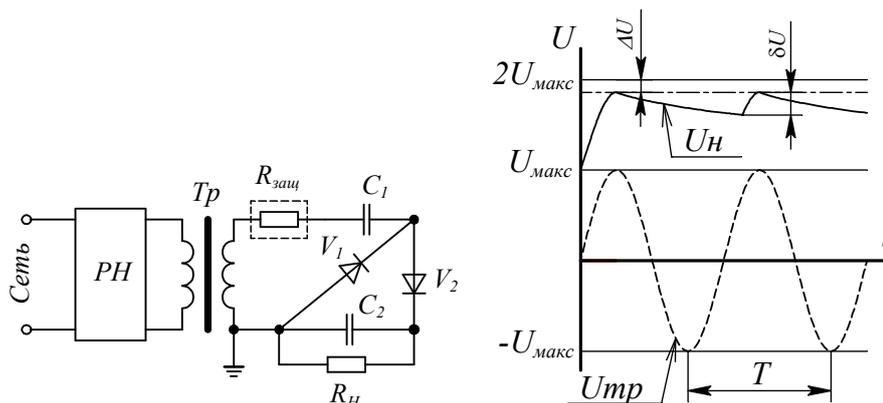


Рис. 4.3. Однокаскадная схема умножения напряжения: а – электрическая схема, б – диаграмма напряжения трансформатора U_{Tr} и на нагрузке U_H

4.2.4. Однополупериодная схема выпрямления с утроением напряжения

Схема, представленная на рис. 4.4, позволяет получить утроенное значение напряжения на нагрузке относительно входного напряжения U_{max} .

При воздействии переменного напряжения трансформатора в один из полупериодов выпрямители V_1 и V_2 открыты, и конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются до U_m каждый. В другой полупериод, когда выпрямители закрыты, напряжение на нагрузке является суммой напряжения трансформатора и напряжения на двух последовательно соединенных конденсаторах.

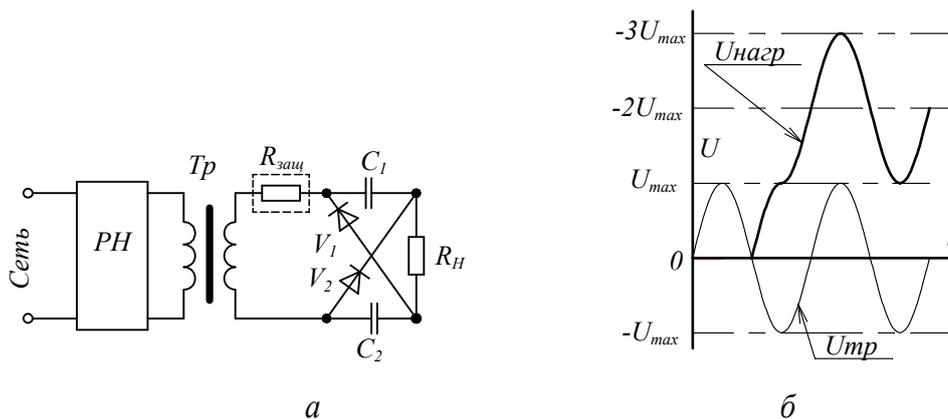


Рис. 4.4. Схема устроения напряжения: а – электрическая схема. б – диаграмма напряжения трансформатора (1) и на нагрузке (2)

Как видим из диаграммы (рис. 4.4, б), напряжение на нагрузке пульсирует от U_m до $3U_m$. В этой схеме выпрямители должны выдерживать напряжение, равное $2U_m$, а конденсаторы должны иметь рабочее напряжение U_m . Недостатком данной схемы является большое внутреннее сопротивление.

4.3. Порядок работы

4.3.1. Собрать однополупериодную схему с удвоением напряжения и измерить напряжение на нагрузке при $R=\infty$. Подключить нагрузку R и снять характеристику $U_H=f(R_H)$. Результаты занести в таблицу.

4.3.15. Собрать двухполупериодную схему с удвоением напряжения и выполнить требования п. 4.3.1.

4.3.16. Собрать однокаскадную схему с удвоением напряжения и выполнить требования п. 4.1.

4.3.17. Собрать однополупериодную схему с утроением напряжения и выполнить требования п. 4.3.1.

4.4. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены схемы выпрямления с умножением напряжения и соответствующие диаграммы напряжения, полученные экспериментально, значения напряжения трансформатора и на нагрузке, таблицы с результатами измерений.

4.4.1. Построить зависимость $\delta U = f(C_\phi)$ для схемы по пункту 4.2.2 и 4.2.3. При построении характеристик напряжение выразить в относительных единицах.

$$U^* = \frac{U_H}{U_\phi},$$

где $U_6 = U_{max}$.

