

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

В.А. Лавринович

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ

*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 / В.А. Лавринович; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 98 с.

В 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.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», также 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 НИ ТПУ, 2010
© Лавринович В.А., 2010
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2010

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Содержание

1. Калибровка электростатического вольтметра с помощью шарового измерительного разрядника.....	6
1.1. Методы и устройства для измерения высоких напряжений.....	6
1.2. Измерение шаровым разрядником	6
1.3. Измерение электростатическим киловольтметром.....	10
1.4. Измерение напряжения с использованием делителей	12
1.4.1. Омический делитель для измерения постоянных напряжений.....	13
1.4.2. Омический делитель для измерения переменного и импульсного напряжения	14
1.4.3. Емкостный делитель	16
1.4.4. Емкостно-омические делители	16
1.5. Описание экспериментальной установки	17
1.6. Порядок выполнения работы	17
1.6.1. Калибровка киловольтметра на переменном напряжении.....	17
1.6.2. Калибровка киловольтметра на постоянном напряжении.....	18
1.7. Контрольные вопросы.....	19
2. Определение времени включения и отключения высоковольтного выключателя	21
2.1. Краткие сведения.....	21
2.1.1. Выключатели баковые масляные.....	22
2.1.2. Выключатели маломасляные	22
2.1.3. Выключатели воздушные	23
2.1.4. Выключатели электромагнитные.....	24
2.1.5. Выключатели элегазовые.....	25
2.1.6. Выключатели вакуумные.....	26
2.1.7 Приборы для определения времени включения и отключения выключателя.....	29
2.2. Принципиальная схема установки.....	33
2.3. Порядок работы	33

2.4. Содержание отчета	34
2.5. Контрольные вопросы.....	34
3. Исследование работы схем выпрямления напряжения	35
3.1. Общие сведения	35
3.2. Схемы выпрямления.....	36
3.2.1. Однополупериодная однофазная схема выпрямления	36
3.2.2. Двухполупериодная мостовая схема выпрямления (схема Герца).....	38
3.2.3. Трехфазная однополупериодная схема выпрямления	39
3.2.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова)	40
3.3. Порядок работы	42
3.4. Содержание отчета	42
3.5. Контрольные вопросы.....	43
4. Исследование работы схем умножения напряжения	44
4.1. Общие сведения	44
4.2. Схемы выпрямления с умножением напряжения	45
4.2.1. Однополупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения	46
4.2.2. Двухполупериодная схема выпрямления с удвоением напряжения	46
4.2.3. Однокаскадная схема удвоения напряжения.....	48
4.2.4. Однополупериодная схема выпрямления с утроением напряжения.....	48
4.3. Порядок работы	49
4.4. Содержание отчета	49
4.5. Контрольные вопросы.....	50
Список Литературы	50
5. Генератор импульсных напряжений по схеме Аркадьева–Маркса	51
5.1. Краткие сведения.....	51
5.2. Принцип работы ГИН	51
5.5. Порядок выполнения работы	62
5.6. Содержание отчета	63
5.7. Контрольные вопросы.....	63
6. Многоступенчатый каскадный генератор постоянного напряжения	64
6.1. Краткие сведения.....	64
6.2. Порядок выполнения работы	71

6.3. Содержание отчета	71
6.4. Контрольные вопросы.....	72
7. Калибровка сильноточного шунта для измерения импульсных токов.....	73
7.1. Основные положения	73
7.2. Порядок выполнения работы	83
7.3. Содержание отчета	83
7.4. Контрольные вопросы.....	83
Приложение 1. Таблицы разрядных напряжений шаровых промежутков	84
Приложение 2. Принцип работы однокаскадной схемы удвоения напряжения	89

1. КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ШАРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО 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. Нормальными атмосферными условиями принято считать: 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, 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).

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.

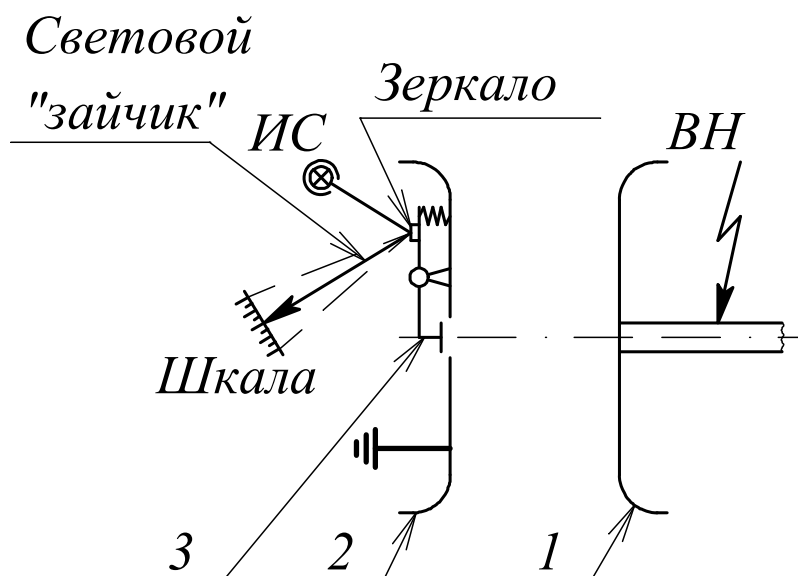


Рис. 1.2. Схема устройства электростатического киловольтметра: 1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленный электрод-экран; 3 – подвижный электрод; ИС – источник света

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 оказывало 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 предназначаются для измерения какого-либо одного вида напряжения: постоянного, переменного или импульсного. По виду основных элементов, составляющих делитель напряжения, различают омические (или резистивные), емкостные (или конденсаторные), емкостно-омические (смешанные) делители напряжения.

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

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

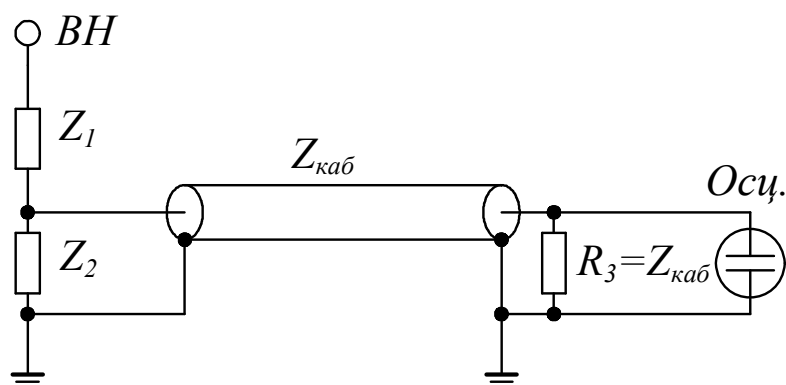


Рис. 1.3. Схема измерения высокого напряжения посредством делителя напряжения: Z_1 – сопротивление высоковольтного плеча делителя; Z_2 – сопротивление низковольтного плеча делителя; $Z_{каб}$ – волновое сопротивление кабеля, подводящего напряжение от низковольтного плеча делителя к осциллографу; R_3 – 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.

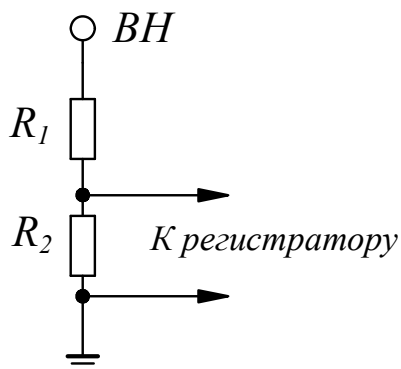


Рис. 1.4. Схема замещения омического делителя: $ВН$ – высокое напряжение; R_1 – сопротивление высоковольтного плеча делителя; R_2 – сопротивление низковольтного плеча делителя

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. Снижения 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, оттекающих 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.

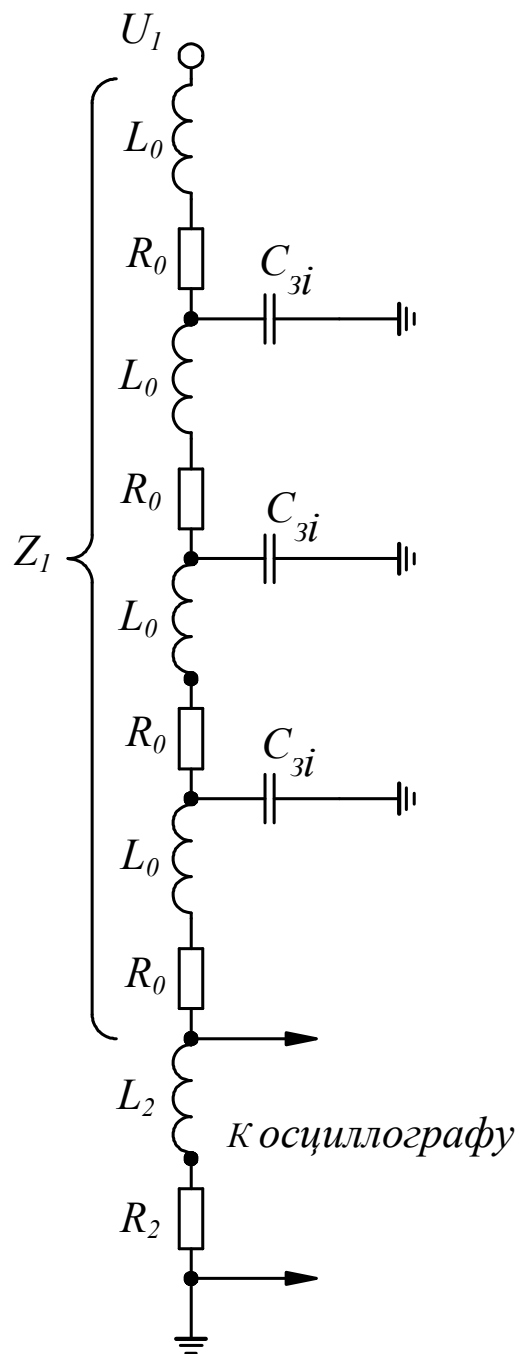


Рис. 1.5. Схема замещения омического делителя при измерении переменных и импульсных напряжений: Z_1 – эквивалентное сопротивление высоковольтного плеча; R_0 – активное сопротивление резисторов, из которых собран делитель; L_0 – индуктивность отдельных резисторов и их соединительных проводников; R_2 – 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.

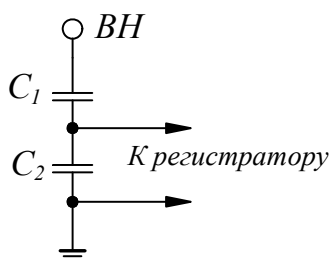


Рис. 1.6. Схема замещения емкостного делителя напряжения

1.4.4. Емкостно-омические делители

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

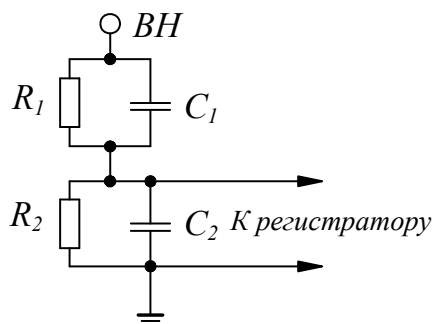


Рис. 1.7. Схема замещения смешанного (емкостно-омического) делителя напряжения

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.

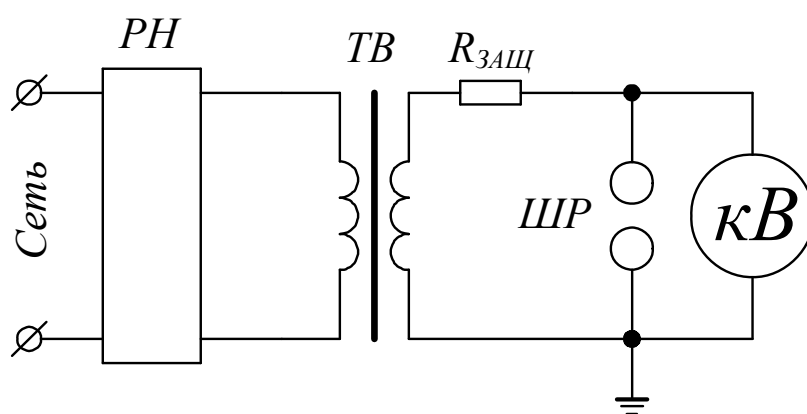


Рис. 1.8. Схема калибровки киловольтметра типа С-100 на переменном напряжении: РН – регулятор напряжения; ТВ – трансформатор высоковольтный; $R_{ЗАЩ}$ – защитный резистор; ШР – шаровой разрядник; кВ – киловольтметр

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.

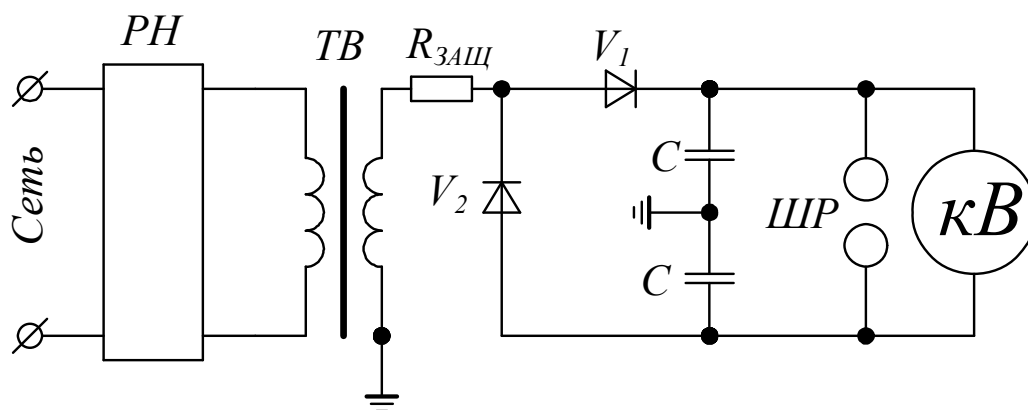


Рис. 1.9. Схема калибровки киловольтметра типа С-100 на постоянном напряжении: РН – регулятор напряжения; ТВ – трансформатор высоковольтный; $R_{зашц}$ – защитный резистор; V_1 , V_2 – вентили; С – конденсатор; ШР – шаровой разрядник; кВ – киловольтметр

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 измерением делителем напряжения?

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

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

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ И ОТКЛЮЧЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Цель работы

Цель работы: измерение 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. Поэтому к выключателю предъявляются высокие требования по надежности. Отказ выключателя в работе ведет к расширению аварии и большим материальным потерям.

Время задержки отключения выключателя должно быть наименьшим. Это позволяет уменьшить последствия аварийного режима и сократить материальные потери, связанные с отключением потребителей. Сокращение времени отключения увеличивает запас устойчивости параллельной работы станций системы и пропускную способность линии 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 монтаж выключателей.

При выборе выключателя следует учитывать его влияние на окружающую среду, пожароопасность, отсутствие или наличие выбросов масла, раскаленных газов, пламени, громких хлопков при работе.

2.1.1. Выключатели баковые масляные



Рис. 2.1. Общий вид баковых масляных выключателей

Баковые выключатели просты в изготовлении, относительно недорогие. 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 организации специальной службы для сушки и очистки трансформаторного масла. Размещение камер в баке с маслом затрудняет их ремонт и осмотр. В процессе работы выключателя возникают большие ударные 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:

- подвесного типа;
- горшкового типа;
- для наружных установок.



Рис. 2.2. Общий вид маломасляного выключателя горшкового типа

2.1.3. Выключатели воздушные

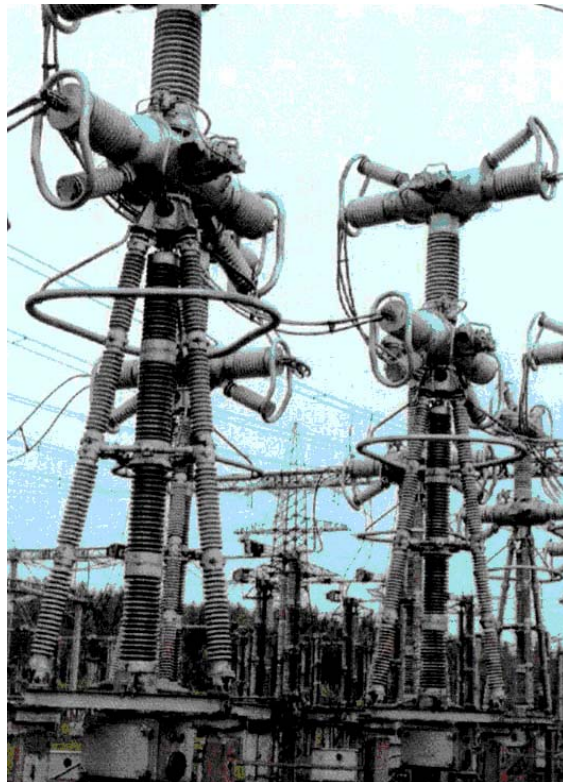


Рис. 2.3. Общий вид воздушных выключателей

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, предназначенные на номинальное напряжение 35 кВ и выше.

Для работы воздушных выключателей необходимо компрессорное хозяйство со сжатым воздухом на выходе с давлением 2-4 МПа.

В настоящее время эти выключатели имеют наивысшие технические данные.

Преимущества воздушных выключателей: время отключения доведено до 0,04 с; пожаробезопасны; нарастание номинального напряжения осуществляется последовательным соединением модулей; для надежной работы изоляции выключателя осуществляется непрерывная вентиляция полостей модуля; имеют большой коммутационный ресурс при номинальном токе (особенно в выключателях для электротермических установок).

К недостаткам воздушных выключателей следует отнести следующее: воздушные выключатели сложнее и дороже масляных выключателей; для надежной работы необходим чистый осушенный сжатый воздух — поэтому требуется наличие сложного и дорогого компрессорного хозяйства; при отключении слышатся сильные хлопки типа взрыва.

2.1.4. Выключатели электромагнитные



Рис. 2.4. Общий вид электромагнитного выключателя

В ряде установок требуется частая коммутация номинальных токов при напряжении до 10-15 кВ, например, в электротермических устройствах, в цепях собственных нужды 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 до 0,08 с. Механический ресурс в цикле ВО до 25000-120000 циклов в зависимости от назначения выключателя. Комму-

тационный 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).

Преимущества электромагнитных выключателей заключаются в следующем: взрывобезопасность; большой коммутационный ресурс номинального тока; большой механический ресурс; ограничение тока при гашении; слабая зависимость процесса отключения от скорости восстановления напряжения сети.

Недостатком электромагнитных выключателей является ограничение по номинальному напряжению ($U_{\text{ном}} \leq 15$ кВ).

2.1.5. Выключатели элегазовые



Рис. 2.5. Общий вид элегазового выключателя

Выключатели обладают рядом достоинств, основные из них следующие.

1. 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.

2. Элегазовые выключатели являются перспективными на напряжение 110 кВ и выше. Элегаз позволяет повысить нагрузку токоведущих частей и уменьшить их массу за счет своих охлаждающих свойств.

Наряду с достоинствами элегазовым выключателям присущи некоторые недостатки.

1. Высокие требования к качеству заполняющего элегаза.

2. Работоспособность выключателя зависит от температуры окружающей среды, и при понижении температуры ниже определенного значения выключатель может отказать в гашении, так при давлении 0,35 МПа и плотности элегаза 28 кг/м^3 предельная рабочая температура минус 40°C . Это затрудняет применение элегазовых выключателей при более низких температурах окружающего воздуха.

2.1.6. Выключатели вакуумные



Рис. 2.6. Общий вид вакуумного выключателя

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 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 $(30—50) \cdot 10^3$ коммутаций;
- экологическая безопасность при эксплуатации и при утилизации.

Разработаны и подготовлены к выпуску выключатели с числом коммутаций до $1,5 \cdot 10^6$. При коммутации тока КЗ ресурс ВО до 100 коммутаций; отсутствие ударной нагрузки на фундамент; в пределах коммутационного ресурса

камера не ремонтируется. Срок службы камеры $(30-150) \cdot 10^3$ коммутаций без тока или 50 – 100 при токе КЗ; механический ресурс $(10-25) \cdot 10^3$ циклов ВО; позволяют создать малогабаритные (многоэтажные) КРУ; малые ход и скорость контактов позволяют применить небольшие пружинные или электромагнитные приводы; выключатели работают без выброса пламени и газов (экологически чистые).

Идея использовать вакуум в качестве дугогасительной среды возникла примерно в конце 19 века. Но первые вакуумные коммутаторы были созданы лишь в 1923 году из-за возникших трудностей технологического характера. При выборе выключателя в настоящее время преимущество отдают именно вакуумным выключателям по следующим причинам, которые можно отнести к достоинствам вакуумных выключателей:

- автономность работы, независимость от посторонних источников энергии; нет необходимости применять для дугогашения какие-либо газы или жидкости;
- отсутствие выхлопов наружу пламени или раскаленных газов;
- высокая надежность работы в штатных и аварийных режимах;
- высокий коммутационный ресурс;
- возможность ориентировать камеры в пространстве в произвольном положении;
- исключительно высокая коммутационная способность; для успешного отключения токов не удаленного короткого замыкания не требуется шунтирующих резисторов или конденсаторов;
- относительно маломощный привод;
- взрыво- пожаробезопасность;
- бесшумность оперирования (малый шум при коммутации любых токов);
- малые габариты, малый вес, возможность встраивания в любые существующие шкафы КРУ;
- способность работы в любых климатических зонах земного шара;
- экологическая безопасность при эксплуатации и утилизации.

В процессе эксплуатации вакуумные дугогасительные камеры не требуют обслуживания; в большинстве случаев срок их службы не меньше, чем у выключателя, на котором они установлены.

Но у вакуумных выключателей есть серьезный недостаток: вблизи нуля тока наблюдается срез тока, в результате чего возникают перенапряжения, опасные для коммутируемого оборудования.

Последствия тока среза в вакуумном выключателе при коммутации представляют большую опасность для изоляции высоковольтного оборудования, чем при коммутации маломасляным выключателем, потому что при возникновении повторных пробоев возможна эскалация напряжения с большей степенью вероятности, чем с применением маломасляных выключателей. В связи с этим ваку-

умные выключатели должны комплектоваться средствами ограничения коммутационных перенапряжений, например, ОПН или емкостно-резистивными цепочками.

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

Таблица 2.1

Технические характеристики высоковольтного вакуумного выключателя типа ВВТЭ-М

Наименование параметра	Норма
	ВВТЭ – М – 10 – 20
1. Климатическое исполнение и категория размещения	У3 Т3
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 У3	630,1000,1600
При частоте 60 Гц, для исполнения Т3	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:	О-0,3 с-ВО-180 с - ВО
Цикл Ia:	О-0,3 с-ВО-20 с - ВО
14. Номинальное напряжение электромагнитов управления и вспомогательных 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	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

2.1.7 Приборы для определения времени включения и отключения выключателя

Для вакуумных выключателей, в соответствии с инструкциями заводоизготовителей, в процессе эксплуатации требуется проводить контроль только временных характеристик. Но в ответственных случаях контроль скоростных характеристик также желателен.

Временные характеристики контролируются как в простых операциях "О" и "В", так и в сложных циклах. Для облегчения управления выключателем в сложных циклах разработано множество специальных диагностических устройств, например, прибор контроля выключателей типа ПКВ-М6.

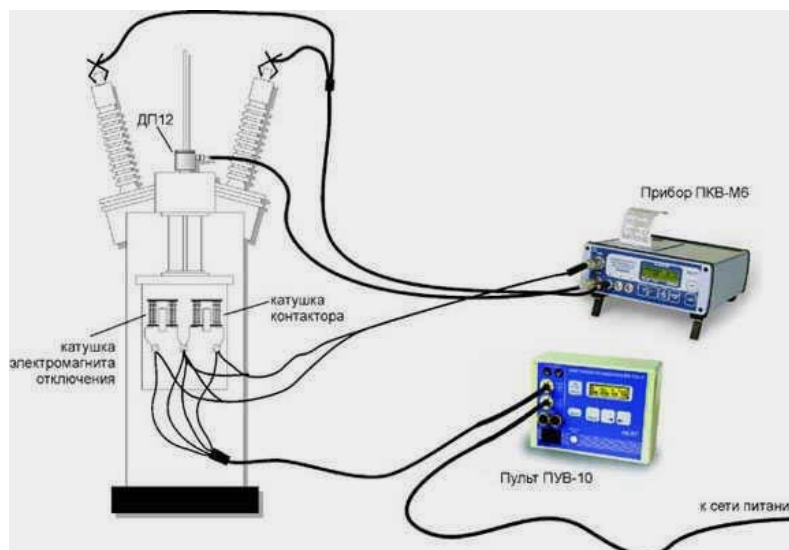


Рис. 2.7. Прибор контроля вакуумных выключателей ПКВ – М6

ПКВ-М6 автоматически распознает вид сложного цикла и измеряет характеристики как цикла в целом, так и составляющих его простых операций. Кроме того, в сложных циклах прибор определяет длительность командных импульсов, что позволяет проверять правильность работы блокировочных контактов выключателя. На рис. 2.7 показан способ подсоединения прибора и пульта к масляному выключателю при контроле в простых операциях. Для осуществления контроля в сложных циклах достаточно отсоединить от прибора кабель датчика перемещения и задать на пульте нужный цикл.

Комплекс ИКВ-01 (рис. 2.8) предназначен для контроля всех типов высоковольтных выключателей (воздушных, элегазовых, вакуумных, масляных) на все классы напряжений от 6 до 1050 кВ, выведенных в ремонт, либо для профилактического обследования (со снятым высоким напряжением).

Этим комплексом можно проконтролировать большинство характеристик выключателей. Для временных характеристик воздушных выключателей измеряются все паспортные параметры (из-за многочисленности не перечислены), а для прочих типов выключателей – следующие параметры.

Временные характеристики: время включения/отключения полюса, собственное время включения/отключения выключателя, разновременность включения между полюсами и разновременность замыкания/размыкания между контактами полюса, время вибрации контактов, длительности командных импульсов, время завода пружинного привода, время работы насоса для восстановления давления в гидроприводе, время восстановления давления воздуха после операций, параметры сложных циклов.



Рис. 2.8. Комплекс безразборного контроля высоковольтных выключателей ИКВ-01

Скоростные характеристики и параметры хода: скорость включения/отключения, максимальная скорость, средняя скорость на участке хода, мгновенная скорость в любой точке хода; полный ход, ход до замыкания/размыкания полюса, ход в контактах (вжим), отскок, перелет, неодновременность по ходу замыкания/размыкания контактов, ход вибрации контактов, а также графики зависимостей: скорости от хода, скорости от времени, хода от времени.

В данной лабораторной работе для определения характеристик включения и выключения высоковольтного выключателя применяется электронный осциллограф Tektronix TDS1000B.



Рис. 2.9. Электронный осциллограф Tektronix TDS1000B

Интерфейс пользователя осциллографа обеспечивает быстрый доступ к специальным функциям через структуру меню. При нажатии кнопки на передней панели в правой части экрана осциллографа появляется соответствующее меню. В меню отображаются параметры, доступ к которым осуществляется с помощью функциональных кнопок без надписей, расположенных непосредственно справа от экрана.

Кнопки МЕНЮ (К 1, К 2, К 3, К 4). Эти кнопки позволяют вывести на экран значения параметров меню по вертикали и включить или отключить отображение сигнала определенного канала.

ВОЛЬТ/ДЕЛ (К 1, К 2, К 3, К 4). Выбор масштаба по вертикали.

МЕНЮ МАТЕМАТИКА. После нажатия кнопки на экране отображается меню математических операций для сигналов. Кнопка также используется для включения и выключения расчетных осциллограмм.

УСТ НУЛЬ. Если нажать кнопку, устанавливается нулевое положение по горизонтали.

СЕК/ДЕЛ. Поворотом этой ручки задается коэффициент масштабирования (время/деление) для основного масштаба времени или масштаба времени окна. При использовании функции Window Zone (Зона окна) с помощью этого элемента можно изменить ширину зоны окна, увеличив или уменьшив масштаб времени окна.

УРОВЕНЬ. Если используется синхронизация по фронту или по длительности импульса, ручка УРОВЕНЬ позволяет установить уровень амплитуды, которую должен иметь сигнал, чтобы его можно было зарегистрировать.

МЕНЮ СИНХ. При нажатии этой кнопки на экран выводится меню синхронизации.

УСТ 50 %. Уровень запуска устанавливается по вертикали посередине между пиковыми уровнями сигнала синхронизации.

ФОРС ЗАПУСК. При нажатии этой кнопки сбор данных завершается независимо от наличия необходимого сигнала синхронизации. Если регистрация данных уже остановлена, эта кнопка не действует.

ПРОСМ ИМП СИНХ. При нажатии и удержании кнопки ПРОСМ ИМП СИНХ на экране вместо сигнала канала отображается сигнал синхронизации. Эту кнопку можно использовать, чтобы посмотреть, как параметры синхронизации, например, тип входа синхронизации, влияют на сигнал синхронизации.

Универсальная ручка. Конкретная функция ручки определяется отображенным на экране меню или выбранной командой меню. Когда ручка активна, рядом с ней загорается индикатор.

СЕРВИС. При нажатии данной кнопки на экран выводится меню сервиса.

КУРСОР. Вывод на экран меню курсора. Курсоры отображаются на экране после выхода из меню курсора.

ЭКРАН. Отображение меню экрана.

СПРАВКА. Вывод на экран меню справки.

НАСТРОЙКА ПО УМОЛЧАНИЮ. Восстановление заводской настройки.

АВТОУСТ. Автоматическая установка значений параметров управления сигналом, обеспечивающих приемлемое изображение входящих сигналов.

ОДИНОЧН ЗАПУСК. Регистрируется одиночный сигнал, после чего сбор данных прекращается.

ПУСК/СТОП. Сигналы регистрируются непрерывно, или сбор данных приостанавливается.

СОХРАНЕНИЕ. Горящий индикатор указывает, что кнопка PRINT (Печать) настроена для сохранения данных в запоминающем устройстве USB.

2.2. Принципиальная схема установки

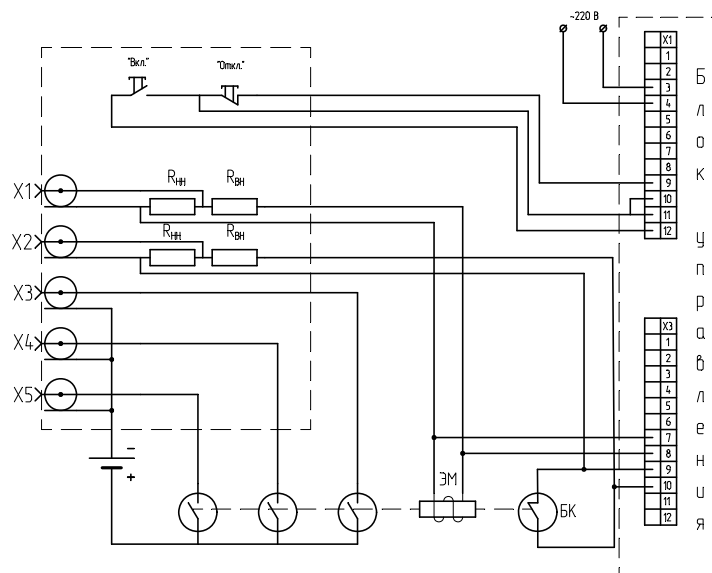


Рис. 2.10. Схема установки

2.3. Порядок работы

1. Ознакомиться с описанием установки и схемой эксперимента (рис. 2.10).
2. Включить осциллограф и настроить его на измерение в импульсном режиме на развертке длительностью 20 мс/деление.
3. Собрать установку по схеме (подключить осциллограф к датчикам).
4. Произвести включение выключателя.
5. Зарегистрировать форму импульсов.
6. Произвести отключение выключателя.
7. Зарегистрировать форму импульсов.

8. Повторить п. 4 – 7 12-13 раз.
9. Повторить пп. 4 – 8 для другого полюса выключателя.
10. Повторить пп. 4 – 8 для третьего полюса выключателя.
11. Обработать полученные данные и привести в виде таблицы.

2.4. Содержание отчета

1. Отчет оформить в соответствии с установленными требованиями.
2. По полученным экспериментальным данным рассчитать собственное время включения и отключение выключателя.
3. Определить разновременность включения полюсов.
4. На основании анализа результатов сделать выводы по проделанной работе. Сравнить полученные данные с нормированными.
5. Ответить на контрольные вопросы.

2.5. Контрольные вопросы

1. Почему необходимо определять собственное время включения и отключения выключателя?
2. При помощи какой аппаратуры измеряют время включения и отключения выключателя? Приведите свои варианты измерения времени включения и отключения выключателя.
3. Почему необходимо настраивать работу выключателя на одновременное замыкание главных силовых контактов с разбросом не более 1 мс?
4. От чего зависит погрешность при определении разброса замыкания контактов разных полюсов?
5. Какой стандарт нормирует испытание электротехнической аппаратуры на одновременность замыкания главных контактов выключателя?
6. В чем отличие между полным временем включения выключателя и собственным?
7. В чем отличие между полным временем отключения выключателя и собственным?
8. Чем отличается номинальный ток выключателя от номинального тока отключения?
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 $U_{обр} = U_m$.

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

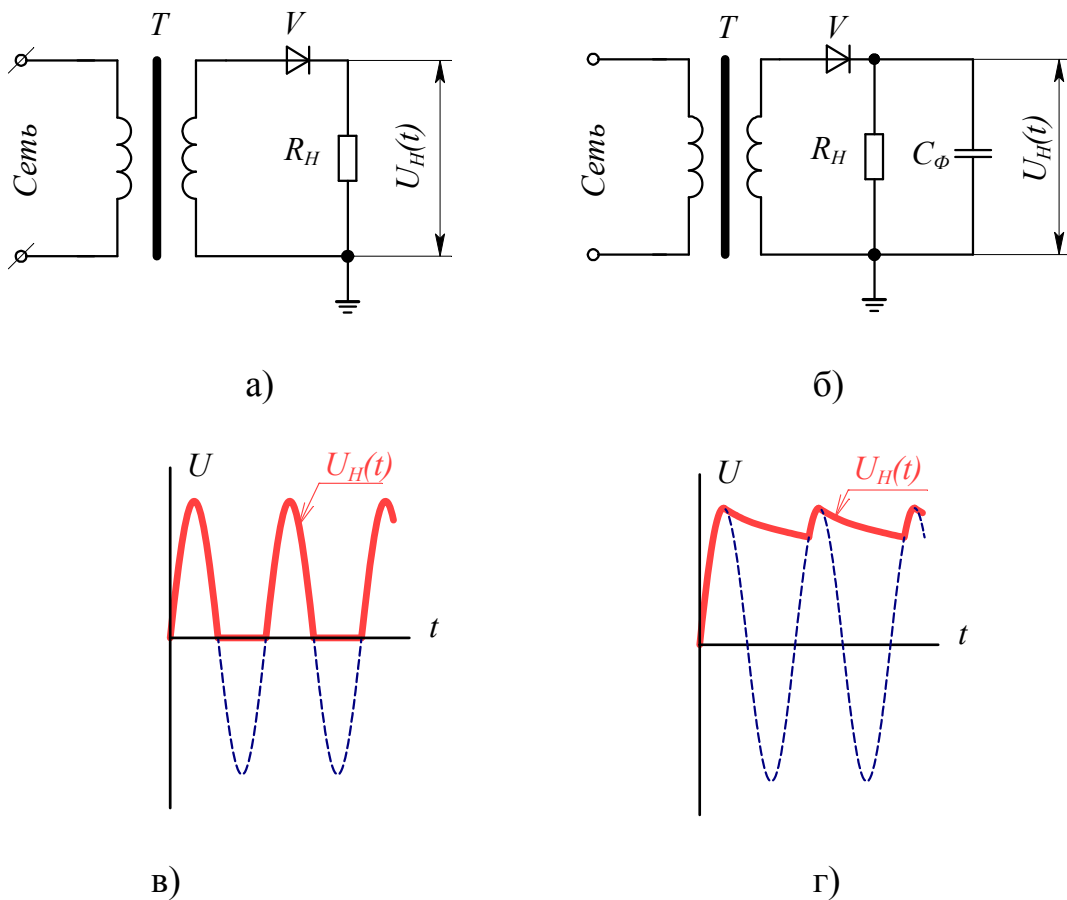


Рис. 3.1. Схемы однополупериодного выпрямления: а – без фильтра; б – с фильтром и, соответственно, диаграммы напряжения (в, г) на нагрузке.

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_n и создает на нем напряжение

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

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 $U_{обр} \approx U_m$.

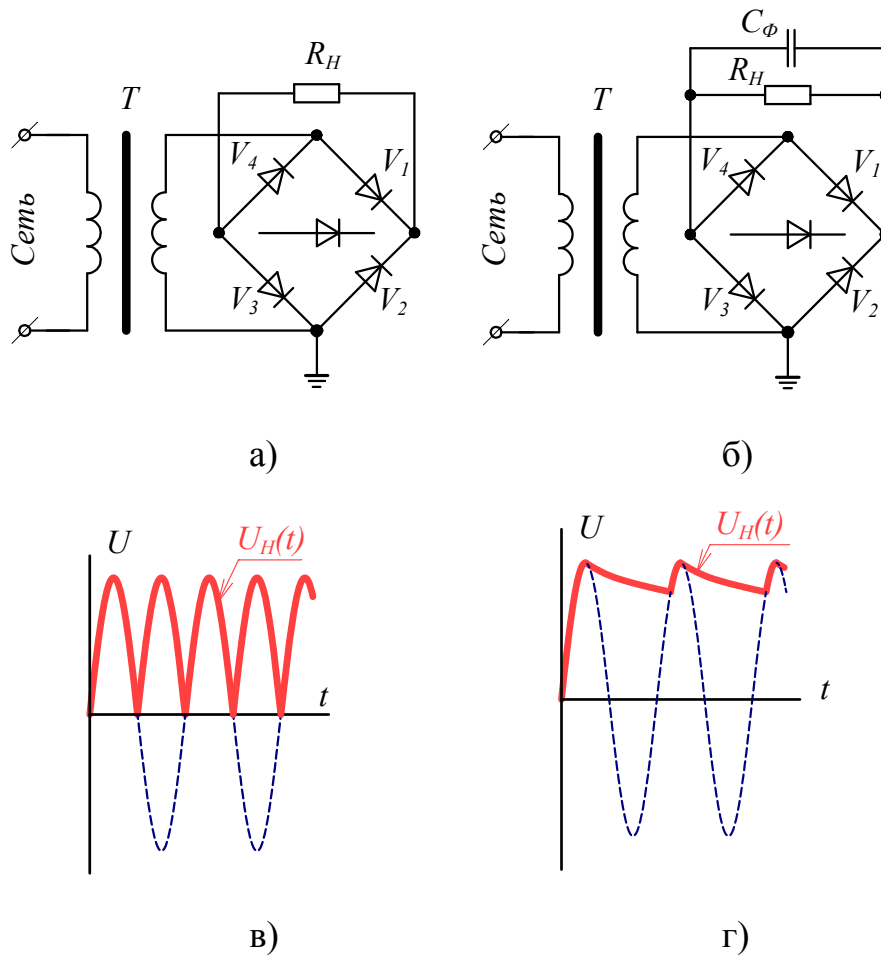


Рис. 3.2. Схемы двухполупериодного выпрямления: а – без фильтра; б – с фильтром, в, г – диаграммы напряжения на нагрузке для схемы без фильтра и с фильтром, соответственно

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 диаграмма 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.

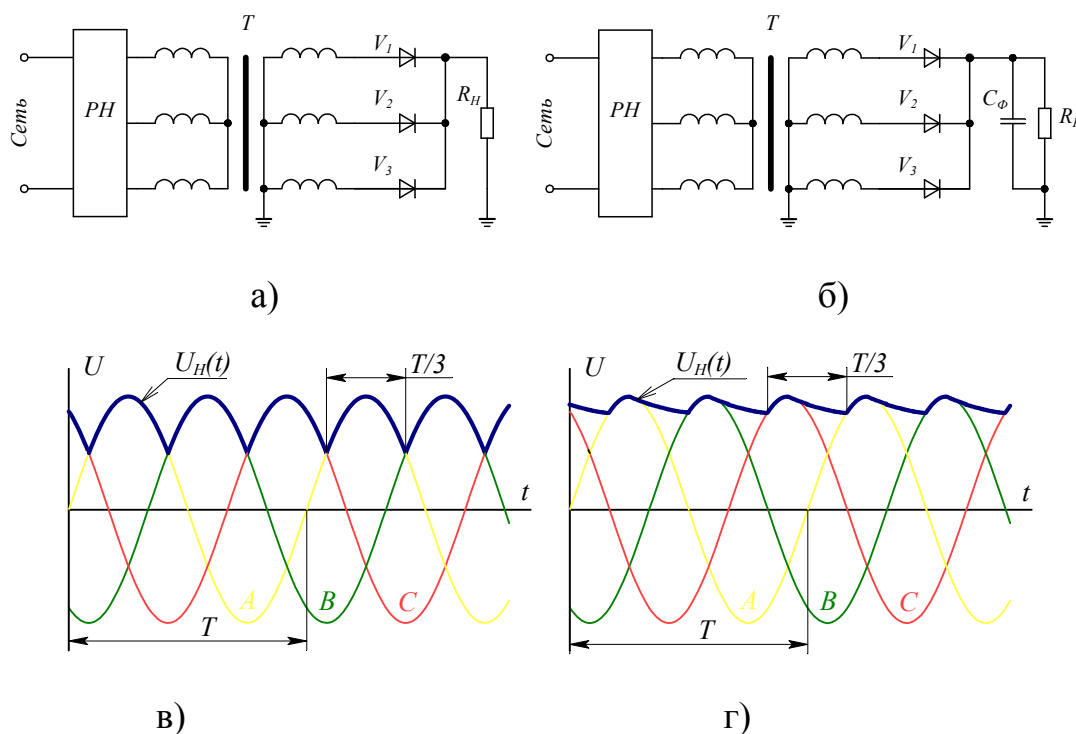
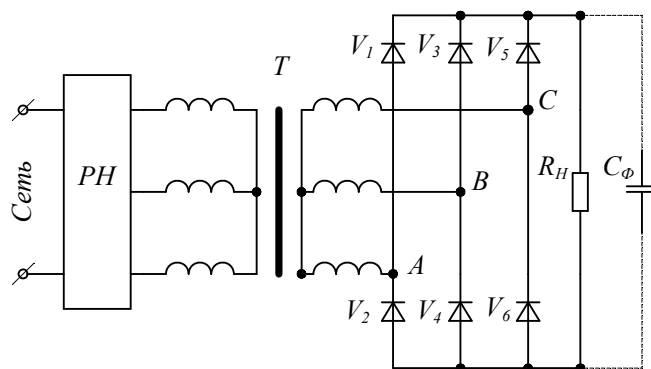


Рис. 3.3. Трехфазная однополупериодная схема выпрямления: а – схема без фильтра; б – с фильтром; в, г – диаграммы напряжения на нагрузке для схемы без фильтра и с фильтром, соответственно

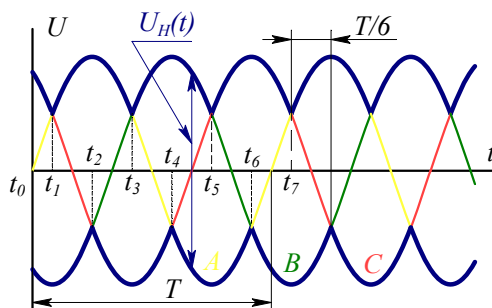
3.2.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (схема Ларионова)

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

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

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 вентилей 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.

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

где $U_{\phi} = U_{max}$.

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_{cp} , I_{cp});

- 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 – $K_{\text{тр}}$

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

где n – число фаз трансформатора; $U_{\text{эф2}}$ – 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.

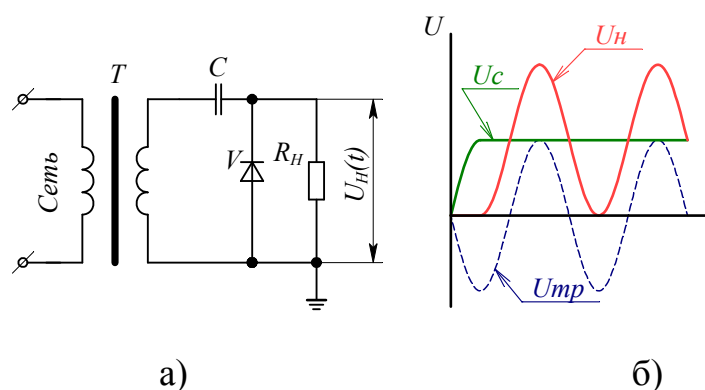


Рис. 4.1. Однополупериодная схема с удвоением напряжения: а – электрическая схема, б – диаграмма напряжения трансформатора U_{mp} и на нагрузке U_H

Диаграммы изменения напряжения на трансформаторе и на нагрузке приведены 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.

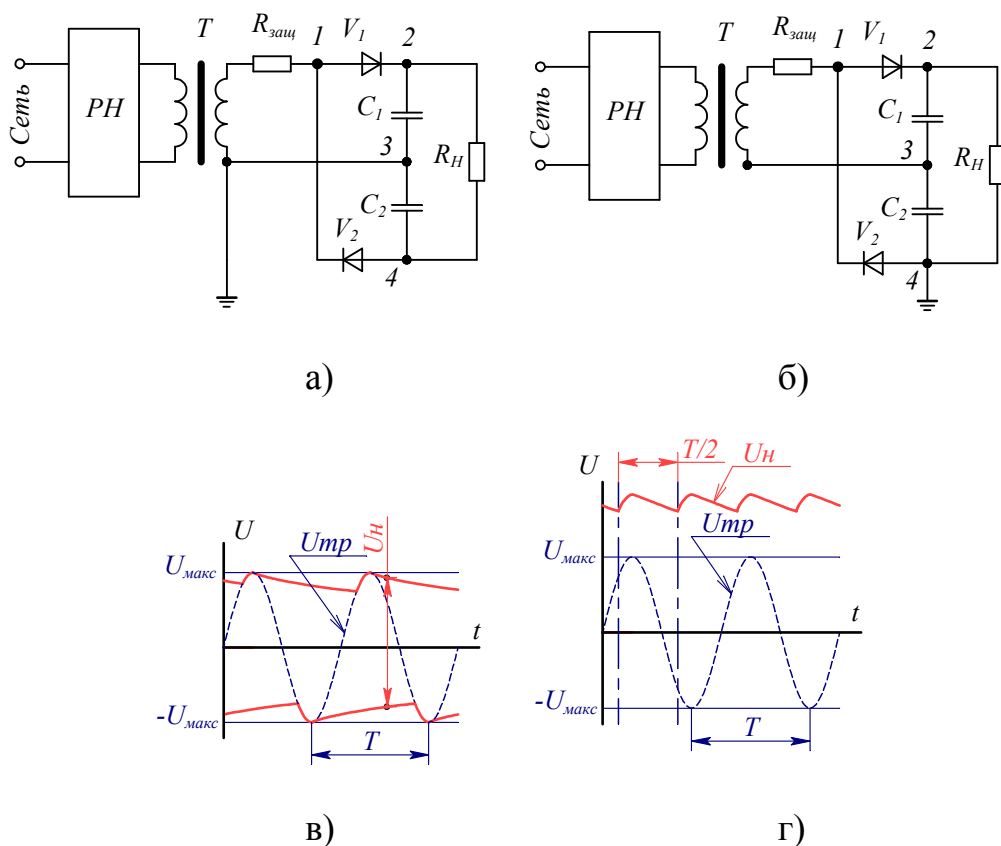


Рис. 4.2. Двухполупериодная схема с удвоением напряжения: а – симметричная схема, б – несимметричная схема, в и г – соответствующие диаграммы напряжения трансформатора $U_{Тр}$ и на нагрузке U_H

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 (рис. 4.3) является составным элементом каскадного умножения напряжения при получении сверхвысоких постоянных напряжений. 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. Более подробно принцип работы однокаскадной схемы умножения напряжения приведен в приложении

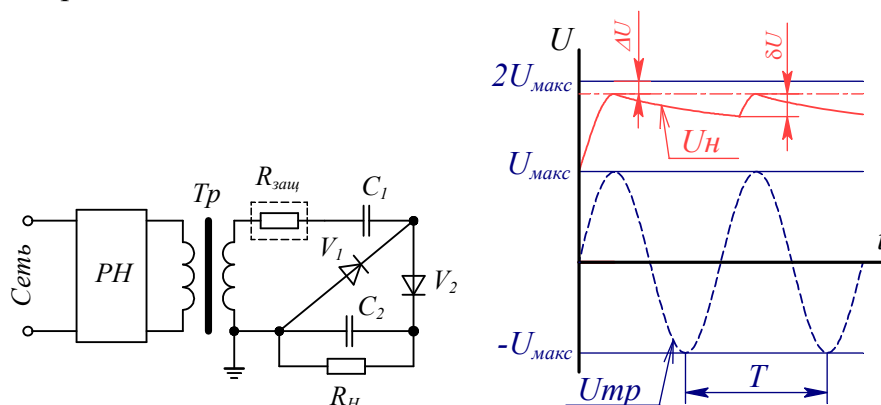


Рис. 4.3. Однокаскадная схема умножения напряжения: а – электрическая схема, б – диаграмма напряжения трансформатора U_{Tr} и на нагрузке U_H

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_m .

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.

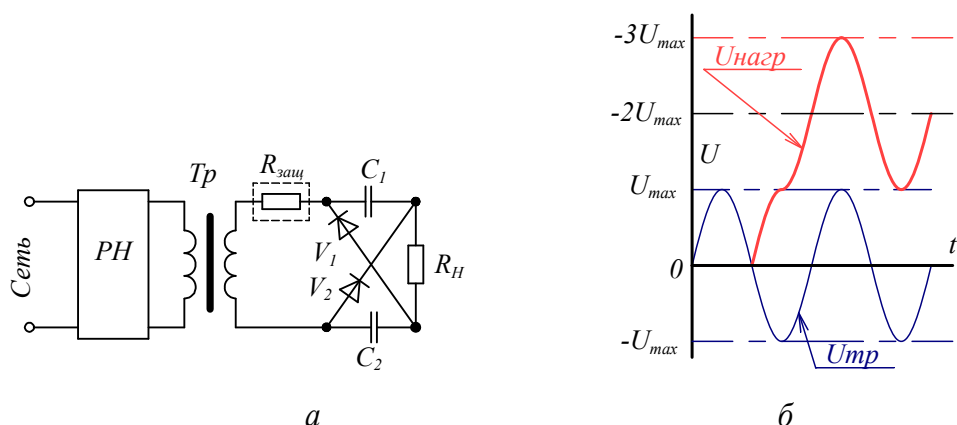


Рис. 4.4. Схема устроения напряжения: а – электрическая схема. б – диаграмма напряжения трансформатора (1) и на нагрузке (2)

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.

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

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.

5. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СХЕМЕ АРКАДЬЕВА–МАРКСА

Цель работы

Ознакомиться с принципом работы, схемой замещения, устройством и особенностями работы генератора импульсных напряжений.

5.1. Краткие сведения

Изоляция электрооборудования может подвергаться воздействию грозовых и коммутационных перенапряжений. Воздействие молнии вызывает грозовые перенапряжения, которым подвергается линейное и подстанционное оборудование. Для имитации грозовых воздействий на изоляции электрооборудования используют генераторы импульсных напряжений (ГИН). Наибольшее распространение получил ГИН, работа которого основана на принципе, предложенном Аркадьевым. ГИН на объекте испытания формирует импульс напряжения, форма которого может быть приближена к грозовому импульсу, утвержденному стандартом. За рубежом импульсный генератор по аналогичному принципу действия был предложен Марксом, поэтому в современной литературе подобные устройства называют ГИН по схеме Аркадьева-Маркса.

5.2. Принцип работы ГИН

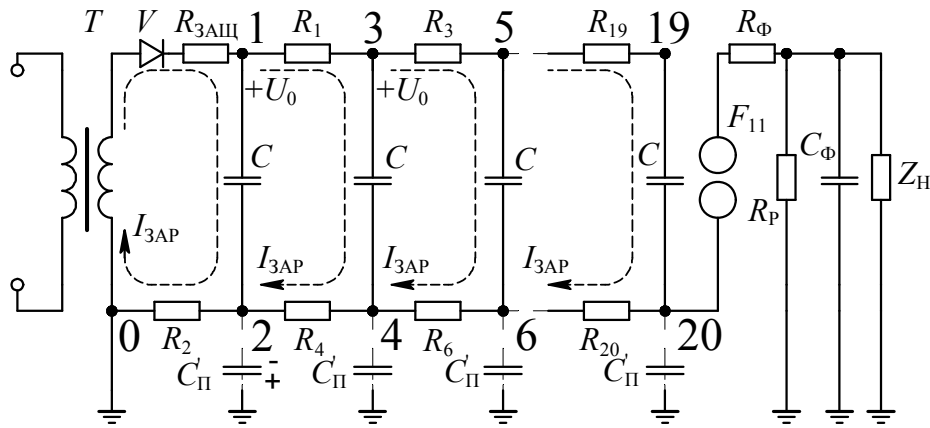
В ГИН по схеме Аркадьева–Маркса используется относительно медленное накопление энергии в конденсаторах, включенных параллельно, затем быстрое включение их последовательно и подключение к объекту испытания. Напряжение между началом и концом этой цепочки суммируется, достигая в пределе величины nU_0 , где n – число последовательно включенных конденсаторов, а U_0 – напряжение, до которого они были заряжены. Переключение с параллельного соединения на последовательное осуществляется, как правило, искровыми промежутками. На рис. 1 приведен один из вариантов схемы генератора импульсных напряжений.

Конденсаторы C заряжаются через систему последовательно включенных сопротивлений: одно сопротивление $R_{\text{заш}}$, которое называется защитным, и несколько одинаковых сопротивлений R_0 ($R_1 \dots R_{20}$), которые называются зарядными. Для обеспечения одновременного заряда всех емкостей C до определенного одинакового напряжения U_0 необходимо выполнение условия $R_{\text{заш}} \gg R_0$. При выполнении этого условия в любой момент времени верхние обкладки конденсаторов (нечетные узловые точки 1...19 на рис. 1) имеют один потенциал, который к моменту окончания зарядки емкостей равен амплитуде напряжения высо-

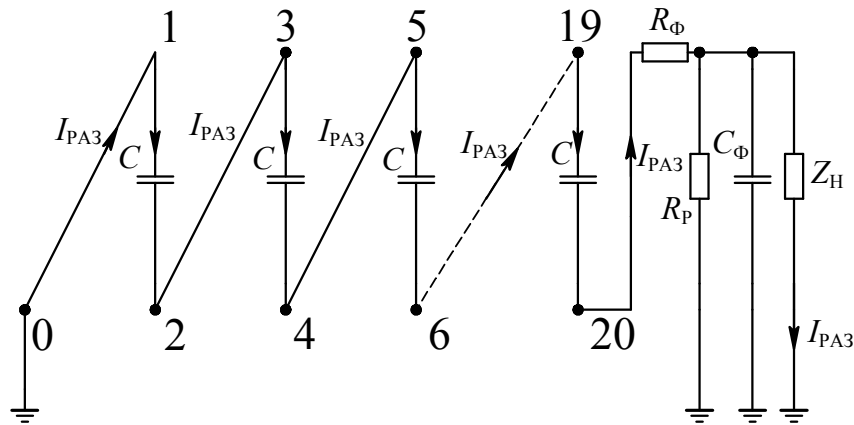
тате последовательного пробоя промежутков $F_1 \dots F_n$ все емкости оказываются соединенными последовательно. Напряжения их суммируются, т.е. потенциал узла 20 станет равным $U_{20} = n(-U_0)$, где n – число ступеней ГИН.

Промежуток F_{11} необходим для отделения нагрузки от ГИН в процессе заряда ступеней ГИН, т.е. по постоянному напряжению, а также в переходном режиме в процессе срабатывания искровых разрядников $F_1 \dots F_{10}$. Сопротивления R_0 должны быть выбраны так, чтобы $R_0 C$ было много больше длительности импульса, получаемого с ГИН, иначе емкости C будут разряжаться на R_0 и влиять на длительность формируемого импульса.

Таким образом, в работе ГИН прослеживаются две стадии: стадия зарядки конденсаторов и стадия их разрядки. Соответственно этим стадиям можно выделить зарядную (рис. 5.2, а) и разрядную (рис. 5.2, б) схемы замещения ГИН.



а



б

Рис. 5.2. Схемы замещения ГИН при зарядке емкостей (а) и при срабатывании ГИН (б)

5.3. Форма испытательных волн

Значение разрядного напряжения при воздействии импульсного напряжения зависит от формы воздействующего на изоляцию напряжения. Чтобы иметь возможность сравнивать между собой импульсные характеристики, полученные в различных лабораториях, форма волны для импульсных испытаний нормирована и находится в соответствии с формой волн атмосферных перенапряжений, воздействующих на изоляцию в результате разрядов молнии.

Стандартная волна характеризуется быстрым нарастанием напряжения до максимума (фронт волны) и более медленным спадом (хвост волны). Поскольку фронт волны плавно переходит в спад, то по осциллограммам без специальной их обработки трудно определить начало волны, длительность фронта и длительность волны. Процедура определения параметров стандартной волны регламентирована и заключается в следующем.

Для определения фронта волны необходимо на осциллограмме провести прямую, параллельную оси времени и проходящую через максимум волны (U_{\max} на рис. 5.3, а, точка 1). Затем провести две прямые параллельные U_{\max} на уровне $0,3U_{\max}$ и $0,9U_{\max}$. Через точки пересечения прямых $0,3U_{\max}$ и $0,9U_{\max}$ с фронтом волны (точки 2 и 3 на рис. 5.3, а) провести прямую А до пересечения с осью времени (точка t_0 на рис. 5.3, а, которая называется условное начало волны) и прямой U_{\max} (точка f на рис. 5.3, а). Спроектировать точку f на ось времени (точка t_f на рис. 5.3, а). Расстояние от t_0 до t_f , выраженное во временном масштабе, называют фронтом волны (см. рис. 5.3, а).

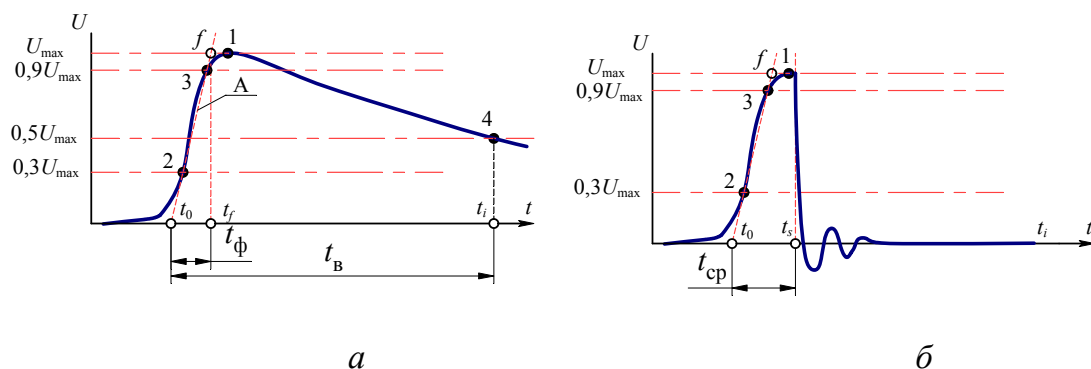


Рис. 5.3. Форма полной (а) и срезанной (б) испытательной волны

Длительность волны t_B определяется от условного начала волны (точка t_0 на рис. 5.3, а) до проекции точки 4 на ось времени (точка t_i на рис. 5.3, а). Точка 4 получена при пересечении прямой $0,5U_{\max}$, параллельной U_{\max} , со спадом волны.

В качестве стандартной волны принята волна с параметрами:

длительность фронта волны (t_ϕ) – $1,2 \pm 0,4$ мкс

длительность волны (t_B) – 50 ± 10 мкс

В процессе работы средств защиты от атмосферных перенапряжений, а также при пробое изоляционных промежутков вблизи шин подстанции на изоляции электрооборудования возможно появление так называемых срезанных волн, представляющих опасность для работы изоляции. Эта опасность связана с высокой скоростью изменения напряжения, приводящей к высоким градиентным перенапряжениям в обмотках трансформаторов, реакторов и электрических машин.

В связи с этим проводятся испытания такого оборудования стандартной срезанной волной, имеющей длительность $2,0 \pm 0,5$ мкс и представляющей собой начальную стадию полной стандартной волны (рис. 5.3, б). Длительность срезанной волны определяют как промежуток времени от условного начала волны (точка t_0 на рис. 5.3, б) до проекции на ось времени точки начала резкого спада (среза) волны (точка t_s на рис. 5.3, б).

5.4. Регулирование формы волны

Для анализа влияния значений элементов ГИН на параметры испытательной волны целесообразно общую электрическую схему ГИН упростить. Прежде всего, убираем все элементы, связанные с зарядкой емкостей, т. к. эти элементы выбираются такими, чтобы не влиять на процесс формирования волны на испытуемом объекте (нагрузке). В связи с этим приходим к схеме, приведенной на рис. 5.2, б. На этой схеме отсутствуют индуктивности, которые на самом деле включены последовательно в каждую ступень ГИН и существуют из-за того, что все соединительные провода и искровые промежутки имеют геометрическую длину, а значит, обладают индуктивностью. С учетом индуктивностей ступеней ГИН и индуктивности присоединения схема замещения будет выглядеть, как представлено на рис. 5.4.

Из схемы замещения ГИН, представленной на рис. 5.4, видно, что все емкости C и индуктивности $L_1 \dots L_n$, $L_{\text{ПР}}$ включены последовательно, поэтому они могут быть заменены эквивалентными $C_{\text{ЭКВ}}$ и $L_{\text{ЭКВ}}$.

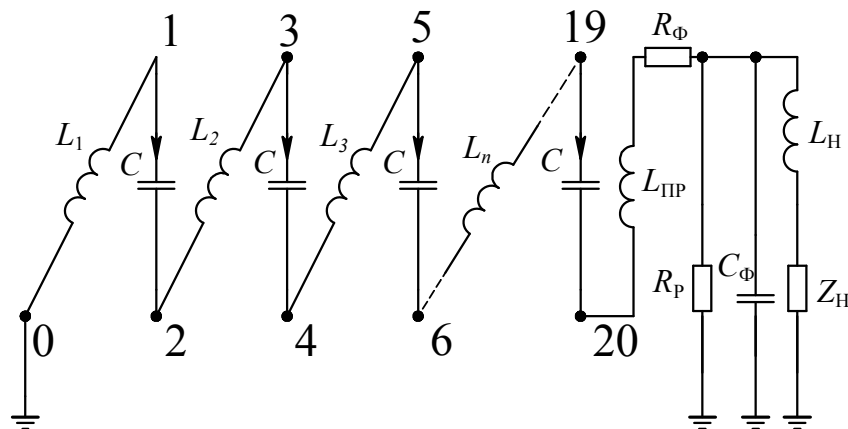


Рис. 5.4. Схема замещения ГИИ с учетом индуктивностей: C – емкость ступени ГИИ, $L_1 \dots L_n$ – индуктивности ступени ГИИ, $L_{ПР}$ – индуктивность присоединения испытуемого объекта к ГИИ, $L_Н$ – индуктивность нагрузки

$$C_{ЭКВ} = \frac{C}{n},$$

$$L_{ЭКВ} = L_1 + L_2 + \dots + L_n + L_{ПР}.$$

Схема замещения ГИИ примет вид, представленный на рис. 5.5.

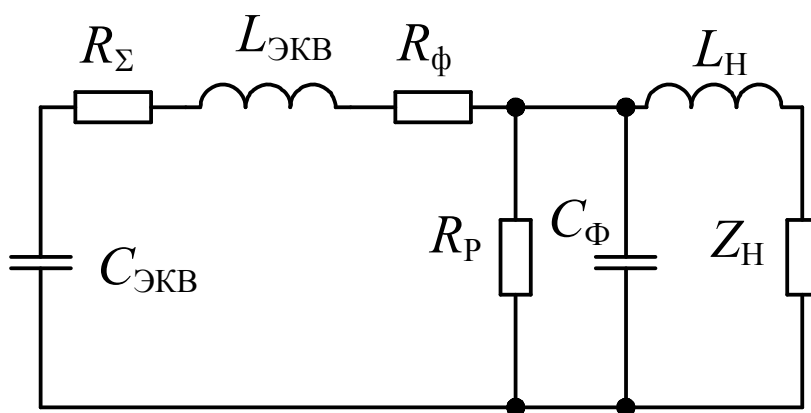


Рис. 5.5. Схема замещения ГИИ с учетом индуктивностей: $C_{ЭКВ}$ – эквивалентная емкость ГИИ, $L_{ЭКВ}$ – эквивалентная индуктивность ГИИ, $L_Н$ – индуктивность нагрузки, $R_Σ$ – суммарное активное сопротивление всех соединительных проводников, включая активное сопротивление искровых каналов

Необходимая форма волны напряжения достигается с помощью специальных формирующих элементов, включаемых в разрядную цепь ГИИ, таких как фронтовое сопротивление $R_Ф$, разрядное сопротивление $R_П$. Прежде чем определить влияние фронтового сопротивления $R_Ф$ и разрядного сопротивления $R_П$ на форму волны определим неизвестные параметры ГИИ, такие как эквивалентная

индуктивность ГИН – $L_{\text{ЭКВ}}$ и эквивалентная собственная конструктивная емкость ГИН, приведенная к выходу ГИН, $C_{\text{П}}$ (во многих источниках эту емкость называют паразитной).

Эквивалентную индуктивность ГИН $L_{\text{ЭКВ}}$ можно определить из опыта короткого замыкания. Схема замещения разрядного контура и форма волны тока в контуре ГИН будет такой, как представлена на рис. 5.6.

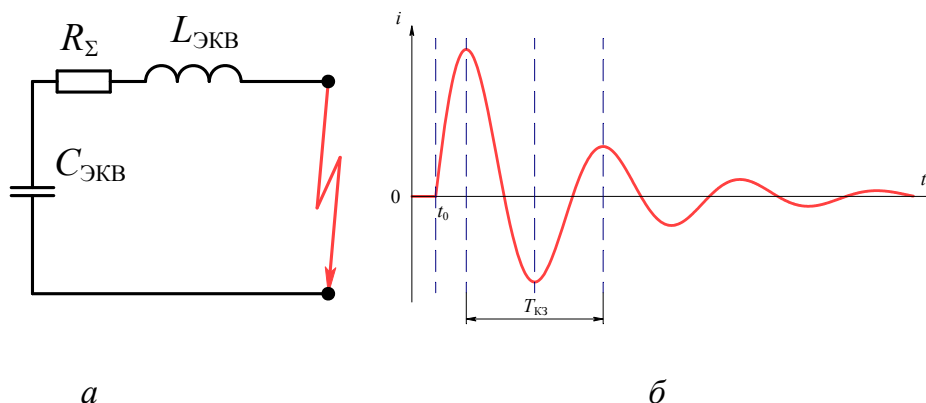


Рис. 5.6. Эквивалентная схема ГИН при проведении опыта короткого замыкания(а) и осциллограмма тока, соответствующая этому опыту (б)

Из осциллограммы тока определяем период колебаний тока $T_{\text{кз}}$ и по формуле, связывающей период колебаний с параметрами колебательного контура $C_{\text{ЭКВ}}$ и $L_{\text{ЭКВ}}$

$$T_{\text{кз}} \cong 2\pi\sqrt{L_{\text{ЭКВ}}C_{\text{ЭКВ}}}$$

находим

$$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{T_{\text{кз}}^2}{4\pi^2C_{\text{ЭКВ}}}.$$

При отсутствии формирующих элементов и работе ГИН на холостом ходу схема замещения разрядного контура и форма волны напряжения на выходе ГИН будут такими, как представлено на рис. 5.7.

Видно, что на холостом ходу напряжение на выходе ГИН имеет аperiodическую форму с наложенными колебаниями, период этих колебаний определяется по формуле

$$T_{\text{ХХ}} \cong 2\pi\sqrt{L_{\text{ЭКВ}}C_{\text{П}}}.$$

Из этой формулы находим приведенную конструктивную емкость ГИН

$$C_{\text{П}} = \frac{T_{\text{ХХ}}^2}{4\pi^2L_{\text{ЭКВ}}}.$$

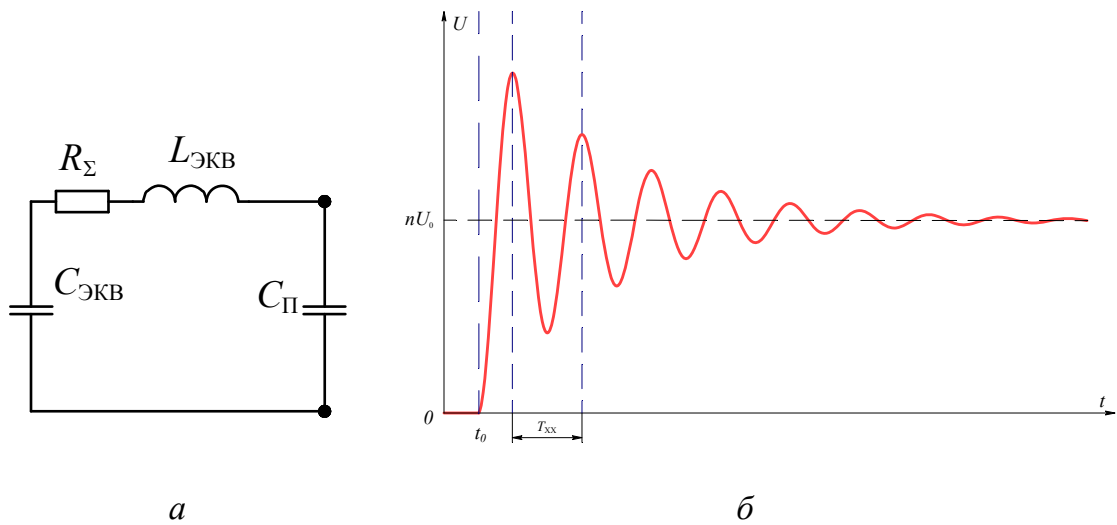


Рис. 5.7. Схема замещения (а) и осциллограмма на выходе ГИН при работе на холостом ходу (как правило, $C_{ЭКВ} \gg C_{П}$)

Для устранения колебаний, возникающих в контуре (см. рис. 7, а), образованном эквивалентной емкостью ГИН $C_{ЭКВ}$, эквивалентной индуктивностью контура $L_{ЭКВ}$, паразитной емкостью ГИН $C_{П}$, в разрядный контур необходимо включить демпфирующее активное сопротивление, которое выбирается из условия

$$R_{Д} \geq 2 \sqrt{\frac{L_{ЭКВ}}{C_{П}}}.$$

Частота колебаний при работе ГИН на холостом ходу из-за небольших значений $C_{П}$ и $L_{ЭКВ}$ такова, что четверть периода колебаний, определяющая фронт волны, значительно меньше требуемого стандартом. Для удлинения фронта волны требуется фронтовое сопротивление $R_{Ф}$. Обычно совмещают функции демпфирующего резистора $R_{Д}$ и фронтового $R_{Ф}$. Вид осциллограммы напряжения на выходе ГИН при наличии демпфирующего резистора, равного

$$R_{Д} = R_{Ф} = 2 \sqrt{\frac{L_{ЭКВ}}{C_{П}}}, \text{ приведен на рис. 5.8.}$$

Для получения фронта волны, соответствующего стандарту, необходимо на выходе ГИН подключить емкость, которую называют фронтовой $C_{Ф}$. В качестве фронтовой емкости $C_{Ф}$ может выступить емкость объекта испытания $C_{Об}$. В конечном счете, фронтовая емкость является суммой трех емкостей: приведенной конструктивной емкости $C_{П}$, емкости испытуемого объекта $C_{Об}$ и дополнительной емкости $C_{Доп}$, которая дополнительно присоединяется к ГИН, чтобы обеспечить требуемый фронт волны

$$C_{\Phi} = C_{\Pi} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ДОП}}.$$

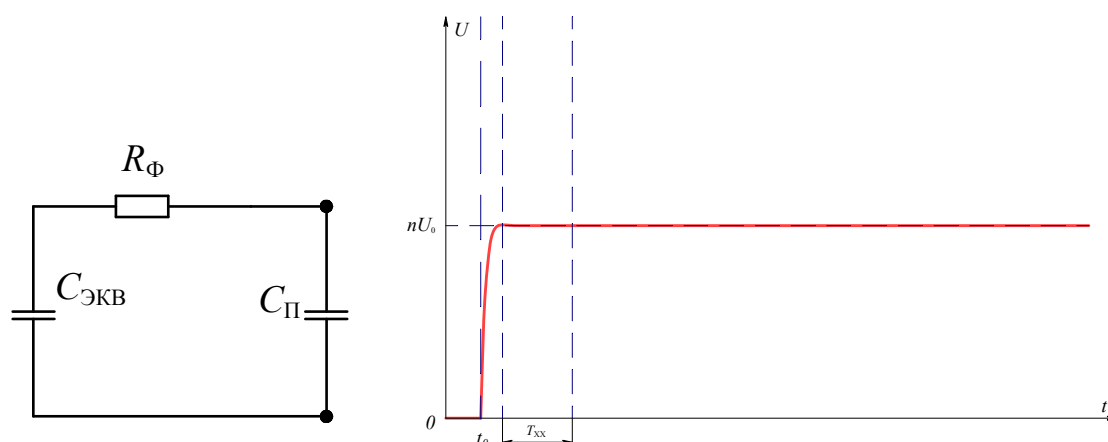


Рис. 5.8. Схема замещения и вид осциллограммы на выходе ГИН при работе на холостом ходу с установленным демпфирующим резистором $R_{\text{Д}}=R_{\Phi}$ (масштаб осциллограммы одинаковый с рис. 7)

Длительность фронта волны можно оценить по формуле

$$t_{\phi} \cong 3,25 \times R_{\Phi} \times C_{\Phi} = 3,25 \times R_{\Phi} \times (C_{\Pi} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ДОП}}) = 1,2 \times 10^{-6}.$$

Для формирования волны, соответствующей стандарту, необходимо обеспечить спад напряжения на 50% от максимума за 50 мкс (см. рис. 3, а). Этого можно достичь, если на выходе ГИН подключить сопротивление, которое называют разрядным $R_{\text{Р}}$. Значение разрядного сопротивления можно определить из формулы

$$t_{\text{в}} \cong 0,7 \times C_{\text{ЭКВ}} \cdot R_{\text{Р}} = 50 \times 10^{-6}.$$

Отсюда

$$R_{\text{Р}} = \frac{50 \times 10^{-6}}{0,7 \times C_{\text{ЭКВ}}}.$$

Делитель напряжения $R_{\text{Д}}$ может совмещать функции разрядного сопротивления $R_{\text{Р}}$. В разрядное сопротивление также входит сопротивление объекта испытания $R_{\text{Н}}$. В общем случае разрядное сопротивление $R_{\text{Р}}$ представляет собой параллельное соединение трех сопротивлений: сопротивления делителя напряжения $R_{\text{Д}}$, сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ и добавочного сопротивления $R_{\text{ДОБ}}$. Схема замещения ГИН с учетом введенных сопротивлений и соответствующая ей форма волны приведены на рис. 5.9.

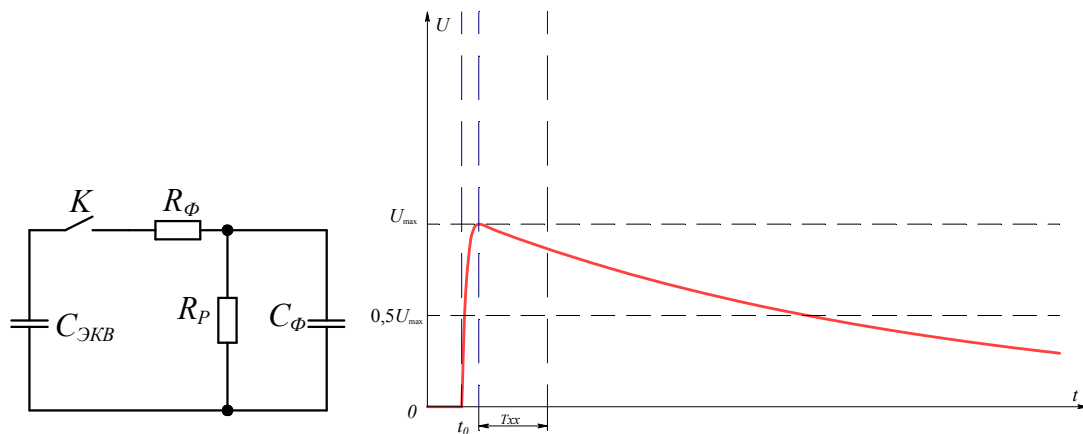


Рис. 5.9. Схемы замещения ГИН с учетом формирующих элементов (а) и соответствующая форма волны напряжения на испытуемом объекте

В большинстве практических случаев $C_{\text{ОБ}} \ll C_{\text{ДОП}} \gg C_{\text{П}}, R_{\text{Н}} \gg R_{\text{Д}}$ и $R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ДОБ}}$, поэтому после подбора параметров $C_{\text{ДОП}}$ и $R_{\text{ДОБ}}$ подключение объекта испытания практически не оказывают влияния на форму волны напряжения на выходе ГИН. В общем случае форма волны напряжения определяется параметрами эквивалентной емкости ГИН $C_{\text{ЭКВ}}$, приведенной конструктивной емкости $C_{\text{П}}$, емкости испытуемого объекта $C_{\text{ОБ}}$, дополнительной емкости $C_{\text{ДОП}}$, эквивалентной индуктивности разрядного контура $L_{\text{ЭКВ}}$, активным сопротивлением испытуемого объекта $R_{\text{Н}}$, активным сопротивлением делителя напряжения $R_{\text{Д}}$, добавочным сопротивлением $R_{\text{ДОБ}}$, фронтовым сопротивлением $R_{\text{Ф}}$, причем

$$\text{фронтная емкость: } C_{\text{Ф}} = C_{\text{П}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ДОП}},$$

$$\text{фронтное сопротивление } R_{\text{Ф}} = R_{\text{Д}} = 2 \sqrt{\frac{L_{\text{ЭКВ}}}{C_{\text{Ф}}}},$$

$$\text{разрядное сопротивление } R_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{Н}} \times R_{\text{Д}} \times R_{\text{ДОБ}}}{R_{\text{Н}} \times R_{\text{Д}} + R_{\text{Д}} \times R_{\text{ДОБ}} + R_{\text{Н}} \times R_{\text{ДОБ}}}$$

называются формирующими элементами.

Общий вид ГИН, который будет использоваться при проведении лабораторной работы, приведен на рис. 5.10.

Основу ГИН составляют конденсаторы C типа К-15-10 емкостью 9960 пФ (12 ступеней по 1 конденсатору в ступени), которые заряжаются от блока питания. Высокое напряжение от блока питания подается к ГИН посредством коаксиального кабеля типа РК-50-7. Защитный резистор $R_{\text{ЗАЩ}}$ 820 Мом типа КЭВ-1. Зарядные сопротивления R_0 также выполнены из резисторов типа КЭВ-5 сопротивлением 510 кОм каждый. Искровые промежутки (разрядники) представляют собой два шарообразных электрода, расположенных на токоподводящих стержнях. Расстояние между электродами разрядников можно регулировать. Искро-

вые промежутки в первых двух разрядниках можно регулировать при поданном зарядном напряжении, это позволяет подстраивать эти разрядники в зависимости от зарядного напряжения U_0 . В качестве фронтного резистора используется сборка из последовательно включенных 10 резисторов типа ТВО-2 сопротивлением по 1 кОм каждый. Фронтной конденсатор C_f выполнен в виде двух пластин, помещенных в диэлектрический корпус и залитых трансформаторным маслом. На тыльной стороне корпуса ГИН установлен шаровой разрядник. Расстояние между электродами шарового разрядника можно регулировать вращением шпильки, на которой закреплен заземленный электрод шарового разрядника. При сведении электродов шарового разрядника до касания друг друга осуществляется режим короткого замыкания ГИН. При максимальном разведении электродов шарового разрядника реализуется режим холостого хода.

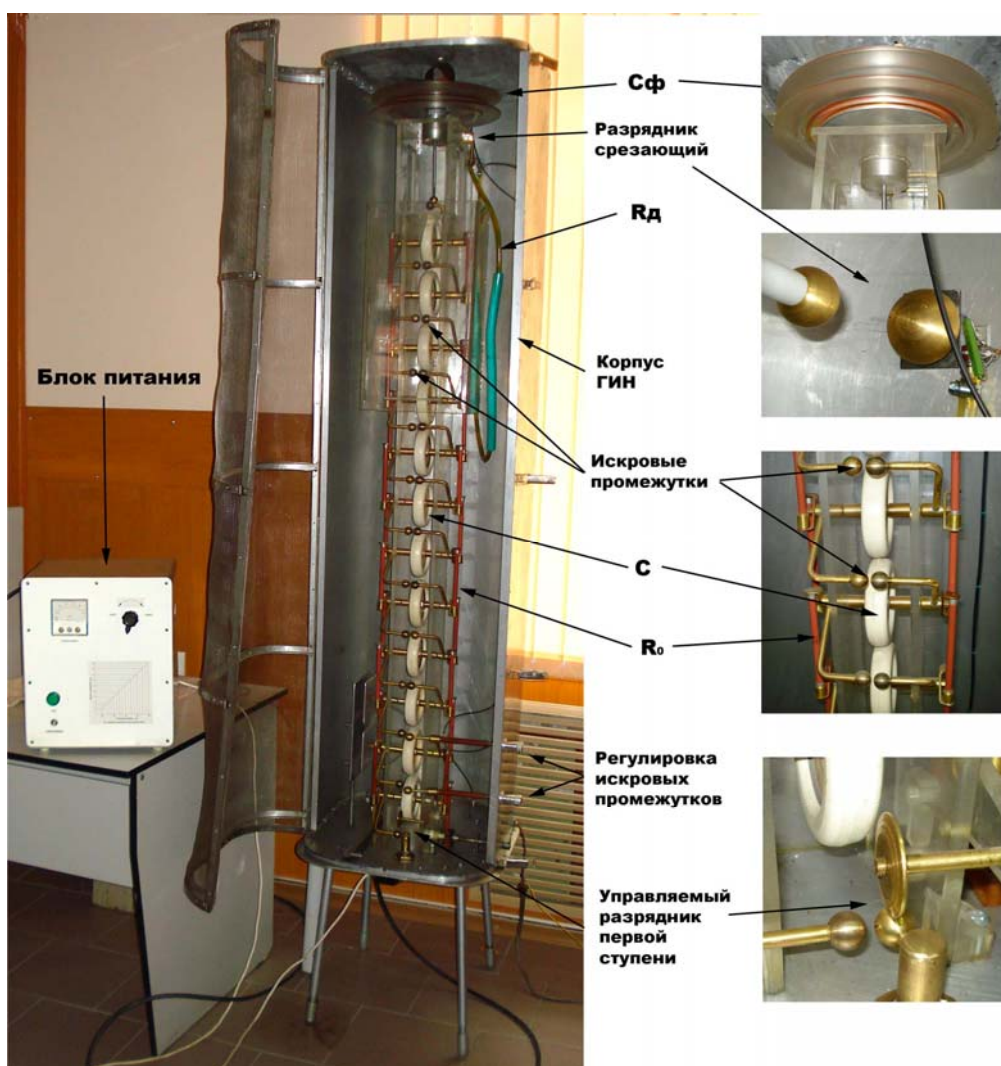


Рис. 5.10. Устройство ГИН

В промежуточном положении электродов шарового разрядника возможно получение срезанного импульса. В качестве разрядного сопротивления можно использовать две сборки из резисторов типа ТВО-2 по 20 шт. в каждой. Первая сборка состоит из последовательно соединенных резисторов сопротивлением 1 кОм, вторая – 51 кОм.

Измерение напряжения на выходе ГИН осуществляется активным делителем напряжения, выполненным на основе резисторов типа ТВО-2. В высоковольтном плече делителя находится 20 резисторов по 5,1 кОм каждый. Низковольтное плечо делителя выполнено на основе резисторов типа ТВО-1 сопротивлением 51 Ом. Ток, протекающий в цепи ГИН, регистрируется посредством шунта, который установлен последовательно в разрядном контуре ГИН в первой ступени. Шунт выполнен из 48 отрезков нихромовой проволоки, соединенных параллельно, что позволило получить эквивалентное сопротивление шунта $5,0 \times 10^{-3}$ Ом. Для регистрации сигнала с делителя и шунта используется осциллограф типа Tektronix TDS 2012B. Весь ГИН заключен в металлический корпус, таким образом, исключается электромагнитное воздействие ГИН при его работе на окружающие объекты и средства измерения. Передняя стенка корпуса ГИН выполнена из мелкой металлической сетки для визуального наблюдения пробоя искровых разрядников. ГИН может работать в двух режимах: на самопробое и в управляемом режиме. Для управления в первой ступени ГИН предусмотрен механически управляемый трехэлектродный разрядник (между двумя шарообразными электродами вводится третий электрод, что вызывает электрический пробой первого искрового промежутка). Напряжение заряда от блока питания может регулироваться в пределах 4...17 кВ. Всего в ГИНе содержится 12 ступеней, что позволяет при зарядном напряжении 20 кВ получить на выходе импульс амплитудой около 200 кВ.

Блок питания включает в себя высоковольтный источник, автотрансформатор ЛАТР-2 в качестве регулятора напряжения, стрелочный индикатор напряжения на передней панели, а также сетевой выключатель и сигнальную лампу.

5.5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой, устройством и работой ГИН.
2. Установить зарядное напряжение 10-12 кВ, отстроить разрядники первой и второй ступеней так, чтобы происходило стабильное срабатывание всех искровых промежутков ГИН.
3. Собрать схему короткого замыкания и снять осциллограмму тока. Определить период колебаний $T_{кз}$.
4. Собрать схему холостого хода генератора и снять осциллограмму напряжения. Определить период наложенных колебаний $T_{хх}$.

6. Собрать схему с фронтовым резистором. Снять осциллограмму напряжения с установленным фронтовым резистором.
7. Собрать схему с фронтовым резистором и фронтовым конденсатором. Снять осциллограмму напряжения с установленными фронтовыми резистором и конденсатором.
8. Подключить шаровой разрядник и получить срезанную волну.

5.6. Содержание отчета

1. Привести принципиальную схему генератора импульсных напряжений и расшифровать все обозначения, приведенные на схеме. Пояснить принцип работы ГИН.
2. Привести формы стандартных испытательных волн.
3. По полученным $T_{кз}$ и $T_{хх}$ определить $L_{ЭКВ}$ и $C_{П}$. Привести исходные экспериментально полученные осциллограммы.
4. Рассчитать $R_{Ф}$ и $R_{Р}$, обеспечивающие стандартную форму волны на основании экспериментально определенных $T_{кз}$ и $T_{хх}$, вычислив $C_{Ф}$, $C_{П}$, и полагая известными $C_{ЭКВ}$ и $R_{Д}$.
5. Привести ответы на контрольные вопросы.

5.7. Контрольные вопросы

1. Почему для испытания изоляции используется стандартная форма волны напряжения?
2. Чем отличается полная грозовая волна от срезанной?
3. Как регулируется длительность фронта импульса $t_{Ф}$, длительность волны $t_{В}$, амплитуда напряжения на выходе ГИН U_{max} ?
4. Почему изоляция трансформаторов, реакторов и вращающихся машин должна испытываться полной и срезанной волнами?
5. С помощью каких устройств в лабораториях получают срезанную волну, как можно регулировать время среза $t_{ср}$?
6. Как можно изменить полярность волны на выходе ГИН?
7. Как можно изменить частоту повторения срабатывания ГИН?

6. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ КАСКАДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Ознакомиться с принципом работы, схемой замещения, устройством и особенностями работы многоступенчатого каскадного генератора постоянного напряжения.

6.1. Краткие сведения

Необходимость получения высокого постоянного напряжения диктуется потребностью испытания изоляции ряда элементов высоковольтного оборудования или использованием высоковольтных источников постоянного напряжения в качестве источника питания для ускорителей прямого действия. Например, при испытании изоляции высоковольтных синхронных машин в обязательном порядке используется метод испытания повышенным выпрямленным напряжением с измерением токов утечки. По изменению токов утечки при этих испытаниях можно судить о скорости старения изоляции и прогнозировать остаточный ресурс.

Одним из способов получения выпрямленного постоянного напряжения является включение последовательно нескольких однокаскадных схем удвоения напряжения, принцип действия которых был рассмотрен в лабораторной работе "Исследование работы схем умножения напряжения". Принципиальная электрическая схема трехступенчатого каскадного генератора приведена на рис. 6.1.

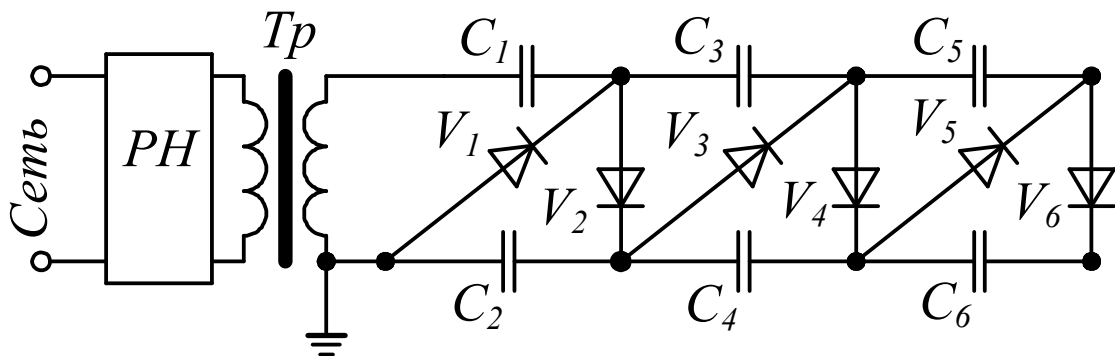


Рис. 6.1. Электрическая схема трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока

В течение четверти первого полупериода (при условии, что в первый полупериод напряжения на трансформаторе Tr имеет отрицательную полярность) заряжается емкость C_1 через вентиль V_1 до амплитудного значения напряжения U_m , выдаваемого трансформатором Tr . В следующую половину периода (поляр-

ность напряжения трансформатора Tr положительная, вентиль V_1 закрыт) заряжается емкость C_2 через вентиль V_2 . В пределе, как было показано в лабораторной работе "Исследование работы схем умножения напряжения", максимальное напряжение на C_2 может достигать $2U_m$.

В следующий полупериод (положительная полярность напряжения с питающего трансформатора Tr) открываются вентили V_1 и V_3 . Происходит заряд емкостей C_1 и C_3 . В пределе емкости C_1 и C_3 могут быть заряжены до U_m . Затем вентили V_1 , V_3 закрываются, и в следующий полупериод открываются вентили V_2 , V_4 , и заряжаются емкости C_2 , C_4 . На каждой емкости C_2 и C_4 максимальное напряжение может достигать $2U_m$. Напряжение V_4 в пределе может достигать $4U_m$.

В следующий полупериод (отрицательная полярность напряжения с питающего трансформатора Tr) открываются вентили V_1 , V_3 , V_5 . Происходит заряд емкостей C_1 , C_3 , C_5 . В пределе емкости C_1 , C_3 , C_5 могут быть заряжены до U_m . Затем вентили V_1 , V_3 , V_5 закрываются, и в следующий полупериод открываются вентили V_2 , V_4 , V_6 , и заряжаются емкости C_2 , C_4 , C_6 . На каждой емкости C_2 , C_4 , C_6 максимальное напряжение может достигать $2U_m$. В итоге напряжение V_6 в пределе может достигать $6U_m$.

Общее напряжение на выходе многоступенчатого каскадного генератора постоянного тока складывается из напряжений на емкостях с четными номерами: C_2 , C_4 , C_6 ... и в пределе стремится к значению, рассчитанному по формуле:

$$U = 2nU_m,$$

где n – количество ступеней; U_m – максимальное напряжение на выходе трансформатора Tr .

Форма напряжения на выходе трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока при подключении к сети приведена на рис. 6.2 (осциллограмма получена моделированием трехступенчатого каскадного генератора в среде MATLAB при частоте питающего напряжения 50 Гц, неограниченной мощности питающего трансформатора, $U_m=100$ В, идеальных вентилях и $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=1$ мкФ). На приведенной осциллограмме показано, что напряжение на выходе генератора устанавливается не мгновенно, а требуется значительное время, чтобы оно достигло своего теоретического предела $2nU_m$.

Однако такая ситуация может установиться при идеальных вентилях и при отсутствии нагрузки R_H . При наличии нагрузки R_H напряжение на выходе (V_6) не достигает своего теоретического максимума $2nU_m$, и наблюдаются пульсации выходного напряжения. Характер пульсаций приведен на рис. 6.3.

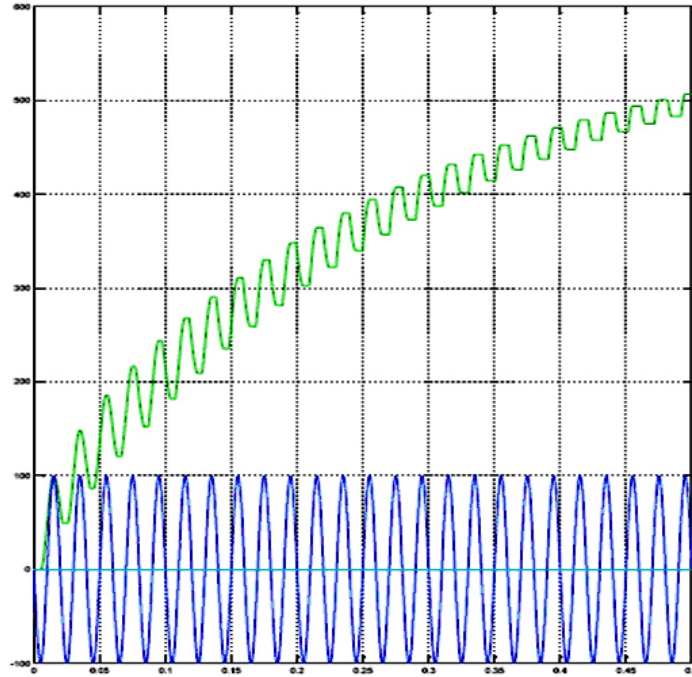


Рис. 6.2. Осциллограмма напряжения на выходе трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока (верхняя кривая) при подключении к сети, (нижняя осциллограмма – напряжение на выходе Tr)

Кривая напряжения на нагрузке имеет три характерных участка.

Участок 1: открыты вентили с нечетными номерами ($V_1, V_2, V_3 \dots$). Происходит подзарядка емкостей C_1, C_3, C_5, \dots от емкостей C_2, C_4, \dots и разряд последовательно соединенных емкостей C_2, C_4, C_6, \dots на нагрузку R_H (см. рис. 6.4).

Участок 2: все вентили закрыты. На участке 2 происходит разряд последовательно соединенных емкостей на нагрузку R_H (см. рис. 6.5). Следует отметить, что за период питающего напряжения такое состояние, когда все вентили закрыты, наблюдается дважды: при положительной полуволне питающего напряжения и при отрицательной.

Участок 3: открыты вентили с четными номерами ($V_2, V_4, V_6 \dots$). Происходит подзарядка емкостей C_2, C_4, C_6, \dots от емкостей C_1, C_3, C_5, \dots и разряд последовательно соединенных емкостей C_2, C_4, C_6, \dots на нагрузку R_H (см. рис. 6.6).

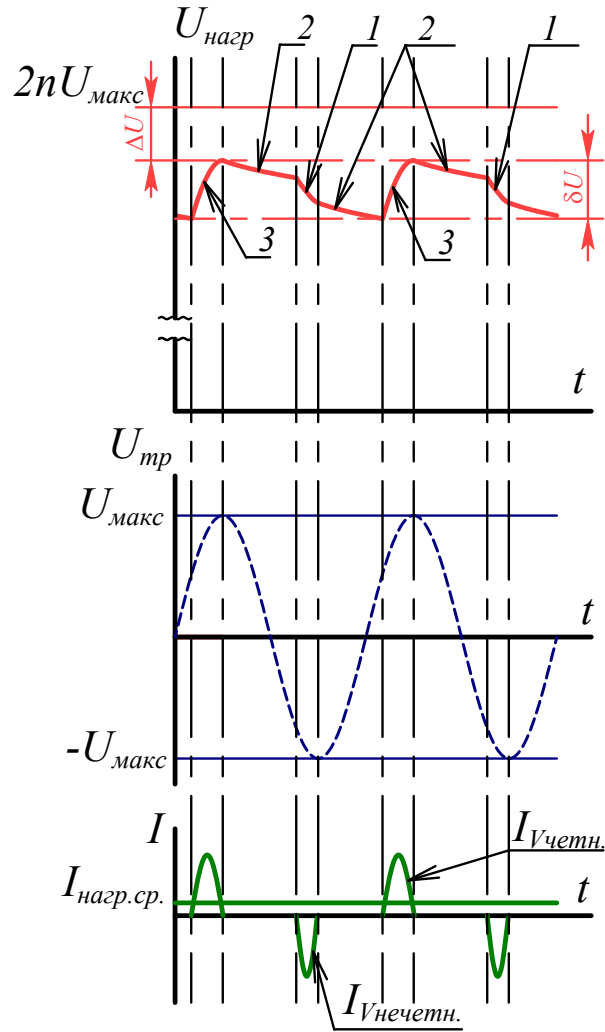


Рис. 6.3. Осциллограмма напряжения на выходе многоступенчатого каскадного генератора (верхняя кривая) при наличии нагрузки R_H

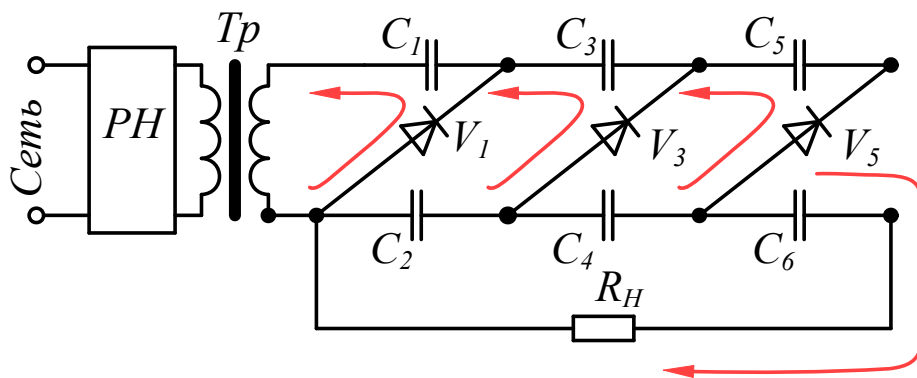


Рис. 6.4. Состояние элементов схемы каскадного генератора при открытых вентилях $V_1, V_3, V_5...$

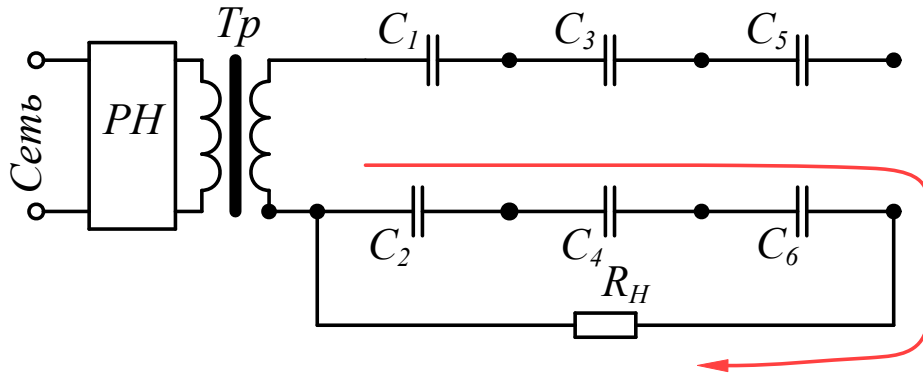


Рис. 6.5. Состояние элементов схемы каскадного генератора, когда все вентили закрыты

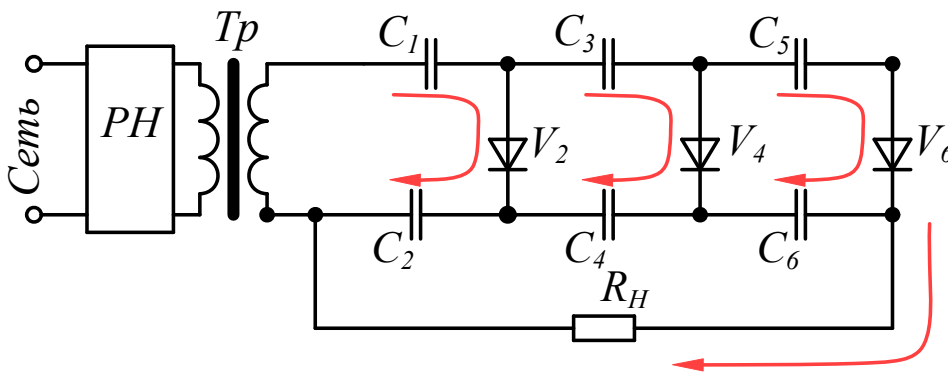


Рис. 6.6. Состояние элементов схемы каскадного генератора при открытых четных вентилях ($V_2, V_4, V_6 \dots$)

В простейшем случае, когда все емкости многоступенчатого каскадного генератора равны друг другу: $C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=C_6=\dots=C$, падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора ΔU и пульсация δU определяются по следующим формулам:

$$\Delta U = \frac{I_{\text{ср}}}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right), \quad (6.1)$$

$$\delta U = \frac{I_{\text{ср}}}{2fC} (n+1)n, \quad (6.2)$$

где n – количество ступеней, $I_{\text{ср}}$ – средний ток нагрузки, f – частота питающего напряжения, C – емкость ступени.

Из приведенных уравнений видно, что падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и пульсации прямопропорциональны среднему току нагрузки и существенно зависят от количества ступеней. Поэтому многоступенчатые каскадные генераторы постоянного тока по схеме рис. 6.1 применяются

для питания нагрузок малой мощности. Средний ток нагрузки обычно не превышает десятков миллиампер, а количество ступеней – 10. При напряжениях U_m порядка 100 кВ напряжение на нагрузке не превышает 2...3 МВ. В редких случаях достигают напряжения 5 МВ. Для уменьшения падения напряжения на генераторе и пульсаций используют многофазные схемы питания, увеличение частоты питающего напряжения, увеличение емкости C_1 по отношению к другим емкостям генератора.

Каскадные выпрямители на большие токи нагрузки (от десятков миллиампер до нескольких ампер) выполняются с питанием каждой ступени от отдельного трансформатора. На рис. 6.7 приведена схема многоступенчатого каскадного генератора постоянного тока с питанием каждой ступени от отдельного трансформатора и удвоением напряжения в каждой ступени.

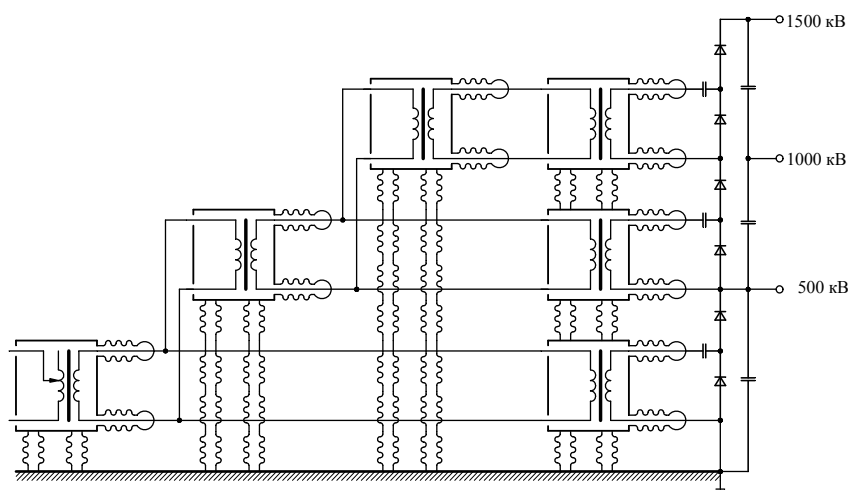


Рис. 6.7. Схема трехступенчатого каскадного генератора с питанием каждой ступени от отдельного трансформатора и удвоением напряжения на каждой ступени

На рис. 6.8 приведена схема с использованием мостовых схем выпрямления.

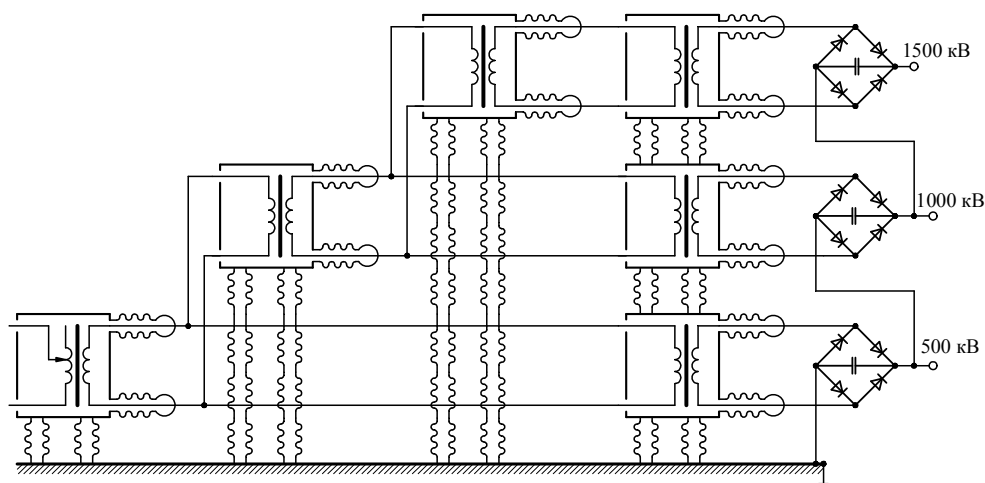


Рис. 6.8. Схема трехступенчатого каскадного генератора с питанием каждой ступени от отдельного трансформатора для получения токов нагрузки до единиц ампер

Схема содержит встроенные емкости C для сглаживания пульсаций. Прототип такой схемы впервые был предложен Горевым А. А. (см. Техника высоких напряжений/Под ред. М. В. Костенко. – М., Высшая школа, 1973. – 528 с).

Внешний вид генератора постоянного тока на основе каскадного генератора постоянного тока приведен на рис. 6.9.



Рис. 6.9. Общий вид многоступенчатого каскадного генератора постоянного тока для ускорителя заряженных частиц

Ускорители электронов с энергией 1–2 МэВ, созданные на основе каскадных генераторов постоянного тока и мощностью в несколько киловатт, могут служить генераторами рентгеновского тормозного излучения в промышленной дефектоскопии. Излучение возникает при взаимодействии электронного пучка с мишенью из тяжёлого металла, например, вольфрама. Малые размеры электронного пучка на мишени (единицы или доли миллиметров) позволяют получить рентгеновские снимки с высоким разрешением.

6.2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой, устройством и работой многоступенчатого каскадного генератора постоянного напряжения.

2. Собрать схему трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока без нагрузки.

3. Подключить генератор к питающей сети и исследовать с помощью осциллографа и делителя напряжения зависимость напряжения на ступенях генератора от соотношения значений емкостей ступеней генератора.

4. Собрать схему трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока с нагрузкой.

5. Подключить генератор к питающей сети и исследовать с помощью осциллографа и делителя напряжения зависимость напряжения на ступенях генератора от соотношения значений емкостей ступеней генератора и сопротивления нагрузки.

6. Определить падение напряжения на генераторе и пульсацию напряжения на нагрузке при различных значениях сопротивления нагрузки.

7. Проверить соответствие полученных результатов с теоретическими формулами, приведенными в описании.

6.3. Содержание отчета

1. Привести принципиальную схему трехступенчатого каскадного генератора постоянного тока, расшифровать все обозначения, приведенные на схеме; пояснить принцип работы генератора.

2. Привести осциллограммы напряжений на выходе генератора в режиме холостого хода и при наличии нагрузки.

3. По полученным осциллограммам определить падение напряжения на генераторе и пульсации напряжения на выходе. Сравнить экспериментальные данные с расчетными (6.1) и (6.2).

4. Привести осциллограммы тока нагрузки. По осциллограммам определить средний ток нагрузки.

5. Привести ответы на контрольные вопросы.

6.4. Контрольные вопросы

1. Почему для испытания изоляции генераторов промышленной частоты необходимо использовать постоянное напряжение?
2. Чем ограничивается выходное напряжение многоступенчатого каскадного генератора постоянного тока?
3. Какие параметры многоступенчатого каскадного генератора изменятся, если увеличить емкость каждой ступени в 2 раза?
4. Какие схемы используют для получения тока нагрузки многокаскадного выпрямителя от десятков миллиампер до единиц ампер?
5. Как частота питающего трансформатора влияет на пульсации выходного напряжения многоступенчатого каскадного генератора постоянного напряжения?
6. Как можно изменить полярность напряжения на выходе многоступенчатого каскадного генератора постоянного напряжения?
7. Как можно изменить глубину пульсаций на выходе многоступенчатого каскадного генератора постоянного напряжения?

7. КАЛИБРОВКА СИЛЬНОТОЧНОГО ШУНТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Цель работы

Ознакомиться с методикой калибровки сильноточного импульсного шунта.

7.1. Основные положения

Измерение импульсных токов представляет собой отдельную самостоятельную задачу. В настоящее время для нужд импульсной техники еще не освоено серийное производство шунтов, поэтому, как правило, для импульсных установок шунты разрабатываются индивидуально. Методов расчета амплитудно-частотных характеристик шунтов, позволяющих с приемлемой для практики точности рассчитать передаточную характеристику шунта, в настоящее время также не существует. Обычно параметры шунта оценивают при его разработке, а после изготовления производят калибровку, в результате которой определяется сопротивление шунта или масштабный коэффициент в тех диапазонах частот токов, которые предполагается измерять шунтом. Один из способов калибровки заключается в определении параметров шунта при установке его в колебательный контур, например, генератора импульсных токов.

Упрощенная схема замещения разрядной цепи ГИТ приведена на рис. 7.1. Емкость C включает в себя емкость всей конденсаторной батареи ГИТ, индуктивность L – общая индуктивность разрядного контура, сопротивление R – полное резистивное сопротивление контура, включая резистивное сопротивление шунта $R_{ш}$.

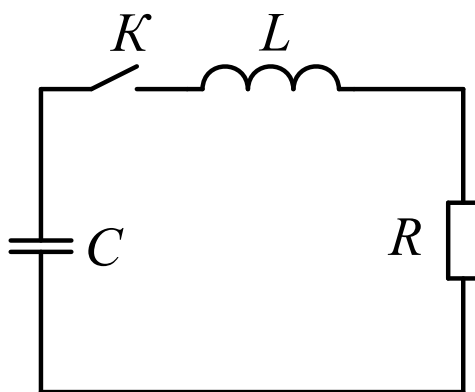


Рис. 7.1. Электрическая схема замещения генератора импульсных токов: C – эквивалентная емкость ГИТ; L – эквивалентная индуктивность разрядного контура ГИТ, R – эквивалентное сопротивление разрядного контура ГИТ

Дифференциальное уравнение, описывающее зависимость тока от времени для данных параметров элементов цепи C , L и R , имеет вид [1]

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0 \quad (7.1)$$

Соответствующее ему характеристическое уравнение

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0 \quad (7.2)$$

имеет корни

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (7.3)$$

где

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (7.4),$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ — резонансная частота.} \quad (7.5)$$

Возможны три варианта корней характеристического уравнения (2).

Случай 1. $\delta > \omega_0$, т. е. $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho$,

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ волновое или характеристическое сопротивление контура.

В этом случае ток имеет аperiodическую форму.

Случай 2. $\delta = \omega_0$, т. е. $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho$.

Это критический случай. Ток имеет аperiodическую форму.

Случай 3. $\delta < \omega_0$, т. е. $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho$.

В этом случае ток имеет колебательную форму. Корни характеристического уравнения комплексные и сопряженные

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}, \quad (7.6)$$

где $\omega_{св}$ — угловая частота свободных колебаний

$$\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (7.7)$$

Отсюда

$$\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega_{св}^2}. \quad (7.8)$$

Величину $\omega_{св}$ называют угловой частотой свободных колебаний или собственной частотой колебаний в цепи R, L, C . Период свободных колебаний определяется как

$$T_{св} = \frac{2\pi}{\omega_{св}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (7.9)$$

Ток в цепи имеет вид

$$i = \frac{U}{\omega_{св} L} \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega_{св} \cdot t), \quad (7.10)$$

где U – напряжение заряда емкости C .

Введем обозначения:

$$\frac{U}{\omega_{св} \times L} = I_{max},$$

и выразим $\omega_{св}$ через $T_{св}$. Получим:

$$i = I_{max} \times e^{-\delta t} \times \sin\left(\frac{2\pi}{T_{св}} \times t\right). \quad (7.11)$$

Графически эта зависимость тока от времени представлена на рис. 7.2.

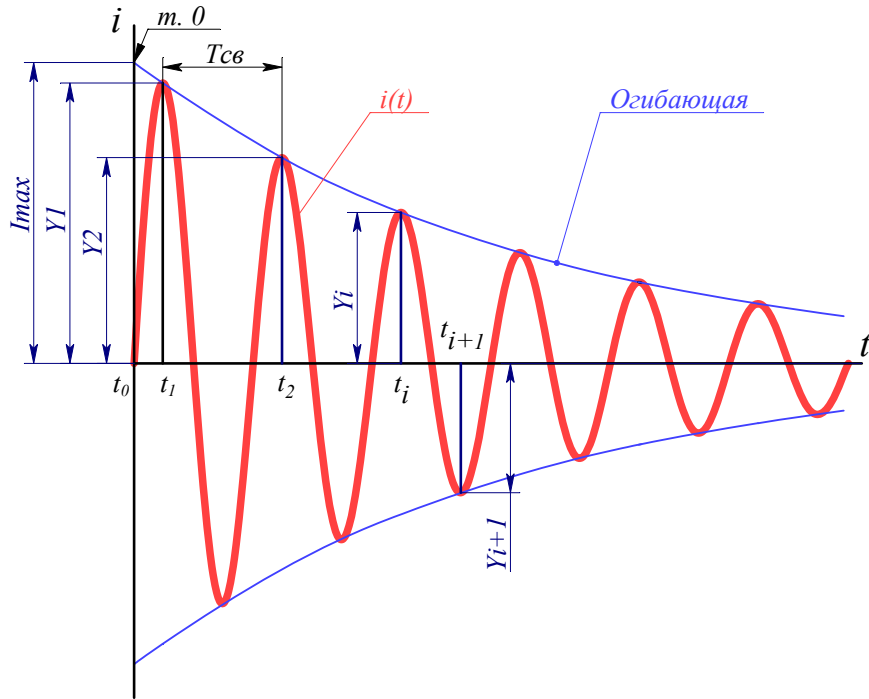


Рис. 7.2. Зависимость тока от времени в цепи RLC при $R < 2\rho$

Выражение (7.11) показывает, что при включении заряженной до напряжения U емкости C на контур L, R , в цепи возникают затухающие гармонические колебания. Огибающая кривой тока имеет вид

$$i_{oz} = \pm \frac{U}{\omega_{св} L} \cdot e^{-\delta t} \quad (7.12)$$

Колебания возникают вследствие периодического преобразования энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно. Потери энергии в сопротивлении приводят к затуханию колебаний.

При $t = \frac{1}{\delta}$ ордината огибающей в $e = 2,718$ раза меньше начального значения огибающей. Поэтому величину

$$\tau = \frac{1}{\delta} = 2 \frac{L}{R}$$

называют постоянной времени колебательного контура и обычно обозначают греческой буквой τ , которая определяет промежуток времени, в течение которого ордината экспоненциальной функции уменьшается в $e = 2,718$ раз.

Из уравнения (7.8) видно, что угловая частота свободных колебаний $\omega_{св}$ всегда меньше резонансной частоты ω_0 . Чем меньше δ по сравнению с ω_0 , тем медленнее затухает колебательный процесс и тем больше частота свобод-

ных колебаний для данной цепи приближается к резонансной частоте ω_0 . В пределе при $\delta = 0$ $\omega_{cs} = \omega_0$ колебания не затухают.

О быстроте затухания колебательного процесса судят по так называемому декременту затухания колебаний. Классическое определение: декрементом затухания колебаний называется (обозначения согласно рис. 7.2)

$$\Delta = \frac{Y_1}{Y_2},$$

где Y_1 и Y_2 определены при времени t_1 и t_2 , причем $t_2 - t_1 = T_{cs}$.

Для экспоненциальной функции, которой является огибающая кривой колебательного процесса, в общем случае можно записать уравнение

$$Y(t) = e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где τ – постоянная времени.

Для определения τ по кривой колебательного процесса рассмотрим выражения

$$Y_1 = e^{-\frac{t_1}{\tau}},$$

$$Y_2 = e^{-\frac{t_2}{\tau}}.$$

Отсюда

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{e^{-\frac{t_2}{\tau}}}.$$

Прологарифмируем это уравнение. Получим

$$\ln \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{t_2 - t_1}{\tau},$$

где $\ln \frac{Y_1}{Y_2}$ называется логарифмическим декрементом затухания θ .

$$\theta = \ln \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{T_{cs}}{\tau} = \frac{2\pi R}{2L\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} = \frac{\pi R}{\sqrt{\rho^2 - \frac{1}{4}R^2}},$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление контура.

Отсюда

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Y_1}{Y_2}} \quad (7.13).$$

Для рассматриваемого колебательного контура $\tau = \frac{2L}{R}$, при $t_2 - t_1 = T_{св}$, получим

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Y_1}{Y_2}} = \frac{T_{св}}{\ln \frac{Y_1}{Y_2}}. \quad (7.14)$$

Когда в цепи ГИТ не установлен специальный резистор, то ток ограничивается только сопротивлением проводов и сопротивлением искры разрядника. В этом случае в большинстве практических случаев наблюдается выполнение условия $\delta < \omega_0$, т. е. $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho$. В этом случае с приемлемой для практики точностью можно принять, что $\omega_{св} = \omega_0$. Тогда общая индуктивность контура определится из уравнения

$$T_{св} \approx T_0 = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (7.15)$$

где T_0 – период колебаний при $\omega_{св} = \omega_0$.

Отсюда

$$L = \frac{T_{св}^2}{4\pi^2 C}. \quad (7.16)$$

Оценим погрешность, возникающую при принятом в (7.15) допущении $T_{св} \approx T_0$.

$$\Delta T_{св} = \frac{T_{св} - T_0}{T_{св}} \times 100\% = \left(1 - \frac{T_0}{T_{св}}\right) \times 100\%, \quad (7.17)$$

где $T_{св} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}$, $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Подставим $T_{св}$ и T_0 в (7.17) и обозначим $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$, получим

$$\Delta T_{св} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{4\rho^2}}\right) \times 100\%. \quad (7.18)$$

В табл. 7.1 приведена зависимость погрешности $\Delta T_{св}$ от соотношения $\frac{R}{\rho}$, найденные по формуле (7.18).

Таблица 7.1.

Зависимость относительной погрешности $\Delta T_{св}$ от $\frac{R}{\rho}$

$\frac{R}{\rho}$	$\Delta T_{св}, \%$
1	13,4
0,8	8,4
0,5	3,2
0,2	0,50
0,1	0,125
0,08	0,080
0,05	
0,01	0,00125

Погрешность определения значения L по формуле (7.16) зависит во второй степени от относительной погрешности в определении $T_{св}$, приведенной в табл. 7.1, причем значение индуктивности L по данной оценке получается завышенным относительно реального значения.

Таким образом, определив L можно определить значение характеристического сопротивления ρ данного контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Зная зарядное напряжение U емкости C , можно определить начальное значение тока I_{max} (значение тока, которое было бы в момент времени $t=0$)

$$I_{max} = \frac{U}{\rho}, \quad (7.19)$$

где I_{max} – максимально возможный ток в контуре (ток при $t = 0$, точка 0 на рис. 7.2), U – напряжение заряда емкости C .

Активное сопротивление контура R определится из уравнения (7.13) при $\tau = \frac{2L}{R}$, $t_2 - t_1 = T_{св}$, если положить, что $\omega_{св} = \omega_0$:

$$R = \frac{2 \times L \times \ln \frac{Y_1}{Y_2}}{T_{св}}. \quad (7.20)$$

Далее, зная $U_{ш\max}$, полученное с шунта (см. рис. 7.2), и I_{\max} , вычисленное по (7.19), можем найти значение сопротивления шунта:

$$R_{ш} = \frac{U_{ш\max}}{I_{\max}}. \quad (7.21)$$

где $U_{ш\max}$ – максимальное напряжение на шунте (точка 0 на рис. 7.2), I_{\max} – максимально возможный ток в контуре (ток при $t = 0$, точка 0 на рис. 7.2).

Для правильного определения напряжения на шунте необходимо учитывать аттенюаторы, которые стоят в измерительной цепи от шунта до осциллографа. Если аттенюаторов нет, то $U_{ш\max} = U_{осц\max}$, если аттенюаторы есть, $U_{ш\max} = K \times U_{осц\max}$, где K – суммарный коэффициент ослабления всех аттенюаторов в измерительной цепи шунта.

Максимальное значение напряжения на осциллограмме (в момент времени $t=0$, точка 0 на рис. 7.2) определим исходя из уравнения огибающей

$$U(t)_{осц} = U_{осц\max} \times e^{-\delta t}. \quad (7.22)$$

Отсюда

$$U_{осц\max} = \frac{U(t)_{осц}}{e^{-\delta t}} = U(t)_{осц} e^{\delta t}, \quad (7.23)$$

где t время момента первого максимума $t = \frac{T_{св}}{4}$.

$$U_{ш\max} = K \times U_{осц\max}. \quad (7.24)$$

где K – коэффициент ослабления аттенюатора.

При обработке осциллограмм удобно пользоваться так называемым масштабным коэффициентом по току, который можно обозначить как K_{MI} .

$$I_{конт} = U_{осц} \times K_{MI}, \quad (7.25)$$

где $I_{конт}$ – ток в контуре, $U_{осц}$ – напряжение на осциллографе, K_{MI} – масштабный коэффициент по току.

$$K_{MI} = \frac{I_{\max}}{U_{осц\max} \times K},$$

где I_{\max} – максимальный ток в контуре при $t=0$, определенный по формуле (7.19), $U_{\text{осци}\max}$ – максимальное напряжение на осциллограмме при $t=0$, определенное по формуле (7.23), K – коэффициент ослабления аттенюатора.

Предварительную оценку логарифмического декремента затухания можно сделать по осциллограмме тока. На рис. 7.3 представлен график относительного изменения амплитуд кривой тока в зависимости от логарифмического декремента затухания (соотношения активного R и характеристического ρ сопротивлений контура).

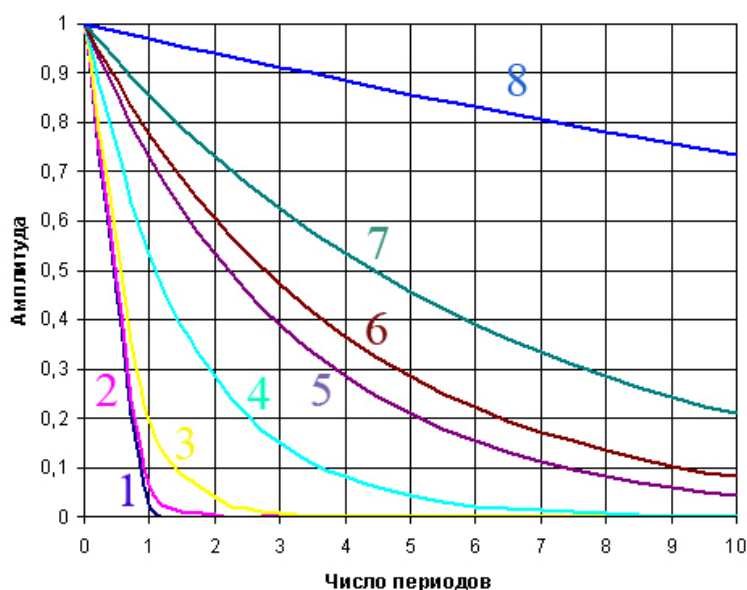


Рис. 7.3. Относительное изменение амплитуд кривой тока в зависимости от логарифмического декремента затухания (соотношения активного R и характеристического ρ сопротивлений контура): 1 – $\frac{R}{\rho}=1$ ($\theta=3,62$); 2 – $\frac{R}{\rho}=0,8$ ($\theta=2,74$);

3 – $\frac{R}{\rho}=0,5$ ($\theta=1,62$); 4 – $\frac{R}{\rho}=0,2$ ($\theta=0,63$); 5 – $\frac{R}{\rho}=0,1$ ($\theta=0,314$); 6 – $\frac{R}{\rho}=0,08$ ($\theta=0,251$); 7 – $\frac{R}{\rho}=0,05$ ($\theta=0,157$); 8 – $\frac{R}{\rho}=0,01$ ($\theta=0,031$)

На рис. 7.4 представлена схема экспериментальной установки для калибровки шунта.

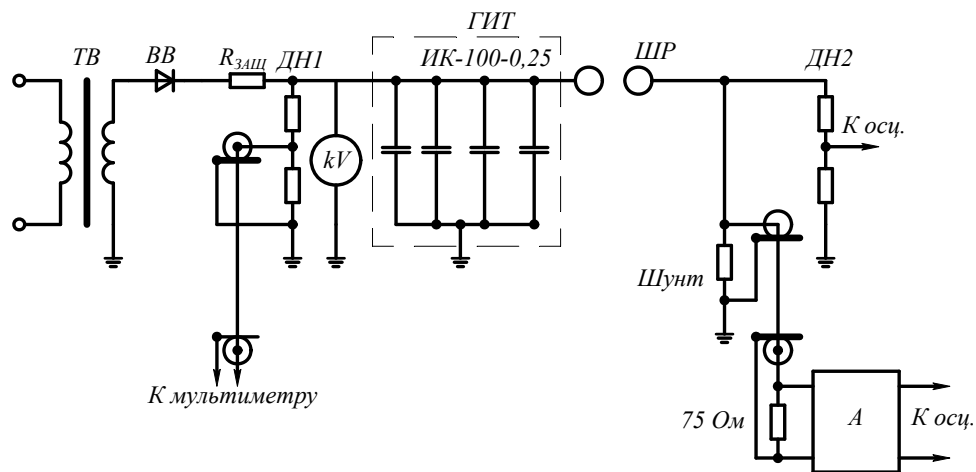


Рис. 7.4. Схема экспериментальной установки: ТВ – трансформатор высоковольтный, ВВ – вентиль высоковольтный, $R_{защ}$ – ДН1, ДН2 – делители напряжения, kV – киловольтметр, ГИТ – конденсаторная батарея генератора импульсов тока, ШР – шаровой разрядник, А – аттенюатор

Внешний вид генератора импульсов тока приведен на рис. 7.5.

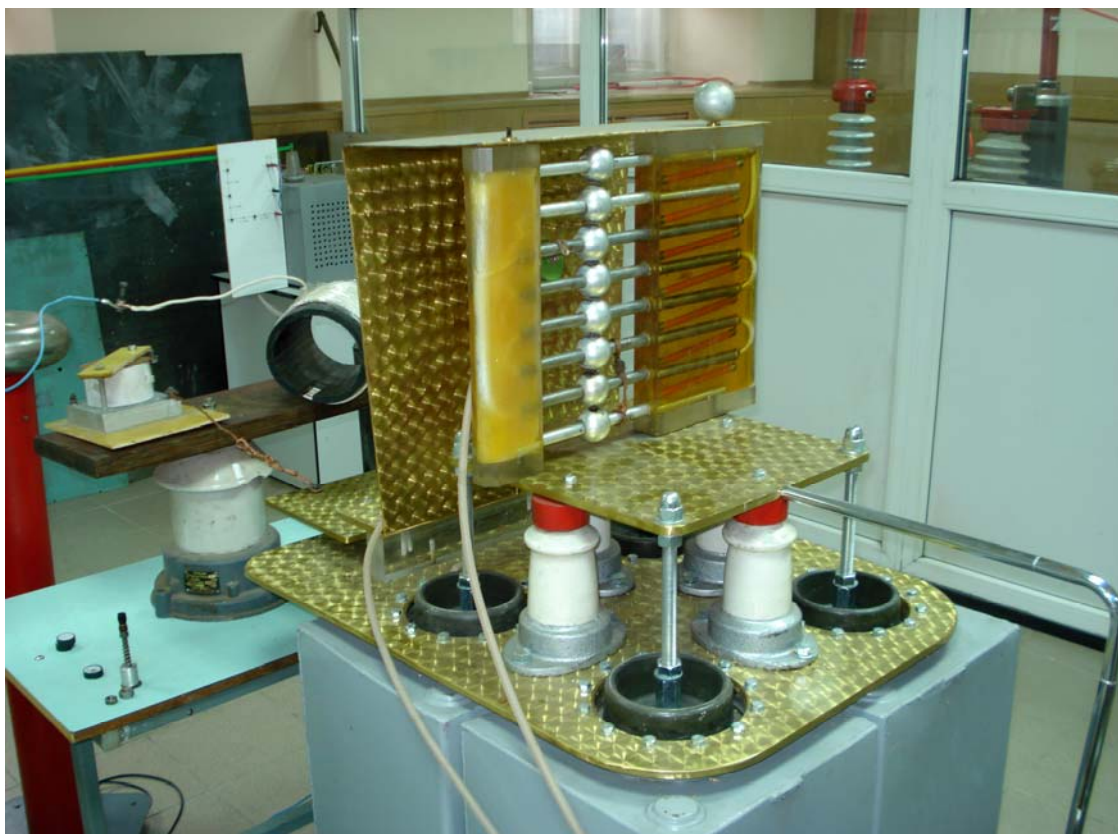


Рис. 7.5. Внешний вид генератора импульсов тока

7.2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой, устройством и работой генератора импульсов тока.
2. Собрать схему для калибровки шунта.
3. Подключить генератор к питающей сети и исследовать с помощью осциллографа и шунта зависимость тока от параметров цепи генератора.
4. По полученным осциллограммам рассчитать параметры разрядного контура генератора.
5. Рассчитать параметры шунта и построить градуировочную кривую: зависимость напряжения на шунте от частоты и амплитуды протекающего тока.
6. Оценить погрешность измерений тока с помощью откалиброванного шунта.

7.3. Содержание отчета

1. Привести описание методики и принципиальную схему калибровки шунта.
2. Привести осциллограммы напряжений на выходе шунта в различных режимах.
3. По полученным осциллограммам определить параметры разрядного контура генератора импульсных токов.
4. Определить параметры шунта.
5. Привести ответы на контрольные вопросы.

7.4. Контрольные вопросы

1. Для каких целей используются генераторы импульсов тока в электроэнергетике?
2. Чем ограничивается ток генератора?
3. Какие параметры генератора тока нужно изменить, чтобы увеличить ток генератора в 2 раза?
4. Какие требования по индуктивности предъявляются к шунтам при измерении импульсов тока?
5. Какие требования по нагреву предъявляются к шунтам при измерении импульсов тока?
6. Как влияет собственная индуктивность шунта на параметры сигнала, снимаемого с шунта?
7. Какие конструктивные исполнения шунтов существуют?

Приложения

Приложение 1. Таблицы разрядных напряжений шаровых промежутков

Таблица III. Разрядные напряжения шаровых промежутков (при импульсах 50 % разрядные напряжения), $kV_{\text{макс}}$ 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)

Приложение 2. Принцип работы однокаскадной схемы удвоения напряжения

Рассмотрим подробно, как происходит удвоение напряжения в однокаскадном генераторе, схема которого приведена на рис. П2.1. Для объяснения работы схемы примем некоторые упрощения: трансформатор бесконечной мощности выдает напряжение $U_T = U_m \sin \omega t$, емкости $C_1 = C_2$. Вентиль V_1 открыт, когда потенциал точки 2 меньше нуля, а вентиль V_2 открыт, когда потенциал точки 2 больше, чем потенциал точки 3. Емкость C_1 заряжается от трансформатора Тр до максимального значения U_m , когда открывается вентиль V_1 . Емкость C_2 , которую можно назвать, как емкость фильтра, заряжается, когда открывается вентиль V_2 .

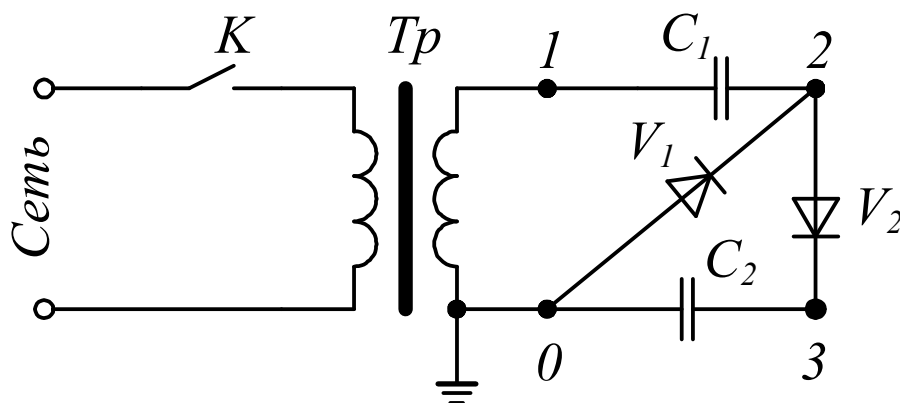


Рис. П2.1. Принципиальная схема однокаскадного генератора удвоенного напряжения

Рассмотрение работы схемы начнем с подключения трансформатора Тр ключом К в момент t_0 согласно рис. П2.2.

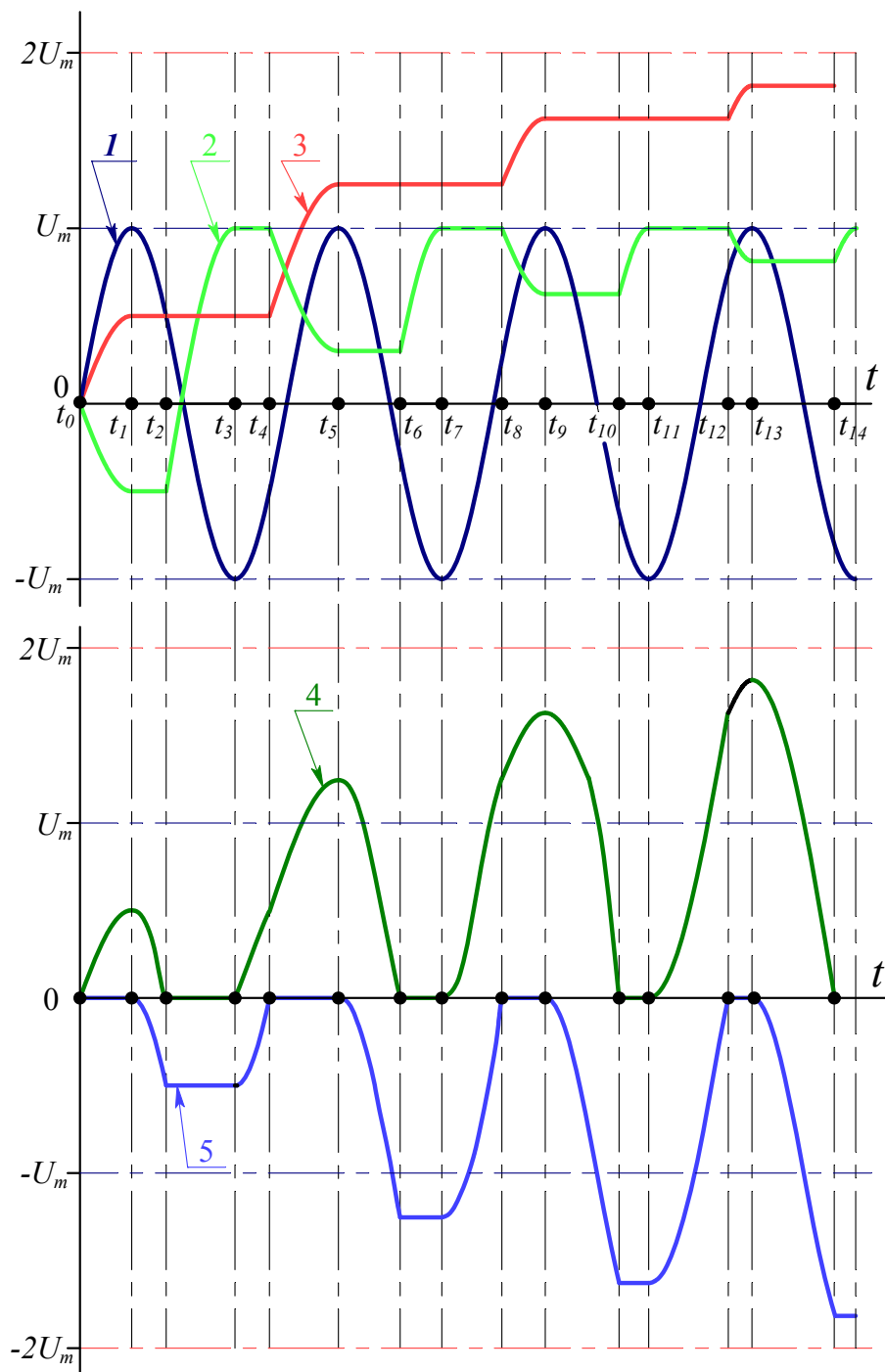


Рис. П2.2. Напряжения на элементах схемы однокаскадного генератора удвоения напряжения: 1 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора Tr , 2 – напряжение на емкости C_1 , 3 – напряжение на емкости C_2 , 4 – напряжение на вентиле V_1 , 5 – напряжение на вентиле V_2

Допустим, что подключение (замыкание ключа К согласно рис. П2.1) произошло в момент, когда напряжение на трансформаторе Тр начинает подниматься от 0 к U_m . В момент t_{0+} (индекс + обозначает, что момент времени не точно t_0 , а немного больше, чем t_0) открывается вентиль V_2 , что соответствует схеме замещения рис. П2.3, а (при открытом вентиле V_2 разность потенциалов между точками 2 и 3 равна 0). Ток, создаваемый трансформатором, протекает через последовательно включенные емкости C_1 и C_2 , заряжая их до одинакового напряжения, т. к. $C_1=C_2$, напряжение трансформатора делится между равными емкостями C_1 и C_2 . Этот процесс продолжается до достижения напряжения на трансформаторе U_m (момент времени t_1 согласно рис. П2.2).

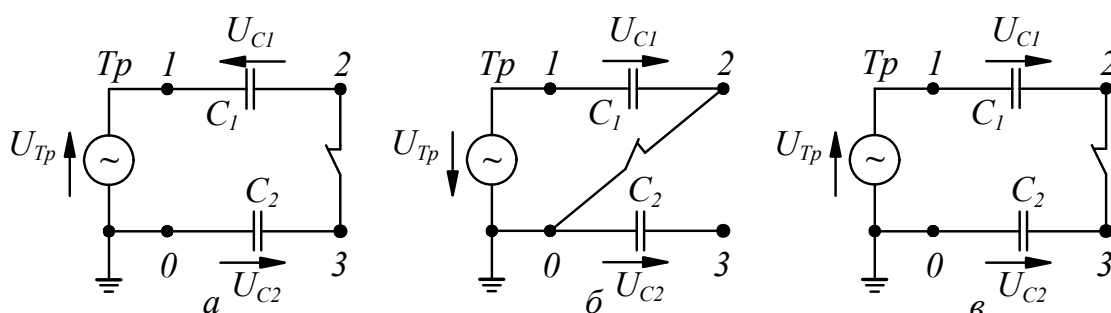


Рис. П2.3. Схемы замещения однокаскадного генератора в разные моменты времени: а) $t_{0+} \dots t_1$; б) $t_2+ \dots t_3, t_6+ \dots t_7, \dots$ в) $t_4+ \dots t_5, t_8+ \dots t_9 \dots$

Как только напряжение трансформатора Тр начнет переходить через максимум U_m (момент времени t_{1+}), вентиль V_2 закрывается, а на емкостях C_1 и C_2 напряжение остается постоянным и равным $0,5U_m$. После перехода напряжения трансформатора Тр через максимум потенциал точки 3 равен $0,5U_m$, а потенциал точки 2 понижается по мере снижения напряжения на трансформаторе по синусоидальному закону, задавая соответствующий потенциал точки 1.

В момент t_2 потенциал точки 1 становится равным напряжению, до которого заряжена емкость C_1 . В момент t_{2+} вентиль V_1 открывается и начинается заряд емкости C_1 до напряжения U_m согласно схеме замещения рис. П2.3, б. В момент времени t_3 напряжение на трансформаторе Тр переходит через отрицательный максимум, в момент t_3 емкость C_1 заряжена до напряжения U_m , а вентиль V_1 закрывается.

Пока вентиль V_1 был открыт, потенциал точки 2 был равен нулю. Как только вентиль V_1 закрывается, потенциал точки 2 начинает подниматься и задается суммой напряжений емкости C_1 и трансформатора Тр. Когда напряжение на трансформаторе вместе с напряжением на емкости C_1 будет равно потенциалу точки 3, откроется вентиль V_2 , это наступит в момент t_{4+} . Схема замещения для этого момента представлена на рис. П2.3, в. Трансформатор Тр в период открытого вентиля V_2 будет создавать ток, который разряжает емкость C_1 и заряжает емкость C_2 . Ток в цепи (рис. П2.3, в) будет протекать до тех пор, пока напряжение

на трансформаторе Tr не достигнет положительного максимума (момент времени t_5). В общем виде напряжение на C_2 во время открытого вентиля V_2 имеет вид:

$$U_{C_2} = U_{Tr} + U_{C_1}$$

Изменения напряжения на емкости C_1 от момента открытия вентиля V_2 (t_{4+}) до момента его закрытия (t_5) и на емкости C_2 за этот же промежуток времени равны между собой, поэтому для промежутка времени от t_{4+} до t_5 можно записать:

$$U_{Tr} + U_{C_1} - \Delta U_{C_1} = U_{C_2} + \Delta U_{C_2}.$$

Отсюда, при $\Delta U_{C_1} = \Delta U_{C_2} = \Delta U_C$ получим

$$\Delta U_C = \frac{U_{Tr} + U_{C_1} - U_{C_2}}{2} = \frac{U_m + U_m - 0,5U_m}{2} = \frac{2U_m - 0,5U_m}{2} = 0,75U_m$$

Таким образом, в момент t_5 напряжение на емкости C_2 будет равно:

$$U_{C_2}(t_5) = U_{C_2}(t_1) + \Delta U_C(t_4...t_5) = 0,5U_m + 0,75U_m = 1,25U_m.$$

Напряжение на емкости C_1 в момент времени t_5 будет $0,25U_m$.

Дальнейшее изменение напряжения на трансформаторе Tr приведет к тому, что в момент t_6 потенциал точки 1 становится равным напряжению, до которого заряжена емкость C_1 ($0,25U_m$). В момент t_{6+} вентиль V_1 открывается и начинается заряд емкости C_1 до напряжения U_m согласно схеме замещения рис. П2.3, б. В момент времени t_7 напряжение на трансформаторе Tr переходит через отрицательный максимум, в этот момент емкость C_1 заряжена до напряжения U_m , вентиль V_1 закрывается.

В момент t_8 , когда напряжение на трансформаторе вместе с напряжением на емкости C_1 будет равно потенциалу точки 3, откроется вентиль V_2 . Схема замещения для этого момента представлена на рис. П2.3, в. Трансформатор Tr в период открытого вентиля V_2 будет создавать ток, который разряжает емкость C_1 и заряжает емкость C_2 . Ток в цепи (рис. П2.3, в) будет протекать до тех пор, пока напряжение на трансформаторе Tr не достигнет положительного максимума. Таким образом, разность напряжений на C_2 от момента t_5 до t_7 определится по формуле:

$$\Delta U_C = \frac{U_{Tr} + U_{C_1} - U_{C_2}}{2} = \frac{2U_m - 1,25U_m}{2} = 0,375U_m.$$

Напряжение на емкости C_2 в момент t_7 определится по формуле:

$$U_{C_2}(t_7) = U_{C_2}(t_5) + \Delta U_C(t_5...t_7) = 1,25U_m + 0,375U_m = 1,625U_m.$$

Соответственно, напряжение на емкости C_1 в момент времени t_7 будет равно $0,625U_m$.

Далее цикл открытия и закрытия вентилей V_1 и V_2 повторяется. Емкость C_1 при каждой отрицательной полуволне напряжения на трансформаторе дозарядается до U_m . Емкость C_2 заряжается от трансформатора Тр и емкости C_1 при положительной полуволне напряжения трансформатора Тр. В общем виде, начиная со второй положительной полуволны, напряжения трансформатора Тр напряжение на емкости C_2 увеличивается на значение, которое можно найти по формуле:

$$\Delta U_C = \frac{0,75}{2 \times 2^{(n-3)}} U_m, \quad (\text{П.2.1})$$

где $n=2, 3, 4, \dots$ – номер по порядку положительной полуволны напряжения трансформатора от момента его включения t_0 .

Напряжение на емкости C_2 к моменту положительного максимума напряжения на трансформаторе Тр, начиная с третьей полуволны напряжения, можно найти по формуле:

$$U_{C_2}(n) = \left(0,5 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{0,75}{2 \times 2^{(n-3)}} \right) U_m \quad (\text{П.2.2})$$

В пределе напряжение на емкости C_2 становится равным $2U_m$, на емкости $C_1 - U_m$, потенциал в точке 2 изменяется от нуля до $2U_m$.

Такая картина наблюдается, если нет нагрузки R , которая подключается параллельно конденсатору C_2 . При наличии нагрузки R емкость C_2 постоянно разряжается на нее, поэтому напряжение на C_2 при закрытом вентиле V_2 не остается постоянным, а снижается с постоянной времени $\tau = RC_2$. Целесообразно иметь постоянную времени такой, чтобы в течение полупериода питающего напряжения спад напряжения на C_2 был бы не более 10...20 %. В противном случае емкость C_2 будет разряжаться на сопротивление R в течение промежутка времени $t_1 \dots t_4$ настолько, что при этом напряжение на выходе генератора может оказаться незначительно больше U_m , а при $\tau = RC_2 < 0,5T$ (T – период колебаний питающего напряжения) будет меньше U_m . Форма напряжения на элементах схемы при наличии нагрузки R будет изменяться так, как показано на рис. П4.

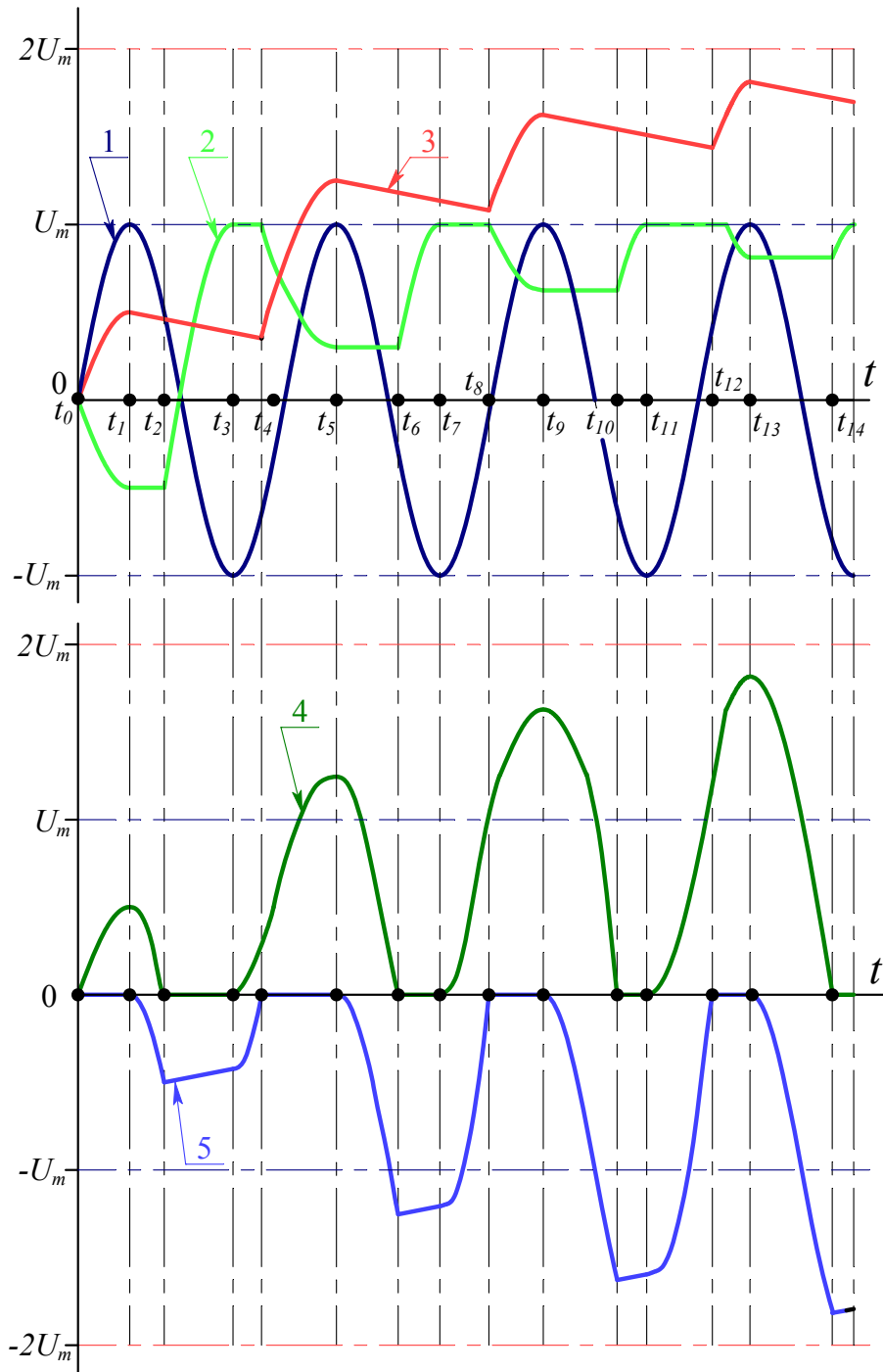


Рис. П2.4. Напряжения на элементах схемы однокаскадного генератора удвоения напряжения при наличии нагрузки R : 1 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора Tr , 2 – напряжение на емкости C_1 , 3 – напряжение на емкости C_2 , 4 – напряжение на вентиле V_1 , 5 – напряжение на вентиле V_2

Рассмотрим процессы в схеме с нагрузкой R более подробно. Считаем, что подключение (замыкание ключа K согласно рис. П2.1) произошло в тот же момент, как и в случае без R , т. е. когда напряжение на трансформаторе Tr начинает подниматься от 0 к U_m . В момент t_{0+} открывается вентиль V_2 , что соответствует схеме замещения рис. П5, а. Ток, создаваемый трансформатором, протекает через последовательно включенные емкость C_1 и цепочку из параллельно включенных RC_2 , заряжая емкости C_1 и C_2 примерно до одинакового напряжения, поскольку $C_1=C_2$, а сопротивление R практически не влияет на процесс распределения напряжения из-за $\tau = RC_2$ значительно большего, чем период колебаний питающего напряжения. Этот процесс продолжается до достижения напряжения на трансформаторе U_m (момент времени t_1 согласно рис. П2.5).

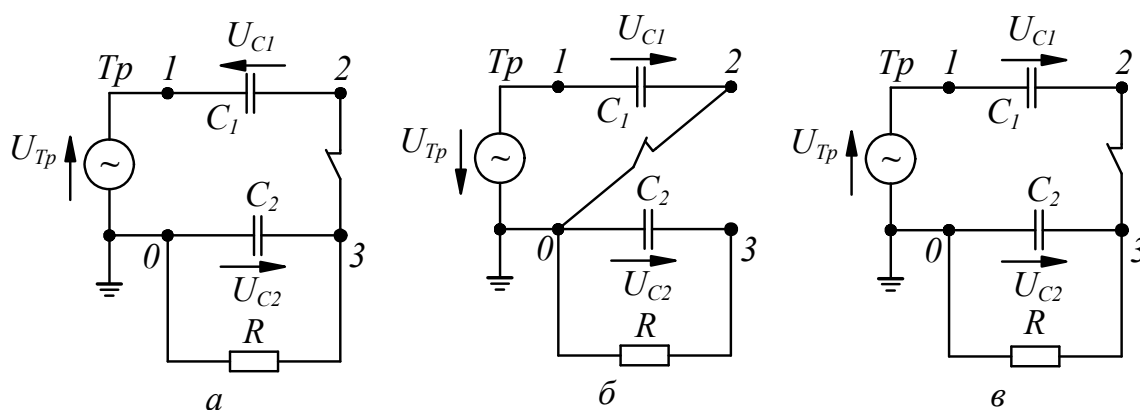


Рис. П2.5. Схемы замещения однокаскадного генератора при наличии нагрузки R в разные моменты времени: а) $t_{0+...t_1}$; б) $t_{2+...t_3}$, $t_{6+...t_7}$, ... в) $t_{4+...t_5}$, $t_{8+...t_9}$...

Как только напряжение трансформатора Tr начнет переходить через максимум U_m (момент времени t_{1+}), вентиль V_2 закрывается, напряжение на емкости C_1 остается постоянным, а на емкости C_2 уменьшается с постоянной времени $\tau = RC_2$. Потенциал точки 2 понижается по мере снижения напряжения на трансформаторе по синусоидальному закону, задавая соответствующий потенциал точки 1.

В момент t_2 потенциал точки 1 становится равным напряжению, до которого заряжена емкость C_1 , и в момент t_{2+} вентиль V_1 открывается, и начинается заряд емкости C_1 до напряжения U_m согласно схеме замещения рис. П2.5, б. В момент времени t_3 напряжение на трансформаторе Tr переходит через отрицательный максимум, в этот момент емкость C_1 заряжена до напряжения U_m , а вентиль V_1 закрывается.

Пока вентиль V_1 был открыт, потенциал точки 2 был равен нулю. Как только вентиль V_1 закрывается, потенциал точки 2 начинает подниматься и задается суммой напряжений емкости C_1 и трансформатора Tr . Напряжение в точке 3 понижается по экспоненте в соответствии с $\tau = RC_2$. Когда напряжение на

трансформаторе вместе с напряжением на емкости C_1 будет равно потенциалу точки 3, откроется клапан V_2 , это наступит в момент t_{4+} . Схема замещения для этого момента представлена на рис. П2.5, в. Таким образом, за промежуток времени $t_1 \dots t_4$ напряжение на емкости C_2 снизится на $\delta U_{C_2}(t_2 \dots t_4)$. Следует отметить, что при наличии нагрузки R промежуток времени $t_1 \dots t_4$, в течение которого клапан V_2 закрыт, меньше, чем без нагрузки R . Трансформатор Тр в период открытого клапана V_2 будет создавать ток, который разряжает емкость C_1 и заряжает емкость C_2 . Ток через клапан V_2 (рис. П2.5, в) будет протекать до тех пор, пока напряжение на трансформаторе Тр не достигнет положительного максимума (момент времени t_5). В общем виде напряжение на C_2 в момент времени t_4 (в момент открытия клапана V_2) при наличии нагрузки R будет на $\delta U_{C_2}(t_2 \dots t_4) = \delta U_{C_2}$ меньше, чем в случае холостого хода и будет иметь значение:

$$U_{C_2}(t_4) = \frac{U_m}{2} - \delta U_{C_2}.$$

Изменения напряжения на емкости C_1 от момента открытия клапана V_2 (t_{4+}) до момента его закрытия (t_5) и на емкости C_2 за этот же промежуток времени равны между собой, поэтому для промежутка времени от t_{4+} до t_5 можно записать:

$$U_{\text{Тр}} + U_{C_1} - \Delta U_{C_1} = U_{C_2} + \Delta U_{C_2}.$$

Отсюда, при $\Delta U_{C_1} = \Delta U_{C_2} = \Delta U_C$ получим

$$\Delta U_C = \frac{U_{\text{тр}} + U_{C_1} - U_{C_2}}{2} = \frac{U_m + U_m - 0,5U_m + \delta U_{C_2}}{2} = 0,75U_m + 0,5\delta U_{C_2}.$$

Таким образом, в момент t_5 напряжение на емкости C_2 будет равно:

$$\begin{aligned} U_{C_2}(t_5) &= U_{C_2}(t_4) + \Delta U_C(t_4 \dots t_5) = 0,5U_m - \delta U_{C_2} + 0,75U_m + 0,5\delta U_{C_2} = \\ &= 1,25U_m - 0,5\delta U_{C_2}. \end{aligned}$$

В пределе δU_{C_2} может быть равно $0,5U_m$, при этом напряжение $U_{C_2}(t_5)$ на емкости C_2 будет U_m .

Напряжение на емкости C_1 в момент времени t_5 будет:

$$U_{C_1}(t_5) = U_m - 0,75U_m - 0,5\delta U_{C_2} = 0,25U_m - 0,5\delta U_{C_2}.$$

Дальнейшее изменение напряжения на трансформаторе Тр приведет к тому, что в момент t_6 , потенциал точки 1 становится равным напряжению, до ко-

того заряжена емкость C_1 ($0,25U_m - 0,5\delta U_{C_2}$). В момент t_{6+} вентиль V_1 открывается и начинается заряд емкости C_1 до напряжения U_m согласно схеме замещения рис. П5, б. В момент времени t_7 напряжение на трансформаторе Тр переходит через отрицательный максимум, в этот момент емкость C_1 заряжена до напряжения U_m , а вентиль V_1 закрывается.

В момент t_8 , когда напряжение на трансформаторе вместе с напряжением на емкости C_1 будет равно потенциалу точки 3, откроется вентиль V_2 . Схема замещения для этого момента представлена на рис. П2.3, в. Трансформатор Тр в период открытого вентиля V_2 будет создавать ток, который разряжает емкость C_1 и заряжает емкость C_2 . Ток в цепи (рис. П2.3, в) будет протекать до тех пор, пока напряжение на трансформаторе Тр не достигнет положительного максимума. Таким образом, разность напряжений на C_2 от момента t_5 до t_7 определится по формуле:

$$\Delta U_C = \frac{U_{\text{Тр}} + U_{C_1} - U_{C_2}}{2} = \frac{2U_m - 1,25U_m + 0,5\delta U_{C_2}}{2} = 0,375U_m + 0,25\delta U_{C_2}$$

Далее цикл открытия и закрытия вентилях V_1 и V_2 повторяется, как и в случае без R . Емкость C_1 при каждой отрицательной полуволне напряжения на трансформаторе дозаряжается до U_m . Емкость C_2 заряжается от трансформатора Тр и емкости C_1 при положительной полуволне напряжения трансформатора Тр. В общем виде после второй положительной полуволны напряжения трансформатора Тр напряжение на емкости C_2 увеличивается на значение, которое можно найти по формуле:

$$\Delta U_C = \frac{0,75}{2 \times 2^{(n-3)}} U_m - \frac{\delta U_{C_2}}{2^{(n-1)}}, \quad (\text{П.2.3})$$

где $n=2, 3, 4, \dots$ – номер по порядку положительной полуволны напряжения трансформатора от момента его включения t_0 .

Напряжение на емкости C_2 к моменту положительного максимума напряжения на трансформаторе Тр, начиная со второй положительной полуволны напряжения, можно найти по формуле:

$$U_{C_2}(n) = \left(0,5U_m + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{0,75}{2 \times 2^{(n-3)}} U_m - \frac{0,5\delta U_{C_2}}{2 \times 2^{(n-2)}} \right) \right). \quad (\text{П.2.4})$$

В пределе при наличии R напряжение на емкости C_2 уже не становится равным $2U_m$, потому что вся прибавка по напряжению на емкости C_2 понижается разрядом на R . На емкости C_1 напряжение каждый период достигает U_m , потенциал в точке 2 изменяется от нуля до $2U_m$.

Учебное издание

ЛАВРИНОВИЧ Валерий Александрович

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Научный редактор
*доктор технических наук,
профессор В.Я. Ушаков*
Редактор *Е.С. Барченко*
Компьютерная верстка и дизайн обложки
В.А. Лавринович


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 19.01.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,7. Уч.-изд. л. 5,16.
Заказ 62-11. Тираж 40 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



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