4.4.2. Определить коэффициенты умножения напряжений на нагрузке относительно напряжения трансформатора для всех схем умножения.

Сделать выводы по работе, ответить на контрольные вопросы

4.5. Контрольные вопросы

4.5.1. Что такое обратное напряжение и прямой ток выпрямителя?

4.5.2. От чего зависит величина и частота пульсаций напряжения на нагрузке?

4.5.3. Пути снижения пульсаций напряжения на нагрузке.

4.5.4. В чем заключаются трудности использования простейших схем умножения для получения высоких напряжений более 100 кВ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения /Под ред. А.А. Воробьева. -М.-Л.: ГЭИ, 1960.- 584 с.

2. Здрок А.Г., Самотин А.А. Выпрямительные устройства электропитания и управления, - Л.: Энергия, 1975.-364 с.

3. Техника высоких напряжений /Под ред. М.В. Костенко.- М.: Высшая школа, 1973.-528 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица III. Разрядные напряжения шаровых промежутков (при импульсах 50 % разрядные напряжения), kV_{max} при 20°C и 760 мм рт. ст. для переменного напряжения, постоянного напряжения обеих полярностей и для стандартной импульсной волны отрицательной полярности. Один шар заземлен

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см										
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150
0,05	2,8										
0,10	4,7										
0,15	6,4										
0,20	8,0	8,0									
0,25	9,6	9,6									
0,30	11,2	11,2									
0,40	14,4	14,3	14,2								
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8					
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9					
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0					
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0					
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9					
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7				
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	(40,0)	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		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5				
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5		
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0		
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,0	75,5	75,5	75,5		
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0		
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0	
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0	
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112	
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125	
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241	241

Продолжение табл. III

Рас- стоя- ние между шара- ми, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
10		(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
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)	845	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									(2250)

Примечания: 1. Данные таблицы неприменимы к импульсным напряжениям с амплитудой меньше 10 кВ.

2. Данные для $\frac{s}{D} > 0,5$ имеют пониженную точность и поэтому заключены в скобки.

Таблица П2. Разрядные напряжения шаровых промежутков (при импульсах 50 % разрядные напряжения), kV_{max} при 20 °С и 760 мм рт. ст. для стандартной импульсной волны положительной полярности. Один шар заземлен

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см										
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150
0,05											
0,10											
0,15											
0,20											
0,25											
0,30	11,2	11,2									
0,40	14,4	14,3	14,2								
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8					
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9					
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0					
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0					
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9					
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7				
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4				
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9				
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5				
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1				
1,8		54,5	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0				
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5		
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0		
2,6		(73,0)	73,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5		
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0		
3,0		(81,0)	82,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0	
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0	99,0	99,0	
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112	
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125	
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266

Окончание табл. П2

Рас- стоя- ние между шара- ми, см	Диаметр шаров, см								
	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
11			(238)	273	287	290	292	292	292
12			(249)	291	311	315	318	318	318
13				(308)	334	339	342	342	342
14				(323)	357	363	366	366	366
15				(337)	380	387	390	390	390
16				(350)	402	411	414	414	414
17				(362)	422	435	438	438	438
18				(374)	442	458	462	462	462
19				(385)	461	482	486	486	486
20				(395)	480	505	510	510	510
22					510	545	555	560	560
24					540	585	600	610	610
26					570	620	645	655	660
28					(595)	660	685	700	705
30					(620)	695	725	745	750
32					(640)	725	760	790	795
34					(660)	755	795	835	840
36					(680)	785	830	880	885
38					(700)	(810)	865	925	935
40					(715)	(835)	900	965	980
45						(890)	980	1060	1090
50						(940)	1040	1150	1190
55						(985)	(1100)	1240	1290
60						(1020)	(1150)	1310	1380
65							(1200)	1380	1470
70							(1240)	1430	1550
75							(1280)	1480	1620
80								(1530)	1690
85								(1580)	1760
90								(1630)	1820
100								(1720)	1930
110								(1790)	(2030)
120								(1860)	(2120)
130									(2200)
140									(2280)
150									(2350)

Учебное издание

Валерий Александрович Лавринович

**Высоковольтные
испытательные установки и измерения
Лабораторные работы**

Учебное пособие

Научный редактор

Доктор технических наук, профессор В. Я. Ушаков

Редактор

Н. Т. Синельникова

Компьютерная верстка

В. А. Лавринович

Дизайн обложки

В. А. Лавринович

Подписано к печати 05.11.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  тпу. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru