

Федеральное агентство по образованию
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

И. М. Богатенков Ю. Н. Бочаров Н. И. Гуменова
В. В. Титков Ф. Х. Халилов Э. И. Янчус

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2012

УДК 621.373 (075.8)

Электроэнергетика. Изоляция и перенапряжения: Лабораторный практикум/ И.М Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, В.В. Титков, Ф.Х. Халилов, Э.И. Янчус. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. 124 с.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту бакалаврской и инженерной подготовки направлений 140200 “Электроэнергетика”, 140600 “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” и специальностей 140201 “Высоковольтная электроэнергетика и электротехника”, 140203 “Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем”, 140204 “Электрические станции”, 140205 “Электроэнергетические системы и сети”, 140211 “Электроснабжение”, 140601 “Электромеханика”, 140602 “Электрические и электронные аппараты”, 140605 “Электротехнологические установки и системы”, 140611 “Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника”.

Дано описание 31 лабораторной работы, при выполнении которых студенты знакомятся с высоковольтными изоляционными конструкциями, оборудованием и с измерениями на высоком напряжении. Лабораторные работы проводятся как на высоковольтных установках, так и с использованием компьютерной техники. Главное внимание уделяется подготовке студентов к самостоятельной работе.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2012

1. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Программа работы

1. Определить зависимость разрядных напряжений от длины промежутков острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярности напряжения на острие.
2. Для тех же промежутков определить зависимость средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами.

1.2. Пояснения к работе

Напряжение, при котором воздушный промежуток полностью теряет электрическую прочность, называется разрядным напряжением. Начальным напряжением называется напряжение, при котором в промежутке создаются условия самостоятельности разряда. В однородном или слабонеоднородном поле начальное напряжение практически совпадает с разрядным, при этом для нормальных атмосферных условий средняя разрядная напряженность составляет примерно 30 кВ/см. В резконеоднородных полях начальное напряжение всегда меньше разрядного.

Условия, где напряженность поля превышает начальную, создаются у электрода с наименьшим радиусом кривизны. Ввиду того что подвижность электронов примерно на два порядка больше подвижности ионов, у электрода создается избыточный положительный объемный заряд. Удлиняясь в глубь промежутка, этот заряд в случае положительной полярности приложенного напряжения усиливает поле вне зоны развивающегося канала разряда. Такое изменение напряженности электрического поля в промежутке облегчает условия развития разряда.

При отрицательной полярности электрода объемный заряд в узкой зоне непосредственной близости у электрода состоит из положительных ионов, а сразу за ними – из электронов и отрицательных ионов. Такое распределение заряда приводит к ослаблению поля вне зоны развивающегося канала разряда, что усложняет условия его развития. В результате разрядные напряжения в резко неоднородных полях при отрицательной полярности электрода с наименьшим радиусом кривизны имеют большие значения, чем в случае положительной его полярности.

Объемный заряд подвержен статистическим разбросам, причем в промежутке с резко неоднородным полем он больше, чем в промежутке с однородным полем. Поскольку величина этого заряда оказывает существенное влияние на значение разрядного напряжения, то разрядные напряжения в промежутках с резко неоднородным полем имеют большие статистические разбросы, чем в промежутках с однородным полем.

1.3. Определение зависимости разрядных напряжений от длины разрядного промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярности незаземленного острья

Определение зависимости разрядных напряжений от длины разрядного промежутка проводится на высоковольтной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.1. Напряжение сети 220 В, 50 Гц подается через

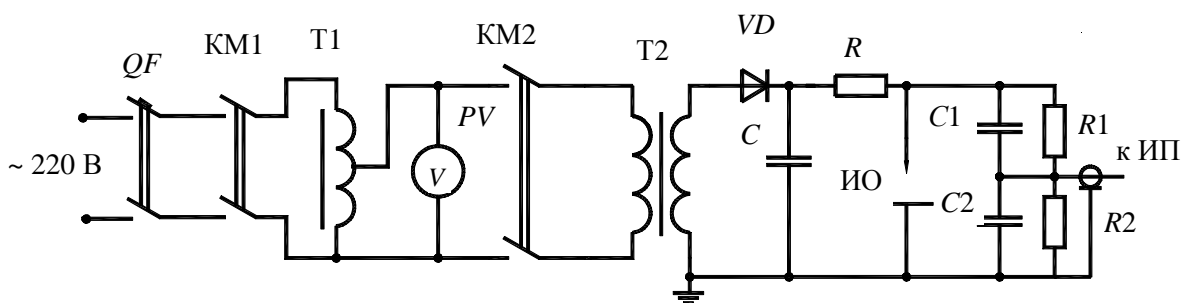


Рис. 1.1. Принципиальная схема установки

автоматический выключатель QF и магнитный пускатель $KM1$ на регулирующей трансформатор $T1$, а с него - через магнитный пускатель $KM2$ на высоковольтный трансформатор $T2$. Вторичная обмотка этого трансформатора подключена к выпрямителю, состоящему из полупроводникового вентиля VD и конденсатора C . Через защитный резистор выпрямленное напряжение подается на исследуемый промежуток $ИО$. Измерение напряжения, поданного на исследуемый промежуток, осуществляется при помощи емкостно-омического делителя напряжения $C1, R1, C2, R2$ и низковольтного измерительного прибора – микроамперметра с выпрямительной схемой, установленного на пульте управления.

Перед измерениями разрядных напряжений следует записать значение атмосферного давления и показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра.

Для измерения разрядных напряжений в промежутке острие – плоскость необходимо:

закрепить электроды на подставке, причем плоскость нужно установить со стороны земли, и установить расстояние между ними 2 см;

при помощи съемных трубок собрать схему установки так, чтобы на острье подавалось напряжение положительной полярности;

снять заземляющую штангу с исследуемого объекта и закрыть калитку ограждения;

включить автоматический выключатель QF , расположенной на пульте управления, дистанционно включить при помощи кнопки включения магнитный пускатель $KM1$ и по вольтметру V проверить наличие напряжения на вторичной стороне регулятора $T1$. Если напряжение не равно нулю, то при помощи регулятора напряжения $T1$ сделать это напряжение равным нулю. Включить магнитный пускатель $KM2$ и плавно поднять напряжение до пробоя исследуемого промежутка. В момент пробоя зафиксировать показания микроамперметра и результаты записать в протокол для оформления отчета. Показания микроамперметра настроены так, что один микроампер соответствует 1 кВ. Для уменьшения ошибки измерения при каждом расстоянии опыт необходимо повторить не менее трех раз.

Для получения зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами нужно увеличивать это расстояние по отношению к предыдущему опыту на 2 см и проводить аналогичные измерения, причем максимальное расстояние должно быть таким, чтобы приложенное к промежутку напряжение не превышало 80–90 кВ.

Для определения зависимости разрядных напряжений от расстояния при отрицательной полярности острия необходимо изменить полярность выпрямленного напряжения, расстояния между электродами при каждом последующем опыте увеличивать на 1 см, начиная от 1 см, и проводить серии из трех опытов до тех пор, пока приложенное к промежутку напряжение не достигнет величины 80–90 кВ.

Для получения зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами в промежутке острие – острие необходимо провести аналогичные исследования. Закрепив электроды в подставке, следует увеличивать расстояние между ними при каждом последующем опыте на 2 см. Максимальное расстояние ограничивается разрядным напряжением 80–90 кВ.

Полученные в процессе проведения лабораторной работы величины разрядных напряжений следует привести к значениям, соответствующим нормальным атмосферным условиям согласно уравнению

$$U_0 = U_{\text{и}} \frac{K_{\gamma}}{K_p K_t},$$

где U_0 – разрядное напряжение при нормальных атмосферных условиях, $U_{\text{и}}$ – измеренное разрядное напряжение, K_p , K_t и K_{γ} – поправочные коэффициенты соответственно на давление, температуру и абсолютную влажность воздуха.

Поправочный коэффициент на давление для промежутков длиной до 1 м

$$K_p = \frac{P}{P_0},$$

где P – атмосферное давление при температуре измерения разрядного напряжения; P_0 – нормальное атмосферное давление.

Поправочный коэффициент на температуру

$$K_t = \frac{293}{273 + t},$$

где t – температура, при которой проводились измерения, °С.

Поправочный коэффициент на абсолютную влажность для промежутков длиной до 1 м и положительной полярности напряжения постоянного тока на острие $K_\gamma = K$, где коэффициент K определяется по показаниям сухого и влажного термометров психрометра и кривой a (рис. 1.2).

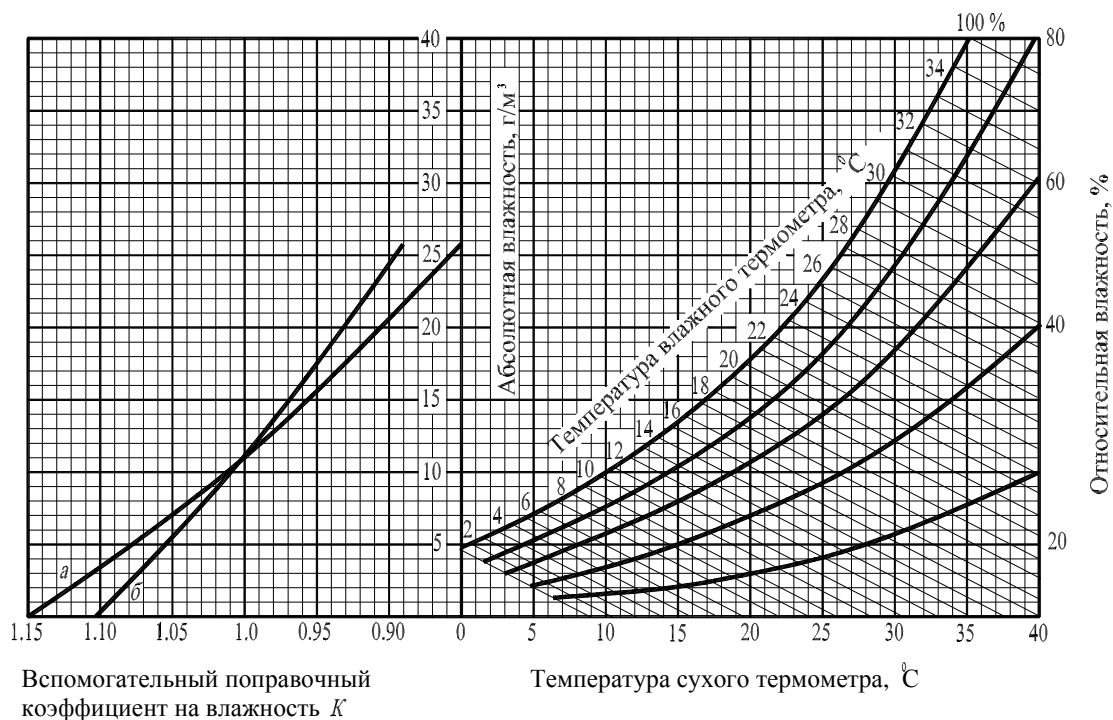


Рис. 1.2. К определению поправки на абсолютную влажность

Для отрицательной полярности напряжения на острие, когда в зоне ионизации напряженность поля имеет значение, существенно превышающее начальное значение напряженности развития разряда, поправка на абсолютную влажность не вводится.

1.4. Определение зависимости средних разрядных напряженностей от длины разрядного промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярностях незаземленного острия

Средние разрядные напряженности определяются путем деления полученного из опытов среднего разрядного напряжения на расстояние между электродами.

1.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы со значениями разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей для исследованных промежутков;
- в) графики зависимостей разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами;
- г) выводы по работе. Отрадите влияние полярности на величину разрядных напряжений воздушных промежутков.

2. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Программа работы

1. Определить зависимость разрядных напряжений от расстояния между электродами для воздушных промежутков острие – плоскость, острие – острие, электродов Роговского и промежутка шар – шар.
2. Для тех же промежутков определить зависимость разрядных напряженностей от длины промежутка.

2.2. Пояснения к работе

Как и при постоянном, прочность промежутка при переменном напряжении зависит от его длины, степени неоднородности электрического поля внутри промежутка и атмосферных условий. Поле внутри промежутка определяется формой электродов, а в процессе развития разряда – также и объемными зарядами. При переменном напряжении картина распределения зарядов возле электрода с малым радиусом кривизны будет несколько отличаться от той, которая наблюдается при постоянном напряжении, за счет влияния остаточных зарядов от предыдущего полупериода.

Разряд воздушного промежутка будет происходить при положительном полупериоде напряжения на электроде с меньшим радиусом кривизны, поскольку при этой полярности прочность промежутка меньше.

2.3. Определение зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами для воздушных промежутков острие – плоскость, острие – острие, электродов Роговского и промежутка шар – шар

Схема установки для определения зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами напряжением 50 Гц показана на рис. 2.1. Источником высокого напряжения служит испытательный трансформатор *T2*. Питание на него подается от сети 220 В с помощью автоматического выключателя *QF* и двух магнитных пускателей *KM1* и *KM2*.

Включение и отключение контакторов производится кнопками на пульте управления установкой. Напряжение на испытуемый объект *ИО* подается через защитный резистор *R*. Измерение напряжения на объекте производится с помощью емкостно-омического делителя *C1, R1, C2, R2* и низковольтного измерительного прибора – микроамперметра с выпрямительной схемой, установленного на пульте управления.

Перед измерениями разрядных напряжений следует записать значение атмосферного давления и показания сухого и влажного термометров лабораторно-

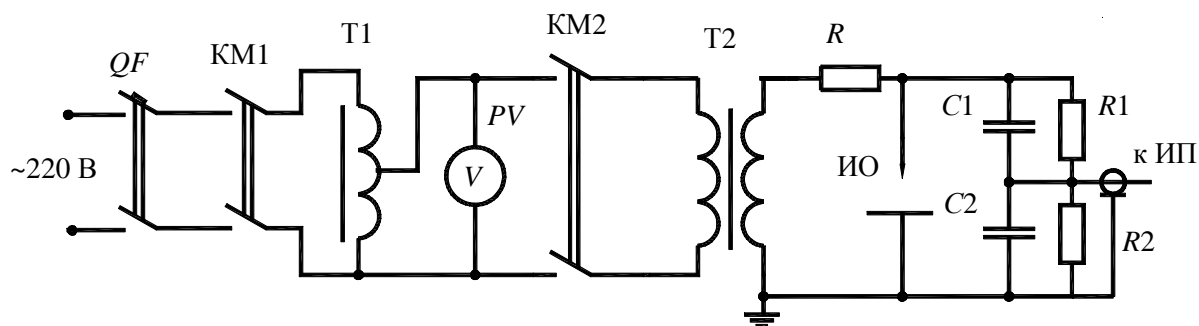


Рис. 2.1. Принципиальная схема установки

го психрометра.

Для измерения разрядного напряжения в промежутке острие – плоскость необходимо:

закрепить электроды острие – плоскость на подставке, сблизить их до соприкосновения и установить нуль шкалы расстояния между электродами. Затем развести электроды на расстояние 2 см;

снять заземляющую штангу с исследуемого объекта и закрыть калитку ограждения;

включить автоматический выключатель *QF*, дистанционно при помощи кнопки включить магнитный пускатель *KM1* и по вольтметру *V* проверить отсутствие напряжения на вторичной стороне регулятора *T1*. Если напряжение не равно нулю, ручкой управления напряжением установить его на нуль;

включить магнитный пускатель *KM2* и плавно поднимать напряжение до пробоя исследуемого промежутка. Зафиксировать в протоколе для оформления отчета показание микроамперметра в момент пробоя (1 мкА шкалы прибора соответствует 1 кВ амплитудного значения напряжения). Для снижения ошибки измерения опыт при каждом расстоянии повторить не менее трех раз;

установить новое расстояние между электродами (для электродов острие – плоскость рекомендуется увеличивать расстояние ступенями по 2 см) и повторять опыты до тех пор, пока разрядное напряжение не достигнет значений 80–90 кВ.

Для определения разрядных напряжений промежутка с электродами острие – острие порядок выполнения измерений такой же, как и для электродов острие – плоскость.

Определение разрядных напряжений промежутков типа электроды Роговского производится аналогичным образом, только шаг увеличения межэлектродного расстояния рекомендуется брать равным 1 см. Увеличение межэлектродного расстояния совершается до тех пор, пока разрядное напряжение не достигнет значений 80–90 кВ.

Определение разрядных напряжений промежутка шар – шар выполняется аналогичным образом, только ступени увеличения расстояния в интервале от 0,5 до 4 см рекомендуется взять 0,5 см, а далее – 1 см.

Полученные в опытах средние разрядные напряжения следует привести к нормальным атмосферным условиям аналогично тому, как сделано в п. 1.3.

2.4. Определение зависимости средних разрядных напряженностей от длины разрядных промежутков острие – плоскость, острие – острие, электроды Роговского и шар – шар

Средние разрядные напряженности определяются путем деления полученного из опытов среднего разрядного напряжения на расстояние между электродами.

2.5. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с величинами разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей для исследованных промежутков;
- в) графики зависимостей разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами;
- г) выводы по работе. Отрадите влияние формы электродов на величину разрядных напряжений воздушных промежутков.

3. РАЗРЯД В ГАЗЕ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА

3.1. Программа работы

1. Определить зависимость разрядных напряжений от расстояния между электродами:

- а) по воздуху для промежутка с однородным электрическим полем при наличии между электродами твердого диэлектрика и без него;
- б) расположенными на поверхности твердого диэлектрика при наличии под диэлектриком проводящей подложки и без нее.

2. Определить зависимость:

а) разрядных напряжений от толщины диэлектрика при расположении электродов на поверхности диэлектрика и при наличии под ним проводящей подложки;

б) средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами и толщины диэлектрика для исследованных промежутков.

3.2. Пояснения к работе

При разработке высоковольтного оборудования неизбежно сочетание токоведущих частей и изоляции из твердого диэлектрика. Стилизованное расположение электродов и диэлектрика для такой композиции показано на рис. 3.1. В первом случае (см. рис. 3.1,а) накапливающиеся на поверхности диэлектрика заряды и ионы абсорбированной и диссоциированной влаги искажают поле промежутка между электродами. Неизбежное наличие зазора между электродами и диэлектриком создает местное увеличение напряженности поля. Все это приводит к снижению разрядных напряжений по отношению к такому же промежутку, но без диэлектрика.

Во втором случае (см. рис. 3.1,б) поле между электродами неоднородно. Диэлектрик, на котором расположены электроды, особого влияния на значения разрядных напряжений не оказывает, и поэтому величина этих разрядных напряжений практически такая же, как и в аналогичном промежутке в воздухе.

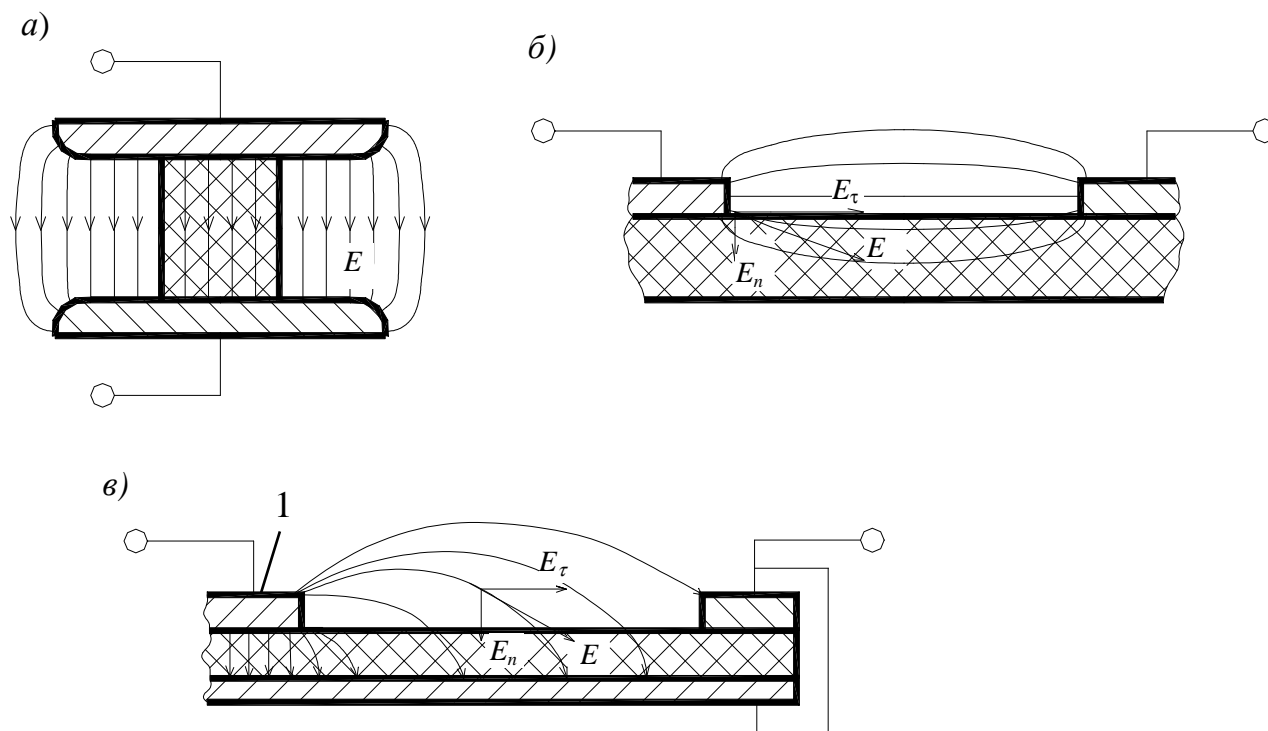


Рис. 3.1. Расположение электродов и диэлектрика

В третьем случае (см. рис. 3.1,в), когда толщина диэлектрика существенно меньше расстояния между электродами, электрическое поле на краю электрода I резко неоднородно из-за близости подложки. При относительно небольшом напряжении возникает коронный разряд. При увеличении приложенного напряжения коронирование переходит в стримерную стадию разряда, а затем и в дуговую. Такой разряд называют скользящим. Величина разрядного напряжения существенно меньше, чем при отсутствии подложки.

3.3. Определение зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами по воздуху для промежутков с однородным электрическим полем при наличии между электродами твердого диэлектрика и без него

Зависимость разрядных напряжений от расстояния между электродами по воздуху для промежутка с однородным электрическим полем при наличии между электродами твердого диэлектрика определяется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 3.2. Источником высокого напряжения служит трансформатор $T2$. Его питание осуществляется от сети 220 В, 50 Гц через автоматический выключатель QF , магнитный пускатель $KM1$, регулирующий трансформатор $T1$ и магнитный пускатель $KM2$. Измерение напряжения на

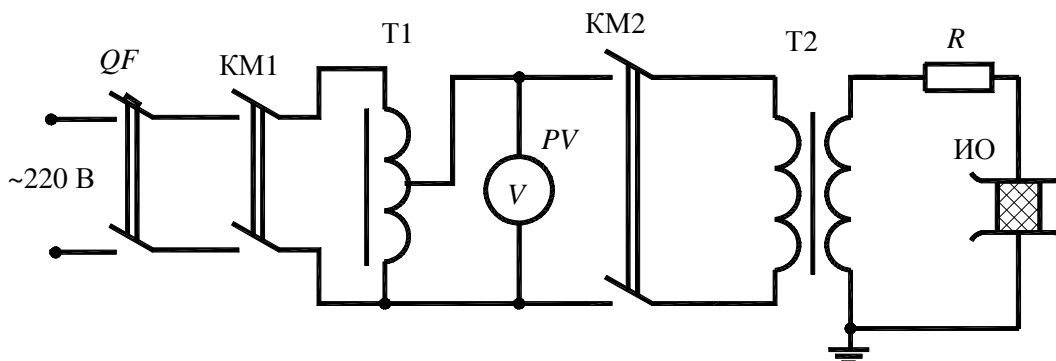


Рис.3.2. Принципиальная схема установки

исследуемом объекте производится по вольтметру PV . Разрядное напряжение промежутка будет равно показанию вольтметра в момент пробоя промежутка, помноженного на коэффициент трансформации трансформатора $T2$, который равен 500.

Для определения разрядных напряжений промежутка от расстояния между электродами при наличии между ними диэлектрика необходимо:

- подключить к защитному резистору R исследуемый промежуток;
- вставить между электродами диэлектрический цилиндр высотой 1 см;
- снять заземляющую штангу с исследуемого промежутка и закрыть калитку ограждения;

включить автоматический выключатель QF , магнитный пускатель $KM1$ и проверить напряжение по вольтметру PV . Если это напряжение не равно нулю, регулятором $T1$ установить показания на нуль;

включить магнитный пускатель $KM2$ и плавно поднять напряжение до пробоя промежутка. После пробоя промежутка немедленно отключить установку, а показания вольтметра в момент пробоя записать для оформления отчета.

С целью уменьшения ошибки измерения пробой промежутка при данном расстоянии следует провести не менее чем три раза.

Чтобы получить зависимость разрядных напряжений промежутка от расстояния между электродами, аналогичные измерения нужно еще совершить для цилиндров высотой 2, 3 и 4 см.

Для получения зависимости разрядных напряжений промежутка от расстояния между электродами при отсутствии диэлектрика между ними необходимо провести аналогичные измерения для расстояний 1, 2, 3 и 4 см.

3.4. Определение зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами, расположенными на поверхности твердого диэлектрика при наличии под диэлектриком проводящей подложки и без нее

Определение зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами, расположенными на поверхности твердого диэлектрика при наличии под диэлектриком проводящей подложки и без нее осуществляется на такой же установке, как описано в п. 3.3. К защитному резистору R подключается высоковольтный вывод затемненной камеры, в которой установлены электроды исследуемого промежутка. В качестве диэлектрика используются листы стекла толщиной 5, 8 и 10 мм. Камера имеет окошко для визуального наблюдения развивающегося разряда.

Для определения разрядных напряжений от расстояния между электродами при наличии подложки необходимо в камере установить лист стекла толщиной 5 мм, под стекло подсунуть латунный лист, соединить его с заземленным выводом камеры, установить при помощи шаблона расстояние между электродами 4 см, закрыть дверцу камеры, снять заземляющую штангу с высоковольтного вывода камеры, закрыть дверь ограждения и таким же способом, как описано в п. 3.3, поднять напряжение до пробоя промежутка. В процессе подъема напряжения следует вести визуальное наблюдение за промежутком. Значения напряжений, при которых появляется корона на незаземленном электроде (слабое фиолетовое свечение отдельных частей электрода) и далее стримеры (отдельные тонкие ярко светящиеся нити, скользящие по стеклу), следует записать для оформления отчета. После пробоя промежутка нужно немедленно отключить установку, а значение напряжения, при котором происходит пробой, также записать для отчета. Чтобы уменьшить ошибку при определении начальных напряжений короны, скользящего разряда и напряжения сквозного пробоя промежутка вышеописанный опыт необходимо провести не менее чем три раза.

Для получения зависимости разрядных напряжений от длины разрядного промежутка рекомендуется дополнительно провести такие измерения для промежутков с расстояниями между электродами 6, 8, 10, 12 и 14 см.

Для получения зависимости разрядного напряжения от расстояния между электродами при отсутствии подложки необходимо вынуть из под стекла латунный лист и провести аналогичные измерения начальных напряжений короны и разрядных напряжений промежутка при расстояниях между электродами 4, 6, 8 и 10 см. При этом нужно следить за тем, чтобы показания вольтметра *PV* не превысили 180–190 В.

3.5. Определение зависимости разрядных напряжений от толщины диэлектрика при расположении электродов на поверхности диэлектрика и наличии под ним проводящей подложки

Для получения зависимости разрядных напряжений от толщины диэлектрика надо к измерениям, проведенным в п. 3.4 для стекла толщиной 5 мм при расстоянии между электродами 8 или 10 см, добавить аналогичные измерения начальных напряжений короны, скользящего разряда и разрядных напряжений промежутка для стекол с толщиной 8 и 10 мм.

3.6. Определение зависимости средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами и от толщины диэлектрика для исследованных промежутков

Средние разрядные напряженности определяются путем деления среднего разрядного напряжения на расстояние между электродами.

3.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с величинами начальных напряжений короны и скользящего разряда, разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей для исследованных промежутков;
- в) графики зависимостей начальных напряжений короны и скользящего разряда, разрядных напряжений и средних разрядных напряженностей от расстояния между электродами;
- г) выводы по работе. Отрадите влияние диэлектрика на величину разрядных напряжений воздушных промежутков.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПРОВОДАХ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Программа работы

1. Определить напряжения начала возникновения коронного разряда и зависимость тока короны от напряжения при положительной и отрицательной полярностях напряжения на проводе.
2. Для этих же проводов рассчитать начальное напряжение коронного разряда.

4.2. Пояснения к работе

Коронный разряд является самостоятельным электрическим разрядом, возникающим в сильнонеоднородном электрическом поле в области высокой напряженности. При лавинной форме коронного разряда толщина слоя газа, охваченного ионизацией, не превышает нескольких миллиметров. В остальной области с более слабой напряженностью поля ударная ионизация отсутствует, но существует движение ионов. При столкновении с молекулами газа ионы отдают им часть приобретенной при движении в электрическом поле кинетической энергии. В результате происходит нагрев газа и, следовательно, потеря энергии. Помимо ионизации в процессе коронного разряда имеет место процесс возбуждения молекул. В возбужденном состоянии молекулы или атомы газа находятся лишь очень короткое время и, возвращаясь в стационарное состояние, излучают фотон видимого света, поэтому коронный разряд сопровождается голубоватым свечением.

Сопровождающие коронный разряд импульсные токи имеют очень высокую частоту, что создает высокочастотные помехи для каналов связи и радиоприема.

4.3. Определение напряжения начала возникновения коронного разряда и зависимости тока короны от напряжения при положительной и отрицательной полярности напряжения на проводе

Определение напряжения начала возникновения коронного разряда и зависимости тока короны от напряжения производится на высоковольтной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 4.1,*а*. Коронирующий провод располагается коаксиально в цилиндре I диаметром 600 мм и активной длиной 1.2 м. Цилиндр изолирован от земли. С целью уменьшения мешающих влияний соседних элементов схемы при измерении тока этот цилиндр окружен металлическим заземленным экраном. Для измерения тока короны последовательно с цилиндром включен микроамперметр PA (см. рис. 4.1,*б*) с нулевым отсчетом в середине шкалы, что позволяет проводить измерения как при положительной, так и при отрицательной полярностях напряжения на проводе.

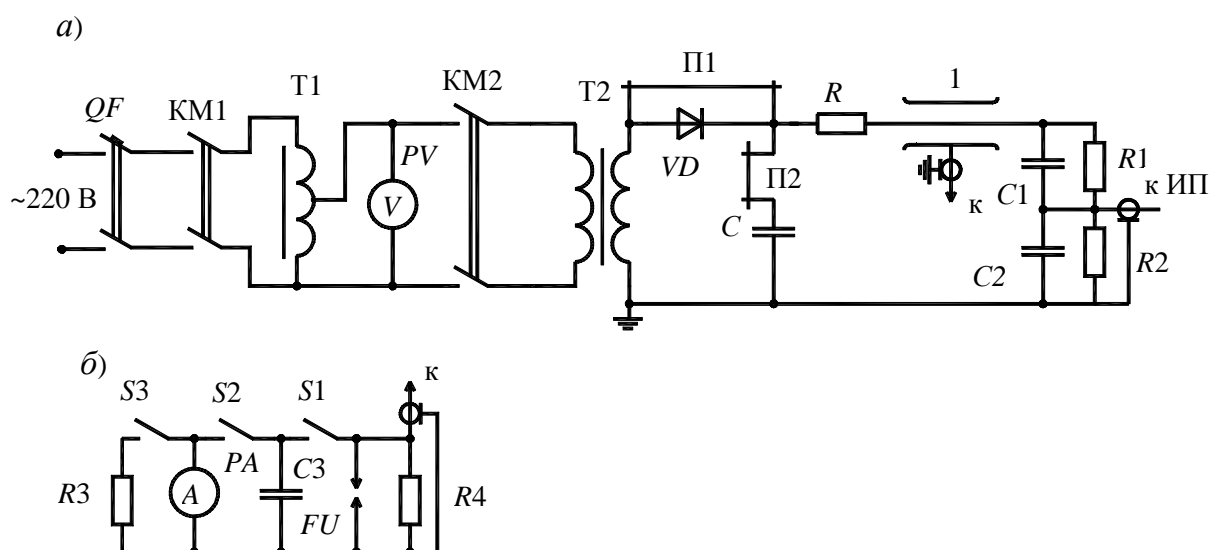


Рис. 4.1. Принципиальные схемы установки и измерения тока короны

Измерение напряжения на проводе осуществляется по помощи емкостно-омического делителя напряжения $C1$, $R1$, $C2$, $R2$ и низковольтного измерительного прибора – микроамперметра с выпрямительной схемой. Измерительные приборы и кнопки управления магнитными пускателями установлены на пульте управления.

Перед проведением измерений следует записать значение атмосферного давления и показание сухого термометра.

Для измерения начального напряжения короны и определения зависимости тока короны от приложенного напряжения необходимо:

закрепить в цилиндре 1 провод диаметром 1.2 мм;

снять закоротку III с вентиля VD , установить вентиль так, чтобы выпрямленное напряжение имело положительную полярность и установить перемычку $II2$;

снять заземляющую штангу с вывода конденсатора C и закрыть калитку ограждения;

переключатель $S3$ на пульте управления поставить в положение “ $\times 1$ ” и включить переключатели $S1$ и $S2$;

включить автоматический выключатель QF , магнитный пускатель $KM1$ и по вольтметру V установить нулевое значение напряжения на вторичной стороне трансформатора $T1$. Включить магнитный пускатель $KM2$, плавно поднять напряжение до появления тока через микроамперметр PA (на пульте управления “Ток короны”) и записать показание микроамперметра “Напряжение U_m ”, над которым стоит знак “+”. 1 мкА соответствует 1 кВ, а полученное напряжение – начальному напряжению короны на проводе.

С целью уменьшения ошибки измерения начальное напряжение определяют как среднее из не менее чем трех измерений.

Для снятия зависимости тока короны от приложенного напряжения необходимо провести восемь – десять измерений тока короны при увеличении напряжения на проводе. Отсчет показаний тока и напряжения проводить через каждые 20–30 мкА. При достижении тока 90–100 мкА переключатель $S3$ нужно перевести в положение “×5”.

Заменяв полярность выпрямленного напряжения (перевернув вентиль на 180°) и проделав соответствующие действия, как при положительной полярности напряжения на проводе, получим начальное напряжение короны и зависимость тока короны от приложенного напряжения для отрицательной полярности напряжения на проводе.

Для определения влияния диаметра провода на коронный разряд необходимо совершить аналогичные вышеприведенным измерения начального напряжения и зависимости тока короны от напряжения для проводов с диаметрами 2 и 3 мм.

Полученные в процессе проведения лабораторной работы значения напряжения следует привести к нормальным атмосферным условиям (см. п. 1.3). Заметим, что поправка на абсолютную влажность воздуха не вводится, поэтому приведение к нормальным атмосферным условиям может быть осуществлено по более простому соотношению

$$U_0 = \frac{U_{\text{и}}}{\delta},$$

где U_0 и $U_{\text{и}}$ – напряжения для нормальных атмосферных условий и условий проведения работы соответственно; δ – относительная плотность воздуха,

$$\delta = \frac{P \cdot 293}{P_0 T},$$

P_0 – нормальное атмосферное давление, P и T – давление и температура К, при которых проводилась работа.

4.4. Расчет начального напряжения коронного разряда

Начальное напряжение коронного разряда для коаксиальной системы проводов можно рассчитать по формуле

$$U_{\text{н}} = E_{\text{н}} r_1 \ln(r_2 / r_1),$$

где r_1 и r_2 – радиусы провода и цилиндра соответственно; $E_{\text{н}}$ – начальная напряженность коронного разряда, которая для провода с радиусом меньше 1 см может быть рассчитана по формуле

$$E_{\text{н}} = A \delta (1 + 0.298 / \sqrt{\delta r_1 / r}),$$

где $A = 3.03 \cdot 10^6$ В/м; δ – относительная плотность воздуха; r_1 – радиус провода м; $r = 0.01$ м.

Начальное напряжение коронного разряда следует рассчитать для всех диаметров проводов.

4.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с величинами напряжений и токов короны;
- в) графики зависимостей тока короны от напряжения;
- г) экспериментальные и расчетные значения начального напряжения коронного разряда на проводе;
- д) выводы по работе.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПРОВОДАХ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Программа работы

1. Определить критическое напряжение коронного разряда и снять зависимость мощности потерь от напряжения для коаксиальной системы проводов.
2. Рассчитать критическое напряжение коронного разряда.

5.2. Пояснения к работе

При напряжении переменного тока образующиеся в течение полупериода ионы, полярность которых совпадает с полярностью напряжения на проводе, движутся в направлении от провода. Ионы противоположной полярности, образовавшиеся в предшествующем полупериоде, совершают движение к проводу. Когда при положительной полярности напряжения на проводе отрицательные ионы вторгаются в зону ионизации, возможен распад отрицательных ионов с образованием свободных электронов, поэтому коронный разряд на проводах линий переменного тока может поддерживаться при напряжении несколько меньшем, чем на проводах линий постоянного тока. Напряжение и напряженность, при которых поддерживается коронный разряд, называются соответственно критическим напряжением и напряженностью коронного разряда. Коронный разряд на проводах линии электропередачи переменного тока, так же как и на линиях постоянного тока, приводит к потерям энергии, возникновению радиопомех и образованию окислителей, которые разрушают металлические элементы изоляторов или других изоляционных конструкций.

5.3. Определение критического напряжения коронного разряда и снятие зависимости мощности потерь от напряжения для коаксиальной системы проводов

Определение критического напряжения коронного разряда и снятие зависимости мощности потерь от напряжения производится на высоковольтной ус-

тановке, как описано в п. 4.3 (см. рис. 4.1). При этом в схему нужно ввести следующие изменения:

- закоротить перемычкой *П1* вентиль *VD*;
- снять перемычку *П2* и закоротить конденсатор *C*;
- отключить переключатель *S2* на пульте управления;
- установить в цилиндр *I* провод с диаметром 1.2 мм.

Вольт-кулоновая характеристика определяется по осциллографу С1-93. Напряжение с низковольтного плеча делителя (на пульте управления гнездо “ЭО”) подается на вход осциллографа “Канал II”. Напряжение с конденсатора *C3* (на пульте второе гнездо “ЭО”) подключается к осциллографу (гнезда “синхронизация внеш.”), и кнопка “ОХ” устанавливается в нажатое положение.

Перед проведением измерений следует записать значение атмосферного давления и показание сухого термометра.

Включение осциллографа осуществляется вытягиванием кнопки “Питание”, а включение установки и поднятие напряжения производятся точно так же, как описано в п. 4.3 при определении начального напряжения короны. При отсутствии коронного разряда вольт-кулоновая характеристика на экране осциллографа изображается в виде наклонной прямой линии. При возникновении коронного разряда линии расходятся. В момент расхождения линий фиксируется значение напряжения, которое и принимается за критическое напряжение коронного разряда.

Для снятия зависимости мощности потерь от напряжения необходимо зарисовать на прозрачную бумагу с экрана осциллографа пять–семь вольт-кулоновых характеристик при изменении приложенного напряжения в пределах от критического коронного напряжения до примерно 90 кВ. Мощность потерь определяется по формуле

$$P = S K_u K_q f ,$$

где S – площадь, ограниченная кривой вольт-кулоновой характеристики, дел².; K_u и K_q – масштабные коэффициенты по напряжению и заряду соответственно; f – частота, равная 50 Гц.

Масштабный коэффициент

$$K_u = \frac{U}{h_y} ,$$

где U – значение напряжения на проводе, В; h_y – максимальное отклонение луча от нулевой линии по вертикали, дел.

Соответственно

$$K_q = h_x C3 ,$$

где h_x – чувствительность осциллографа по горизонтали, равная 0.2 В/дел.; $C3 = 0.47 \cdot 10^{-6}$ Ф.

Для определения влияния диаметра провода на критическое напряжение короны и мощность потерь нужно совершить аналогичные вышеприведенным

измерения критического напряжения и снятие зависимости мощности потерь от напряжения для проводов с диаметрами 2 и 3 мм.

Полученные в процессе работы напряжения следует привести к нормальным атмосферным условиям точно так же, как это сделано в п 4.3.

5.4. Расчет критического напряжения коронного разряда

Критическое напряжение коронного разряда для коаксиальной системы проводов можно рассчитать по формуле

$$U_k = E_k r_1 \ln(r_2 / r_1),$$

где r_1 и r_2 – радиусы провода и цилиндра соответственно ($r_2 = 30$ см); E_k – критическая напряженность коронного разряда, В/м, которая при напряжении промышленной частоты может быть рассчитана по формуле

$$E_k = A \delta \left(1 + \frac{0.62}{\delta^{0.3} (r_1 / r)^{0.38}} \right),$$

где $A = 2.33 \cdot 10^6$ В/м, δ – относительная плотность воздуха (см. п. 4.3); r_1 – радиус провода, см; $r = 1$ м.

Критическое напряжение коронного разряда следует рассчитать для всех проводов, упомянутых в данной работе.

5.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) осциллограммы вольт-кулоновых характеристик;
- в) таблицы с величинами напряжений и мощности потерь;
- г) графики зависимостей мощности потерь от напряжения на проводе;
- д) экспериментальные и расчетные значения критического напряжения коронного разряда на проводе;
- е) выводы по работе.

6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ГИРЛЯНДЕ ИЗОЛЯТОРОВ И РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

6.1 Программа работы

Определить:

- а) распределение напряжения по гирлянде;
- б) сухоразрядное напряжение тарельчатого изолятора.

6.2. Пояснения к работе

На линиях электропередачи 35 кВ и выше в основном используются гирлянды из фарфоровых или стеклянных тарельчатых изоляторов.

В первом приближении гирлянда может быть замещена цепочкой емкостей, показанной на рис. 6.1. Здесь $C_0 = 50\text{--}70$ пф – емкость между шапками тарельчатых изоляторов, $C_n = 0.5\text{--}1$ пФ – емкость отдельных изоляторов по отношению к проводу и $C_з = 4\text{--}5$ пФ – емкость по отношению к заземленным конструкциям опоры линии передачи. Токи, протекающие через емкости $C_з$ и C_n , существенно искажают линейное распределение напряжения вдоль гирлянды, создаваемое последовательно соединенными емкостями C_0 . Поскольку $C_з > C_n$, то наибольшее падение напряжения приходится на первый от провода изолятор. Согласно правилам технической эксплуатации изолирующая подвеска должна быть выполнена так, чтобы наибольшее падение напряжения на изоляторе не превышало допустимое напряжение по уровню радиопомех. Для уменьшения падения напряжения на первых от провода изоляторах на линиях высших классов напряжения для поддерживающих гирлянд используют специальные устройства, которые позволяют “утопить” изолятор между проводами расщепленной фазы, а в натяжных гирляндах применяют специальные тороидальные экраны.

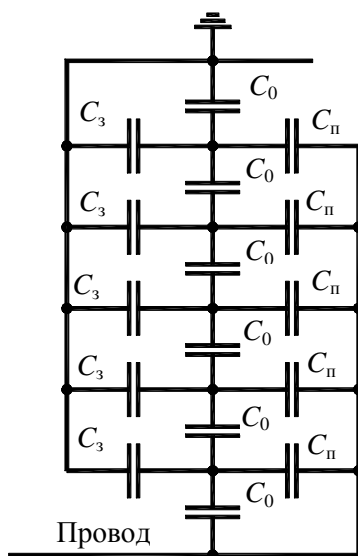


Рис. 6.1. Схема замещения гирлянды

ва, которые позволяют “утопить” изолятор между проводами расщепленной фазы, а в натяжных гирляндах применяют специальные тороидальные экраны.

6.3. Измерение распределения напряжения по гирлянде

Измерение распределения напряжения по гирлянде изоляторов осуществляется на высоковольтной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.2. Исследованию подвергается гирлянда изоляторов на 110 кВ, состоящая из семи изоляторов типа ПС6-Б. Измерение падения напряжения на каждом изоляторе производится при помощи измерительной штанги, состоящей из измерительных шариков с расстоянием между электродами 1–2 мм, металлическими усиками и изоляционной штанги, заземленной у ручки гибким медным тросиком.

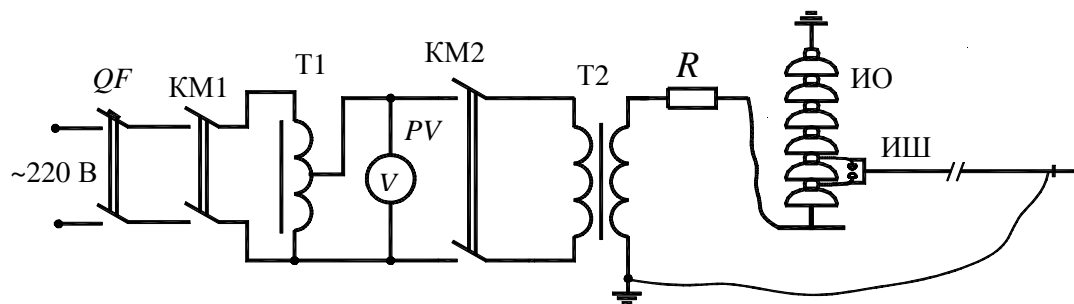


Рис. 6.2. Принципиальная схема установки

Для измерения распределения напряжения по гирлянде необходимо:
расположить гирлянду из семи изоляторов на установочной раме на расстоянии порядка 1 м от левой стойки;

соединить нижний изолятор через имитирующий провод прутком с резистором R ;

в прорезь калитки поместить измерительную штангу $ИШ$;

снять заземляющую штангу с высоковольтного вывода трансформатора $T2$ и закрыть калитку ограждения;

включить автоматический выключатель QF , магнитный пускатель $KM1$, проверить по вольтметру V напряжение и если оно не равно нулю установить его на нуль;

усиками измерительной штанги обхватить первый от провода изолятор, включить магнитный пускатель $KM2$ и поднять напряжение до пробоя шарового разрядника измерительной штанги (до появления жужжания). Для того, чтобы точнее зафиксировать начало жужжания, следует уменьшить напряжение до исчезновения жужжания и снова медленно поднимать напряжения до тех пор, пока не возникнет жужжание. Напряжение на гирлянде U_1 , при котором происходит пробой шарового разрядника измерительной штанги, определяется по вольтметру V , и его нужно записать для оформления отчета.

Таким же образом нужно поступить со всеми изоляторами гирлянды. Доля напряжения α_i , приходящаяся на изолятор, от напряжения на гирлянде рассчитывается по формуле

$$\alpha_i = \frac{1/U_i}{\sum_{i=1}^n 1/U_i},$$

где n – число изоляторов в гирлянде; i – порядковый номер изолятора, отсчитываемый от провода; U_i – напряжение на гирлянде в момент пробоя шарового разрядника измерительной штанги при охвате ее усиками i -го изолятора.

Для определения влияния экрана на распределение напряжения по гирлянде следует установить со стороны провода тороидальный экран и провести аналогичные выше описанным действия.

6.4. Определение сухоразрядного напряжения тарельчатого изолятора

Для определения сухоразрядного напряжения подвешенного изолятора необходимо проволокой закоротить все тарельчатые изоляторы кроме первого от провода и записать значение атмосферного давления и показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра.

Указанным выше способом включите установку. Подъем напряжения до значения 40 % от ожидаемого разрядного можно провести с любой скоростью. Далее напряжение следует повышать плавно в течение 5–30 с до тех пор, пока не произойдет перекрытие изолятора. Разрядное напряжение изолятора равно

показанию вольтметра V в момент перекрытия, помноженному на коэффициент трансформации трансформатора T_2 , который равен 500. Сухоразрядное напряжение определяется как среднее арифметическое из десяти результатов измерения. Полученное значение сухоразрядного напряжения необходимо привести к нормальным атмосферным условиям (см. п. 1.3).

6.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с результатами измерений;
- в) графики распределения напряжения по гирлянде изоляторов;
- г) величину сухоразрядного напряжения тарельчатого изолятора;
- д) выводы по работе.

7. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ГРОЗОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

7.1. Программа работы

1. Определить зависимость 50 %-ного разрядного напряжения от длины промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярностях импульса напряжения на острие.
2. Для тех же промежутков определить зависимость 50 %-ной разрядной напряженности от расстояния между электродами.

7.2. Пояснения к работе

Своеобразие развития разряда при импульсном напряжении заключается в том, что время формирования разряда соизмеримо с длительностью воздействия импульса напряжения. В сильнонеоднородных полях при воздействии импульсного напряжения искровому разряду предшествует импульсная корона, при которой объемный заряд заполняет лишь область, непосредственно примыкающую к коронирующему электроду.

Разрядные свойства воздушных промежутков при импульсных воздействиях характеризуются 50 %-ными разрядными напряжениями. Максимальное значение импульсного напряжения, при котором вероятность сквозного пробоя промежутка равна 50 %, называется 50 %-ным разрядным напряжением.

В промежутках порядка 20–30 см время развития разряда при напряжении, близком к 50 %-ному, составляет несколько микросекунд. Поскольку объемный заряд не успевает существенно исказить первоначальное электрическое поле, 50 %-ное разрядное напряжение оказывается немного больше, чем при воздействии напряжений постоянного тока положительной полярности и пере-

менного тока. По этой же причине при отрицательной полярности импульса напряжения на стержне 50 %-ное напряжение несколько меньше, чем при воздействии напряжения постоянного тока отрицательной полярности.

7.3. Определение зависимости 50 %-ного разрядного напряжения от длины промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярностях импульса напряжения на острие

Определение зависимости 50 %-ного разрядного напряжения от длины промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярностях импульса напряжения на острие производится на высоковольтной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 7.1. На

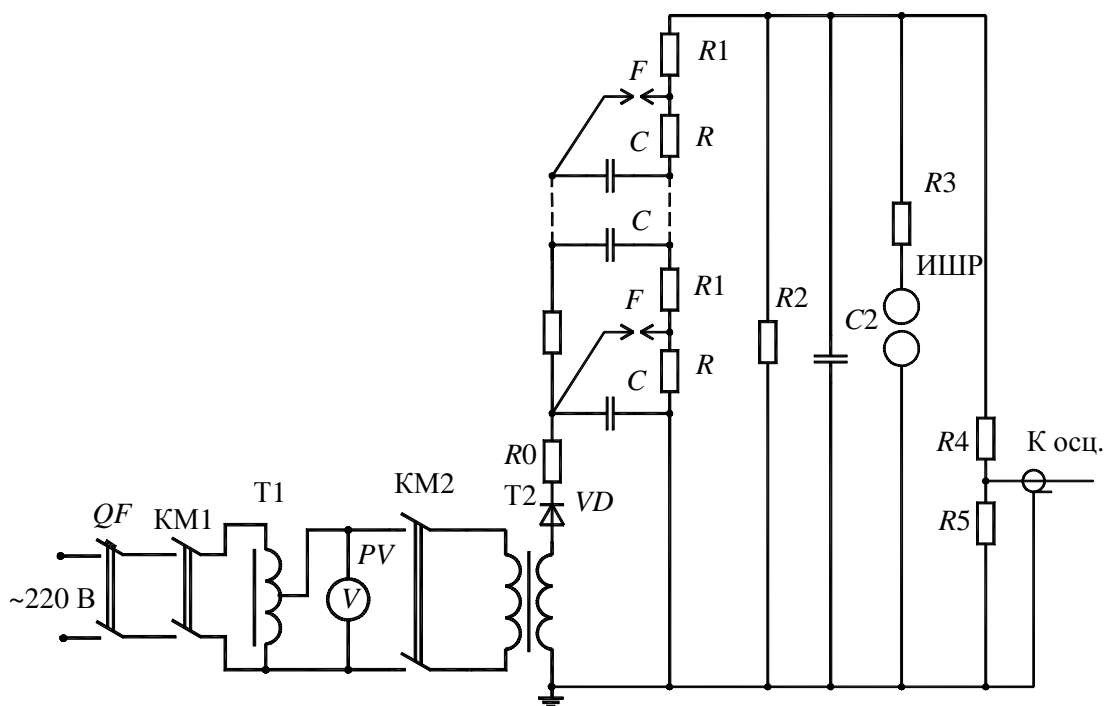


Рис. 7.1. Принципиальная схема установки

этой схеме VD , $R1$, $R2$, R , C , $C2$, F – элементы генератора импульсных напряжений, настроенного на стандартный импульс “1.2 / 50”, $ИШР$ – измерительный шаровой разрядник и QF , $KM1$, $T1$, $KM2$, $T2$, V – элементы управления установкой.

Для определения 50 %-ного разрядного напряжения острие – плоскость при положительной полярности импульса напряжения на острие необходимо:

установить параллельно измерительному шаровому разряднику промежуток острие – плоскость с расстоянием между электродами 10 см, записать значение атмосферного давления и показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра;

снять заземляющие штанги с генератора импульсных напряжений (ГИН) и закрыть калитку ограждения;

с пульта управления при помощи кнопки автоматического привода сделать полярность выходного импульса напряжения положительной;

искровые промежутки ГИН при помощи кнопок автоматического привода и шкалы сельсина, установленных на пульте управления, сделать минимальными и равными примерно 0,3 см;

расстояние между шарами измерительного разрядника при помощи кнопок автоматического привода и шкалы сельсина, расположенных на пульте управления для измерительного разрядника, установить примерно равным 3 см;

включить автоматический выключатель QF , магнитный пускатель $KM1$, проверить по вольтметру V напряжение на вторичной стороне трансформатора $T1$ и сделать его равным нулю, затем включить магнитный пускатель $KM2$;

поднять напряжение до автоматического срабатывания промежутков F ГИН с частотой одно срабатывание в 1–3 секунды.

Если на этих импульсах не происходит пробоя промежутка следует увеличить расстояние искровых промежутков ГИН с пульта управления, причем если ГИН перестает срабатывать, то нужно при помощи трансформатора $T1$ повысить напряжение, подаваемое на первичную сторону трансформатора $T2$, так чтобы сохранить вышеуказанную частоту срабатывания. Такое регулирование выходного напряжения нужно осуществлять до тех пор пока вероятность пробоя промежутка острее – плоскость, определяемая как отношение числа разрядов к числу приложенных импульсов, не станет близкой 50 %. В лабораторной работе вероятность пробоя промежутка рекомендуется определять исходя из 10–15 срабатываний ГИН. Если вероятность пробоя промежутка больше 50 %, то расстояния между искровыми промежутками нужно уменьшать, а чтобы сохранить частоту срабатывания ГИН – уменьшить напряжение с помощью трансформатора $T1$.

После получения 50 %-ной вероятности пробоя промежутка необходимо с помощью шарового измерительного разрядника, подключенного параллельно промежутку, провести измерение этого напряжения. Измерение производится следующим образом. Расстояние между шарами измерительного разрядника с пульта управления при помощи кнопок дистанционного привода уменьшается до тех пор, пока вероятность пробоя, определяемая как отношение числа пробоев шарового промежутка к общему числу срабатывания ГИН (10–15), не станет равной 50 %. Наличие промежутка острее – плоскость на пробой измерительного разрядника не оказывает влияния, поскольку пробой между шарами измерительного разрядника происходит на максимуме импульса напряжения, а пробой промежутка острее – плоскость – за ним. Далее по расстоянию между шарами измерительного разрядника, соответствующему 50 %-ной вероятности пробоя, и таблице, приведенной на странице 25, определяем максимальное значение импульсного напряжения. Это напряжение следует привести к

Т а б л и ц а

Разрядные напряжения для переменных синусоидальных напряжений, напряжения постоянного тока обеих полярностей, полных стандартных и более длинных импульсных напряжений отрицательной полярности (50 %-ные разрядные) – а) и полных стандартных и более длинных импульсных напряжений положительной полярности (50%-ные разрядные) – б), кВ

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см							
	6.25		12.5		25		50	
	а	б	а	б	а	б	а	б
0.4	14.2	14.2						
0.5	17.2	17.2	16.8	16.8				
0.6	20.2	20.2	19.9	19.9				
0.7	23.2	23.2	23.0	23.0				
0.8	26.2	26.2	26.0	26.0				
0.9	29.1	29.1	28.9	28.9				
1.0	31.9	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7		
1.2	37.5	37.6	37.4	37.4	37.4	37.4		
1.4	42.9	43.2	42.9	42.9	42.9	42.9		
1.5	45.5	45.9	45.5	45.5	45.5	45.5		
1.6	48.1	48.6	48.1	48.1	48.1	48.1		
1.8	53.5	54.0	53.5	53.5	53.5	53.5		
2.0	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0
2.2	63.0	64.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5
2.4	67.5	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
2.6	72.0	73.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5
2.8	76.0	78.0	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0	81.0
3.0	79.5	82.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0
3.5	(87.5)	(91.5)	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0
4.0	(95.0)	(101)	108	110	112	112	112	112
4.5	(101)	(108)	119	122	125	125	125	125
5.0	(107)	(115)	129	134	137	138	138	138
5.5			138	145	149	151	151	151
6.0			146	155	161	163	164	164
6.5			(154)	(164)	173	175	177	177
7.0			(161)	(173)	184	187	189	189
7.5			(168)	(181)	195	199	202	202
8.0			(174)	(189)	206	211	214	214
9.0			(185)	(203)	226	233	239	239
10.0			(195)	(215)	244	254	263	263
11.0					261	273	286	287
12.0					275	291	309	311
13.0					(289)	(308)	331	334
14.0					(302)	(323)	353	357
15.0					(314)	(337)	373	380
16.0					(325)	(350)	392	402
17.0					(336)	(362)	411	422
18.0					(347)	(374)	429	442

атмосферным условиям, при которых проводились измерения пробивного напряжения в соответствии с п. 1.3 и формулой

$$U_{и} = U_0 K_p K_t.$$

Полученное таким образом значение разрядного напряжения для промежутка острие – плоскость необходимо привести к нормальным атмосферным условиям (см. п. 1.3). Поправочный коэффициент на абсолютную влажность K_u для импульсных напряжений определяется по кривой b (см. рис. 1.2).

Чтобы найти зависимость 50 %-ного разрядного напряжения от длины промежутка, следует проделать аналогичные действия для расстояний между электродами 15, 20 и 25 см.

Перед снятием зависимости 50 %-ного разрядного напряжения от длины промежутка при отрицательной полярности необходимо с пульта управления нажатием кнопки “полярность” изменить полярность зарядного напряжения генератора импульсных напряжений и для расстояний между электродами 5, 10 и 15 см провести аналогичные измерения 50 %-ного разрядного напряжения.

Определение зависимости 50 %-ного разрядного напряжения от расстояния между электродами для промежутка острие – острие осуществляется аналогичным образом, как в промежутке острие – плоскость. Для этого нужно разместить промежуток острие – острие на место промежутка острие – плоскость и проследить, чтобы длина заземленного острия была больше длины промежутка не менее, чем в три раза. Поскольку значения разрядных напряжений в промежутках с симметричным электрическим полем больше, чем в промежутках с резко неоднородным полем, то расстояния между электродами рекомендуется устанавливать 5, 10 и 15 см.

7.4. Определение зависимости 50 %-ной разрядной напряженности от длины промежутка острие – плоскость и острие – острие при положительной и отрицательной полярностях импульса напряжения на острие

Пятидесятипроцентная разрядная напряженность определяется путем деления 50 %-ного разрядного напряжения на расстояние между электродами.

7.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с результатами измерений;
- в) графики зависимостей 50 %-ных разрядных напряжений и напряженностей от расстояния между электродами исследованных промежутков;
- г) выводы по работе.

8. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИН НА ФОРМУ ГЕНЕРИРУЕМОГО ИМПУЛЬСА

8.1. Программа работы

Определить зависимость длительности:

1. фронта импульса и коэффициента использования ГИН от величины фронтного и демпферных резисторов,
2. импульса и коэффициента использования ГИН от сопротивления разрядных резисторов,
3. фронта импульса и коэффициента использования ГИН от величины фронтной емкости,
4. импульса и коэффициента использования ГИН от емкости его конденсаторов.
5. Рассчитать форму импульса для учебного ГИН.

8.2. Пояснения к работе

Генераторы импульсных напряжений являются одной из основных установок высоковольтных лабораторий. Они предназначены для воспроизведения импульсных воздействий грозового характера на изоляцию высоковольтного оборудования. Согласно ГОСТ 1516.2 - 97 длительность фронта стандартного грозового импульса T_{ϕ} определяется как время, превышающее в 1.67 раза интервал времени между моментами, когда возрастающее напряжение составляет 30 и 90 % своего максимального значения и составляет 1.2 ± 0.36 мкс. Длительность такого импульса $T_{и}$ определяется как интервал времени между условным началом импульса, определяемым по точке пересечения прямой, проведенной через точки на кривой импульса 30 и 90 % максимального значения, с осью времени и моментом, когда напряжение понизилось до половины максимального значения. $T_{и} = 50 \pm 10$ мкс.

Одна из наиболее распространенных принципиальных схем двухполупериодных многоступенчатых генераторов импульсных напряжений показана в верхнем левом углу на рис. 8.1. В этой схеме $R0, R, R1, R3$ - зарядные, разрядные, демпферные и фронтной резисторы соответственно. C - конденсаторы ГИН, $C2$ - фронтная емкость и F - шаровые разрядники.

Расчет разрядного режима многоступенчатого генератора импульсных напряжений с использованием этой схемы является достаточно сложной задачей даже при применении вычислительной техники. Однако, если пренебречь влиянием паразитных емкостей элементов ГИН и предположить, что зарядные напряжения конденсаторов всех ступеней одинаковы, то схема многоступенчатого генератора импульсных напряжений может быть приведена к эквивалентной схеме, показанной в верхнем правом углу на рис. 8.1. Результаты расчета кривой выходного напряжения по этой схеме хорошо согласуются с экспериментальной кривой.

Form2

Выход С ? С2 ? R ? Cal OK Print

Вариант: Двухполупериод

Число конденс. 6

$R_0, \text{кОм}$ 200
 $R_1, \text{кОм}$ 0.03
 $R, \text{кОм}$ 2.24
 $R_3, \text{кОм}$ 0.22
 $C, \text{нФ}$ 100
 $C_2, \text{нФ}$ 1.5
 $R_4, \text{кОм}$ 10
 $L, \text{мГн}$ 0.01

$r_1, \text{нФ}$
 $r_1, \text{кОм}$
 $r_3, \text{кОм}$
 $L, \text{мГн}$
 $r_2, \text{кОм}$
 $C_2, \text{нФ}$
 коэф. исп.

Тип	Шном,кВ	Сном,нФ	Шим,кВ	фном,Гц
ДМ-100-4	100	1.0	280	50
ДМ-100-4	100	2.25	280	50
ДМ-100-4	100	4.5	280	50
ДМ-80-0.00	80	2.0	155	50
ЛМРЧ-55-3	55	3.3		50

Тип	Шном,кВ	Сном,нФ	L,мГн	Хар.раз.
ИМ-100-0.15	100	150	300	апер.
ИМК-100-0.05	100	50	300	апер.
ИК-100-0.25	100	250	150	кол.
ИК-100-0.4	100	400	150	кол.
ИК-100-0.6	100	600	150	кол.

Т ф=

Т и=

Величины сопротивления резисторов должны соответствовать ряду сопротивлений, нпр. E - 24: 100, 110, 120, 130, 150, 160, 180, 200, 220, 240, 270, 300, 360, 390, 430, 470, 510, 560, 620, 750, 820, 910.

Длина резистора должна быть рассчитана исходя из допустимой напряженности

Рис. 8.1. Схемы ГИН со справочными данными

На этом же рисунке под схемами приведены справочные данные по конденсаторам ГИН (слева, вызывается нажатием на кнопку “С?”) и конденсаторам из которых формируется фронтная емкость (справа, вызывается кнопкой “С2?”). Ниже их – требования к резисторам (вызывается нажатием кнопки “R?”). Справочные данные автоматически закрываются при нажатии левой клавиши мыши на кнопку “Ok”.

Связь между параметрами принципиальной и расчетной схем определяется следующими соотношениями:

$$c1 = C / n, r1 = R1 n / 2,$$

$$r2 = \frac{n R0 R R4}{n R0 R + 2 R0 R4 + 4 R R4}, r3 = R3 \text{ и } c2 = C2,$$

где n - число конденсаторов ГИН.

Зарядное напряжение конденсатора $c1$ в расчетной схеме равно зарядному напряжению первого конденсатора C ГИН (см. принципиальную схему) помноженному на число конденсаторов. l - паразитная индуктивность разрядного контура.

8.3. Определение зависимости длительности фронта импульса

и коэффициента использования ГИН от величины фронтного и демпферных резисторов

Определение зависимости длительности фронта импульса и коэффициента использования ГИН от величины фронтного и демпферных резисторов осуществляется с помощью программы gin.exe. Программа размещена в директории C:\LabWin. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка, в котором приведены одно из конструкций ГИН, логотип кафедры и две кнопки управления программой “ГИН” и “Конец”.

Нажатие левой клавиши мыши на кнопке “ГИН” приводит к появлению окна расчета рис. 8.2.

Выполнение данного пункта работы рекомендуется начать с параметрами принципиальной схемы, приведенными в соответствующих окнах ввода данных, расположенных справа от обозначения элемента схемы. Нажатие левой клавишей мыши кнопки “ОК” запускает программу на расчет, в результате чего в утопленных окнах (см. рис. 8.2) рисуются кривые напряжения на выходе ГИН: на емкости $c2$ (черная на экране, верхняя на рисунке) и на последовательно соединенных его конденсаторах на емкости $c1$ (красная на экране, нижняя на рисунке). Эти кривые напряжения построены в относительных единицах, причем – левые для определения длительности фронта, а правые – для определения длительности импульса. Кроме того, в левом окне приводятся прямые построения длительности фронта импульса и на уровне “1” пределы длительности фронта, а в правом – на уровне “0.5” пределы стандартной длитель-

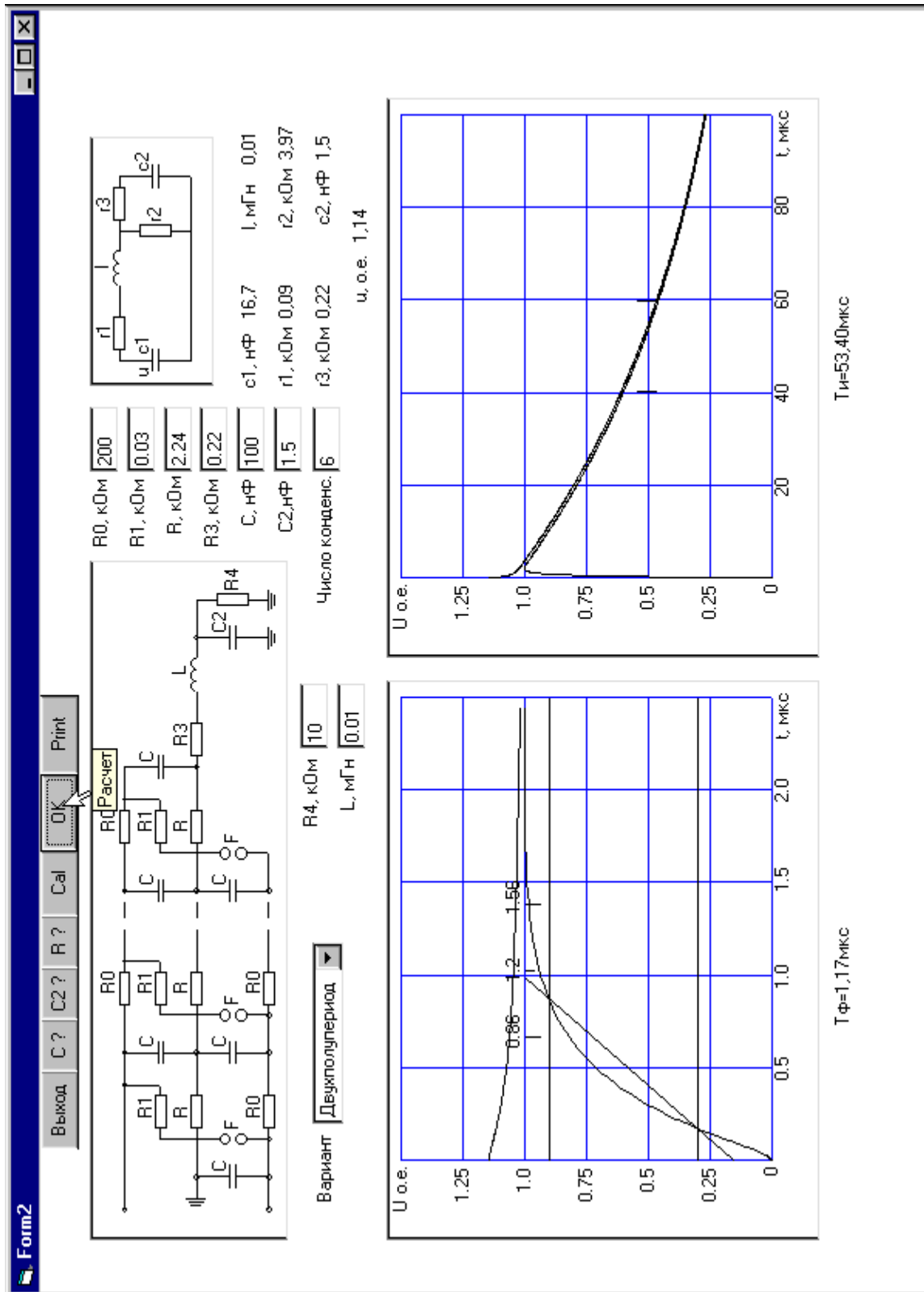


Рис. 8.2. Окно расчета

ности импульса. Для получения зарядного напряжения конденсаторов ГИН следует максимальное значения испытательного импульсного напряжения поделить на коэффициент использования и число конденсаторов ГИН.

Данное расчетное окно рекомендуется вывести на печать для оформления отчета. Для этого необходимо включить принтер и нажать левой клавишей мыши на кнопку “Print”. Если принтер не готов к работе, то на экран выводится общепринятое сообщение системы Windows, которым и нужно руководствоваться.

Для получения зависимости длины фронта импульса и коэффициента использования от сопротивления фронтального резистора следует провести два аналогичных расчета. Первый – при увеличенном и второй при уменьшенном в 2 раза сопротивлении по сравнению со значением, при котором обеспечивалась стандартная длительность фронта импульса. При этом нужно следить за тем, чтобы величины сопротивлений соответствовали ряду сопротивлений “E-24”. Для изменения величины фронтального резистора $R3$ необходимо подвести курсор мыши на белое окошко правее обозначения $R3$, нажать левую клавишу мыши и с клавиатуры ввести соответствующее значение. Проведение нового расчета осуществляется нажатием левой клавишей мыши на кнопку “ОК”. Значения длительности фронта импульса и коэффициент использования следует записать для оформления этих зависимостей.

Для получения зависимости длины фронта импульса и коэффициента использования от сопротивления демпферных резисторов рекомендуется установить $R3 = 0.22$ кОм и провести 2 аналогичных расчета. Первый - при увеличенном и второй при уменьшенном в 2 раза сопротивлении $R1$ по сравнению со значением, при котором обеспечивалась стандартная длительность фронта импульса ($R1 = 0.03$ кОм), при тех же требованиях к величинам резисторов.

8.4. Определение зависимости длительности импульса и коэффициента использования ГИН от сопротивления разрядных резисторов

Для определения зависимости длительности импульса и коэффициента использования ГИН от сопротивления разрядных резисторов к расчету по параметрам, приведенным на рис. 8.2 необходимо добавить еще два расчета. Первый при уменьшенном сопротивлении резистора R примерно на 1 кОм, а второй при увеличенном сопротивлении также на приблизительно 1 кОм. При этом величины вводимых сопротивлений должны соответствовать ряду “E-24”.

8.5. Определение зависимости длительности фронта импульса и коэффициента использования ГИН от величины фронтальной емкости

Для определения зависимости длительности фронта импульса и коэффициента использования ГИН от величины фронтальной емкости к расчету, приведенному на рис. 8.2, необходимо добавить еще 2 расчета при изменении емко-

сти C_2 примерно в 2 раза в большую и меньшую стороны. При этом величина вводимой емкости должна соответствовать емкости конденсаторов, справочные данные о которых выводятся нажатием кнопки “ C_2 ?”.

8.6. Определение зависимости длительности импульса и коэффициента использования ГИН от емкости его конденсаторов

Для определения зависимости длительности импульса и коэффициента использования ГИН от емкости его конденсаторов к расчету, приведенному на рис. 8.2, следует добавить еще 2 расчета при изменении величины емкости C примерно в 2 раза в большую и меньшую стороны. При этом величина вводимой емкости должна соответствовать емкости конденсаторов, справочные данные о которых выводятся нажатием кнопки “ C ?”.

8.7. Расчет формы импульса выходного напряжения учебного ГИН

Упрощенная принципиальная схема учебного генератора импульсных напряжений приведена на рис. 8.9.

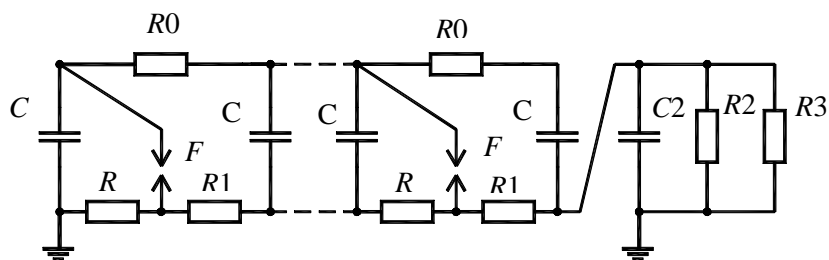


Рис. 8.9. Принципиальная схема учебного ГИН

Параметры схемы: $C = 140$ нФ, $R_0 = 12$ кОм, $C_2 = 1.125$ нФ, $R_2 = 13$ кОм, $R_3 = 10$ кОм, $R = 550$ Ом и $R_1 = 61$ Ом, число конденсаторов 6.

Для расчета формы импульса в боксе “Вариант” (см. рис. 8.2) выбрать “Однополупериодный”, в окнах ввода данных ввести эти параметры и нажать кнопку “Ок”. Полученный результат следует вывести на печать для оформления отчета.

8.8. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- распечатки расчетных окон двухполупериодной схемы зарядки и учебного ГИН,
- таблицы зависимостей длительностей фронта и импульса и коэффициента использования ГИН от фронтального сопротивления, фронтальной емкости, сопротивления разрядных резисторов и емкости конденсаторов,
- выводы по работе.

9. ГЕНЕРАТОР КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

9.1. Программа работы

Выбрать параметры генератора коммутационных импульсов напряжения для получения стандартного коммутационного импульса:

1. Апериодического “250/2500” на основе генератора импульсных напряжений;

2. Колебательного “4000/7500” на основе испытательного трансформатора при возбуждении его первичной обмотки от двух встречновключенных колебательных контуров;

3. Колебательного “4000/7500” на основе испытательного трансформатора при возбуждении его первичной обмотки от колебательного контура встречновключенного к контуру апериодического разряда конденсаторной батареи.

4. Выбрать параметры схемы для испытания внутренней изоляции силового трансформатора индуктированным напряжением коммутационного импульса “20/500”.

9.2. Пояснения к работе

Для испытания изоляции электрооборудования, согласно ГОСТ 1516.2-97, применяется апериодический и колебательный, затухающий около нулевого значения или вокруг составляющей более низкой частоты, коммутационные импульсы напряжения, приведенные на рис. 9.1. Время подъема T_n определяется как интервал времени между моментами, когда напряжение равно нулю и когда оно достигает максимального значения, а длительность импульса T_i – как интервал между началом подъема и моментом, когда напряжение снизилось до половины максимального значения.

Стандартный апериодический коммутационный импульс “250/2500” (см. рис. 9.1а) имеет следующие параметры:

время подъема $T_n = 250 \pm 50$ мкс,

длительность $T_i = 2500 \pm 500$ мкс,

допуск на максимальное значение испытательного напряжения ± 3 %.

Этим импульсом может проводиться испытание всех видов изоляции классов напряжения до 500 кВ включительно. Допускается применение апериодических импульсов “100/2500”, “500/2500” и “1000/5000” с допусками на время подъема ± 20 %, длительность ± 60 % и максимальное значение ± 3 %.

Стандартный колебательный коммутационный импульс “4000/7500”, (см. рис. 9.1б) применяемый для испытания газовой изоляции, испытываемой отдельно от внешней, и линейной изоляции, в том числе гирлянд изоляторов, имеет:

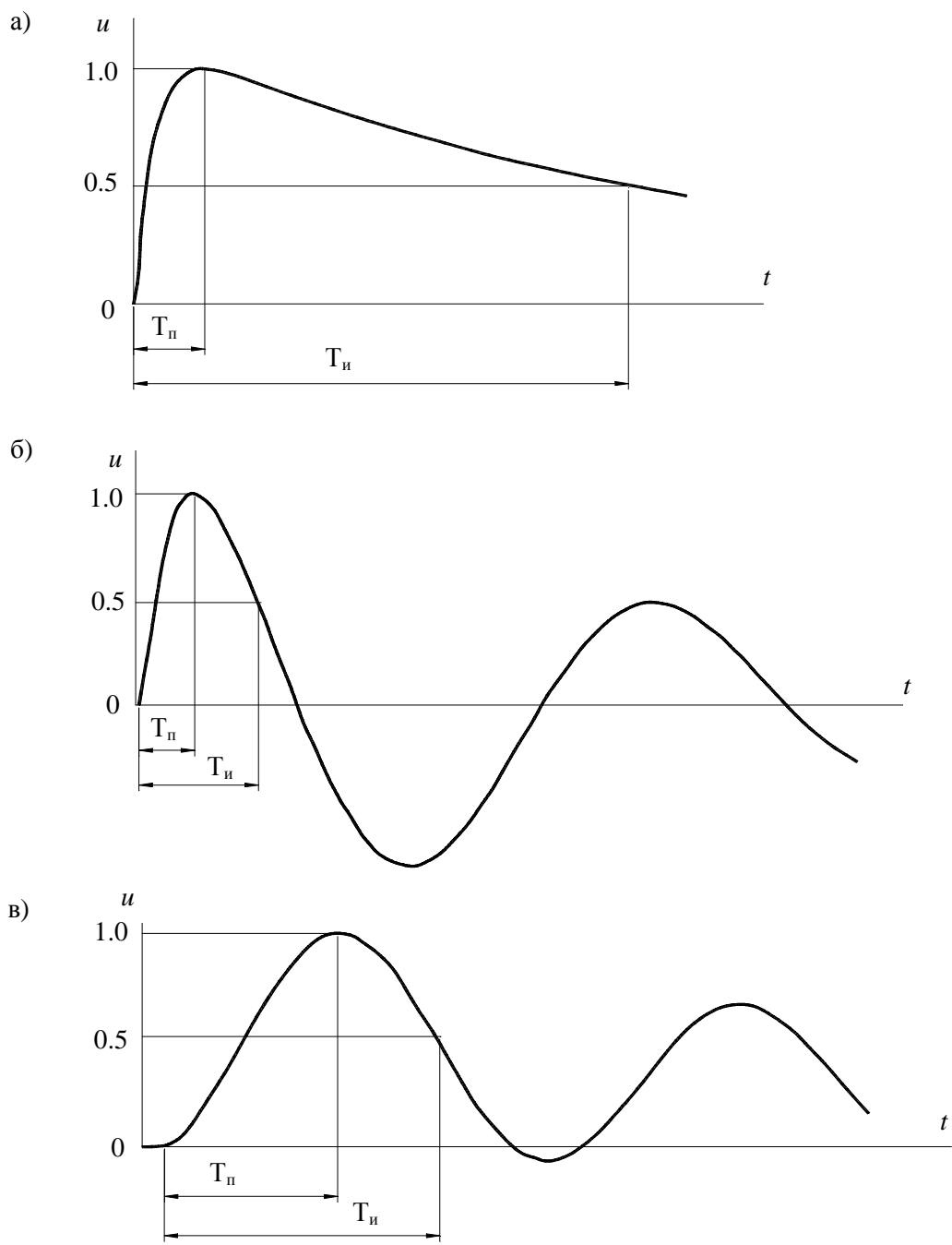


Рис. 9.1. Формы коммутационных импульсов: а) аperiodический, б) колебательный, затухающий около нулевого значения и в) колебательный, затухающий вокруг составляющей более низкой частоты

время подъема $T_n = 4000 \pm 1000$ мкс,

длительность $T_n = 7500 \pm 2500$ мкс,

допуск на максимальное значение испытательного напряжения $\pm 3\%$.

Допускается применение импульса “100/1000” для испытания газовой изоляции, испытываемой отдельно от внешней, и внутренней изоляции сило-

вых трансформаторов и импульса “20/500” - для внутренней изоляции шунтирующих реакторов и силовых трансформаторов. Полярность импульса определяется полярностью первого полупериода. При испытании внутренней изоляции силовых трансформаторов, трансформаторов напряжения и шунтирующих реакторов длительность импульса $T_{и}$ равна интервалу времени между началом подъема и первым переходом напряжения через нулевое значения.

При испытании объектов, представляющих собой емкостную нагрузку (выключатели, разъединители, трансформаторы тока, опорные изоляторы, гирлянды изоляторов и т.д.) ГОСТ 1516.2 - 97 рекомендует в качестве источников апериодических коммутационных импульсов использовать генераторы импульсных напряжений (см. рис.8.1) при соответствующем изменении сопротивлений резисторов R_0 , R , R_1 и R_3 , выходной емкости C_2 , а в некоторых случаях и емкости конденсаторов C ГИН для получения необходимой формы коммутационного импульса напряжения.

При испытании объектов колебательным коммутационным импульсом напряжения рекомендуется применять схемы на основе испытательного трансформатора или каскада трансформаторов.

9.3 Апериодический импульс “250/2500” на основе генератора импульсных напряжений

Выбор параметров генератора коммутационных импульсов осуществляется с помощью программы gik.exe, размещенной в директории C:\LabWin. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка с общим видом каскада трансформаторов на 2.25 МВ, логотипом кафедры и четырьмя кнопками управления программой: “ГИН”, “Транс.”, “Исп. транс.” и “Конец”. Для выполнения этого пункта следует левой клавишей мыши нажать на кнопку “ГИН”. Появляется расчетное окно рис. 9.2, в котором приведены в левом верхнем углу принципиальная схема, правее от нее окошки с параметрами, в верхнем правом углу – расчетная схема, ниже ее – расчетные параметры, ниже этих схем бокс для установки времени наблюдения, в низу утопленное окно для вывода расчетных кривых и в самом низу слева – координаты курсора в масштабе выводимых кривых напряжения. В самом верху окна имеются четыре кнопки управления программой в этом окне: “Выход”, “Импульс”, “Ok” и “Print”. Кнопка “Выход” возвращает программу в окно-заставку, нажатие кнопки “Импульс” выводит в низу экрана справочный бокс параметров апериодических импульсов, где на сером фоне приведен стандартный импульс, а на белом – импульсы, применения которых допускается. Нажатие кнопки “?”, расположенной правее бокса вызывает окно, в котором приведены справочные данные по использованию этих испытательных импульсов. Нажатие на кнопку “?”, расположенную в верхнем правом углу для вывода кривых, вызывает справочное окно, в котором даны пояснения по измерению мгновенных значений времен и напряжений. Все справочные окна закрываются нажатием кнопки “Ok” или своих кнопок “X”.

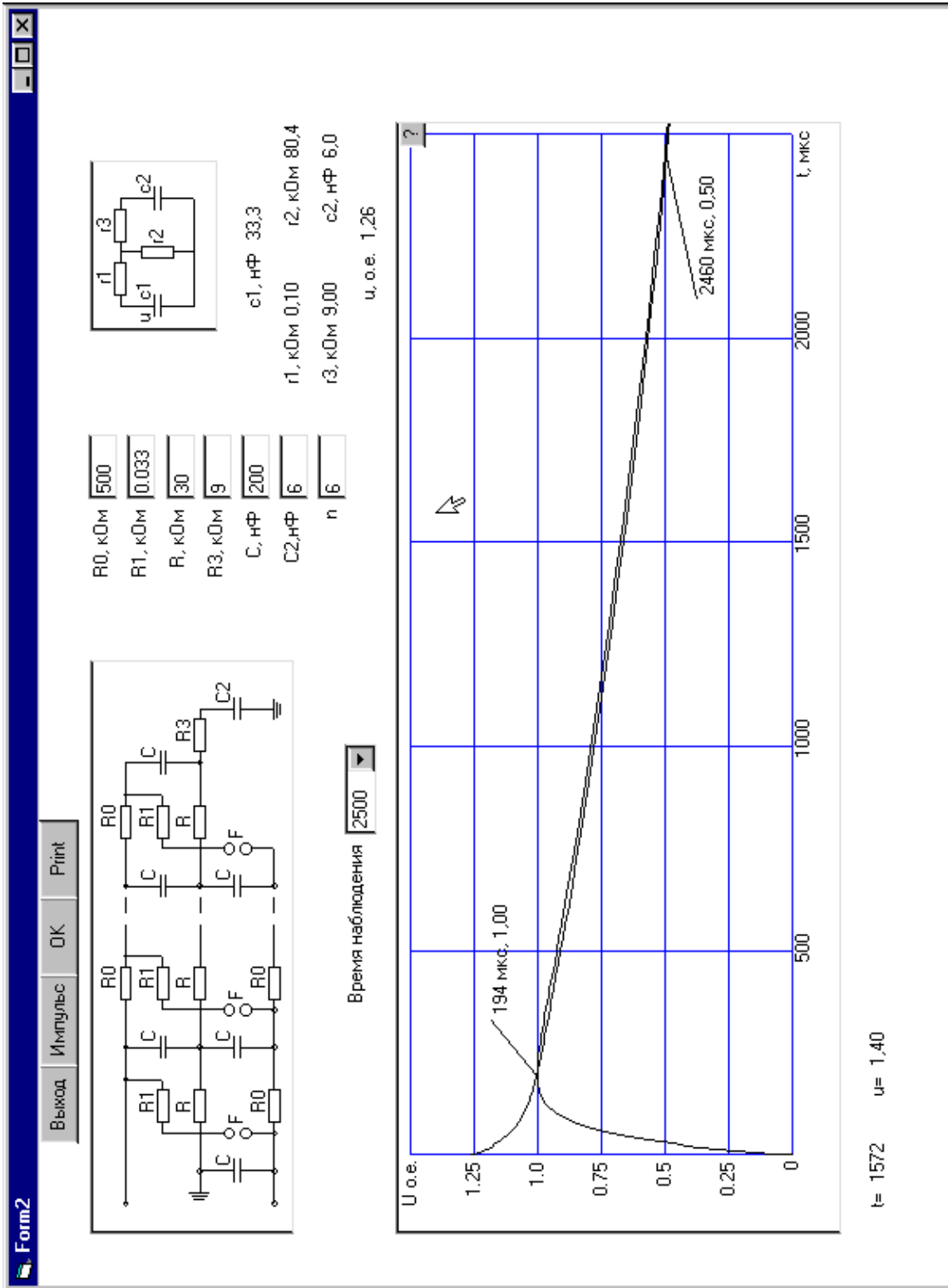


Рис. 9.2. Расчетное окно

В процессе расчета зарядное напряжение конденсаторов (красная на экране, верхняя в начале построения на рис. 9.2) изменяется так, что, независимо от параметров схемы, максимальное напряжение выходного импульса (черная на экране, нижняя в начале построения на рис. 9.2) имеет заданное значение, принимаемое за единицу.

На кривой выходного напряжения указаны согласно пояснениям, содержащимся под кнопкой “?”, окна вывода кривых, мгновенные значения времен на максимуме импульса и на 0.5 от максимального значения. По ним время подъема $T_{\text{п}} = 194$ мкс и длительность импульса $T_{\text{и}} = 2460$ мкс, что соответствует стандарту. Для получения зарядного напряжения конденсаторов ГИН следует максимальное значения испытательного импульсного напряжения помножить на значение u , о.е. и поделить на число его конденсаторов n .

Для изменения параметров принципиальной схемы необходимо подвести курсор мыши к соответствующему окошку ввода данных, нажать левую кнопку мыши и на клавиатуре набрать нужное значение. При этом нужно следить за тем, чтобы дробная часть отделялась точкой. Проведения очередного расчета осуществляется нажатием левой клавиши мыши на кнопке “Ok”.

Вывод содержимого экрана на принтер для оформления отчета осуществляется нажатием на кнопку “Print”. Следует заметить, что кнопка “Print” становится активной только после проведения очередного расчета. Рекомендуется выводить на печать только те расчетные окна, в которых импульсы напряжения соответствуют ГОСТ 1516.2 – 97.

9.4. Колебательный импульс “4000/7500” на основе испытательного трансформатора при возбуждении его первичной от двух встречновключенных колебательных контуров

Выбор параметров генератора коммутационных импульсов для получения стандартного колебательного импульса “4000/7500” на основе каскада трансформаторов ФРЕО 1550/750 при возбуждении их первичных обмоток от двух встречновключенных колебательных контуров осуществляется в расчетном окне рис. 9.3, которое появляется на экране дисплея после нажатия левой кнопки мыши на кнопке “Транс.” в окне-заставке. Это окно аналогично по содержанию окну, показанному на рис. 9.2, но добавлена еще одна кнопка “Транс.”, нажатие на которой вызывает справочные данные по некоторым каскадам трансформаторов используемых при построении генераторов коммутационных импульсов.

На расчетной схеме рис. 9.3, расположенной в верхнем правом углу $L1$, $C1$ - колебательный контур, обеспечивающий большей степени длительность коммутационного импульса, $L2$, $C2$ - колебательный контур, определяющий время подъема, L и $C3$ (в желтых окошках ввода данных на экране) – индуктивность короткого замыкания и собственная емкость испытательного каскада

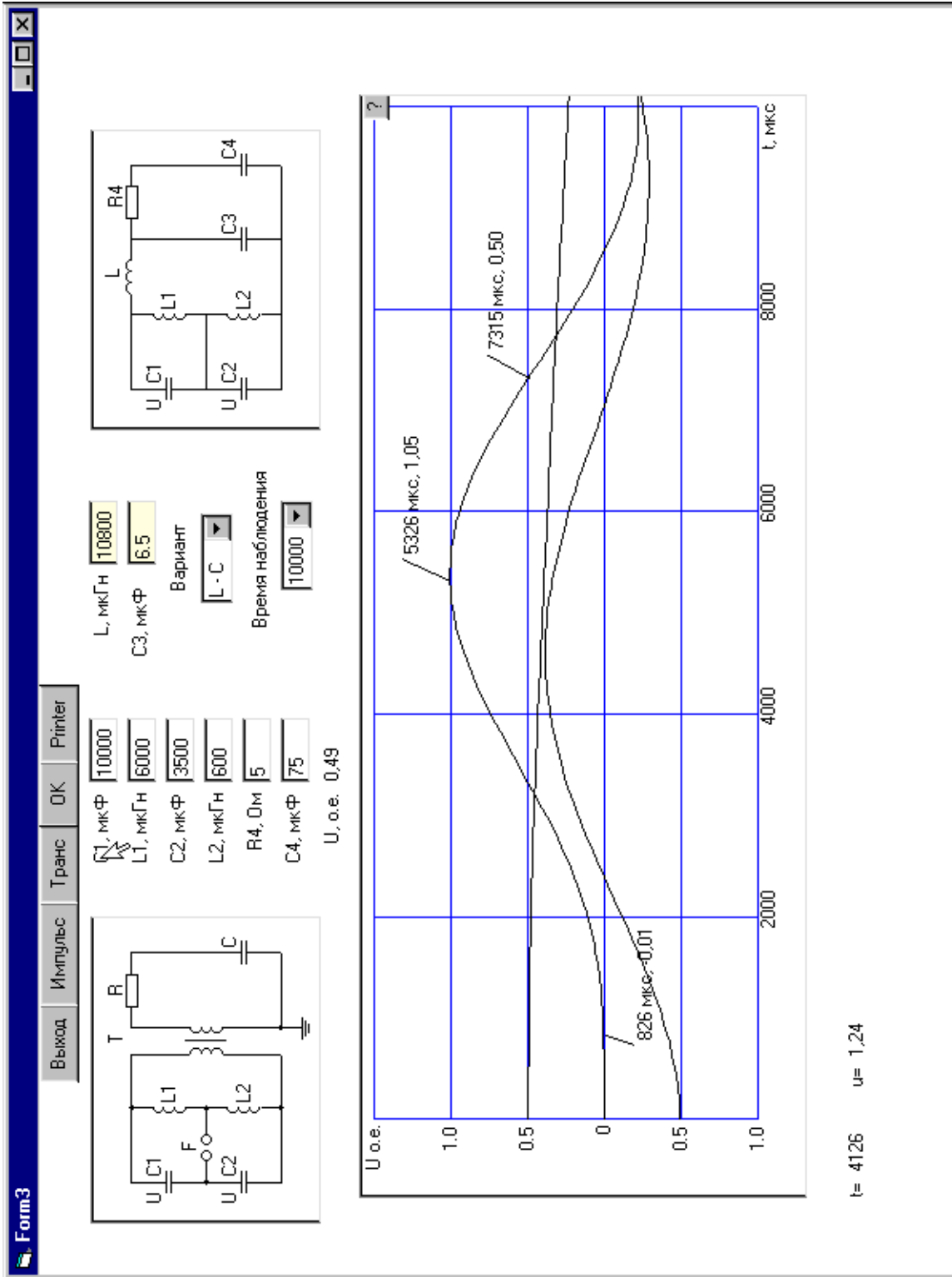


Рис. 9.3. Расчетное окно

трансформаторов, $R4$ - защитный резистор и $C4$ - емкость объекта и дополнительного конденсатора.

Все эти параметры приведены к низковольтной стороне испытательного каскада трансформаторов.

Параметры каскада трансформаторов, емкости объекта и дополнительного конденсатора рассчитаны следующим образом.

Мощность каскада трансформаторов $P = 4900$ кВА, напряжение питания $U = 6$ кВ, напряжение короткого замыкания $u_k = 46$ %, коэффициент трансформации $K = 375$ и собственная частота 600 Гц. Емкость объекта и дополнительного конденсатора согласно ГОСТ 1516.2 - 97 должна быть не менее 500 пФ. Тогда индуктивность короткого замыкания и емкость трансформатора, приведенные к стороне напряжения питания:

$$L = \frac{u_k U^2}{100 \cdot P \cdot 314} = \frac{46 \cdot 6000^2}{100 \cdot 490000 \cdot 314} = 10800 \text{ мкГн},$$
$$C3 = \frac{1}{f^2 \cdot 6.28 \cdot L} = \frac{1}{660^2 \cdot 6.28 \cdot 0.108} = 6.5 \text{ мкФ}.$$

Емкость объекта и дополнительного конденсатора

$$C4 \geq K^2 \cdot 500 \cdot 10^{-12} = 375^2 \cdot 500 \cdot 10^{-12} = 75 \text{ мкФ}.$$

Кривые импульсного напряжения, представленные на рис. 9.3 соответствуют: верхняя в начале построения (на экране красная) – изменению напряжения на емкости $C1$, нижняя (белая на экране) – изменению напряжения на емкости $C2$ и средняя (черная на экране) – напряжению на первичной стороне трансформатора T .

Аналогично п. 9.4 время подъема $T_n = 5326 - 826 = 4500$ мкс и длительность импульса $T_{и} = 7315 - 626 = 6489$ мкс. Этот импульс соответствует требованиям ГОСТ 1516.2 – 97 и следовательно нажатием на кнопку “Print” может быть выведен на печать для оформления отчета. Заметим, что зашитые в программе параметры не обеспечивают стандартный импульс. Рекомендуется для отчета выбрать параметры генератора при других его емкостях, отличных от приведенных на рис. 9.3.

9.5. Колебательный импульс “4000/7500” на основе испытательного трансформатора при возбуждении его первичной обмотки от колебательного контура встречновключенного к контуру апериодического разряда конденсаторной батареи

Для выбора параметров генератора коммутационных импульсов для получения стандартного колебательного коммутационного импульса “4000/7500” при возбуждении первичных обмоток трансформаторов каскада от колебательного контура встречновключенного к контуру апериодического разряда конденсаторной батареи необходимо в боксе “Вариант” рис. 9.3 выбрать “ $L - R$ ” и проделать аналогичные расчеты как в п. 9.4.

9.6. Выбор параметров схемы для испытания внутренней изоляции силового трансформатора индуктированным напряжением коммутационного импульса “20/500”

При испытании трансформаторов индуктированным напряжением можно применять схемы, основанные на принципе разряда ГИН на обмотку низкого напряжения испытываемого трансформатора. Такая схема показана в верхнем левом углу расчетного окна на рис. 9.4, в которой $C1, F, L2, R2, R3, C2$ - элементы генератора импульсных напряжений и T - испытываемый трансформатор, где a, b, c - обмотки низкого напряжения и A, B, C - обмотки высокого напряжения.

Это окно вызывается нажатием левой клавиши мыши на кнопке “Исп. транс.” в окне-заставке. По содержанию и работе с ним оно аналогично выше-приведенным (см. рис.9.2 и 9.3). Кнопкой “Транс.” здесь вызывается справочное окно по параметрам рекомендуемых к испытанию силовых трансформаторов высокого напряжения.

В приведенной в верхнем правом углу окна расчетной схеме получается колебательный импульс напряжения, форма первого полупериода которого может быть сделана близкой к форме апериодического импульса. Вследствие насыщения стали магнитопровода индуктивность холостого хода трансформатора зависит как от величины напряжения, так и от длительности импульса. Так как насыщение стали в программе не учтено, то форма импульса, полученная расчетным путем, может несколько отличаться от формы, получаемой в реальных испытательных схемах.

Индуктивность L в расчетной схеме представляет собой индуктивность короткого замыкания силового трансформатора. Для одного из рекомендованных на класс напряжения 330 кВ трансформаторов ТЦ 1000000 / 330, имеющего параметры: $P=1000000$ кВА, $U_{вн} = 347$ кВ, $U_{нн} = 24$ кВ, $u_k = 11 \%$, $i_0 = 0.4 \%$, $P_{xx} = 480$ кВт, емкость, измеренную на стороне 330 кВ $C_T = 2300$ пФ индуктивность короткого замыкания

$$L_{кз} = \frac{U_{нн}^2 u_k}{100 \cdot P \omega} = \frac{24^2 \cdot 10^6 \cdot 11}{100 \cdot 10^9 \cdot 314} = 0.202 \text{ мГн.}$$

Приведенная индуктивность согласно принципиальной схеме (см. правый верхний угол рис. 9.4)

$$L = L_{кз} \cdot 2/3 = 0.202 \cdot 2/3 = 0.135 \text{ мГн.}$$

Приведенная емкость на сторону низкого напряжения силового трансформатора согласно ГОСТ 1516.2 -97

$$C = C_T \cdot 0.5 \cdot K^2 = 2300 \cdot 0.5 \cdot (346/24)^2 = 245 \text{ нФ.}$$

Значение сопротивления резистора R , эквивалентирующего потери в стали равно

$$R = \frac{U_{нн}^2 \cdot 2}{P_{xx} \cdot 3} = \frac{24^2 \cdot 2}{480 \cdot 3} = 0.8 \text{ кОм.}$$

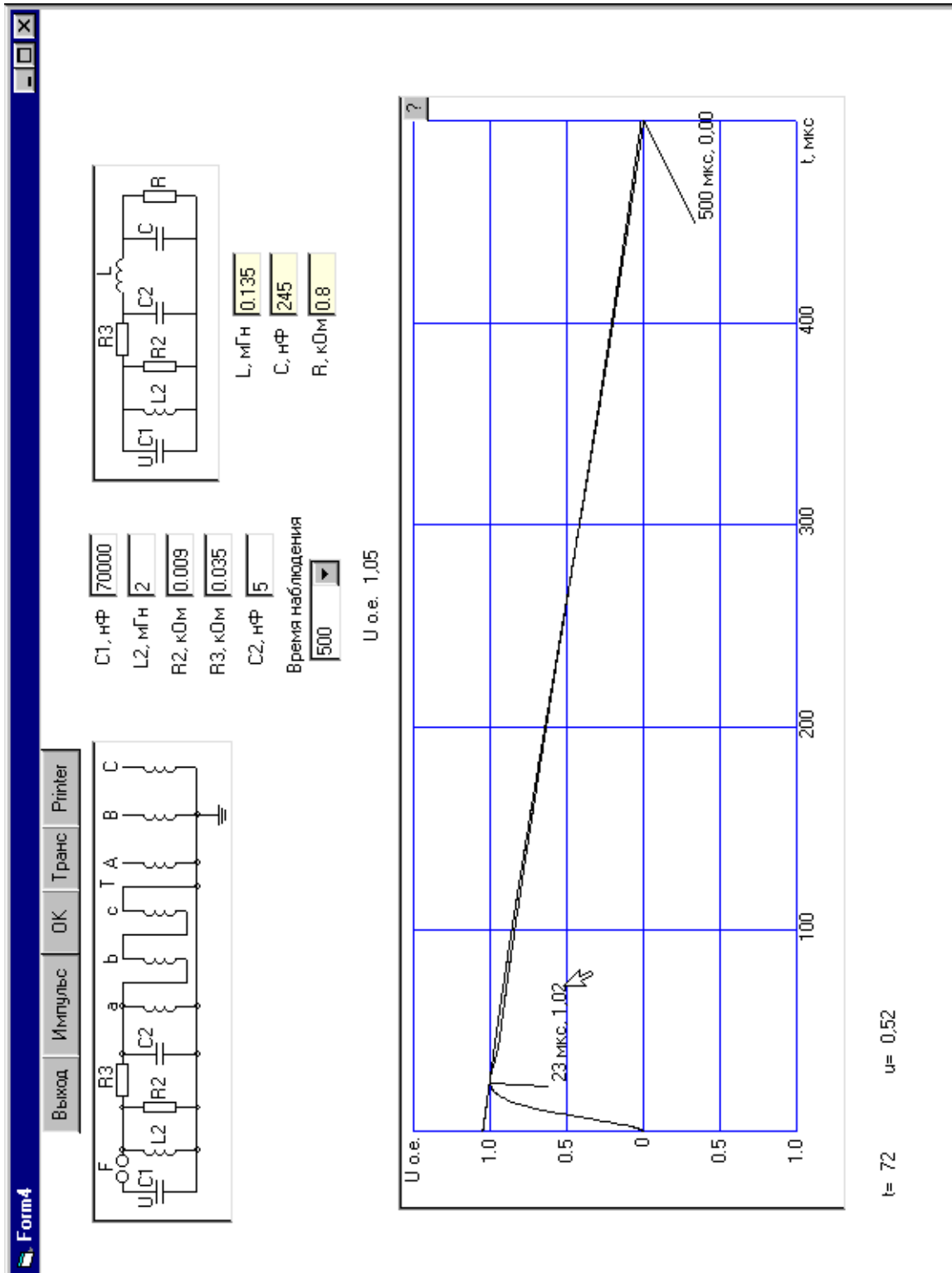


Рис. 9.4. Расчетное окно

Верхняя кривая импульсного напряжения на рис.9.4 (на экране дисплея красная) характеризует изменения напряжения на емкости $C1$ в процессе ее разряда на первичную обмотку испытуемого трансформатора, нижняя (черная на экране) – импульсное напряжение на емкости $C2$, т.е. на первичной обмотке этого же трансформатора.

При испытательном напряжении линейного вывода класса 330 кВ $U_{\text{исп}} = 950$ кВ напряжение на емкости $C2$ (см. расчетную схему рис. 9.4) может быть рассчитана по формуле

$$U_2 = \frac{U_{\text{исп}}}{K},$$

где K – коэффициент трансформации испытуемого трансформатора.

Зарядное напряжение конденсаторов ГИН (на емкости $C1$, см. расчетную схему рис.9.4) –

$$U = U_2 U_{\text{о.е.}}$$

где $U_{\text{о.е.}}$ – зарядное напряжение в относительных единицах, при котором максимальное значение выходного напряжения генератора импульсных напряжений, т.е. напряжение на первичной стороне испытуемого трансформатора равно единице.

Как видно из мгновенных значений времен, нанесенных согласно ГОСТ 1516.2 –97, импульс является стандартным и может быть нажатием на кнопку “Print” распечатан для оформления отчета.

9.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатки расчетных окон,
- б) расчеты параметров испытательных и испытуемых трансформаторов,
- в) выводы по работе.

10. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

10.1. Программа работы

1. Определить параметры импульса выходного напряжения.
2. Измерить коэффициент использования, индуктивность разрядного контура и выходную емкость.

10.2. Пояснения к работе

Основными электрическими параметрами генераторов импульсных напряжений являются:

форма генерируемого импульса (длительность фронта импульса и длительность импульса);

коэффициент использования

$$\eta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1 n};$$

максимальное значение выходного импульса

$$U_{\text{max}} = U_1 n \eta;$$

емкость в ударе

$$C_y = C / n;$$

количество энергии, запасаемой в генераторе

$$W = C_y U_1^2 n^2 / 2;$$

удельная энергия

$$K_w = W / V;$$

средний градиент напряжения по высоте

$$K_u = U_{\text{max}} / H,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – максимальное значение выходного импульса; U_1 – зарядное напряжение конденсаторов первой ступени; n – число ступеней; C – емкость одной конденсаторной ступени; V – строительный объем; H – высота генератора импульсных напряжений.

Часть из этих параметров – емкость в ударе, количество запасаемой энергии и удельная энергия – может быть определена расчетным путем. Длительность фронта импульса и самого импульса, коэффициент использования, максимальное значение напряжения выходного импульса, индуктивность разрядного контура и выходная емкость, представляющая собой емкости испытуемого объекта, делителя напряжения, фронтового конденсатора и собственных емкостей элементов ГИН, как правило, требуют и экспериментального определения.

10.3. Определение параметров импульса выходного напряжения

Параметры импульса выходного напряжения генератора определяются на установке, упрощенная принципиальная схема которой показана на рис. 10.1. На этой схеме QF , $KM1$, $T1$, $KM2$ и PV – элементы управления. $T2$ – высоковольтный трансформатор и VD – высоковольтный полупроводниковый вентиль используются в качестве зарядной установки. C – емкости ступени, состоящие из четырех конденсаторов емкостью по 35 нФ, F – искровые промежутки, $R0$, $R1$ и $R3$ – зарядные, демпферные и разрядные резисторы соответственно, $R2$ и $C2$ – отдельно стоящие разрядный резистор и фронтовой конденсатор являются элементами генератора импульсных напряжений. $R4$ и $R5$ представляют собой экранированный омический делитель напряжения, который используется для записи выходного импульса напряжения на осциллографе типа С8 – 13 и ИШР – измерительный шаровой разрядник с диаметром шаров 25 см для проведения градуировки делителя напряжения и осциллографа.

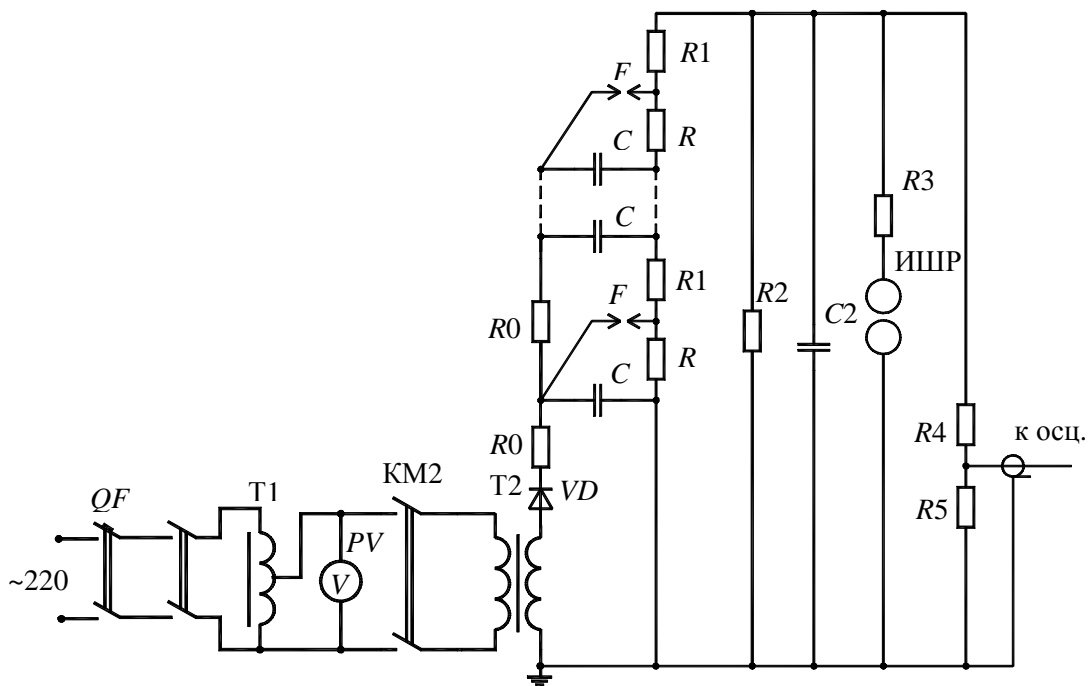


Рис. 10.1. Принципиальная схема ГИН

Для определения длительности фронта импульса выходного напряжения необходимо сначала включить выключателем “сеть” осциллограф С8–13 и настроить его. Для этого поставить:

ручку “автостирание” в левое крайнее положение “откл.”;

ручки “☉” и “★” в положение, при котором черная риска на ручке будет совпадать с красной черточкой на панели осциллографа;

переключатель “ярко, норм., память, накопл., форсир.” в положение “память”;

переключатель “~, ⊥, ≃” в положение “≃”;

ручкой “↑” добиться, чтобы красные светодиоды, расположенные справа от экрана, не светились;

переключатель “авт., ждущий” в положение “ждущий нормально”;

переключатель “внутр., сеть, внеш.” в положение “сеть”;

переключатель “≃, ~, вч.” в положение “≃”.

После того как экран станет светиться зеленым светом, последовательно нажать кнопки “стирание” и “готов”.

Если горизонтальная линия на экране не сфокусирована, то при помощи ручек “☉” и “★”, кнопок “стирание” и “готов” и ручки “↑” добиться нормальной фокусировки луча и чтобы он был сдвинут на одно деление сетки экрана вниз по отношению к центральной линии шкалы.

Далее поставить переключатели:

“время/дел.” – в положение “1” или “0.5”;

“mV/дел.” – в положение “20”;

“ $\times 1000$, $\times 100$, $\times 10$, $\times 1$ ” – в положение “ $\times 10$ ”;

“внут., сеть, внеш.” – в положение “внеш. 1:10”.

После проведения такой настройки следует приступить к работе по непосредственному определению длительности фронта импульса. Для этого необходимо:

снять заземляющую штангу № 3 с конденсаторов ГИН и заземляющие штанги № 2 и № 1;

удалить всех студентов с огражденной территории и закрыть на защелку дверь ограждения;

проверить положение ручки регулятора напряжения, расположенного слева от пульта управления. Ручка должна находиться в крайнем положении при вращении против часовой стрелки;

нажатием на пульте управления кнопки “контактор Г” (см. рис. 10.1, *QF*) включить пульт управления;

проверить полярность выходного импульса. Если горит сигнальная лампочка, указывающая полярность “-“, то нужно кратковременно нажать на кнопку “полярность” и через некоторое время полярность изменится, и загорится сигнал “+”;

кнопками “поджиг разрядника”, “увеличить расст.”, “уменьшить расст.” по прибору “зажигающий промежуток” установить расстояние 7–8 мм;

при помощи кнопок “увеличить расст.”, “уменьшить расст.”, находящихся на пульте управления в блоке кнопок “Расстояние между измерительными шарами”, установить расстояние между шарами измерительного разрядника 80–100 мм;

при помощи светящейся кнопки “главный контактор Г” включить магнитный пускатель *KM1* (см. рис. 10.1). При этом загорается красным светом кнопка “главный контактор 0” и размыкается механический заземлитель первой ступени конденсаторов;

кнопкой “контакт. норм. режима Г” включить магнитный пускатель *KM2*;

плавно, вращая по часовой стрелке ручку регулятора напряжения, увеличить зарядное напряжение до ~10 кВ так, чтобы ГИН срабатывал один раз в 4–5 с;

для получения изображения импульса на экране осциллографа нажать на кнопку “стереть”, а потом перед очередным разрядом ГИН – на кнопку “готов” и после получения изображения импульса отключить магнитный пускатель *KM2* путем нажатия кнопки “конт. норм. режима Г”.

Для отчета полученную осциллограмму импульса необходимо зарисовать на прозрачную бумагу, нанести масштабную сетку и обработать в соответствии с определением длительности фронта импульса (см. п. 8.2) и так, как это сделано на рис. 8.5.

Для измерения длительности импульса напряжения следует переключатель “время/дел.” на осциллографе установить в положение “5”, включить

кнопкой “контакт. норм. режима I” магнитный пускатель *КМ2*, нажать на кнопку “стереть”, а потом перед очередным разрядом ГИН – на кнопку “готов” и после получения изображения импульса отключить магнитный пускатель *КМ2* путем нажатия кнопки “конт. норм. режима 0”.

Полученную осциллограмму импульса необходимо зарисовать на прозрачную бумагу, нанести масштабную сетку и обработать согласно определению длительности импульса (см. п. 8.2).

10.4. Измерение коэффициента использования

Для измерения коэффициента использования следует включить магнитный пускатель *КМ2* и кнопками “увеличить расст.”, “уменьшить расст.”, находящимися на пульте управления в блоке кнопок “Расстояние между измерительными шарами”, установить расстояние между шарами измерительного разрядника так, чтобы из десяти срабатываний ГИН в четырех – шести случаях произошел пробой между шарами. По прибору “Зарядное напряжение”, установленному на пульте управления, в момент разряда ГИН измерить напряжение на первой ступени. Затем полностью отключить и заземлить установку согласно инструкции по технике безопасности. Измеренное напряжение и расстояние между измерительными шарами, определяемое по шкале прибора “Расстояние между измерительными шарами”, установленного на пульте управления, записать для оформления отчета. По диаметру измерительных шаров, расстоянию между ними и таблице (см. с. 25) определить значение выходного напряжения и по формуле

$$\eta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1 n}$$

вычислить коэффициент использования ГИН.

10.5. Измерение индуктивности разрядного контура и выходной емкости

Для измерения индуктивности разрядного контура необходимо специальными проводниками закортить демпферные резисторы *R1* (см. рис. 10.1) и штангой № 4 – разрядный контур. На осциллографе С8–13 установить переключатели:

“*mV* / дел.” – в положение “5” и “10”;

“авт. ждущий” – в положение “ждущий”;

“время/дел.” – в положение “2” в диапазоне “*mS*”;

“ярко, норм., память, накопл., форсир.” – в положение “накопл.”.

Включите установку точно так же, как описано в п. 10.3. Для снятия осциллограммы нажмите на кнопку “готов” и после очередного разряда отключите при помощи кнопки “конт. норм. режима I” магнитный пускатель *КМ2*. Переключатель осциллографа “ярко, норм., память, накопл., форсир.” переведите в положение “память”, зарисуйте на прозрачную бумагу полученную осциллограмму и полностью отключите установку.

Индуктивность разрядного контура рассчитывается по формуле

$$L_p = \frac{T_1^2}{4 \cdot \pi^2 C_r},$$

где T_1 – период колебаний, определяемый из осциллограммы короткого замыкания; C_r – эквивалентная емкость ГИН,

$$C_r = \frac{C_k n_1}{n_2},$$

где C_k – емкость конденсатора ГИН; n_1 – число конденсаторов на этаже; n_2 – число этажей ($C_k = 0.035$ мкФ, $n_1 = 4$, $n_2 = 6$).

Для измерения выходной емкости снимите штангу № 4 с разрядного контура, на осциллографе переключателя “mV / дел.” поставьте в положение в “10” и “15”, переключатель “время/дел.” переведите в положение “0.2”, включите описанным выше способом установку, снимите и зарисуйте на прозрачную бумагу осциллограмму. После этого полностью отключите и заземлите установку и снимите закоротки с демпферных резисторов.

Выходная емкость ГИН рассчитывается по формуле

$$C_v = \frac{C_r T_2^2}{T_1^2},$$

где T_2 – период колебаний, определяемый из опыта холостого хода.

10.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) расшифрованные осциллограммы;
- в) значения индуктивности разрядного контура и выходной емкости;
- г) выводы по работе.

11. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

11.1. Программа работы

1. Снять градуировочную кривую высоковольтного испытательного трансформатора с помощью шарового разрядника.
2. Измерить напряжение при помощи емкостного делителя:
 - а) с электростатическим вольтметром;
 - б) с микроамперметром.
3. Оценить синусоидальность высокого напряжения.

11.2. Пояснения к работе

Наиболее простым способом измерения напряжения промышленной частоты на высоковольтной стороне испытательного трансформатора является измерение напряжения на его низковольтной стороне и пересчет на высоковольтную сторону через коэффициент трансформации. Однако при этом необходимо иметь в виду, что связь между напряжениями первичной и вторичной сторон испытательного трансформатора будет различной при подключении к трансформатору разных объектов вследствие изменения падения напряжения на защитном сопротивлении и индуктивности трансформатора. Кроме того, на эту зависимость будет оказывать влияние нелинейность характеристик магнитопровода трансформатора и наличие короны на подводящих проводах и испытуемом объекте, поэтому для измерения напряжения на высоковольтной стороне трансформатора необходимо иметь градуировочную кривую трансформатора для заданной нагрузки.

Другой, требующий дополнительного оборудования, способ измерения высокого напряжения основан на применении емкостного делителя напряжения с подключением низковольтных измерительных приборов параллельно низковольтному его плечу. В этом случае измеряемое высокое напряжение равно показанию низковольтных приборов (в вольтах), помноженному на коэффициент деления делителя.

11.3. Снятие градуировочной кривой высоковольтного испытательного трансформатора с помощью шарового разрядника

Снятие градуировочной кривой высоковольтного испытательного трансформатора типа ИОМ 100/25 с помощью шарового разрядника осуществляется на высоковольтной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 11.1.

Перед измерениями напряжения следует записать значения атмосферного давления и температуры.

Для снятия одной точки градуировочной кривой необходимо:

между измерительными шарами диаметром 12.5 см установить при помощи шаблона расстояние 0.5 см;

по таблице (см. с. 25) определить для этого расстояния разрядное напряжение U_0 ;

снять заземляющую штангу с измерительного разрядника;

включить автоматический выключатель QF ;

при помощи кнопки " K_1 ", расположенной на пульте управления, включить магнитный пускатель $KM1$;

по вольтметру электромагнитной системы V , показывающему эффективное значение напряжения, проверить отсутствие напряжения на вторичной стороне регулятора $T1$. Если напряжение не равно нулю, ручкой регулирования напряжения установить нуль;

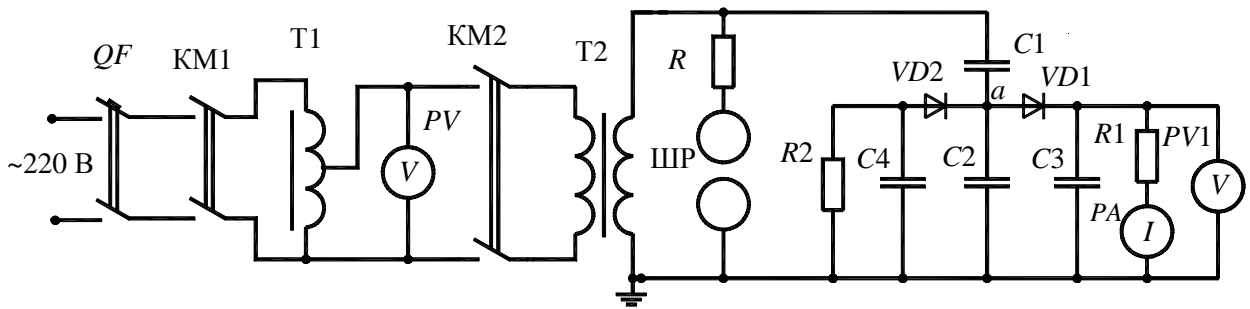


Рис. 11.1. Принципиальная схема установки

кнопкой “ K_2 ” включить магнитный пускатель $KM2$ и поднять напряжение до пробоя измерительного разрядника с такой скоростью, чтобы разряд произошел не ранее чем через 30 с после начала подъема. В момент пробоя зафиксировать показание вольтметра PV и записать его в таблицу результатов для отчета.

Для уменьшения случайной ошибки измерения следует провести еще хотя бы два таких опыта и определить среднее показание вольтметра. Вольтметр показывает эффективное значение напряжения. Разрядное напряжения шарового разрядника имеет амплитудное значение, приведенное к нормальным атмосферным условиям. Определив поправочный коэффициент на атмосферные условия

$$\delta = \frac{P \cdot 293}{P_0 (273 + t)},$$

следует найти амплитудное значение напряжения пробоя шарового разрядника для условий, при которых снимается градуировочная кривая, по формуле

$$U_{и} = \delta U_0,$$

где обозначения величин, входящие в эти формулы, такие же, как в п. 1.3.

При построении градуировочной кривой рекомендуется по оси абсцисс отложить показания вольтметра PV и по оси ординат – $U_{и}$.

Для построения градуировочной кривой дополнительно к этому рекомендуется провести аналогичные действия при расстояниях между шарами разрядника 1.0, 1.5 и 2.0 см.

Погрешность измерения напряжения по градуировочной кривой может быть оценена по формуле

$$\frac{\Delta U_m}{U_m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{273 + t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_1}{U_1}\right)^2 + 0.03^2},$$

где ΔS , ΔP , Δt , ΔU_1 – абсолютные погрешности измерения расстояния между шарами, давления, температуры и напряжения, измеренного вольтметром PV , соответственно (эти погрешности могут быть приняты равными половине деле-

ния соответствующей шкалы); 0.03 – относительная погрешность метода измерения напряжения шаровым разрядником.

11.4. Измерение напряжения при помощи емкостного делителя с электростатическим вольтметром

Для выполнения измерения напряжения при помощи емкостного делителя с электростатическим вольтметром необходимо включить установку, как было описано в п. 11.3, установить напряжение по вольтметру PV 60–70 В и записать показание электростатического вольтметра $PV1$ (см. рис. 11.1). Амплитудное значение напряжения на высоковольтной стороне трансформатора

$$U = K U_{m2},$$

где K – коэффициент деления емкостного $C1$, $C2$ делителя напряжения, $K = \frac{C1 + C2}{C1}$; $C1 = 350$ нФ и $C2 = 0.325$ мкФ; U_{m2} – амплитудное значение напряжения, измеренное вольтметром $PV1$.

Погрешность измерения напряжения может быть оценена по формуле

$$\frac{\Delta U_m}{U_m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{m2}}{U_{m2}}\right)^2 + 0.02^2},$$

где $\frac{\Delta K}{K} = 0.02$ – относительная погрешность измерения коэффициента деления емкостного делителя напряжения; ΔU_{m2} – абсолютная погрешность электростатического вольтметра; 0.02 – относительная погрешность схемы измерения, определяемая емкостями измерительных конденсаторов $C3 = C4 = 1$ мкФ и сопротивлениями резисторов $R1 = R2 = 910$ кОм.

11.5. Измерение напряжения при помощи емкостного делителя с микроамперметром

Измерение напряжения при помощи емкостного делителя с микроамперметром отличается от измерения напряжения, описанного в п. 11.4, только тем, что в этом случае напряжение на высоковольтной стороне испытательного трансформатора определяется по показанию микроамперметра (см. рис. 11.1), поэтому для измерения напряжения необходимо провести все те действия, как и в п. 11.4, и записать показание микроамперметра PA . Амплитудное значение напряжения в этом случае

$$U = K R1 I,$$

где I – показание микроамперметра.

Погрешность измерения оценивается по следующей формуле:

$$\frac{\Delta U_m}{U_m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R1}{R1}\right)^2 + 0.02^2},$$

где ΔI – абсолютная погрешность измерения тока микроамперметром PA ;
 $\frac{\Delta R1}{R1} = 0.01$ – относительная погрешность измерения сопротивления резистора $R1$.

11.6. Оценка синусоидальности высокого напряжения

Для измерения синусоидальности высокого напряжения следует установить значение напряжения, как описано в п. 11.4 и электростатическим вольтметром $PV1$ измерить его амплитудное значение U_m (см. рис. 11.1). Далее, не отключая установки и не изменяя величины напряжения необходимо переключить электростатический вольтметр в точку a и измерить эффективное значение напряжения U . В случае синусоидальности напряжения отношение

$$\frac{U_m}{U} = \sqrt{2} \pm 0.07.$$

11.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы результатов измерений;
- в) градуировочную кривую испытательного трансформатора;
- г) выводы по работе.

12. ОМИЧЕСКИЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

12.1. Программа работы

Определить:

- а) характеристики делителя напряжения учебного генератора импульсных напряжений;
- б) влияние элементов делителя, указанных преподавателем, на форму передаваемого импульса.

12.2. Пояснения к работе

Осциллографирование импульсов высоких напряжений производится при помощи делителей напряжения, поскольку значение напряжения, подаваемое на пластины осциллографа, не может превысить 500 В. Омический делитель напряжения состоит из двух последовательно соединенных резисторов, один из которых рассчитан на полное измеряемое напряжение, а второй – на напряжение, подающееся на пластины осциллографа.

Основными характеристиками делителя напряжения являются:

реакция на единичный прямоугольный импульс, численно равная площади, заключенной между единичным прямоугольным импульсом, подаваемым на делитель и приведенным к низковольтному плечу, и соответствующей ему кривой напряжения, снимаемой с низковольтного плеча;

время передачи, численно равное длительности между моментами, соответствующими одинаковым мгновенным значениям напряжения для подаваемого на делитель и приведенного к его низковольтному плечу и записанного ;

время нарастания, численно равное промежутку времени в течение которого кривая реакции на единичный прямоугольный импульс возрастает от 0.1 до 0.9 максимального значения.

12.3 Определение характеристик делителя напряжения учебного генератора импульсных напряжений

Определение характеристик делителя напряжения может быть осуществлено при помощи программы `dn.exe`, размещенной в директории `C:\LabWin`. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка, в котором на фоне генератора импульсных напряжений на 1.5 МВ приведен делитель напряжения, логотип кафедры и три кнопки управления: “дн”, “дн-о” и “Конец”.

Нажатие левой клавиши мыши на кнопке “дн” приводит к появлению окна расчета рис. 12.1. В верхнем левом углу этого окна приведен эскиз делителя напряжения, где Hd – высота делителя; Ro , Rt , Rot – радиусы изоляционной трубы, экрана и экранной трубы соответственно; Ho и S – расстояния от земли и от ближайшего заземленного ограждения соответственно; Hx – расстояние до экрана от верхней части делителя. В правом верхнем углу показана его принципиальная схема, в которой $C31$ – $C35$ – частичные емкости делителя по отношению к заземленным предметам; $Ce1$ – $Ce5$ – частичные емкости делителя на экран; Ce – емкость экрана на землю; $L1$, $R1$ и C – индуктивность, сопротивление и продольная емкость на единицу длины высоковольтного плеча делителя соответственно; $L2$, $R2$ и $C2$ – индуктивность, сопротивление и емкость низковольтного плеча делителя соответственно; Re – сопротивление между верхней частью делителя и экраном; L – индуктивность контура подключения делителя; R – сопротивление, включаемое в цепь контура подключения для компенсации влияния индуктивности; E – прикладываемое напряжение.

В программе защиты данные для делителя напряжения на 1.5 МВ. Поэтому вместо этих данных следует ввести значения для учебного ГИН: $Hd = 1.7$ м, $Ro = 0.05$ м, $Rt = 0.4$ м, $Rot = 0.04$ м, $Ho = 0.3$ м, $S = 1.5$ м, $Hx = 0.15$ м, $L1 \approx 0.35$ мкГн, $R1 = 2$ кОм, $C \approx 2$ пФ, $R2 = 4$ Ом, $Re = 0.42$ кОм, $L \approx 10$ мкГн, $L2 = 5$ нГн, $R = 0.9$ кОм. Ввод осуществляется следующим образом. Курсор мыши подводится к соответствующему окошку ввода, нажимается левая клавиша мыши и на клавиатуре набирается нужное значение.

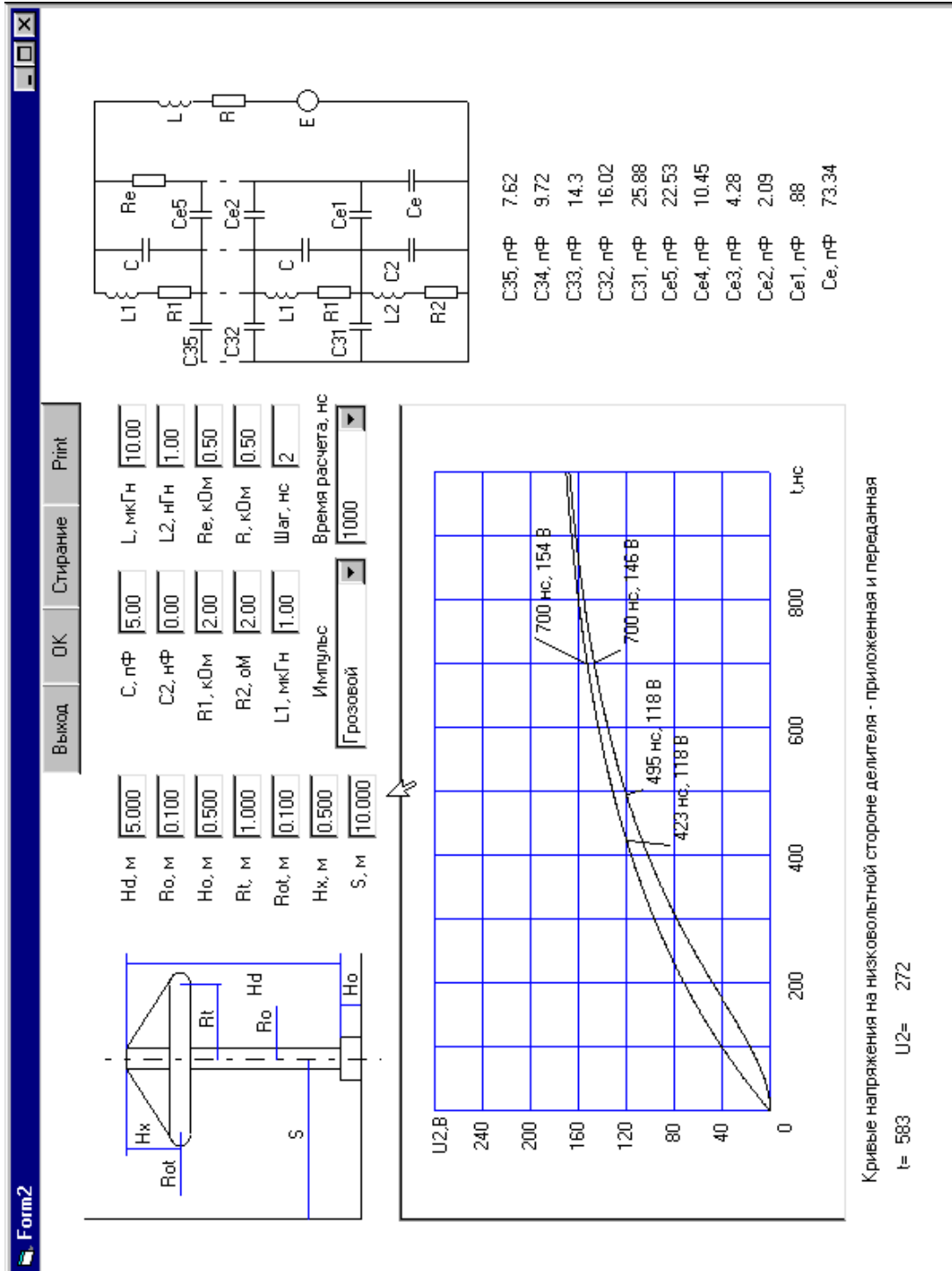


Рис.12.1.1. Расчетное окно

На рис. 12.1 показаны кривые напряжения для делителя на 1.5 МВ для параметров, приведенных на этом же рисунке: верхняя (на экране дисплея красная) – подаваемого на делитель, но пересчитанного на низковольтное плечо делителя по коэффициенту деления, нижняя (черная на экране) – выведенная программой. Правее этих кривых приведены собственные емкости делителя, рассчитанные программой.

Для проведения нового расчета необходимо левой клавишей мыши нажать сначала на кнопку “Стирание”, а потом “Ок”.

Для определения времени передачи необходимо подвести кончик курсора мыши к соответствующей точке левой кривой, например к точке с мгновенным значением напряжения 120 В, как на рис. 12.1, нажать левую кнопку мыши, удерживая нажатой отвести курсор на свободное место и кнопку мыши отпустить. Далее провести такие же действия на правой кривой. Время передачи будет равно разности этих времен. Например, для кривых на рис. 12.1 $T_{\text{п}} = 495 - 423 = 72$ нс. Рекомендуется такие измерения провести еще для двух других уровней напряжения и время передачи определить как среднее из трех измерений. Таким образом обработанное расчетное окно следует нажатием на кнопку “Printer” вывести на печать для составления отчета.

Для определения погрешности передачи при срезе импульса на фронте необходимо провести аналогичные действия при одинаковом времени например 700 нс, как на рис. 12.1. Погрешность измерения

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{(154 - 146) \cdot 100}{154} = 5.2 \%$$

Рекомендуется определить погрешность измерения для срезанных импульсов на фронте не менее чем для трех значений времени среза.

Для определения реакции на единичный прямоугольный импульс и времени нарастания в боксе “Импульс” следует выбрать “Скачкообразный”, нажать кнопку “Стирание” и “ОК”.

После расчета под кривыми будет выведено численное значение реакции на единичный прямоугольный импульс. Для определения времени нарастания необходимо установить кончик курсора мыши на максимальное значение импульса и по показаниям в левом нижнем углу экрана определить численное значение напряжения. Помножьте полученное значение на 0.9, на этом уровне установите курсор мыши на черную на экране кривую, нажмите левую клавишу мыши, удерживая нажатой отведите курсор на свободное место в пределах окна построения кривых и клавишу мыши отпустите. Далее подведите курсор на эту же кривую в точку, соответствующую значению напряжения 0.1, и сделайте те же действия. Время нарастания по определению будет равно разности этих времен. При экспоненциальном изменении кривой реакции на единичный прямоугольный импульс, что имеет место в омических делителях напряжения, время нарастания превышает время реакции на единичный импульс в 2.2 раза. Это окно следует нажатием левой клавиши мыши на кнопке “Printer” вывести

на печать для составления отчета. Следует отметить, что кнопка “Printer” становится активной только после проведения очередного расчета.

12.4. Определение влияния некоторых элементов делителя на форму передаваемого импульса

Рекомендуется определить влияние на форму передаваемого импульса индуктивности подводящего контура, расстояния S установки делителя от заземленных предметов, радиуса экрана Rt , радиуса трубы экрана Rot и места установки экрана по отношению верха делителя, расстояния Hx . Влияние каждого из этих параметров следует определить при помощи проведения аналогичных п. 12.3 расчетов при не менее чем двух значениях соответствующего параметра и чтобы влияние было бы более четким не следует стирать результаты предыдущего расчета. Вывод сделать в форме констатации.

12.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатки расчетных окон;
- б) результаты определения времени передачи, погрешности измерения и времени нарастания;
- в) выводы по работе.

13. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

13.1. Программа работы

Определить:

- а) коэффициент деления омического делителя напряжения и масштабный коэффициент измерительной системы;
- б) время передачи измерительной системы методом шарового разрядника.

13.2. Пояснения к работе

Измерение импульсных напряжений, как правило, осуществляется при помощи делителя напряжения и импульсного осциллографа. Делитель напряжения, помимо характеристик, указанных в гл. 12, характеризуется также коэффициентом деления, равным отношению напряжения, приложенного к делителю, и напряжения, снимаемого с его низковольтного плеча. Для измерительной системы более удобным является масштабный коэффициент, определяемый как отношение напряжения, приложенного к делителю, и отклонение луча импульсного осциллографа.

По рекомендациям МЭК одним из способов определения времени передачи делителя и всей измерительной системы является метод шарового разрядника. Он основан на использовании зависимости разрядного напряжения U шарового разрядника с шарами диаметром 25 см и расстоянием между ними 6 см от крутизны s линейно нарастающего импульса напряжения отрицательной полярности, показанной на рис. 13.1. Для любой точки вольт-секундной характеристики (рис. 13.2), например точки C , крутизну импульса можно определить как $s = U_c / T_c$. Если измерительная система искажает форму импульса, то в момент пробоя она

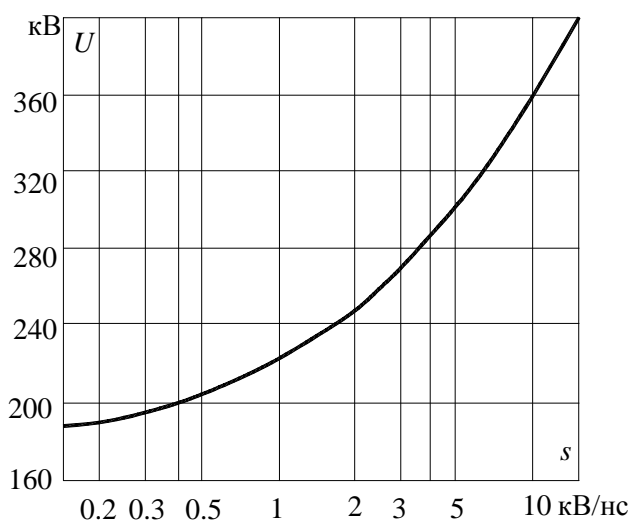


Рис.13.1. Зависимость разрядного напряжения от крутизны линейно нарастающего

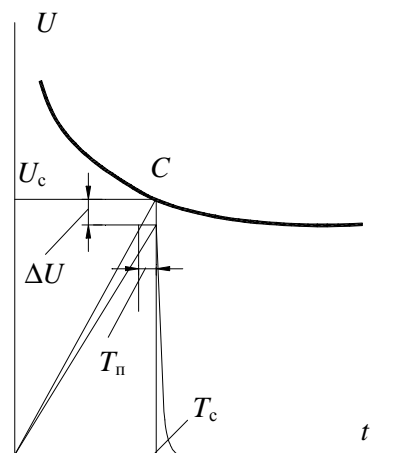


Рис. 13.2. К определению времени передачи

покажет напряжение $U_c - \Delta U$. Как видно из рис. 13.2, истинное значение напряжения измерительная система показывает с задержкой времени T_n , которое является временем передачи системы. Это время может быть определено из соотношения

$$T_n = \Delta U \frac{T_c}{U_c}, \text{ или } T_n = \frac{\Delta U}{s}.$$

13.3. Определение коэффициента деления омического делителя напряжения и масштабного коэффициента измерительной системы

Определение коэффициента деления омического делителя напряжения и масштабного коэффициента измерительной системы осуществляется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 10.1. Перед проведением измерений необходимо записать значение атмосферного давления и показание сухого термометра. Для определения масштабного коэффициента следует включить установку таким же способом, как описано в п. 10.3, установить расстояние между измерительными шарами диа-

метром 25 см $S = 6$ см и подобрать зарядное напряжения конденсаторов генератора импульсных напряжений так, чтобы из 10–15 срабатываний ГИН в 5–7 случаях произошел пробой измерительного разрядника. Снимите 3–4 осциллограммы, по каждой из них определите и запишите отклонения луча и отключите установку. Найдите среднее отклонение луча осциллографа в делениях шкалы h_r . По расстоянию $S = 6$ см, диаметру шаров 25 см и таблице (см. с. 25) определите максимальное значение импульсного напряжения U_0 . Приведите его к атмосферным условиям, при которых проводились измерения в соответствии с п. 1.3 и формулой

$$U_r = U_0 K_p K_t.$$

Отсюда масштабный коэффициент измерительной системы $m = U_r / h_r$ и относительная погрешность его определения

$$\frac{\Delta m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_r}{U_r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_r}{h_r}\right)^2},$$

где $\Delta U_r / U_r$ – относительная погрешность измерения шаровым разрядником, равная 3 %; Δh_r – погрешность определения отклонения h_r , примерно равная толщине луча.

При известной чувствительности осциллографа m_o (В/дел) напряжение на низковольтном плече делителя $U_n = m_o h_r$. Тогда коэффициент деления $K_d = U_r / U_n$.

Измерение импульсного напряжения осуществляется согласно отношению $U_x = m h_y$, где h_y – отклонение луча при измерении. Погрешность измерения может быть оценена по формуле

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_y}{h_y}\right)^2}.$$

13.4. Определение времени передачи измерительной системы методом шарового разрядника

Для определения времени передачи измерительной системы методом шарового разрядника необходимо включить установку и согласно ГОСТ 17512–82 провести следующие действия:

1. Кнопками “увеличить расст.”, “уменьшить расст.”, находящихся на пульте управления в блоке кнопок “Расстояние между измерительными шарами”, установить расстояние между шарами измерительного разрядника 7–7.5 см. При помощи регулятора напряжения и кнопок изменения расстояния между шаровыми разрядниками генератора сделать выходное напряжение таким, чтобы при каждом срабатывании ГИН пробивался промежуток измерительного шарового разрядника. Для получения изображения импульса на экране осциллографа следует нажать на кнопку “стереть”, а потом перед очередным разрядом ГИН – на кнопку “готов”.

Контролируемая часть подъема напряжения на экране осциллографа должна составлять не менее 40 % всего подъема перед пробоем, если только она не будет располагаться выше 160 кВ. Получите и зарисуйте на прозрачную бумагу три импульса напряжения. Определите скорость нарастания напряжения s из каждой осциллограммы как наклон наиболее подходящей прямой линии для контролируемой части осциллограммы, затем по трем осциллограммам – среднее значение s .

2. Установите расстояние между измерительными шарами 6 см и снимите три или более осциллограммы пробоя, без каких-либо изменений в настройке ГИН. Среднее из трех измеренных значений пробивных напряжений U_x приведите к нормальным атмосферным условиям по формуле

$$U_0 = \frac{U_x}{K_p K_t}.$$

По полученному среднему значению s и зависимости разрядного напряжения от крутизны линейно нарастающего импульса, приведенной на рис. 13.1, определите истинное значение пробивного напряжения U_c , а также время передачи

$$T_{\text{п}} = \frac{U_c - U_0}{s}.$$

3. Все вышеизложенное необходимо проделать с двумя другими заметно отличающимися значениями s , т.е. при других зарядных напряжениях конденсаторов ГИН.

4. Среднее значение $T_{\text{п}}$, полученное из трех измерений, следует принять за время передачи измерительной системы, а разброс в значениях – за показатель точности измерения.

При регистрации полного и срезанного импульсов время передачи согласно ГОСТ 17512 – 82 и п.12.3 не должно превышать 100 нс.

13.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) результаты определения масштабного коэффициента, времени передачи измерительной системы и коэффициента деления;
- в) расшифрованные осциллограммы;
- г) выводы по работе.

14. ЦЕПЬ “ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ – ОСЦИЛЛОГРАФ”

14.1. Программа работы

1. Определить погрешность, вносимую несогласованным кабелем присоединения осциллографа к омическому делителю напряжения, при записи срезанного стандартного импульса со временем среза 1 мкс.

2. Подобрать параметры схемы присоединения, обеспечивающие минимальную погрешность измерения срезанного на фронте импульса.

14.2. Пояснения к работе

Источником погрешности записи импульсов напряжения помимо искажения сигнала в схеме омического делителя напряжения и внешних помех, создаваемых электромагнитным полем высоковольтной установки и импульсами тока в контуре заземления, может быть кабель присоединения осциллографа к делителю напряжения. Длина этого кабеля, учитывая габариты высоковольтной установки, может достигать нескольких десятков метров. Если не выполнено условие “согласования” кабеля с низковольтным плечом делителя или с входным сопротивлением осциллографа, то многократные отражения волн от концов кабеля вносят искажения в записываемый сигнал. Стандартные значения волновых сопротивлений коаксиальных кабелей определены ГОСТ 11326.0–78 и составляют 50, 75, 100, 150 и 200 Ом. Входное сопротивление импульсного осциллографа находится в пределах от 200 до 100 кОм и без заметной погрешности может считаться бесконечно большим. Входная емкость – 20–100 пФ.

14.3. Определение погрешности, вносимой несогласованным кабелем присоединения осциллографа к омическому делителю напряжения, при записи срезанного стандартного импульса со временем среза 1 мкс

Определение погрешности, вносимой несогласованным кабелем присоединения осциллографа к омическому делителю напряжения, при записи срезанного стандартного импульса осуществляется при помощи программы dn.exe, размещенной в директории C:\LabWin. После запуска программы в окне-заставке необходимо левой клавишей мыши нажать на кнопку “дн-о”. Появится расчетное окно, показанное на рис. 14.1. В этом окне в боксе “Скачкообразный” поменять на “Грозовой”. Подвести курсор мыши в окно ввода данных правее R_2 , нажать левую клавишу мыши и на клавиатуре набрать “4”, что соответствует сопротивлению нижнего плеча делителя напряжения учебного ГИН. Аналогичным образом ввести значение сопротивления $R = 120$. Нажать кнопку управления программой “Ok”. После этого в углубленном окне для вывода кривых появятся кривые напряжения: левая (на экране дисплея красная) – импульс напряжения в начале соединительного кабеля и правая (на экране черная) – импульс напряжения в конце.

Для определения погрешности передачи необходимо кончик курсора мыши подвести на красную кривую для времени 1 мкс, нажать левую клавишу мыши, удерживая нажатой отвести курсор на свободное место в пределах окна построения кривых и отпустить. Аналогичные действия следует провести на черной кривой для времени 1.5 мкс, поскольку время

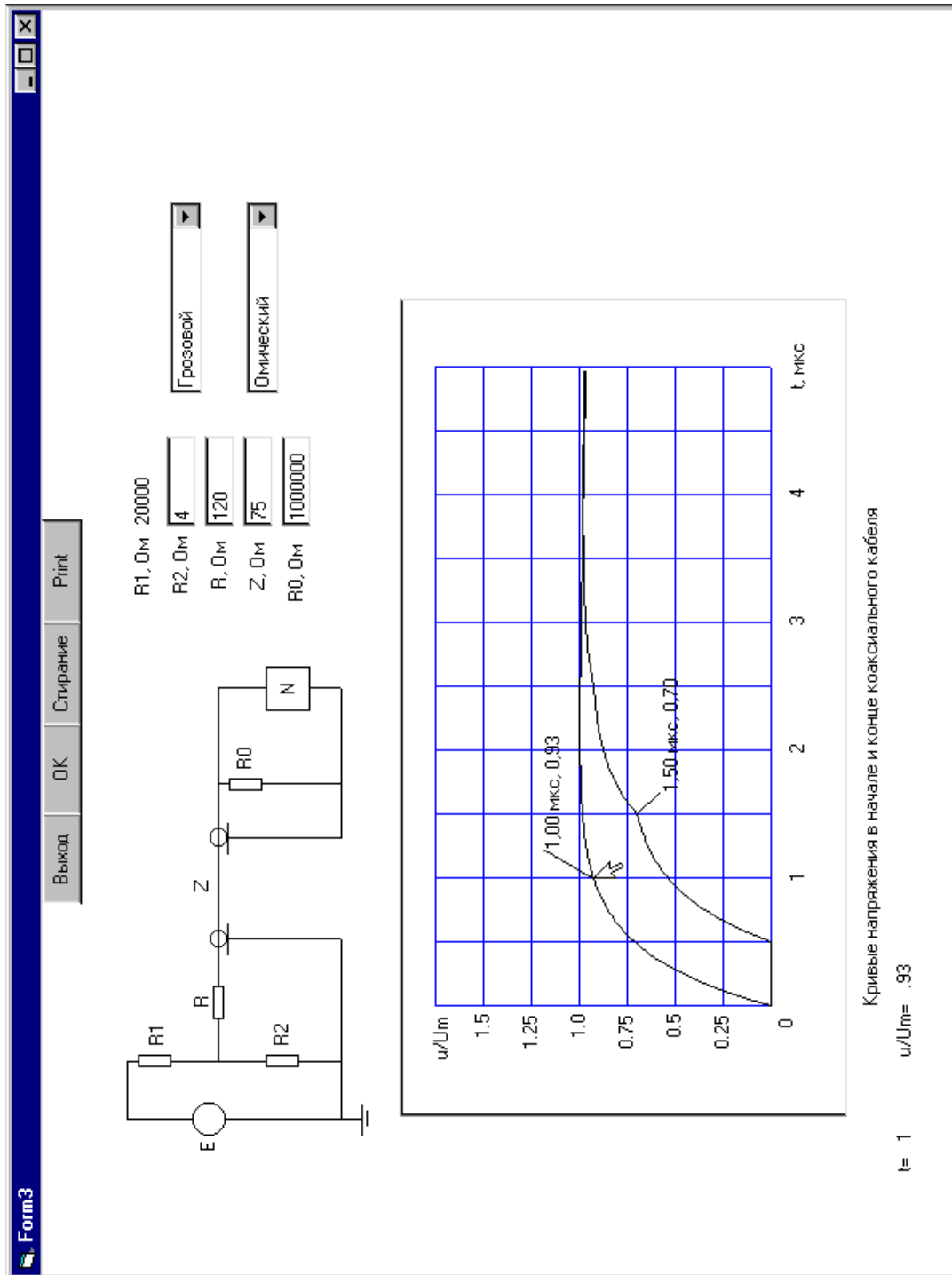


Рис. 14.1. Расчетное окно

пробега по кабелю длиной 10 м (такая длина кабеля учебного ГИН) составляет 0.5 мкс. В качестве примера такие действия проведены на крмвых рис. 14.1.

Погрешность передачи

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{0.93 - 0.70}{0.93} 100 = 24.7 \%$$

Заметим, что при вводе $R2$ программа изменяет и сопротивление высоковольтного плеча делителя так, что на его выходе напряжение остается неизменным и равным условной единице при заданном значении воздействующего напряжения $E = 1$ МВ.

Это окно нажатием кнопки “Printer” следует вывести на печать для составления отчета.

Далее в боксе “Грозовой” следует заменить на “Скачкообразный”, нажать на кнопку “Стирание” и провести новый расчет. Внизу под кривыми будет выведено “Время реакции на единичный импульс $T=3$ мкс”. Это время следует записать для составления отчета.

Такие расчеты следует провести еще для двух значений сопротивлений согласующего резистора, для $R = 0$ и $R = 71$ Ом. Полученные значения погрешностей и времен реакции следует записать для оформления отчета и убедиться, что при согласованном включении кабеля погрешность измерения и время реакции становятся равными нулю.

14.4. Подбор параметров схемы присоединения, обеспечивающих минимальную погрешность измерения срезанного на фронте импульса

При подборе параметров схемы присоединения, обеспечивающих минимальную погрешность измерения срезанного на фронте импульса рекомендуется добиться минимальной погрешности путем изменения значения сопротивления $R0$. Минимальная погрешность соответствует, как установлено в п. 14.3, времени реакции на прямоугольный импульс, равной нулю, поэтому расчеты можно проводить при воздействии прямоугольного импульса, что обеспечивает существенные удобства при оценке результатов расчета. Для этого в расчетном окне (см. рис. 14.1) нужно установить значения сопротивлений $R2 = 4$ Ом, $R = 0$ и последовательно провести расчеты для $R0 = 150$ Ом, $R0 = 100$ Ом, $R0 = 75$ Ом и $R0 = 50$ Ом. Для случая, когда время реакции на единичный импульс будет равно нулю, провести измерения максимального значения импульса напряжения U_{max} и определить коэффициент дополнительного деления напряжения по формуле $K = 1 / U_{max}$. Коэффициент дополнительного деления K увеличивает коэффициент деления делителя напряжения K_d в K раз, т.е. $K_c = K_d K$.

Далее, используя аналогичные расчеты, рекомендуется подобрать параметры схемы присоединения кабеля при величине сопротивления

низковольтного плеча делителя $R_2 = 150 \text{ Ом}$. Следует рассмотреть два варианта (а затем выбрать один из них и обосновать предпочтение):

выбрать новый измерительный кабель с соответствующим волновым сопротивлением;

согласовать подключение уже установленного кабеля и определить новое значение коэффициента деления измерительной системы K_c .

14.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатку расчетных окон;
- б) результаты оценки погрешности измерения срезанного импульса напряжения и коэффициента измерительной системы;
- в) выводы по работе.

15. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

15.1. Программа работы

Измерить зондирующий ток и определить системную погрешность:

- а) низкоомного шунта;
- б) воздушного трансформатора тока.

15.2. Пояснения к работе

Для измерения больших импульсных токов применяют низкоомные шунты и воздушные трансформаторы тока, называемые также поясами Роговского.

Измерение больших импульсных токов с помощью низкоомного шунта основано на регистрации осциллографом падения напряжения на нем. При этом

$$U = R_{ш} i + L_{ш} di/dt,$$

где $R_{ш}$ и $L_{ш}$ – активное сопротивление и индуктивность шунта соответственно.

Составляющая $L_{ш} di/dt$ зависит от скорости изменения тока и обуславливает ошибку при измерении первой амплитуды тока, поэтому шунты тока изготавливают так, чтобы их индуктивность имела наименьшее значение. Эскиз шунта учебной установки показан на рис. 15.1. Шунт представляет собой медный цилиндр 1 со вставленным внутрь его изоляционным цилиндром 2. По образующей изоляцион-

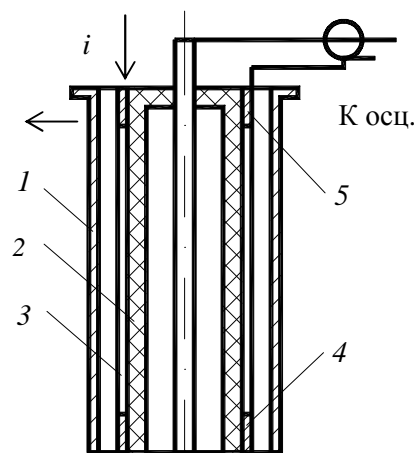


Рис. 15.1. Эскиз шунта тока

ного цилиндра натянуты проволоки из константана 3, диаметр которых 0.2 мм. Концы проволок припаяны к медным кольцам 4 и 5. Ток подводится к кольцу 5, протекает по проволокам 3 и возвращается обратно по цилиндру 1.

Воздушный трансформатор тока представляет собой катушку индуктивности, охватывающую проводник с током. Эскиз такого трансформатора учебной установки приведен на рис. 15.2. Катушка индуктивности 2 этого трансформатора однослойная, намотана медным проводом на изоляционный каркас виток к витку. Один из выводов катушки пропущен по ее средней линии в обратном направлении по отношению к направлению намотки.

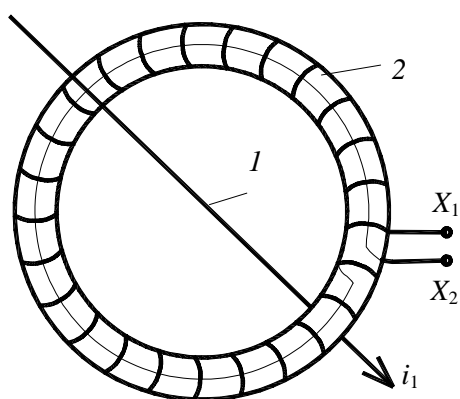


Рис.15.2. Эскиз воздушного трансформатора тока

Диаметр провода 0.8 мм, диаметр изоляционного каркаса 24 мм, длина намотки 1.2 м и число витков 1200. В качестве проводника с током I используется тоководущая шина генератора импульсных токов. При коротком замыкании выводов X_1 – X_2 катушки индуктивности соотношение между токами в шине и в обмотке катушки 2 равно $i_1 = w i_2$, где w – число витков катушки.

15.3. Измерение зондирующего тока и определение системной погрешности низкоомного шунта

Сопротивление шунта, используемого для измерения импульсного тока учебного генератора импульсных токов $R_{ш} = 0.026$ Ом. Его индуктивность $L_{ш} = 0.032$ мкГн. Из-за наличия индуктивности системная погрешность зависит от частоты тока и его затухания. Для рассматриваемого ГИТ частота колебаний тока 23 кГц, а декремент колебаний 8000 1/с.

Измерение зондирующего тока и определение системной погрешности метода низкоомного шунта осуществляется с помощью программы `ibt.exe`, размещенной в директории `C:\LabWin`. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка с примерами конструктивных выполнений шунтов, поясов Роговского, с общим видом измерительной системы учебного генератора импульсных токов, логотипом кафедры и тремя кнопками управления программой “Шунт”, “Пояс” и “Конец”. Нажатие левой клавиши мыши на кнопке “Шунт” вызывает расчетное окно, показанное на рис. 15.3. В этом окне необходимо при помощи мыши активизировать соответствующие окошки ввода данных, на клавиатуре для каждого активного окошка набрать данные соответствующие вышеприведенным параметрам учебного генератора и нажать на кнопку “Ok”. В утопленном окне будут выведены кривые напряжения, пропорциональные

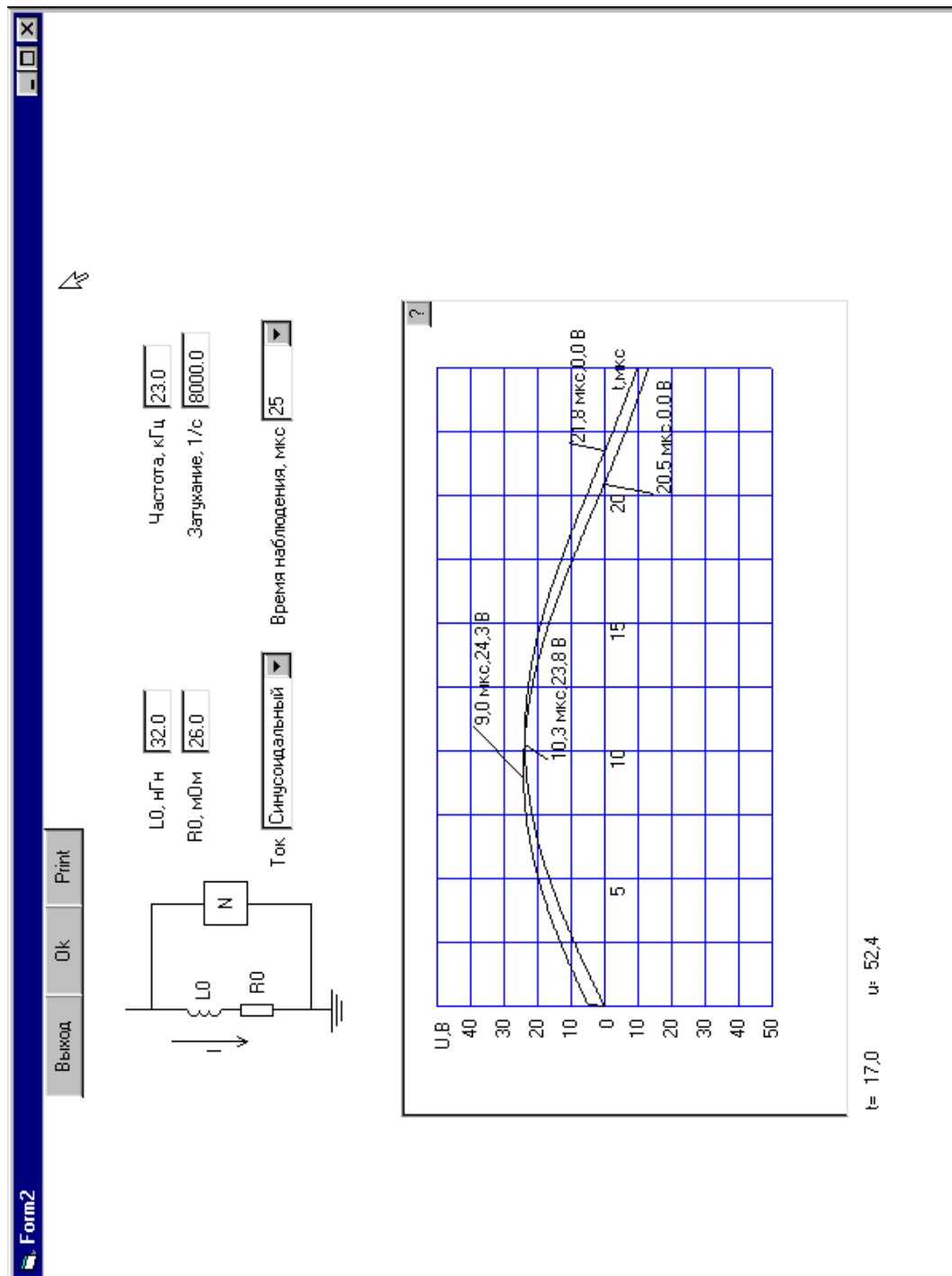


Рис. 15.3. Расчетное окно

каждая своему току. Верхняя (в начале построения см. рис. 15.3, черная на экране) соответствует напряжению, снимаемому с шунта тока, нижняя (на экране красная) тому же току без искажений.

Далее следует нажать левую клавишу мыши на кнопке “?”, расположенной в верхнем правом углу окна для вывода кривых, прочитать инструкцию по измерению мгновенных значений напряжений и времен и обработать кривые так, как показано на рис. 15.3. Тогда величина зондирующего тока

$$I = \frac{U_{\text{ч}}}{R} = \frac{24.3}{0.026} = 1012 \text{ А},$$

системная амплитудная погрешность

$$\delta_i = \frac{U_{\text{ч}} - U_{\text{к}}}{U_{\text{к}}} \cdot 100 = \frac{24.3 - 23.8}{23.8} \cdot 100 = 2.1\%,$$

и системная фазовая погрешность

$$\delta_{\phi} = \frac{U_{\text{к}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{ч}}} \cdot 100 = \frac{21.8 - 20.5}{21.8} \cdot 100 = 6\%,$$

где $U_{\text{ч}}$ и $U_{\text{к}}$ – мгновенные значения напряжений, относящиеся к черной и красной кривым на экране дисплея соответственно.

Это окно следует нажатием кнопки “Printer” вывести на печать для оформления отчета.

Рекомендуется определить, как влияет величина индуктивности на погрешность измерения синусоидального затухающего тока. Для этого в окне (см. рис. 15.3) нужно установить индуктивность шунта в два раза больше и потом в два раза меньше, запустить программу на расчет. Полученные результаты оформите в виде таблицы зависимости погрешности от индуктивности. Далее такие же действия сделайте для импульсного униполярного тока при постоянных времени, заданных в программе и потом в несколько раз больших.

15.4. Измерение зондирующего тока и определение системной погрешности воздушного трансформатора тока

Для измерения зондирующего тока и определения системной погрешности метода воздушного трансформатора в окне-заставке нужно нажать на кнопку “Пояс”. После этого на экране дисплея появляется расчетное окно, показанное на рис. 15.4. Здесь L и R_0 – индуктивность и активное сопротивление катушки индуктивности соответственно; a и e – Э.Д.С., равная напряжению на разомкнутых ее зажимах X_1 – X_2 (см. рис. 15.2). Резистор $R = 1.0$ Ом совместно с катушкой индуктивности представляют собой интегрирующий контур. Резистор R подключен к зажимам X_1 – X_2 для регистрации при помощи осциллографа тока в обмотке катушки i_2 .

Приведенные в этом окне параметры пояса следует заменить на параметры пояса учебного генератора импульсных токов, нажать на кнопку

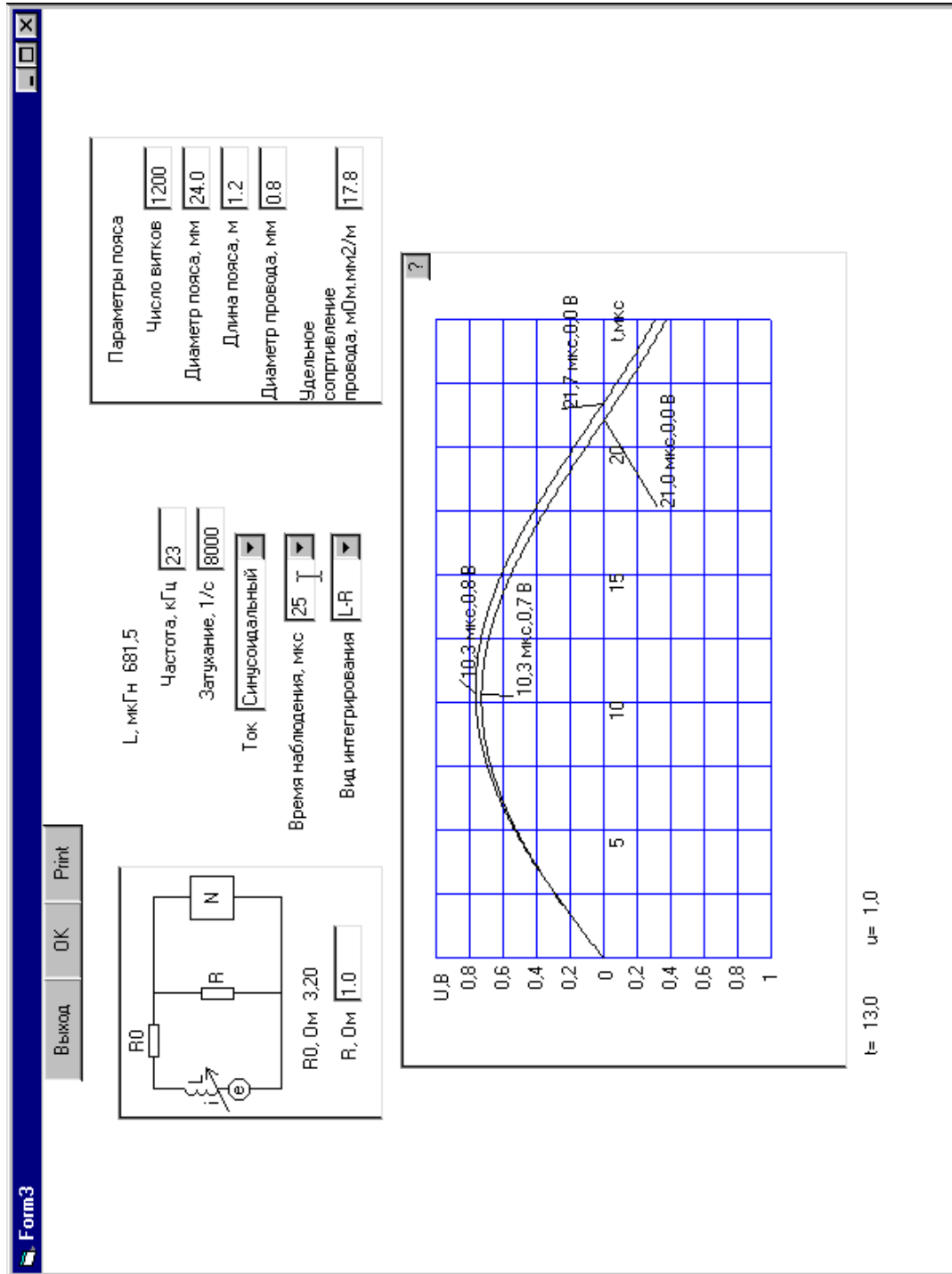


Рис.15.4. Расчетное окно

“Ok” и полученные кривые обработать так, как в п. 15.3. Здесь верхняя кривая (на экране дисплея красная) представляет собой напряжение, пропорциональное току без искажений, нижняя (на экране черная) – реальное напряжение, снимаемое с резистора R . Величина зондирующего тока

$$I = \frac{U_{\text{ч}}}{R} \cdot w = \frac{0.7}{1} \cdot 1200 = 840 \text{ А},$$

системная амплитудная погрешность

$$\delta_i = \frac{U_{\text{к}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{к}}} \cdot 100 = \frac{0.8 - 0.7}{0.8} \cdot 100 = 12.5 \%,$$

и системная фазовая погрешность

$$\delta_{\phi} = \frac{U_{\text{к}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{к}}} \cdot 100 = \frac{21.7 - 21.0}{21.7} \cdot 100 = 3.2 \%.$$

Это окно следует вывести на печать для оформления отчета. Дополнительно необходимо осуществить хотя бы два расчета при измененных значениях сопротивления R для определения влияния на погрешность измерения синусоидального затухающего тока. Результаты расчета оформите в виде таблицы зависимости погрешности от величины сопротивления. Такие же действия проведите для импульсного униполярного тока при постоянных времени, заданных в программе, и при постоянных времени уменьшенных в два раза и увеличенных на порядок по отношению к заданным. Результаты расчета оформите в виде таблицы.

Желательно провести такие же расчеты кривых тока при использовании интегрирующей $R - C$ цепочки. Для этого в боксе “Вид интегрирования” “ $L - R$ ” заменить на “ $R - C$ ”. В этом случае величина зондирующего тока и погрешностей могут быть определены по следующим формулам

$$I = \frac{U_{\text{ч}} R C}{L} \cdot w$$

системная амплитудная погрешность

$$\delta_i = \frac{U_{\text{к}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{к}}} \cdot 100,$$

и системная фазовая погрешность

$$\delta_{\phi} = \frac{U_{\text{к}} - U_{\text{ч}}}{U_{\text{к}}} \cdot 100.$$

15.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатку расчетных окон;
- б) результаты оценки погрешности и самого метода измерения;
- в) выводы по работе.

16. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

16.1. Программа работы

Измерить импульсный ток с помощью:

- низкоомного шунта;
- воздушного трансформатора.

16.2. Пояснения к работе

Источником импульсного тока является генератор импульсных токов, принципиальная схема которого приведена на рис. 16.1. Емкость его

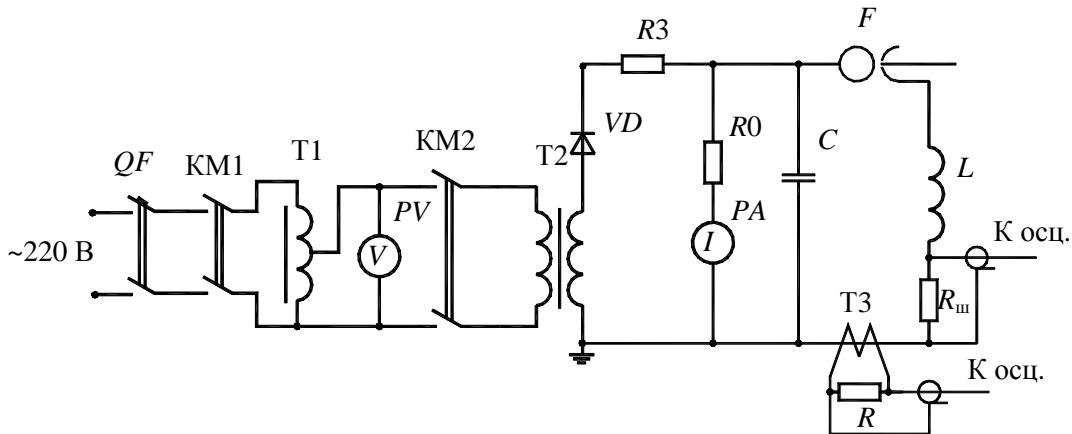


Рис. 16.1. Принципиальная схема ГИТ

конденсаторной батареи $C = 12$ мкФ. Конденсаторная батарея состоит из четырех конденсаторов ИК-50-3, включенных параллельно. Зарядное напряжение $7.5\text{--}10$ кВ. Нагрузкой является соленоид с диаметром $d = 70$ мм, длиной $l = 70$ мм и числом витков $w = 7$. Его индуктивность

$$L = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4l} w^2 k_\phi,$$

где $k_\phi = 0.6$ – коэффициент формы.

Индуктивность ошиновки ГИТ $L_0 = 150$ нГн. Активное сопротивление разрядного контура $R_p = 0.05$ Ом. Отсюда оценочные значения: максимального значения тока при зарядном напряжении $U_0 = 10$ кВ

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L + L_0}};$$

частоты колебаний тока

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L + L_0) C}}$$

и декремента колебаний

$$\delta = \frac{R}{2(L + L_0)}.$$

16.3. Измерение импульсного тока с помощью низкоомного шунта

Работу по измерению импульсного тока с помощью низкоомного шунта следует начать с настройки осциллографа С8–13. Для этого необходимо на вход осциллографа подключить коаксиальный кабель, приходящий на пульт управления с шунта. Затем ручку “автостирание” поставить в левое крайнее положение “откл.”, а переключатели:

“ярко, норм., память, накопл., форсир.” – в положение “норм.”;

“авт., ждущий” – в положение “авт.”;

“ \simeq , \sim , вч.” – в положение “вч.”;

“внутр., сеть, внеш.” – в положение “сеть”;

“разовый” – в положение “откл.”;

“время/дел.” – в положение “2” или “5” мкс;

“ $\times 1000$, $\times 100$, $\times 10$, $\times 1$ ” – в положение “ $\times 1000$ ”;

“ $mV/дел.$ ” – в положение “20” и включить осциллограф при помощи выключателя “сеть”.

В результате на экране должен появиться зеленый луч. Если он не сфокусированный, то с помощью ручек “ \odot ” и “ \star ” добейтесь нормальной яркости и фокусировки. Ручкой “ \updownarrow ” выведите луч на середину экрана. После этого переведите переключатели:

“ярко, норм., память, накопл., форсир.” – в положение “память”;

“авт., ждущий” – в положение “ждущий, нормально”;

“внутр., сеть, внеш.” – в положение “внеш.”;

“разовый” – в положение “разовый”.

Затем нажмите кнопки “ручное стирание” и “готов” и переключателем “+ –” запустите осциллограф.

На экране должен появиться луч. Далее нажмите кнопки “ручное стирание” и “готов”. Включите блок поджига ГПИ, для проверки запуска осциллографа от внешнего импульса нажмите кнопку “пуск”.

Затем следует включить генератор импульсных токов (см. рис. 16.1). Для этого:

снимите заземляющую штангу с батареи конденсаторов C ;

включите автоматический выключатель QF , расположенный на пульте управления, включите дистанционно при помощи кнопки включения магнитный пускатель $KM1$ и по вольтметру V проверьте наличие напряжения на вторичной стороне регулятора $T1$. Если напряжение не равно нулю, то при помощи регулятора напряжения $T1$ сделайте это напряжение равным нулю. Включите магнитный пускатель $KM2$ и медленно зарядите конденсаторную батарею ГИТ до напряжения 7.5–10 кВ. Нажмите кнопки “готов” на передней панели осциллографа и “пуск” на блоке поджига ГПИ. На экране осциллографа появится осциллограмма тока. После этого установку следует отключить, а осциллограмму скопировать на прозрачную бумагу. Нанесите нулевую горизонтальную линию – ось времени со шка-

лой; вертикальную ось из начала нарастания тока – ось тока со шкалой и по ней определите масштаб. Для этого на вход осциллографа подайте калибровочный сигнал от внутреннего генератора, выход которого обозначен “ $\square\square\square 0.6 \text{ В}$ ”, и найдите чувствительность $m_0 = 0.6 / h \text{ В/дел.}$, где h – отклонение луча. Масштаб по току

$$m_i = \frac{m_0}{R_{\text{ш}}} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{\text{А}}{\text{дел.}},$$

где $R_{\text{ш}} = 0.026 \text{ Ом}$ – сопротивление шунта; $R_1 = 60 \text{ Ом}$, $R_2 = 15 \text{ Ом}$ – сопротивления резисторов делителя напряжения, установленного у осциллографа для согласования подключения измерительного кабеля к шунту и уменьшения напряжения, подаваемого на вход осциллографа.

Амплитуда тока $I_m = m_i h_y$, период колебаний $T = m_t h_x$, где h_y – отклонение луча от нулевой линии до амплитудного значения тока; h_x – время между двумя амплитудными значениями одной полярности, дел.; m_t – цена деления, мкс/дел., равная показанию у переключателя “время/дел.”.

Далее необходимо определить частоту колебаний $f = 1/T$, декремент колебаний

$$\Delta = \frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{I_{m2}}{I_{m3}} = \dots,$$

где I_{m1} , I_{m2} , I_{m3} – первая, вторая и третья амплитуды тока одной полярности соответственно.

Активное сопротивление разрядного контура

$$R_k = \frac{T \ln \Delta}{2\pi^2 C}$$

и погрешность измерения

$$\frac{\Delta I_{m1}}{I_{m1}} = \sqrt{\Delta_c^2 + \left(\frac{\Delta m_0}{m_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_y}{h_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2}.$$

Составляющие $\Delta m_0 / m_0$, $\Delta R_{\text{ш}} / R_{\text{ш}}$, $\Delta R_1 / R_1$, $\Delta R_2 / R_2$ могут быть приняты равными 3 %, системная погрешность Δ_c заимствована из гл. 15 (Δh_y – толщина луча).

16.4. Измерение импульсного тока при помощи воздушного трансформатора

Для измерения импульсного тока при помощи воздушного трансформатора необходимо на вход осциллографа подключить коаксиальный кабель, приходящий на пульт управления от пояса Роговского. Переключатель “ $\times 1000$, $\times 100$, $\times 10$, $\times 1$ ” поставьте в положение “ $\times 100$ ” и так же, как в п. 16.3, получите и обработайте осциллограмму. В этом случае амплитуда тока

$$I_m = \frac{w h_y m_0}{R},$$

где $w = 1200$ – число витков пояса, h_y – отклонение луча от нулевой линии, m_0 – чувствительность осциллографа; $R = 1.1$ Ом – резистор, подключенный к зажимам X_1 – X_2 пояса (см. рис. 15.2). Общая погрешность измерения тока поясом Роговского такова;

$$\frac{\Delta I_m}{I_m} = \sqrt{\Delta_c^2 + \left(\frac{\Delta h_y}{h_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_0}{m_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}.$$

16.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) расчет тока, его частоты и декремента колебаний;
- в) расшифрованные осциллограммы, результаты измерения и погрешности;
- г) выводы по работе.

17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

17.1. Программа работы

Определить 50 %-ное разрядное напряжение штыревого изолятора при полярности грозового импульса:

- а) положительной;
- б) отрицательной.

17.2. Пояснения к работе

Одной из важнейших характеристик высоковольтных изоляторов является 50 %-ное разрядное напряжение. Оно нормируется ГОСТом для каждого вида изоляторов и используется при выборе и координации изоляции высоковольтных энергетических установок.

17.3. Определение 50 %-ного разрядного напряжения штыревого изолятора при положительной полярности грозового импульса

Определение 50 %-ного разрядного напряжения штыревого изолятора при положительной полярности грозового импульса осуществляется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 7.1. Перед измерениями следует записать показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра. Испытуемый изолятор ШС-10 установите па-

параллельно измерительному шаровому разряднику *ИШР* (см. рис. 7.1). Далее необходимо провести следующие действия:

снять заземляющие штанги с ГИН и закрыть калитку ограждения;
с пульта управления при помощи кнопки “полярность” автоматического привода сделать полярность выходного импульса напряжения положительной;

при помощи кнопок автоматического привода и шкалы сельсина, установленных на пульте управления, искровые промежутки ГИН сделать минимальными и равными примерно 0.3 см;

при помощи кнопок автоматического привода и шкалы сельсина, расположенных на пульте управления для измерительного разрядника, расстояние между шарами измерительного разрядника установить примерно равным 3.5 см;

включить автоматический выключатель *QF*, магнитный пускатель *KM1*, проверить по вольтметру *V* напряжение на вторичной стороне трансформатора *T1*, сделать его равным нулю и включить магнитный пускатель *KM2*;

поднять напряжение до автоматического срабатывания промежутков *F* ГИН с частотой одно срабатывание в 1–3 с.

Если на этих импульсах не происходит пробоя изолятора, следует увеличить расстояние искровых промежутков ГИН с пульта управления, причем если ГИН перестает срабатывать, то нужно при помощи трансформатора *T1* повысить напряжение, подаваемое на первичную сторону трансформатора *T2* так, чтобы сохранить вышеуказанную частоту срабатывания. Такое регулирование выходного напряжения нужно осуществлять до тех пор, пока вероятность пробоя изолятора как отношение числа разрядов к числу приложенных импульсов не станет близкой 50 %. В лабораторной работе вероятность пробоя промежутка рекомендуется определять исходя из 10–15 срабатываний ГИН. Если вероятность пробоя промежутка больше 50 %, то расстояния между искровыми промежутками нужно уменьшать, а чтобы сохранить частоту срабатывания ГИН – уменьшить напряжение с помощью трансформатора *T1*.

После получения 50 %-ной вероятности пробоя изолятора необходимо с помощью шарового измерительного разрядника, подключенного параллельно ему, провести измерение этого напряжения. Для чего при помощи кнопок дистанционного привода расстояние между шарами измерительного разрядника с пульта управления уменьшается до тех пор, пока вероятность пробоя, определяемая как отношение числа пробоев шарового промежутка к общему числу срабатывания ГИН (10–15), не станет равной 50 %. Наличие изолятора на пробой измерительного разрядника не оказывает никакого влияния, поскольку пробой между шарами происходит на максимуме импульса напряжения, а разряд по поверхности изолятора – за ним. После получения 50 %-ной вероятности пробоя измеритель-

ного разрядника установку следует отключить, а расстояние между шарами записать для оформления отчета. Далее по расстоянию между шарами измерительного разрядника, соответствующему 50 %-ной вероятности пробоя, и таблице (см. с. 25) необходимо определить максимальное значение импульсного напряжения U_0 .

Полученное таким образом значение разрядного напряжения изолятора нужно привести к нормальным атмосферным условиям по формуле

$$U_{и0} = U_0 K_\gamma,$$

где $K_\gamma = K$ – поправочный коэффициент на абсолютную влажность. Для импульсных напряжений K находится по кривой b (см. рис. 1.2).

17.4. Определение 50 %-ного разрядного напряжения штыревого изолятора при отрицательной полярности грозового импульса

Для определения 50 %-ного разрядного напряжения штыревого изолятора ШС–10 при отрицательной полярности грозового импульса необходимо с пульта управления при помощи кнопки “полярность” сделать полярность выходного импульса ГИН отрицательной и выполнить те же действия, как описано в п. 17.3. При этом поправочный коэффициент на абсолютную влажность $K_\gamma = K^\omega$, где $\omega = 0.8$.

17.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) численные значения разрядных напряжений;
- в) выводы по работе.

18. ВОЛЬТ-СЕКУНДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯТОРОВ

18.1. Программа работы

Снять вольт-секундную характеристику изолятора при полярности грозового импульса:

- а) положительной;
- б) отрицательной.

18.2. Пояснения к работе

Вольт-секундная характеристика используется при координации изоляции и защитных аппаратов в случае воздействия перенапряжений грозового характера. Она представляет собой зависимость разрядного напряжения от предразрядного времени. Поскольку разрядные напряжения и предразрядные времена всегда имеют разбросы, то для получения наиболее достоверной вольт-секундной характеристики необходимо провести

достаточно большое число измерений. При координации изоляции и защитных аппаратов для изоляции применяют вольт-секундную характеристику как нижнюю огибающую значений разрядных напряжений, а для защитных аппаратов – как верхнюю огибающую.

18.3. Снятие вольт-секундной характеристики изолятора при положительной полярности грозового импульса

Снятие вольт-секундной характеристики изолятора при положительной полярности грозового импульса осуществляется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 10.1. Испытуемый изолятор ШС–10 необходимо установить параллельно измерительному шаровому разряднику в центре заземленного металлического листа, записать показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра и определить поправочный коэффициент на абсолютную влажность K_γ , как это сделано в п. 17.3.

Начать работу следует с определения масштабного коэффициента измерительной системы. Для этого необходимо настроить осциллограф С8–13 и включить установку, как описано в п. 10.3. При этом расстояние между измерительными шарами диаметром 25 см должно быть $S = 2.4$ см, полярность выходного импульса “+”. Подберите зарядное напряжение конденсаторов генератора импульсных напряжений и расстояние между его искровыми промежутками так, чтобы из 10–15 срабатываний ГИН в пяти–семи случаях произошел пробой измерительного разрядника. Снимите четыре–пять осциллограмм, по ним определите и запишите отклонение луча и отключите установку. Найдите среднее отклонение луча осциллографа h_r . По диаметру шаров измерительного разрядника 25 см, расстоянию между ними $S = 2.4$ см и таблице (см. с. 25) определите максимальное значение импульсного напряжения U_0 . Масштабный коэффициент измерительной системы с учетом приведения разрядных напряжений изолятора к нормальным атмосферным условиям,

$$m = \frac{U_0 K_\gamma}{h_r}.$$

Далее включите установку, переключатель “ $\times 1000, \times 100, \times 100$ ”, находящийся на передней панели осциллографа, поставьте в положение “ $\times 100$ ”, а переключатель “ $mV/\text{дел.}$ ” – в положение “20” и подберите зарядное напряжение конденсаторов и расстояние между искровыми промежутками ГИН так, чтобы из 10 срабатываний в двух–четырех случаях произошло полное перекрытие изолятора. При этом частота срабатывания ГИН не должна превышать одного срабатывания в 4–5 с. Используя кнопки “стирание” и “готов”, снимите не менее пяти осциллограмм. По каждой из них определите разрядное напряжение как максимальное отклонение луча, помноженное на масштабный коэффициент, и предразрядное время как расстояние в делениях шкалы времени осциллографа от начала подъе-

ма напряжения до момента резкого спада напряжения, помноженное на масштаб времени. Последний равен численному значению, над которым установлен переключатель “время/дел.”. Полученные значения разрядных напряжений и предразрядных времен необходимо занести в таблицу для оформления отчета.

Для построения вольт-секундной характеристики число ступеней напряжения должно быть не менее четырех, поэтому рекомендуется провести такие же серии из пяти полных разрядов при увеличении зарядного напряжения конденсаторов ГИН на 5 кВ по отношению к каждой предыдущей серии при сохранении неизменной частоты срабатывания.

18.4. Снятие вольт-секундной характеристики изолятора при отрицательной полярности грозового импульса

Для снятия вольт-секундной характеристики изолятора при отрицательной полярности грозового импульса при помощи кнопки “полярность” установите полярность выходного импульса ГИН отрицательной и проведите не менее четырех серий опытов полных разрядов по поверхности изолятора, как описано в п. 18.3.

18.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) характерные расшифрованные осциллограммы;
- в) таблицы с результатами измерений;
- г) графики вольт-секундных характеристик;
- д) выводы по работе.

19. ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯТОРОВ ГРОЗОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

19.1. Программа работы

1. Привести нормированные испытательные напряжения к атмосферным условиям испытания.
2. Провести испытание линейного штыревого изолятора грозовым импульсом напряжения.

19.2. Пояснения к работе

Координация изоляции линий электропередачи и подстанций осуществляется по совокупности испытательных напряжений, установленных в ГОСТ 1516–76 или технических условиях для внутренней и внешней изоляции.

Испытание изоляторов грозowymi импульсами напряжения является одним из важнейших видов испытаний изоляции. В соответствии с ГОСТ 1526.1–76 эти испытания проводятся 15-ударным методом. Изолятор считается прошедшим испытания, если он выдержал 15 приложений полного стандартного и 15 приложений срезанного грозowych импульсов испытательного напряжения положительной и отрицательной полярностей. Для изоляции с самовосстанавливающей прочностью допускаются испытания полным и срезанным импульсами заменить испытанием полным импульсом с максимальным значением напряжения, равным испытательному напряжению срезанного импульса. При этом, если на изоляторе произошло не более двух разрядов, то он считается выдержавшим испытания как полным, так и срезанным импульсами. Если произошло более двух разрядов и предразрядное время не более чем для двух из них не будет менее 2 мкс, то изолятор считается выдержавшим испытания срезанным импульсом. Испытания полным грозowym импульсом должны быть проведены отдельно при максимальном значении испытательного напряжения, соответствующем напряжению полного импульса.

19.3. Приведение нормированных испытательных напряжений к атмосферным условиям испытания

Рекомендуется провести испытания грозowym импульсом напряжения стержневого линейного изолятора ШС–10. Для него максимальное значение испытательного напряжения при полном и срезанном грозowych импульсах соответственно составляет $U_{п0} = 80$ кВ и $U_{с0} = 100$ кВ. Перед проведением испытаний необходимо записать значение атмосферного давления и показания сухого и влажного термометров лабораторного психрометра и привести напряжения $U_{п0}$ и $U_{с0}$ к атмосферным условиям, при которых проводятся испытания по формулам

$$U_{п} = \frac{U_{п0} K_p K_t}{K_\gamma} \quad \text{и} \quad U_{с} = \frac{U_{с0} K_p K_t}{K_\gamma},$$

где K_p и K_t – поправочные коэффициенты на атмосферное давление и температуру. Определяются они точно так же, как в п. 1.3. Поправочный коэффициент на абсолютную влажность для положительной полярности импульса напряжения $K_\gamma = K$, для отрицательной – $K_\gamma = K^\omega$, где $\omega = 0.8$. Поправочный коэффициент K определяется по показаниям сухого и влажного термометров психрометра и кривой b (см. рис. 1.2).

19.4. Проведение испытания линейного штыревого изолятора грозowym импульсом напряжения

Проведение испытания линейного штыревого изолятора грозowym импульсом напряжения осуществляется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 10.1. Испытуемый изолятор ШС–10 необ-

ходимо установить параллельно измерительному шаровому разряднику в центре заземленного металлического листа.

Начать работу следует с определения масштабного коэффициента измерительной системы. Для этого необходимо настроить осциллограф С8–13 и включить установку, как описано в п. 10.3. Расстояние между измерительными шарами диаметром 25 см должно быть $S = 2.4$ см, полярность выходного импульса “+”. Подберите зарядное напряжение конденсаторов генератора импульсных напряжений и расстояние между его искровыми промежутками так, чтобы из 10–15 срабатываний ГИН в пяти–семи случаях произошел пробой измерительного разрядника при частоте срабатывания одно срабатывание в 5–6 с. Используя кнопки “стирание” и “готов”, снимите четыре–пять осциллограмм, по ним определите и запишите отклонение луча и отключите магнитный пускатель *КМ2* (см. рис. 10.1). Найдите среднее отклонение луча осциллографа h_r . По расстоянию $S = 2.4$ см, диаметру шаров 25 см и таблице (см. с. 25) определите максимальное значение импульсного напряжения U_0 . Масштабный коэффициент

$$m = \frac{U_0 K_p K_t}{h_r},$$

где K_p и K_t – поправочные коэффициенты на атмосферное давление и температуру (такие же, что и в п. 19.3).

Далее необходимо включить магнитный пускатель *КМ2*, подобрать зарядное напряжение конденсаторов и расстояние между искровыми промежутками ГИН так, чтобы измеренное по осциллограмме максимальное значение импульса напряжения $U = m h_y$ было равно $U = U_c$, где h_y – отклонение луча осциллографа при измерении напряжения, и отключить магнитный пускатель *КМ2* (см. рис. 10.1). После этого приступите к испытанию изолятора 15-м приложением этого импульса напряжения к изолятору. Каждое приложение должно происходить в следующей последовательности. Нажмите на панели осциллографа кнопки “стирание” и “готов”, включите магнитный пускатель *КМ2*, после срабатывания ГИН отключите его и обработайте полученную осциллограмму. Если при данных приложениях напряжения не произойдет ни одного пробоя, следует считать, что изолятор при положительной полярности импульса испытания выдержал. Если произойдет более двух полных разрядов и предразрядное время не более чем для двух из них не будет менее 2 мкс, то изолятор считается выдержавшим испытания срезанным импульсом. Если предразрядное время в двух и более опытах будет менее 2 мкс, то испытания необходимо повторить срезанным импульсом. Для срезания импульса применяется стержневой промежуток, включаемый параллельно к испытываемому изолятору. В лабораторной работе допускается использовать в качестве срезающего устройства измерительный шаровой разрядник. Следовательно, при помощи кнопок “увеличить расст.”, “уменьшить расст.”, находящихся на пульте

управления в блоке кнопок “Расстояние между измерительными шарами” расстояние между шарами нужно сделать таким, чтобы срезание импульса происходило при времени среза 2 мкс, а затем провести 15 аналогичных приложений к изолятору этого импульса. Если при этом не произойдет более двух полных разрядов, то изолятор считается выдержавшим испытания срезанным импульсом. Далее следует настроить генератор на импульс с максимальным значением напряжения U_n и провести аналогичное приложение 15 полных импульсов. Изолятор будет считаться выдержавшем испытания, если в этой серии опытов не будет более чем два полных разряда.

Для проведения испытания изолятора при отрицательной полярности импульса необходимо при помощи кнопки “полярность” установить отрицательную полярность выходного импульса генератора импульсных напряжений и проделать те же действия, что и при положительной полярности грозового импульса.

19.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) значения поправочных коэффициентов на атмосферные условия и нормированных испытательных напряжений;
- в) характерные расшифрованные осциллограммы;
- г) таблицы с результатами измерений;
- д) выводы по работе.

20. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

20.1. Программа работы

Определить пробивное напряжение:

- а) конденсаторной бумажной изоляции от числа слоев;
- б) четырехслойной конденсаторной бумажной изоляции при электродах разной площади.

20.2. Пояснения к работе

Конденсаторная бумага является одним из наиболее распространенных видов изоляции, применяемой в конденсаторах. Она обладает хорошей электрической и механической прочностью, технологична и относительно дешева. Изготавливается и поставляется в виде рулонов различной ширины, имеет толщину от 4 до 30 мкм и плотность от 0.8 до 1.3 г/см³. Для увеличения электрической прочности конструкции изоляции из конденсаторной бумаги подвергаются вакуумной сушке и пропитываются различными диэлектрическими жидкостями.

В толще слоя бумажной ленты неизбежно содержится некоторое количество дефектов, облегчающих пробой слоя: пузырьки воздуха, частицы металлов и их окислов. Число дефектов зависит от толщины бумаги и колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен на квадратный метр, поэтому прочность одного слоя мало отличается от прочности воздушного промежутка такой же толщины. Когда слои накладываются друг на друга, слой с дефектами перекрывается другими слоями, и прочность изоляции возрастает.

Однако с увеличением числа слоев возрастает напряженность поля на краю электрода, и поэтому чрезмерное увеличение числа слоев бумаги в изоляционной конструкции может привести к снижению электрической прочности и к нерациональному использованию объема конструкции.

При испытаниях, учитывая большой статистический разброс пробивных напряжений испытываемых образцов и связанную с этим необходимость многократного повторения испытаний, приходится довольствоваться образцами с небольшой площадью электродов. Пересчет пробивного напряжения образцов с малой площадью электродов на большую осуществляется при помощи формул математической статистики.

20.3. Определение пробивного напряжения конденсаторной бумажной изоляции от числа слоев

Определение пробивного напряжения конденсаторной бумажной изоляции от числа слоев осуществляется на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 20.1. Регулирование напряжения осуществляется при помощи трансформатора $T1$ и реостата R . Причем ручкой

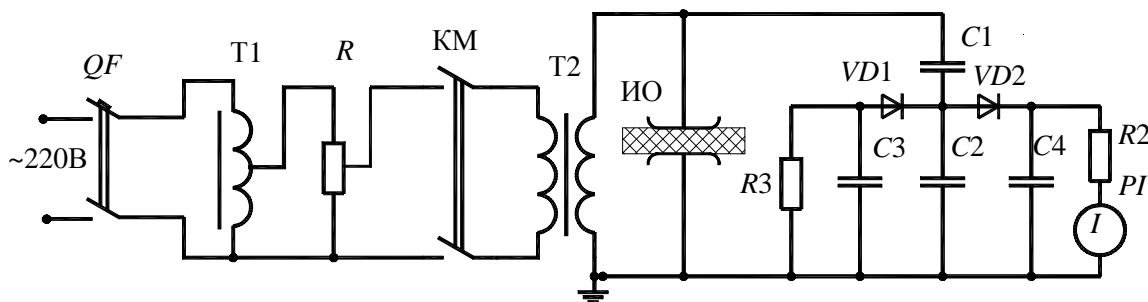


Рис. 20.1. Принципиальная схема установки

трансформатора $T1$, находящейся на передней стенке камеры, устанавливается некоторое значение напряжения, которое регулируется реостатом R от нуля до пробивного напряжения. Если при помощи реостата не удастся довести напряжения до пробивного, этого добиваются трансформатором $T1$, и далее регулирование при повторных опытах производится реостатом. Измерение пробивного напряжения осуществляется при помощи емкостного делителя напряжения $C1-C2$ и микроамперметра с измерительной схемой $R2, R3, C3, C4, VD1, VD2$. Предусмотрены три шкалы измерения 5,

10 и 15 кВ. Испытуемый образец устанавливается между плоскими электродами, расположенными в специальной камере. Площадь испытуемого образца должна быть примерно в полтора раза больше площади электродов.

Измерения пробивного напряжения рекомендуется провести для образцов, состоящих из 2, 4, 6, 8, 10 и 12 слоев конденсаторной бумаги. Для этого необходимо:

- установить образец между электродами;
- снять заземляющую штангу и закрыть дверцу камеры;
- поставить ручку реостата в верхнее крайнее положение;
- включить автоматический выключатель, находящийся на правой стороне камеры *QF*, магнитный пускатель при помощи кнопки управления, расположенной на передней панели камеры, и ручкой реостата *R*, находящейся на правой стороне камеры, медленно поднять напряжение до пробоя.

В момент пробоя зафиксируйте показания микроамперметра и запишите их для составления отчета. Одновременно в момент пробоя от максимально токовой защиты отключается магнитный пускатель *KM*. Для проведения следующего опыта ручку реостата необходимо поставить в верхнее крайнее положение, наложить заземляющую штангу на верхний электрод, поставить новый образец и произвести для него аналогичные измерения. Для каждой толщины образца следует провести не менее пяти измерений и определить среднее значение пробивного напряжения. По полученным данным построить зависимость пробивного напряжения и напряженности от числа слоев. Пробивная напряженность определяется путем деления среднего пробивного напряжения на произведение числа слоев и толщину бумаги.

20.4. Определение пробивного напряжения четырехслойной конденсаторной бумажной изоляции при электродах разной площади

Для определения пробивного напряжения четырехслойной конденсаторной бумажной изоляции при электродах разной площади необходимо провести от 15 до 30 аналогичных измерений пробивного напряжения сначала для электродов меньшей площади, а потом для электродов в 8–10 раз большей площади. По полученным значениям пробивного напряжения найдите параметры статистического распределения пробивных напряжений – среднего пробивного напряжения $U_{\text{ср}}$ и среднеквадратичного отклонения пробивных напряжений от среднего значения σ по следующим формулам:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \text{ и}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_{cp})^2},$$

где n – число измерений пробивного напряжения; i – порядковый номер измерения.

Проведите оценочный пересчет среднего значения пробивного напряжения и среднеквадратичного отклонения от среднего значения, полученных для электродов меньшей площади S_1 , на большую площадь электродов S_2 по следующим формулам:

$$U_{cp.S_2} = U_{cp} - \sigma \ln(\ln K),$$

$$\sigma_{S_2} = \frac{\pi \sigma}{\sqrt{6 \ln K}},$$

где U_{cp} , σ – среднее значение пробивного напряжения и среднеквадратичное отклонение от среднего значения для электродов меньшей площади S_1 соответственно; $K = S_1 / S_2$ – отношение площадей электродов.

20.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы с результатами измерения пробивных напряжений;
- в) графики зависимости пробивного напряжения и пробивной напряженности от числа слоев бумаги;
- г) результаты расчета средних пробивных напряжений и среднеквадратичных отклонений от среднего значения и результаты пересчета их на большую площадь электродов;
- д) выводы по работе.

21. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЕЖУТКОВ С ОДНОРОДНЫМ ПОЛЕМ ОТ ПЛОТНОСТИ ГАЗА

21.1. Программа работы

1. Снять зависимость разрядного напряжения промежутков от плотности (давления) воздуха и построить зависимость $U_p = f(\delta S)$.
2. Рассчитать зависимость $U_p = f(\delta S)$ по формулам, полученным исходя из условия самостоятельности разряда, и сравнить с экспериментальной зависимостью.

21.2. Пояснения к работе

Электрон, появившийся в газовом промежутке с достаточно сильным электрическим полем, может ускоряться и производить ионизацию атомов газа. Число актов ионизации, совершаемых одним электроном на единице длины пути в направлении поля, называют коэффициентом ударной ионизации α_e . В электроотрицательных газах возможно прилипание электронов к нейтральным молекулам. Поэтому эффективный коэффициент ионизации α будет несколько меньше $\alpha = \alpha_e - \eta$, где η – коэффициент прилипания. Вблизи разрядного напряжения $\eta \ll \alpha_e$ и, следовательно, $\alpha \cong \alpha_e$. Коэффициент α пропорционален плотности газа δ и вероятности ионизации при столкновении с атомом. Эта вероятность является функцией кинетической энергии электрона $W_e = E \lambda$, где E – напряженность электрического поля, λ – длина свободного пробега. Таким образом, можно записать $\alpha \approx \delta f(E \lambda)$, и так как $\lambda \approx 1/\delta$, то $\alpha \approx \delta f(E/\delta)$.

Для низкой плотности газов Таунсендом предложена следующая экспоненциальная зависимость α от (E/λ) :

$$\alpha = A \delta \exp \left[-B / \left(\frac{E}{\delta} \right) \right], \quad (1)$$

где A и B – постоянные для данного рода газа. При нормальных атмосферных условиях $P_0 = 760$ мм Нг (Торр), $T_0 = 293$ К ($t = 20$ °С) плотность $\delta = 1$. При других условиях $\delta = \frac{P T}{P_0 T_0}$.

При каждом акте ионизации образуется свободный электрон, ускоряемый вместе с другими электронами к аноду, все вместе они образуют лавину электронов. Самостоятельный разряд устанавливается при условии, что после прохождения лавины, вблизи катода образуется хотя бы один вторичный электрон, способный создать новую лавину электронов. Для промежутков с параметром $\delta S \leq 2,5 - 3$ см, где S – длина промежутка, условие самостоятельности записывается в виде

$$\gamma (e^{\alpha S} - 1) \geq 1. \quad (2)$$

Здесь $e^{\alpha S}$ – количество электронов в лавине; γ – обобщенный коэффициент вторичной ионизации. Физический смысл имеет обратная γ величина ($1/\gamma$), которая равна числу электронов в лавине, необходимому для появления вблизи катода одного вторичного электрона, способного произвести новую лавину. Она зависит от состояния поверхности катода и параметра δS . В воздухе при $\delta S \leq 0.001$ см $1/\gamma \cong 10 - 100$, а при $\delta S \cong 0.1 - 1$ см возрастает до 500 и более.

Чтобы найти разрядное напряжение промежутка $U_p = E S$, подставим (1) в условие самостоятельности разряда (2)

$$\gamma \left\{ \exp \left[A \delta S \exp \left(- \frac{B \delta}{E} \right) \right] - 1 \right\} = 1. \quad (3)$$

Произведем замену $E = U_p / S$, и дважды прологарифмируем полученное выражение. Расчетная формула для разрядного напряжения промежутков с однородным полем будет иметь вид

$$U = \frac{B \delta S}{\ln(A \delta S) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]}. \quad (4)$$

Для воздуха при $\delta S \cong 0.005 - 0.1$ см $A = 11100$ 1/см, $B = 277400$ В/см, $\ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right] \cong 1.8 - 2$. При нормальной температуре ($t = 20$ °С) $\delta = \frac{P}{P_0}$ зависит только от давления, поэтому эмпирическую формулу для α представляют в виде

$$\alpha = A P \exp \left(- B / \left(\frac{E}{P} \right) \right). \quad (5)$$

Тогда уравнение (4) принимает вид

$$U = \frac{B P S}{\ln(A P S) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]}. \quad (6)$$

При подстановке в эту формулу давления в торрах константы A и B имеют значения:

$$A = 14,6 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}; \quad B = 365 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}.$$

При $\delta S \geq 0,1$ см для α вместо аппроксимации вида (1) применяют следующую квадратичную аппроксимацию

$$\alpha = a \delta \left(\frac{E}{\delta} - b \right)^2, \quad (7)$$

где a и b – постоянные для данного газа.

Подставив (7) в условие самостоятельности разряда (2) получим

$$a \delta S \left(\frac{U_p}{\delta S} - b \right)^2 = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = k,$$

откуда

$$U_p = b \delta S + \sqrt{\frac{k}{a}} \sqrt{\delta S}. \quad (8)$$

Для воздуха $a = 0,2 \text{ см} / \text{кВ}^2$, $b = 24 \text{ кВ} / \text{см}$, $k = 8,2$ и следовательно

$$U_p = 24 \delta S + 6,4 \sqrt{\delta S}, \quad (9)$$

здесь S выражено в сантиметрах, U_p – в киловольтах.

Формула (9) применима при $\delta S = 0.1 - 3.5 \text{ см}$. При $\delta S > 3.5 \text{ см}$ разряд развивается в стримерной форме и она дает существенную погрешность.

Как видно из формул (4) и (9) разрядное напряжение промежутков зависит от произведения δS . Эта закономерность впервые была установлена Пашеном. Закон Пашена гласит: если длина разрядного промежутка S и плотность газа δ меняются так, что их произведение остается неизменным, то не меняется и разрядное напряжение. Зависимость $U_p = f(\delta S)$ (см. рис. 21.1) имеет U-образную форму. Такие зависимости для разных газов называют кривыми Пашена. В воздухе кривая Пашена имеет минимум $U_{\min} \approx 370 \text{ В}$ при $\delta S \approx 0,001 \text{ см}$. Слева от δS_{\min} падает плотность газа, вследствие этого падает вероятность столкновений и следовательно вероятность ионизации атомов. При совсем малых δS электрон, стартовавший с катода может долететь до анода не испытав столкновений, т.е. нет условий для возникновения лавин. Поэтому в вакуумной области $\delta S < 0,0001 \text{ см}$ электрическая прочность промежутков сильно возрастает.

Справа от δS_{\min} длина свободного пробега электронов падает, они

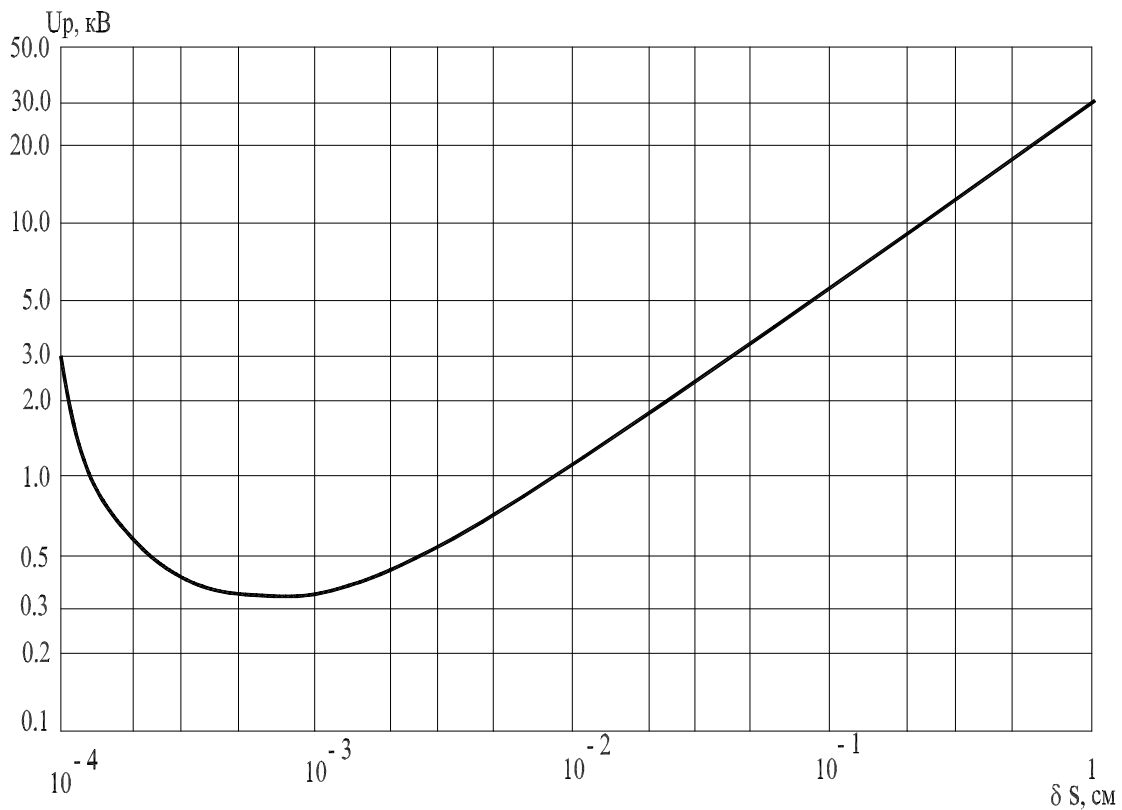


Рис. 21.1. Кривая Пашена для воздушных промежутков

не способны на малой длине свободного пробега набрать кинетическую энергию $W_e = E \lambda$, достаточную для ионизации атомов. Поэтому ионизационная способность электронов α/E падает. Максимум α/E имеет место в минимуме кривой Пашена при $\frac{E}{\delta} = B$.

Техническими средствами можно менять давление в очень широких пределах от 10^{-5} Торр до нескольких десятков и даже сот атмосфер, что соответствует изменению плотности при нормальной температуре от $\delta = 10^{-8}$ до $\delta = 100$. Сильная зависимость разрядного напряжения от плотности газа широко используется в технике. Вблизи минимума кривой Пашена, при малом падении напряжения на разряде, работают газосветные трубчатые лампы, газоразрядные лазеры. Высокая прочность вакуума используется в мощных радиоэлектронных лампах, в ускорителях заряженных частиц, в вакуумных выключателях и др. Эффект возрастания U_p используется в электроизоляционных конструкциях со сжатыми газами, что позволяет существенно уменьшить габариты крупных высоковольтных установок.

21.3 Определение разрядных напряжений промежутков

Схема испытательной установки представлена на рис.21.2

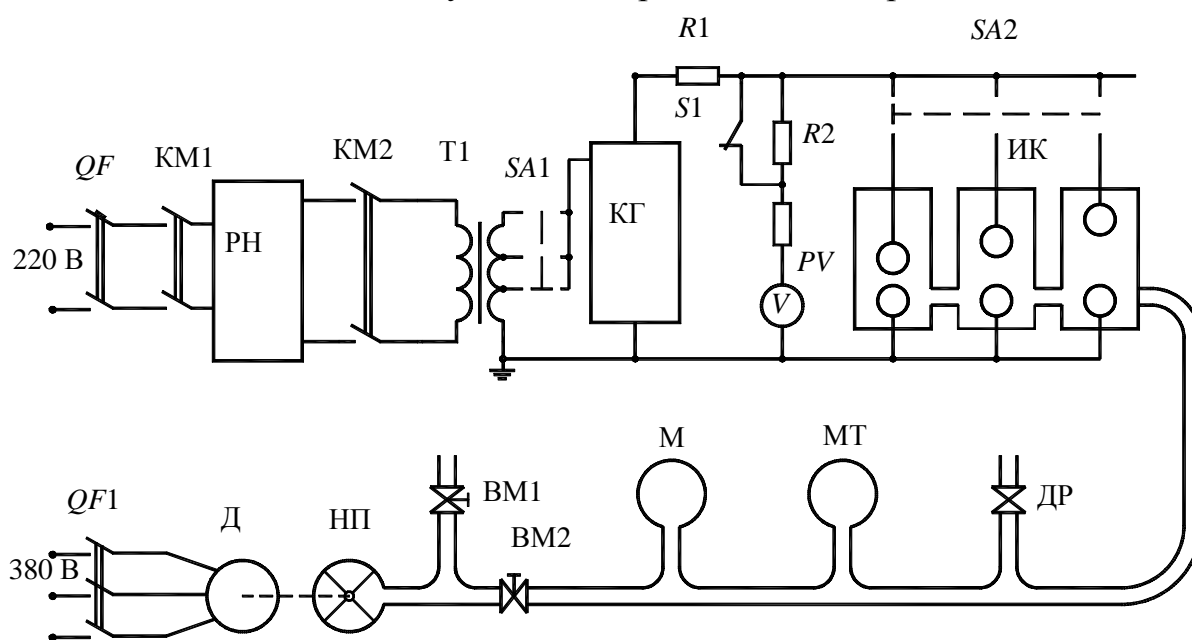


Рис. 21.2. Принципиальная схема испытательной установки

Испытуемые воздушные промежутки образованы стальными электродами полусферической формы. Они помещены в испытательную камеру ИК, состоящую из стеклянных сосудов, из которых воздух откачивается форвакуумным насосом НП через кран ВМ2. Кран ВМ1 предназначен для напуска воздуха в насос после его отключения. Кран ДР служит для медленного напуска воздуха в сосуды. Давление в сосудах из-

меряют двумя манометрами: мембранным М – при давлениях от 0.005 до 0,01 атмосферного и термпарным МТ – при низких давлениях. Разрядные промежутки через защитный резистор $R1$ подключают к источнику высокого напряжения поочередно с помощью переключателя $SA2$.

Питание установки производится от сети 220 В 50 Гц. При включении выключателя QF («сеть») и магнитного пускателя $KM1$ напряжение подается на электронный регулятор РН и затем, при нажатии кнопки «пуск» магнитного пускателя $KM2$ – на трансформатор Т1. Его вторичная обмотка имеет три отпайки, что позволяет с помощью переключателя $SA1$ “диапазон напряжения” изменять напряжение, подаваемое на вход высоковольтного выпрямителя, представляющего собой умножитель напряжения КГ. Установка позволяет с помощью переключателя $SA1$ и регулятора РН изменять напряжение на испытуемых промежутках в широких пределах - от 0,2 до 35 кВ. Одновременно с переключением уровня высокого напряжения производится переключение добавочных резисторов $R2$ и $R3$ в схеме измерения напряжения. Прибор PV , расположенный на пульте управления рядом с переключателем $SA1$, имеет следующие пределы измерения: 2, 10, 50 кВ.

Для откачки сосудов следует закрыть краны $BM1$ и ДР, открыть кран $BM2$ и автоматом $QF1$ включить форвакуумный насос. Давление измерять манометрами М и МТ. При необходимости напуска газа надо закрыть кран $BM2$ и малыми порциями напускать воздух через натекатель ДР.

Для определения разрядного напряжения промежутков следует установить переключатель $SA2$ на верхний электрод одного из промежутков, установить регулятор РН в нулевое положение (против часовой стрелки), включить выключатель «сеть» и нажать кнопку «пуск». Регулятором поднять напряжение до разрядного, отсчитать его по прибору PV . При каждом значении давления необходимо произвести 3 разряда и определить среднее значение разрядного напряжения. Пределы изменения давления – от 10^{-2} до 760 мм рт. ст. Разрядные промежутки имеют длину 0.5, 1.5, 4 см.

Для остановки форвакуумного насоса необходимо отключить автомат $Q2$ и открыть кран $BM1$.

21.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) таблицы значений разрядных напряжений и средних разрядных напряжений для исследованных промежутков;
- в) графики экспериментальной и расчетной зависимостей $U_p = f(\delta S)$ на одном рисунке;
- г) выводы по работе. Отобразить соответствие экспериментальных зависимостей теоретическим представлениям.

22. ЗАЩИТА ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

22.1. Программа работы

1. Определить зону защиты одиночного стержневого молниеотвода.
2. Определить зону защиты двух стержневых молниеотводов.

22.2. Пояснения к работе

Одним из наиболее эффективных средств защиты промышленных и электроэнергетических установок от прямого удара молнии являются молниеотводы (стержневые или тросовые). Молниеотвод образует вокруг себя пространство, защищенное в той или иной степени от прямых попаданий молнии в объект и называемое зоной защиты. Зоны защиты молниеотводов существенно зависят от соотношения между высотами ориентировки молнии, молниеотвода и объекта.

Канал молнии значительную часть своего пути проходит независимо от наличия или отсутствия молниеотводов на поверхности земли. Высота H , начиная с которой он начинает реагировать на наличие молниеотвода, определяется радиусом стримерной зоны головки нисходящего лидера молнии и оценивается приближенно по формуле

$$H = 10 I_m^{0.65},$$

где I_m – максимальное значение тока молнии. Для тока молнии порядка 200 кА эта формула дает значение $H = 300$ м. Характерная высота молниеотводов составляет примерно 30 м, т.е. в 10 раз меньше, чем высота ориентирования канала молнии.

При лабораторных исследованиях разряд молнии моделируется длинной искрой в разрядном промежутке стержень – плоскость при положительной полярности напряжения на стержне. Принимают, что канал разряда в модельном искровом промежутке с самого начала развития от стержня начинает ориентироваться на молниеотвод. Для правильного моделирования высота подвеса стержня должна превышать высоту молниеотвода в 5 – 10 раз.

Защитное действие молниеотводов может быть достаточно полно охарактеризовано зависимостью вероятности Ψ поражения объекта от его расстояния до молниеотвода r_x при неизменных высотах молниеотвода h и объекта h_x . Как показали опыты, зависимость $\Psi = f(r_x)$ хорошо описывается функцией Гаусса (нормальным законом распределения случайной величины). Поэтому для удобства ее построения используют “вероятностную бумагу”, на которой зависимость, соответствующая нормальному закону

распределения случайной величины, будет изображаться прямой линией (рис.22.1).

22.3. Определение зоны защиты одиночного молниеотвода

Определение зоны защиты одиночного молниеотвода проводится на установке, блок-схема которой приведена на рис.22.2. Стержень, имитирующий канал молнии до момента его ориентирования, располагается на расстоянии 50 см от заземленной плоскости, высота молниеотводов $h = 10$ см, а высота защищаемого объекта (стержня) – $h_x = 5$ см.

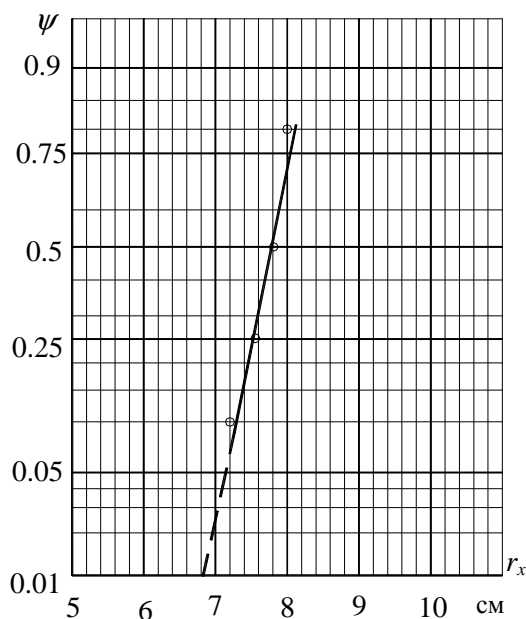


Рис.22.1. Зависимость вероятности поражения объекта от расстояния между молниеотводом и объектом

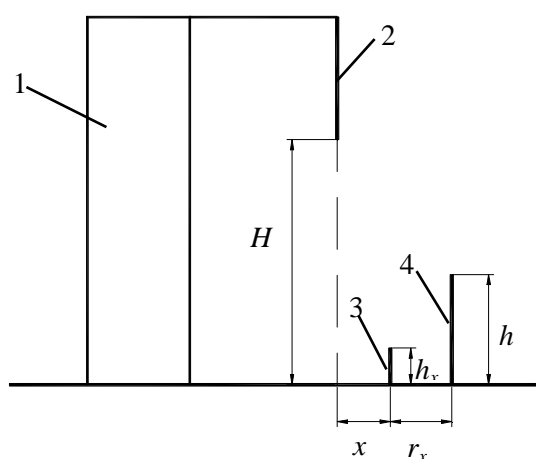


Рис.22.2. Блок-схема установки:
1 - ГИН, 2 - стержень, имитирующий канал молнии, 3 - защищаемый объект, 4 - молниеотвод

Для получения однозначных результатов исследований зоны защиты в начале эксперимента одиночный молниеотвод устанавливают так, чтобы приблизительно половина разрядов приходилась на плоскость, другая половина – на молниеотвод. Затем с помощью изолирующей штанги устанавливают защищаемый объект на некотором расстоянии от молниеотвода по линии, соединяющей молниеотвод с проекцией на плоскость стержня, имитирующего канал молнии, и определяют вероятность поражения объекта как отношение числа попадания искры в объект к общему числу разрядов генератора импульсных перенапряжений. Каждое значение Ψ определяют по 15 – 20 разрядам ГИН. Для построения зависимости $\Psi=f(r_x)$ испытания проводят при трех-четырех расстояниях между молниеотводом и испытуемым объектом при неизменном положении молниеотвода. Экстраполируя полученную зависимость до $\Psi = 0.05$, что соответствует достаточно высокой степени надежности молниезащиты, находим зону защиты молниеотвода при высоте защищаемого объекта h_x (см.

рис.22.1). На рис.22.3 приведена зона защиты одиночного молниеотвода, представляющая собой конус с вершиной, расположенной на высоте $h_0 < h$. Для вероятности попадания молнии в объект $\Psi = 0.05$ величина h_0 составляет 0.92 от h , а граница зоны защиты может быть рассчитана по формуле

$$r_x = 1.5 \left(h - \frac{h_x}{0.92} \right).$$

22.4. Определение зоны защиты двух стержневых молниеотводов

При определении вероятности поражения объекта молниеотводы располагаются на расстоянии $a = (1.5 - 2.5) h$ от линии, соединяющей защищаемый объект и проекцию на плоскость стержня, имитирующего канал молнии так, чтобы вероятность попадания искры в каждый молниеотвод при отсутствии защищаемого объекта была порядка $\Psi = 0.25$. Затем с помощью изоляционной штанги устанавливают защищаемый объект на вышеназванную линию и определяют вероятность поражения объекта, как это делалось при одиночном молниеотводе. Испытания проводят при трех-четырех расстояниях объекта от линии, соединяющей молниеотводы. Экстраполируя полученную зависимость до $\Psi = 0.05$, определим ширину зоны защиты b .

Зона защиты для двух молниеотводов показана на рис. 22.4. Радиус зоны защиты r_x для внешних областей зоны защиты двух стержневых молниеотводов определяется точно так же, как для одиночного стержневого молниеотвода. При вероятности прорыва молнии в объект $\Psi = 0.05$ параметры зоны защиты двойного стержневого молниеотвода описываются формулами

$$h_{min} = h_0 \text{ при } a \leq 1.5 h,$$

$$b = r_x \text{ при } a \leq 1.5 h,$$

$$h_{min} = h_0 - 0.14 (1 - 1.5h)$$

$$\text{при } a > 1.5h,$$

$$b = r_x (h_{min} - h_x) / h_{min}$$

$$\text{при } a > 1.5h.$$

При проведении опытов рекомендуется сразу наносить полученные значения вероятности на “вероятностную бумагу” для планирования последующих опытов

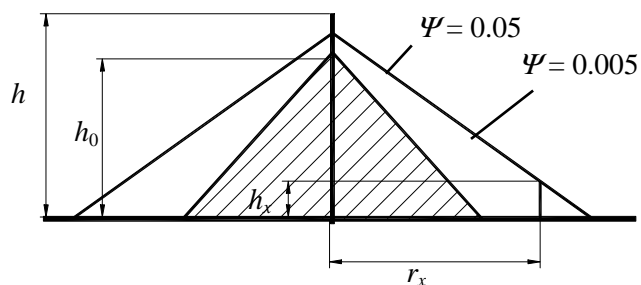


Рис. 22.3. Зона защиты одиночного молниеотвода

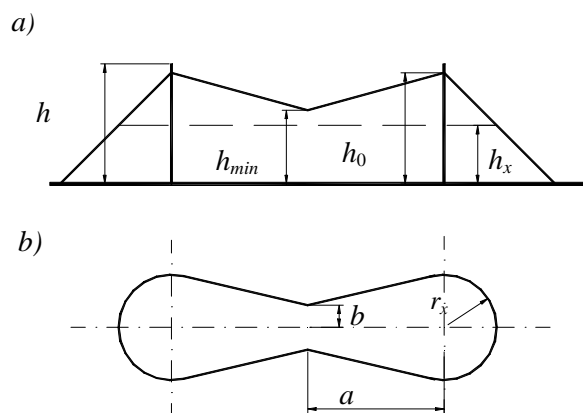


Рис. 22.4. Коллективная зона защиты двух стержневых молниеотводов

(выбора необходимого расстояния).

22.5. Содержание отчета

По результатам испытаний и расчетов составляется отчет, который должен содержать:

- а) блок-схему испытательной установки,
- б) таблицы с полученными результатами,
- в) зависимости вероятности поражения объектов от геометрических размеров, построенные на “нормальной вероятностной бумаге”,
- г) расчет зон защиты одиночного, двойного молниеотводов и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- д) выводы по работе.

23. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА

23.1 Программа работы

1. Измерить кратность перенапряжений на отдельных катушках обмотки при изолированной и заземленной нейтрали, а также при соединении обмоток в треугольник и приходе волны одновременно на оба конца обмотки.

2. Для схемы с изолированной нейтралью измерить кратность перенапряжений между отдельными катушками обмотки.

3. По результатам измерений найти точки обмотки, где получаются наибольшие кратности перенапряжений при каждой схеме соединения обмоток, и снять осциллограммы соответствующих импульсов перенапряжений.

23.2. Пояснения к работе

В процессе эксплуатации трансформаторы подвергаются воздействию волн грозовых перенапряжений, набегающих по линиям электропередачи. Обмотка трансформатора представляет собой сложную колебательную схему, образованную собственными и взаимными индуктивностями отдельных ее частей и паразитными емкостями витков катушек между собой и относительно земли. При определенных упрощениях эквивалентную схему обмотки можно представить как показано на рис. 23.1.

Начальное распределение напряжения по обмотке при пренебрежении влиянием индуктивностей L и активных сопротивлений R определяется емкостями на корпус C и продольными емкостями между соседними витками или катушками C_0 . При крутом фронте волны основная часть напряжения приходится на первые элементы обмотки и практически не зависит от способа подключения нейтрали. Затем каждая емкость перезаря-

жается в колебательном режиме через индуктивности до установившегося значения напряжения.

Установившееся распределение напряжения вдоль обмотки при заземленной нейтрали близко к линейному со спадом от U_m в начале обмотки до нуля в конце, а при соединении обмоток в треугольник или при изолированной нейтрали по всей длине обмотки устанавливается приблизительно одинаковое напряжение, равное U_m .

Амплитуды колебаний напряжения в отдельных катушках обмотки тем больше, чем больше разность между начальным и установившимся напряжением в данной точке обмотки.

Уравнения, описывающие переходный процесс в схеме (см. рис. 23.1) показывают, что, в отличие от схемы замещения длинной линии, не содержащей продольных емкостей C_0 , вдоль обмотки распространяется не волна напряжения, а волна градиента напряжения, как показано на рис. 23.2. При этом максимум перенапряжения на изоляции между витками или катушками перемещается со временем от начала к концу обмотки. В конце обмотки эта волна может отразиться, что вызовет повышение градиентных перенапряжений на последних витках обмотки.

Картина распределения перенапряжений на главной и продольной изоляции обмотки зависит от ее конструктивных параметров: размера витка, расположения витков в катушке, расстояния между витками и катушками и т.д. Изменяя геометрию обмотки и применяя специальные меры снижения перенапряжений, такие, как емкостные кольца и экраны, переплетение витков соседних катушек и подбор расстоя-

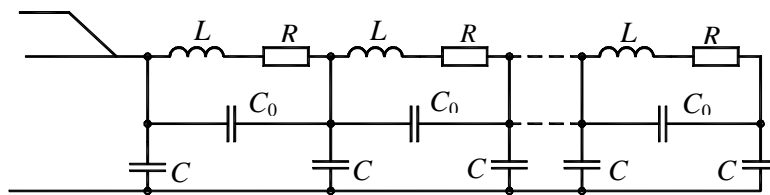


Рис.23.1. Приближенная схема замещения обмотки трансформатора

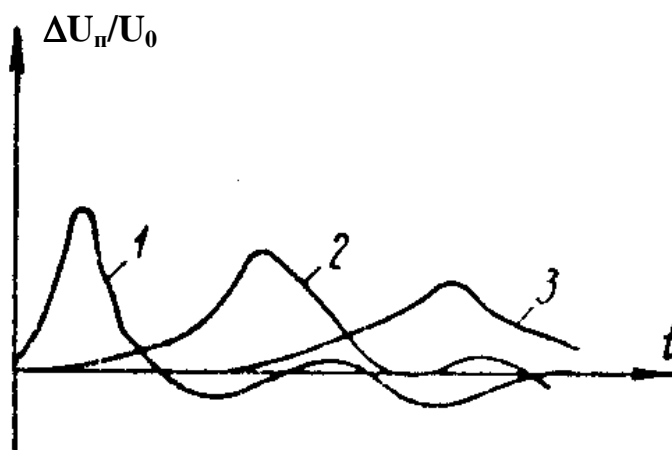


Рис.23.2. Осциллограммы напряжения на изоляции между катушками:
1 - на первой катушке; 2 - на девятой катушке; 3 - на двадцать первой катушке

ния между катушками, удается существенно ослабить неравномерность начального распределения напряжения по обмотке при воздействии крутых волн. При испытаниях новых конструкций обмоток трансформаторов на заводах производят их “импульсный обмер”, методика которого аналогична методике, применяемой в этой лабораторной работе.

23.3. Измерение кратности перенапряжений на отдельных катушках обмотки трансформатора

Измерение перенапряжений на главной изоляции катушек трансформатора с изолированной нейтралью производится по схеме, показанной на рис. 23.3 при отключенных выключателях SA1 и SA2.

Импульсный генератор подсоединяется к гнезду U_B в начале обмотки.

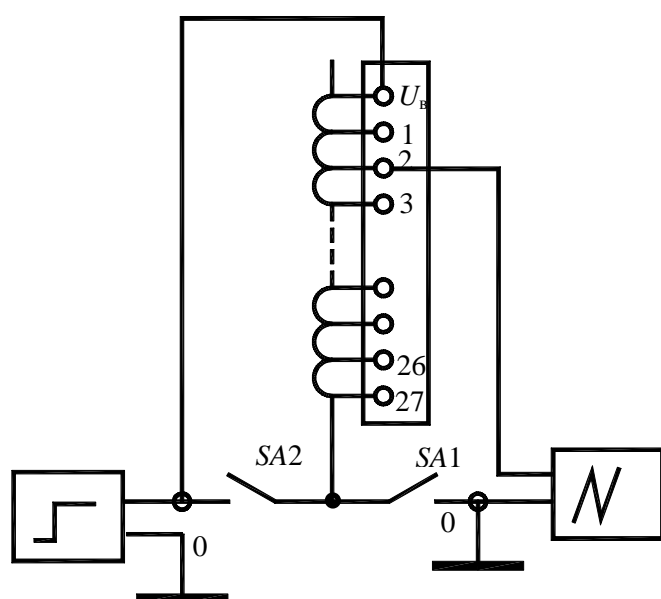


Рис.23.3. Схема установки для измерения перенапряжений на катушках обмотки трансформатора

Провода от земляных зажимов генератора и осциллографа подключаются к гнездам “0” в нижней части щитка выводов обмотки. Амплитуда импульса генератора устанавливается равной 20 В, а его длительность – 20 мкс. Провод от входного зажима осциллографа поочередно присоединяется к началу обмотки и к выводам катушек № 3; 6; 9; 12; 15; 18, 21, 24; 27. По осциллограмме на экране осциллографа измеряется

амплитуда импульса в каждой из этих точек. Полученное значение делится на амплитуду приложенного от генератора напряжения и заносится в таблицу результатов. Для вывода с наибольшей кратностью снимается осциллограмма импульса перенапряжения.

Измерение перенапряжений на обмотке с заземленной нейтралью производится аналогичным способом, но при включенном выключателе SA1 и отключенном – SA2.

Измерение перенапряжений на обмотке, работающей в схеме “треугольник”, производится аналогично, только выключатель SA1 должен быть отключен, а выключатель SA2 – включен. При этом предполагается, что волна приходит одновременно на все три фазные вводы трансформатора и одновременно воздействует на начало и конец каждой обмотки.

23.4. Измерение кратности перенапряжений между отдельными катушками обмотки при изолированной нейтрали

Для замера перенапряжений на продольной изоляции используется дифференциальный усилитель осциллографа, первый вход которого присоединяется к началу измеряемой катушки, а второй – к ее концу. На экране регистрируется осциллограмма разности напряжений, приложенных к его входам. Измерения проводятся последовательно на каждой из катушек, перечисленных в п. 23.3, кратность измеренных амплитуд перенапряжений на продольной изоляции заносится в таблицу результатов. Снимается осциллограмма импульса напряжения на продольной изоляции той катушки, где его величина оказалась наибольшей.

23.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему испытательной установки,
- б) таблицы результатов измерений,
- в) графики распределения кратностей перенапряжений на главной и продольной изоляции,
- г) осциллограммы максимальных перенапряжений для каждого варианта схемы,
- д) анализ полученных результатов.

24. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАБЕЛЯХ

24.1. Программа работы

1. Определить время пробега волны по кабелю и скорость распространения волн в кабеле.
2. Определить волновое сопротивление кабеля методом подбора активного сопротивления в конце кабеля, устраняющего отражения, а также индуктивность и емкость кабеля на единицу длины.
3. Определить зависимость коэффициента отражения волн напряжения на конце кабеля от величины сопротивления нагрузки R в конце кабеля.
4. Определить характер деформации и постоянные времени прямоугольной длинной волны при прохождении ее:
 - мимо емкости, включенной между жилой и оболочкой в середине кабеля;

– через индуктивность, включенную последовательно между отрезками кабеля.

24.2 Пояснения к работе

Как показано на рис. 24.1, при поражении молнией высоковольтного кабеля или воздушной линии электропередачи в них возникают волновые переходные процессы. Когда волна напряжения U_1 , распространяющаяся от узла 1, набегаёт на узловую точку 2, в которой подключены сопротивление нагрузки R и отходящий кабель, часть ее энергии расходуется на образование отраженной волны U_2 , а часть – на создание преломленной волны U_3 .

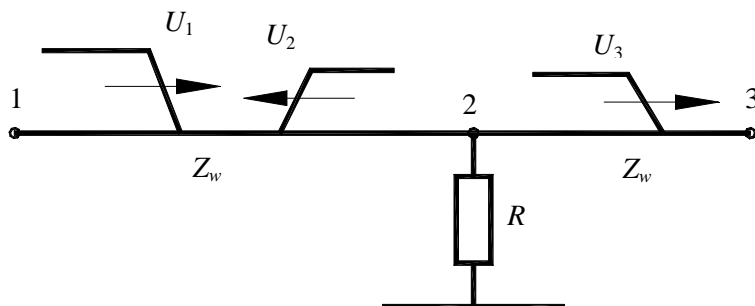


Рис.24.1. Падающая, преломленная и отраженная волны в кабеле, нагруженном на сопротивление R и отходящий кабель

Отраженная волна движется в обратную сторону, а преломленная – продолжает движение в прежнем направлении. Скорость распространения волн

по кабелю или линии без потерь может быть определена по формуле

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где L и C – индуктивность и емкость кабеля или линии электропередачи на единицу длины.

Отношение преломленной волны к падающей называется коэффициентом преломления α , а отношение отраженной волны к падающей – коэффициентом отражения β .

$$\alpha = \frac{U_3}{U_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_w}; \quad \beta = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2 - Z_w}{Z_2 + Z_w},$$

где $Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$, а $Z_2 = \frac{R Z_w}{R + Z_w}$.

Коэффициенты преломления и отражения волн на холостом конце линии или кабеля $\beta=+1$, $\alpha=+2$; при согласованной нагрузке ($Z_2 = Z_w$) – $\beta=0$, $\alpha=+1$, и на короткозамкнутом конце ($Z_2 = 0$) – $\beta=-1$, $\alpha=0$.

В случае включения емкости между жилой и землей или индуктивности между жилами кабелей коэффициенты преломления и отражения являются функциями времени и зависят от формы воздействия.

24.3. Определение времени пробега и скорости распространения волны в кабеле

Измерение времени пробега и скорости распространения волны в кабеле проводится на установке, блок-схема которой приведена на рис. 24.2. Вход осциллографа X1 соединяется с блоком втычных гнезд 3, а "0" - с блоком 2. Соединяются гнезда 5 с 7 и 4 с 6. На генераторе прямоугольных импульсов рекомендуется установить длительность импульса 0.5 мкс, при котором падающие и отраженные волны не будут накладываться друг на друга. Время пробега определяется по осциллограмме напряжения в начале ненагруженного кабеля. Интервал Δt между фронтом прямого и отраженного от холостого конца линии импульса равен двойному времени пробега волны. Следовательно, $t = \Delta t / 2$, а скорость распространения волны по кабелю $v = (l_1 + l_2) / t$.

24.4. Определение волнового сопротивления кабеля методом подбора активного сопротивления в конце кабеля,

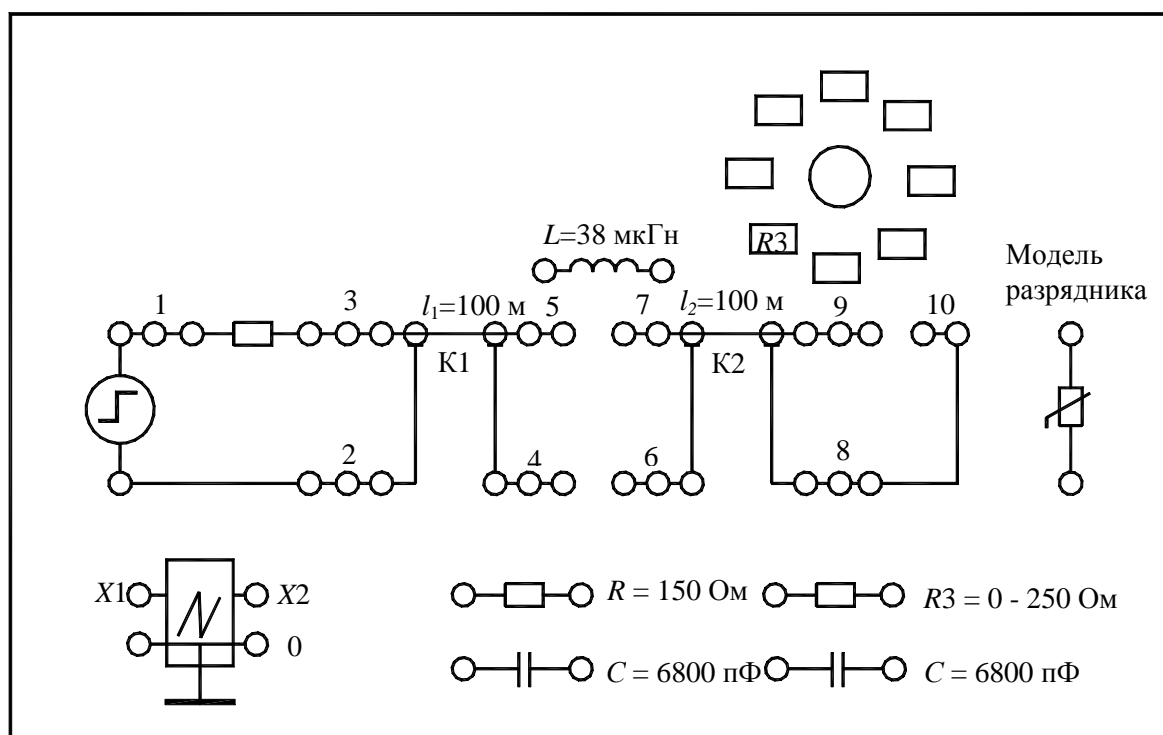


Рис.24.2. Блок-схема испытательной установки

а также индуктивности и емкости кабеля на единицу длины

Дополнительно к п.24.3 один из зажимов резистора R_3 подключается к розеткам 9, а второй – к розеткам 8. Изменяя величину сопротивления этого резистора, добиваемся исчезновения отраженной волны. Считываем показания на шкале R_3 . Это значение сопротивления и будет равно волновому сопротивлению кабеля. Индуктивность и емкость на единицу длины могут быть определены по формулам

$$L = Z_w/v \text{ Гн/м}, C = 1/Z_w v \text{ Ф/м}.$$

24.5. Определение зависимости коэффициентов отражения волн напряжения на конце кабеля от величины сопротивления нагрузки R в конце кабеля

Зависимость коэффициента отражения от величины сопротивления нагрузки определяется по такой же схеме, как и в п 24.4. При четырех-пяти значениях сопротивления нагрузки R_3 на экране осциллографа измеряется отношение амплитуды отраженной волны к падающей, т.е. $\beta = U_2/U_1$, и полученное значение записывается в таблицу результатов для построения зависимости $\beta = f(R)$.

24.6. Определение характера деформации постоянных времени прямоугольной длинной волны

1. При прохождении ее мимо емкости, включенной между жилой и оболочкой в середине кабеля.

Для определения характера деформации волны рекомендуется величину сопротивления R_3 установить равным волновому сопротивлению кабеля. Длину прямоугольного импульса сделать равной 2 мкс. Один из зажимов конденсатора C соединить с гнездами 7, а второй – с гнездами 6. Вход осциллографа $X1$ из гнезд 3 перенести в гнезда 5. Зарисовать на прозрачную бумагу осциллограмму для последующей обработки. Постоянная времени определяется по осциллограмме как длительность времени от начала нарастания импульса до точки пересечения касательной к волне из начала нарастания с горизонтальной прямой, проведенной на амплитуде импульса. Расчетное значение изменения напряжения на емкости может быть определено по формуле $U_2 = U_1(1 - e^{-t/T})$, где T – постоянная времени $T = CZ_w/2$.

2. При прохождении волны через индуктивность, включенную последовательно между отрезками кабеля.

Для определения характера деформации волны при прохождении ее через индуктивность необходимо емкость C отключить, а между гнездами 5 и 7 включить индуктивность L , зажим $X1$ соединить с гнездами 7 и сделать все то же, что и в п. 24.6.1. Необходимо обратить внимание на то, что изменение напряжения от времени будет определяться аналогичной формулой, но постоянная времени будет $T = L/2Z_w$.

24.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) блок-схему испытательной установки;
- б) измеренные и рассчитанные на основании измерений скорость распространения волны в кабеле, волновое сопротивление, индуктивность и емкость кабеля на единицу длины;

- в) графики экспериментальных зависимостей, полученные в п.24.5;
- д) осциллограммы исходных и деформированных импульсов с указанием постоянных времени подъема напряжения, экспериментальные и расчетные постоянные времени;
- е) анализ полученных результатов.

25. ГРОЗОЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ПО ЛИНИИ ВОЛН

25.1. Программа работы

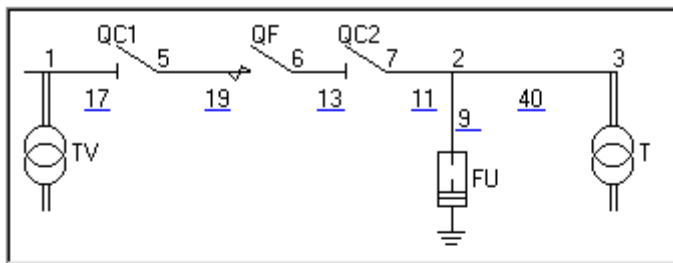
1. Оценить эффективность применяемых на подстанции защитных аппаратов.
2. Определить зависимость перенапряжений на силовом трансформаторе от длины защищенного подхода.

25.2. Пояснения к работе

Грозозащита подстанции включает защиту от прямых ударов молнии, защиту от обратных перекрытий при ударах молнии в заземленные конструкции подстанции, а также защиту от волн, набегающих на подстанцию по линиям электропередачи при ударах молнии в подходы линий к подстанции. При решении двух первых задач с высокой степенью надежности основной причиной возникновения опасных перенапряжений на оборудовании подстанций остаются удары молнии в провода линии электропередачи, опоры и грозозащитные тросы. Эти удары приводят к появлению набегающих на подстанцию волн. Наиболее неблагоприятным является тупиковый режим, когда на подстанцию приходит только одна линия электропередачи и в работе находится только один силовой трансформатор.

Для защиты от перенапряжений указанного типа на подстанциях устанавливают защитные аппараты, а на подходах линий – грозозащитный трос.

Расчет перенапряжений на оборудовании начинается с составления эквивалентной схемы с использованием принципиальной схемы и плана подстанции. Все электрооборудование подстанции заменяется соответствующими входными емкостями и получается схема замещения. Далее выделяются узловые точки. Такими точками являются: 1 – линейный разъединитель, 2 – разветвление по ходу волны к трансформатору и защитному аппарату, 3 – силовой трансформатор и 4 – защитный аппарат. Разнеся емкости в эти узлы по правилу моментов, получаем упрощенную расчетную схему. Такое преобразование схем на примере тупиковой подстанции показано на рис. 25.1.



Принципиальная схема тупиковой подстанции

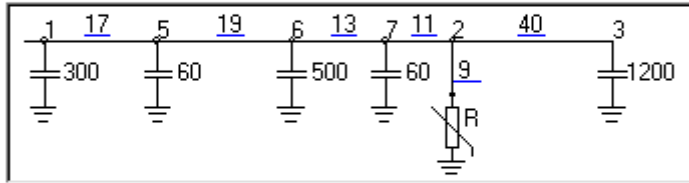
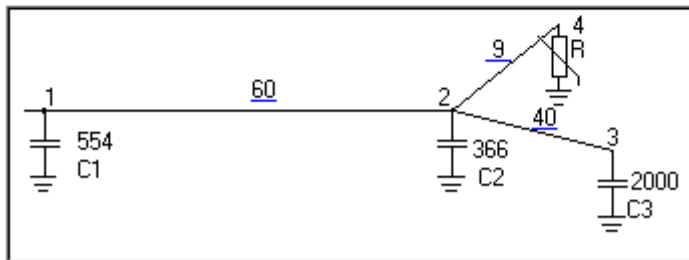


Схема замещения



Расчетная схема

Рис. 25.1. К преобразованию схем

Форму набегающей волны также упрощают. Фронт волны принимают косоугольным до достижения максимального значения, которое далее в пределах расчетного времени не меняется. Волны, возникшие на некотором удалении от подстанции в процессе распространения по линии сглаживаются за счет импульсной короны на проводах. Этот эффект приводит к увеличению длины фронта и соответствующему снижению грозовых перенапряжений. В первом приближении удлинение фронта вследствие импульсной короны определяется выражением:

$$\Delta t_{\phi} = 3.33 \Delta l \left(\sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{u}{U_k} - 1 \right)^{2/3}} - 1 \right),$$

где $U_k = E_k r_{\text{пр}} \ln \frac{2h}{r_{\text{пр}}}$, $E_k = 24.6 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_{\text{пр}}}} \right)$ – соответственно напряжение и напряженность начала короны на проводе радиусом $r_{\text{пр}}$, расположенном на высоте h .

25.3. Оценить эффективность применяемых на подстанции защитных аппаратов

Оценка эффективности применяемых на подстанции защитных аппаратов осуществляется с помощью программы Pod.exe. Программа расположена в директории C:\LabWin. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка, в котором приведены общий вид на узловую подстанцию 330 кВ, процесс преобразование принципиальной схемы в упрощенную расчетную, эмблема кафедры и две кнопки управления программой “Подс.” и “Конец”. Нажатие левой клавиши мыши на кнопке “Подс” приводит к выводу на экран дисплея расчетного окна, показанного на

рис. 25.2. В этом окне следует нажать левой клавишей мыши на кнопку “С-1-Zв” и по указанию класса напряжения преподавателем ввести соответствующие этому классу длины между узлами расчетной схемы, емкости оборудования, величину волнового сопротивления, тип защитного аппарата, вольт-секундную характеристику линии, допустимые напряжения трансформатора и электрических аппаратов и амплитуду напряжения воздействия, равную примерно половине от минимального значения напряжения, определяемого по вольт-секундной характеристике линии электропередачи. Установка расстояний между точками расчетной схемы осуществляется в соответствии с инструкцией, расположенной под кнопкой “?”. Для установки величин емкостей, волнового сопротивления и амплитуды воздействующего напряжения необходимо подвести курсор в соответствующее окошко ввода данных, нажать левую кнопку мыши и на клавиатуре набрать нужное значение. При этом нужно следить за тем, чтобы дробная часть отделялась точкой. Класс напряжения устанавливается нажатием левой клавиши мыши на соответствующее значение напряжения в боксе “Класс напряжения”. Для активизации бокса нужно нажать левой клавишей мыши на стрелочку, расположенную в правой стороне бокса. Тип защитного аппарата задается аналогичным образом в боксе “ВАХ ЗА”, а допустимые напряжения трансформатора и электрических аппаратов, а также вольт-секундная характеристика линии передачи – в боксе “ВСХ”.

Рекомендуется следующий порядок. Сначала проведите расчет без защитных аппаратов. Для этого в боксе “ВАХ ЗА” установите “Нет ЗА” и левой клавишей мыши нажмите на кнопку “ОК”. В соответствии с указаниями как измерить мгновенные значения напряжений, расположенными под кнопкой “?”, находящейся между окнами для графического отображения результатов расчета измерьте максимальное значение на трансформаторе и запишите эту величину для оформления отчета. Далее проведите такие же действия с защитными аппаратами и в отчете сделайте вывод в форме констатации.

25.4. Определение зависимости перенапряжений на силовом трансформаторе от длины защищенного подхода

Определение зависимости перенапряжений на силовом трансформаторе от длины защищенного подхода рекомендуется проводить при очередной установке всех возможных защитных аппаратов для указанного преподавателем класса напряжения. Для этого установите амплитуду воздействующего напряжения “U, кВ”, равную примерно минимальному

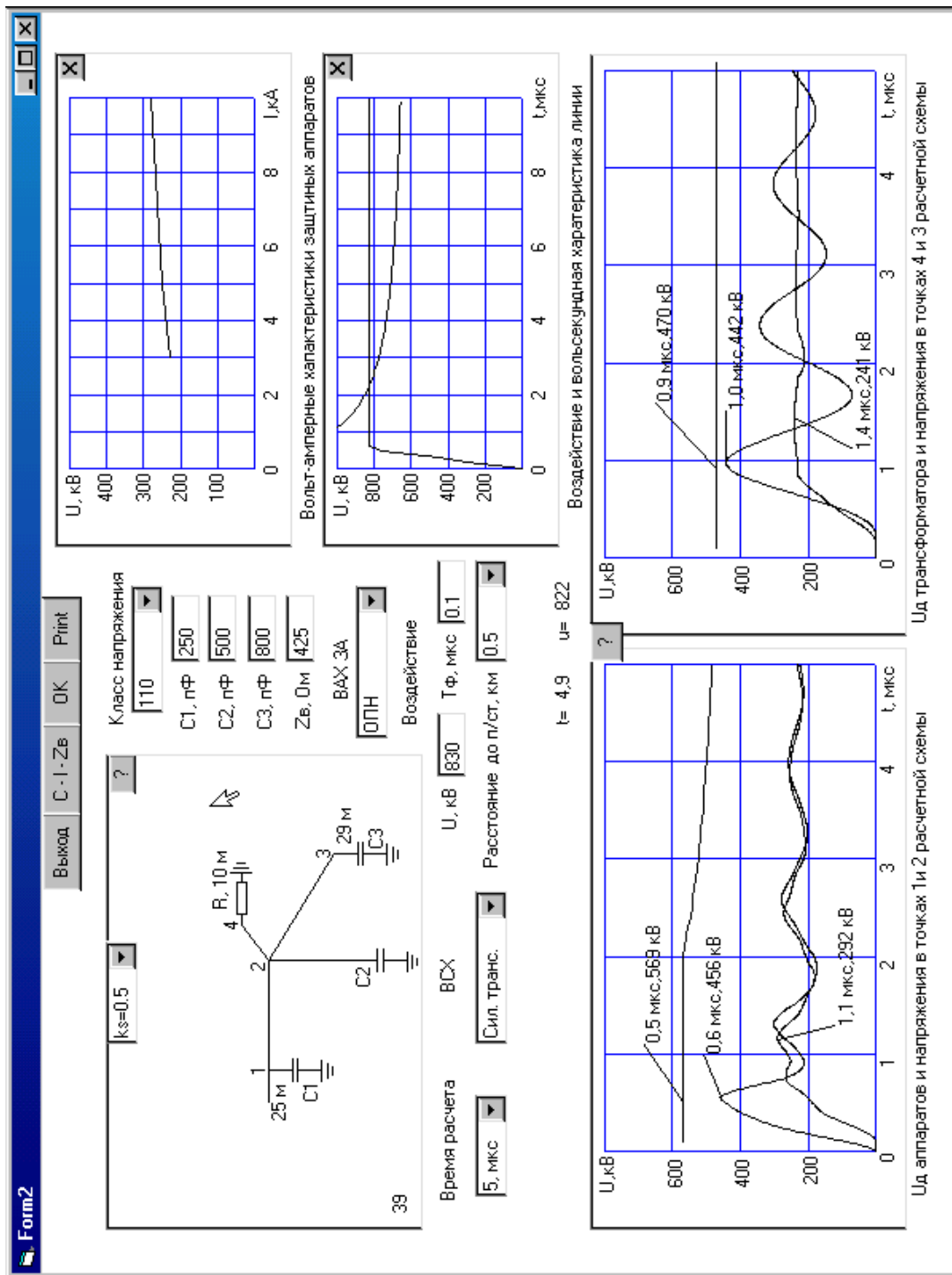


Рис. 25.2. Расчетное окно

значению напряжения, определяемого по вольт-секундной характеристике линии электропередачи и проведите аналогично п. 25.3 расчеты для всех длин защищенного подхода, предусмотренных в боксе “Расстояние до п/ст, км”. Одно из полученных расчетных окон (желательно для случая, когда все оборудования подстанции защищено) обработайте так, показано на рис. 25.2 и выведите на печать нажатием на кнопку “Print” для оформления отчета. Далее проведите такие же расчеты при в два раза большем воздействующем напряжении.

По результатам этих расчетов определите минимальную длину защищенного подхода. Эта длина определяется по графику зависимости напряжения на трансформаторе от длины подхода и равна длине, при которой напряжение на трансформаторе равно допустимому (верхняя прямая в правом окне для построения графиков, красная на экране).

25.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатку расчетного окна;
- б) таблицы и графики;
- в) анализ полученных результатов.

26. ДУГОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

26.1. Программа работы

Определить:

1. максимальные перенапряжения на здоровых фазах по гипотезе Белякова и Джуварлы;
2. зависимость максимальных перенапряжений на здоровых фазах от сопротивления заземления в месте загорания дуги;
3. зависимость максимальных перенапряжений на здоровых фазах от момента первого пробоя изоляции фазы;
4. влияние дугогасящего реактора, включенного в нейтраль трансформаторов, на величину дуговых перенапряжений.
5. максимальные перенапряжения на здоровых фазах при металлическом замыкании одной фазы на землю.

26.2. Пояснения к работе

В сетях 3 - 35 кВ с изолированной нейтралью при частичном повреждении изоляции одной фазы и малых емкостных токах на землю (порядка единиц ампер) дуга сама погасает, и восстанавливается нормальный режим работы сети. С увеличением числа и протяженности линий переда-

чи, а также при наличии кабельных линий токи замыкания на землю $I_3=3 \omega C_\phi U_\phi$ становятся настолько большими, что дуга погаснуть не может. Токи порядка 10 – 20 А приводят к более медленному восстановлению электрической прочности промежутка, в результате чего становятся возможными повторные зажигания дуги. Неоднократные зажигания и погасания заземляющей дуги (рис. 26.1) в поврежденной фазе из-за перезарядки емкостей здоровых фаз приводят в ряде случаев к опасным для изоляции перенапряжениям. Такие перенапряжения в литературе получили название дуговых перенапряжений.

Погасание дуги возможно только в момент перехода тока через нулевое значение. Так как ток замыкания на землю кроме составляющей 50 Гц имеет и высокочастотную составляющую, погасание дуги может произойти при любом из переходов тока через нуль. По гипотезе Петерса и Слепяна, гашение дуги происходит при каждом переходе через нулевое значение тока рабочей частоты 50 Гц после затухания высокочастотной переходной составляющей. Расчетные изменения напряжений на фазах и тока в поврежденной фазе приведены на рис. 26.1,а. Согласно гипотезе Петерсена дуга гаснет при переходе через нуль полного тока с учетом свободных колебаний, вызванных предшествующим зажиганием дуги (см. рис. 26.1,б). По гипотезе Белякова и Джуварлы, дуга замыкания на землю, горящая в открытом воздухе или в узкой щели поврежденной изоляции, где отсутствует интенсивная деионизация ствола дуги, может погаснуть при каждом переходе через нуль, если величина пика гашения не превосходит приблизительно $0.4U_{\text{фном}}$ (см. рис. 26.1,в).

Наиболее близкие значения перенапряжений к реальным, имеющим места в сетях с изолированной нейтралью, обеспечивает гипотеза Белякова и Джуварлы. Поэтому все дальнейшие теоретические исследования перенапряжений будут проводиться на основе этой гипотезы.

26.3. Определение максимальных перенапряжений на здоровых фазах по гипотезе Белякова и Джуварлы

Определение максимальных перенапряжений на здоровых фазах в сетях с изолированной нейтралью по гипотезе Белякова и Джуварлы осуществляется с помощью программы Pd.exe. Программа размещена в директории C:\LabWin. После запуска программы на экране дисплея появляется окно-заставка, в котором представлены примеры кривых перенапряжений, получаемых по всем трем гипотезам, логотип кафедры и две кнопки управления программой. Нажатие левой клавишей мыши кнопки “Pd” вызывает расчетное окно, показанное на рис. 26.2. В этом окне время $t1$ соответствует моменту времени пробоя изоляции фазы, вызванного воздействием внешних перенапряжений или механическим повреждением.

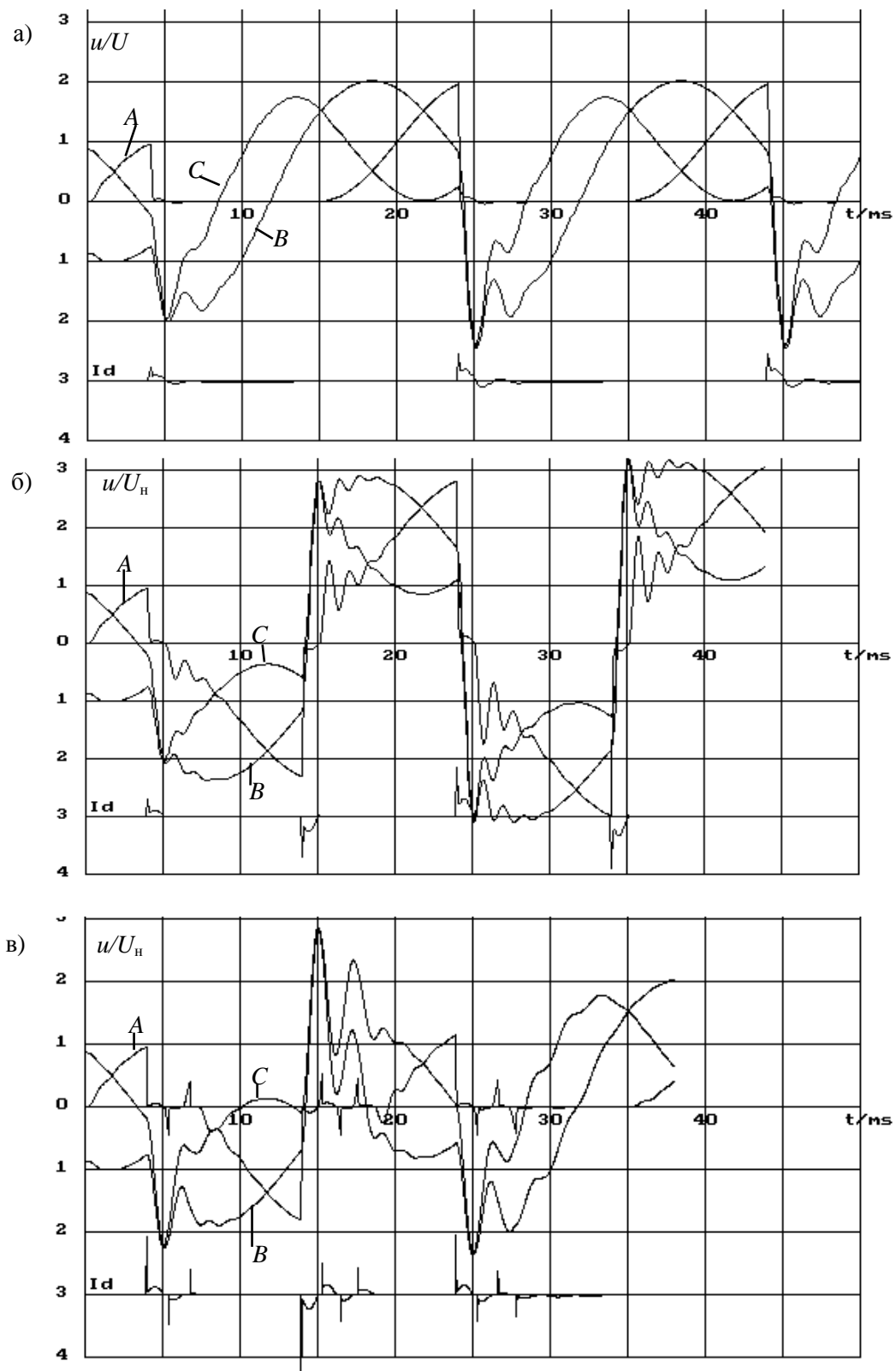


Рис. 26.1. Осциллограммы дуговых перенапряжений по гипотезам:
 а) Петерса и Слепяна, б) Петерсена и в) Белякова и Джуварлы

Времена t_2 и t_3 – моменты повторных зажигания дуги в поврежденном месте.

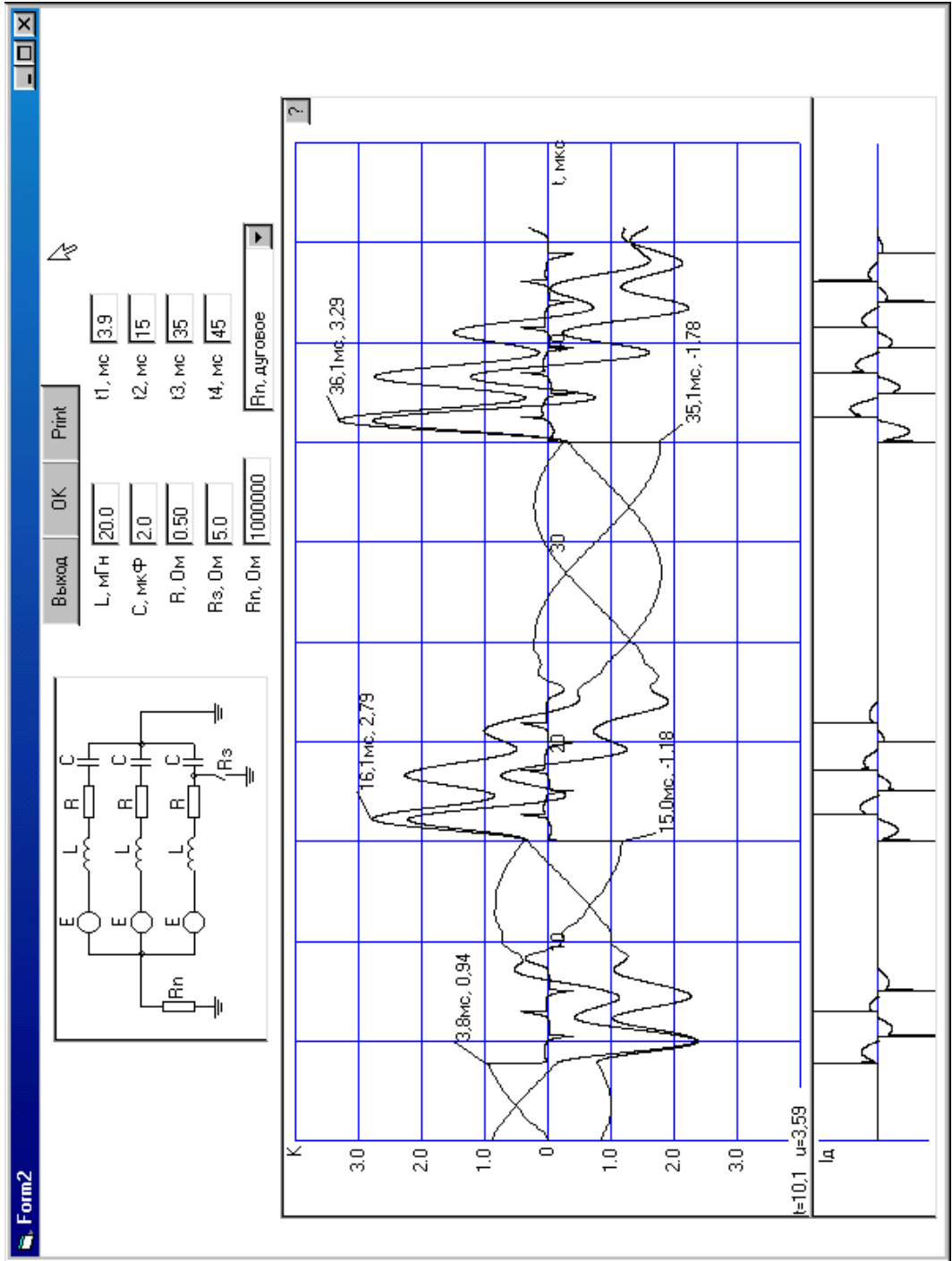


Рис. 26.2. Расчетное окно

Время t_4 – конец расчета. Рекомендуется первый расчет провести при параметрах, которые зашиты в программе. Далее времена t_2 , t_3 и t_4 следует изменить так, чтобы получить максимальные перенапряжения. Ввод соответствующих времен осуществляется следующим образом. Курсор мыши подводится в соответствующее окошко ввода данных, нажимается левая клавиша мыши и на клавиатуре набирается необходимое значение времени. Чтобы получить максимальные напряжения на здоровых фазах, времена t_2 и t_3 должны соответствовать максимуму напряжения на поврежденной фазе (на рис. 26.2 средняя кривая в начале построения, на экране – красная). После установки времен и нажатие кнопки “Ok” будут выведены кривые напряжения на всех фазах, а под кривыми – ток через поврежденный участок. Для измерения мгновенных значений напряжений следует нажать мышью кнопку “?”, расположенную в правом верхнем углу окна для вывода расчетных кривых и согласно рекомендациям обработать кривые так, как это сделано на рис. 26.2. Это окно следует вывести на печать путем нажатия на кнопку “Print” для оформления отчета.

26.4. Определение зависимости максимальных перенапряжений на здоровых фазах от сопротивления заземления в месте загорания дуги

Для определения зависимости максимальных перенапряжений на здоровых фазах от сопротивления заземления в месте загорания дуги рекомендуется провести пять-шесть аналогичных расчетов при изменении сопротивления R_z в пределах от 0 до 50 Ом. Полученные значения перенапряжений на здоровых фазах и значения введенных сопротивлений запишите в таблицу для оформления отчета.

26.5. Определение зависимости максимальных перенапряжений на здоровых фазах от момента первого пробоя изоляции фазы

Определение зависимости перенапряжений на здоровых фазах от момента первого пробоя изоляции фазы рекомендуется осуществить путем проведения пяти-семи аналогичных расчетов при изменении времени пробоя изоляции t_1 в пределах от 0,1 до 8 мс и полученные результаты записать в таблицу для оформления отчета в виде графических зависимостей.

26.6. Определение влияния дугогасящего реактора, включенного в нейтраль трансформаторов, на величину дуговых перенапряжений

Для выполнения этого пункта программы необходимо левой клавишей мыши нажать на стрелку бокса, в котором установлено “Rn, дуговое”. В этом боксе выбрать “Ln, дуговое” и нажать кнопку “Ok”. Измерить максимальные значения напряжений и вывести это окно на печать для оформления отчета. Далее для определения влияния реактора нужно про-

вести хотя бы два дополнительных расчета при изменении его индуктивности на порядок в большую и в меньшую стороны.

26.7. Определение максимальных перенапряжений на здоровых фазах при металлическом замыкании одной фазы на землю

Для определения максимальных перенапряжений на здоровых фазах при металлическом замыкании одной фазы на землю необходимо левой клавишей мыши нажать на стрелку бокса, в котором установлено “ L_n , дуговое”. В этом боксе выбрать “ R_n , металлическое” и нажать кнопку “Ok”. Измерить максимальные значения напряжений и вывести это окно на печать для оформления отчета.

26.8. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) распечатки расчетных окон;
- б) графики зависимости перенапряжений на здоровых фазах от момента первого пробоя изоляции фазы;
- в) графики перенапряжений на здоровых фазах в зависимости от величины сопротивления заземления в месте загорания дуги;
- д) выводы по работе.

27. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

27.1. Программа работы

1. Определить влияние сопротивления земли на величину перенапряжений на конце ненагруженной линии электропередачи.
2. Определить зависимость величины перенапряжений от фазы включения. Определить зависимость величины перенапряжений от длины линии.

27.2. Пояснения к работе

Включение линии электропередачи осуществляется высоковольтным выключателем. Пробой межконтактного промежутка выключателя при включении происходит в основном в области амплитудного значения приложенного к выключателю напряжения. Поскольку собственные емкости на землю отключенной линии электропередачи не заряжены, то происходит переходный процесс заряда этих емкостей от нулевого до амплитудного значения напряжения, в результате чего и возникают перенапряжения на изоляции линии. Величина этих перенапряжений и их форма кривой меняются в широких пределах в зависимости от мощности

подстанции, класса напряжения и длины линии. В данной работе предлагается исследование таких перенапряжений в коротких линиях (до 300 км) для класса напряжения 110 кВ при упрощенном моделировании подстанции эквивалентной индуктивностью и линии с одним звеном Г-образной схемы замещения.

27.3. Определение влияния сопротивления земли на величину перенапряжений на конце ненагруженной линии электропередачи

Для выполнения этого пункта программы можно воспользоваться программой Micro-Cap V Working. Ее запуск осуществляется при помощи команд системы Windows. После запуска программы на экране дисплея появляется рабочее окно, в котором можно средствами самой программы нарисовать расчетную схему и провести анализ соответствующих переходных процессов в этой схеме. С целью уменьшения времени для подготовки расчета рекомендуется через меню “File” открыть файл “vkll.cir”. Такое окно с открытым файлом показано на рис. 27.1. В этом окне E1 амплитудное значение напряжения источника питания

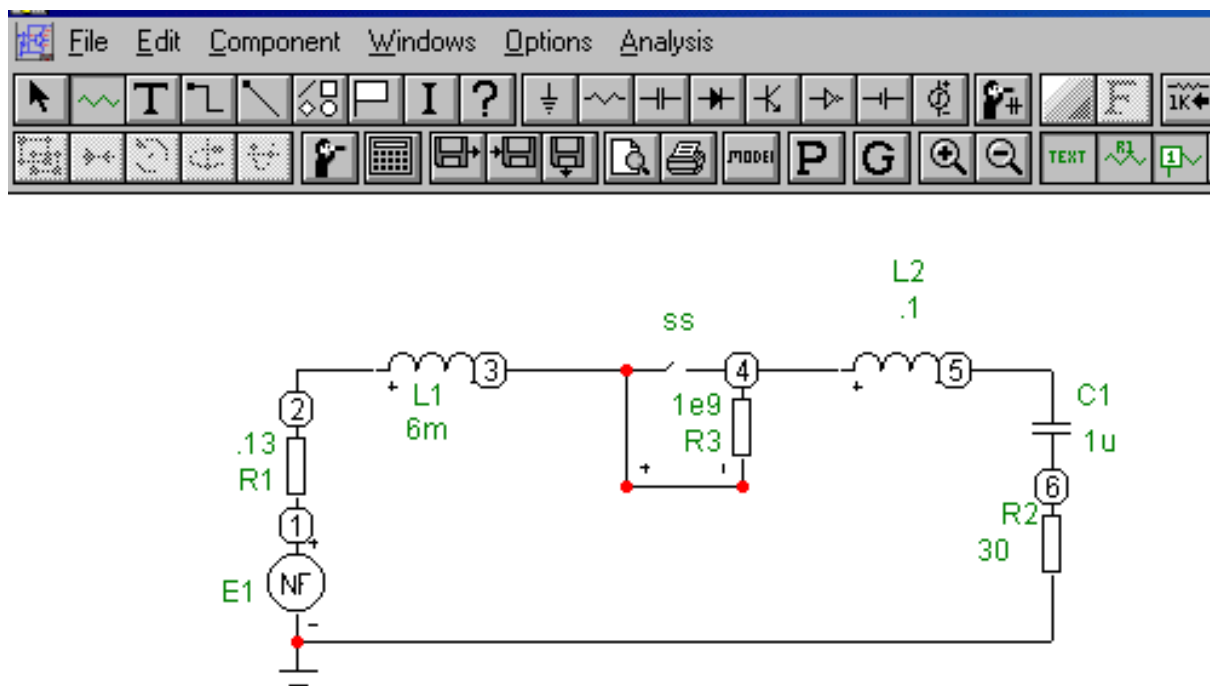


Рис. 27.1. Окно с расчетной схемой

$$E1 = \frac{U_{\text{нб}} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cong 100 \text{ кВ},$$

где $U_{\text{нб}}$ – наибольшее рабочее напряжение, равное 126 кВ. Эквивалентная индуктивность подстанции

$$L1 = \frac{U_{нб}}{\sqrt{3} I \omega},$$

где I – ток короткого замыкания на шинах подстанции, среднее значение которого может быть принято 40 кА; ω – круговая частота, равная 314 рад/с. Активное сопротивление проводников может быть найдено из условия, что максимальное значение ударного тока согласно ГОСТ 687 – 78 равно $1.8 I$. Исходя из этого, можно составить следующее уравнение:

$$0.8 = e^{-\delta 0.01}, \text{ где } \delta = \frac{R1}{L1}, \text{ или } R1 = \ln\left(\frac{1}{0.8}\right) 100 L1.$$

Индуктивность линии $L2$ может быть приближенно определена исходя из того, что 1 пог. м. нерасщепленного провода имеет один мкГн, а емкость $C1$ – 10 пФ. Таким образом, на рис.27.1 параметры линии электропередачи соответствуют длине 100 км.

SS на рис. 27.1 представляет собой управляемый по времени выключатель, а $R2$ – сопротивления земли.

Для запуска программы на расчет следует подвести курсор мыши на “Analysis” и нажать на левую клавишу мыши. Появится спадающее меню. В нем следует нажать левую клавишу мыши на “Transient Analysis”. Выпадет окно для установки параметров построения графиков, приведенное на рис. 27.2. В этом окне устанавливается время наблюдения (Time Range), шаг расчета (Maximum Time Step), напряжения в точках ($v(1)$, $v(5)$) схемы

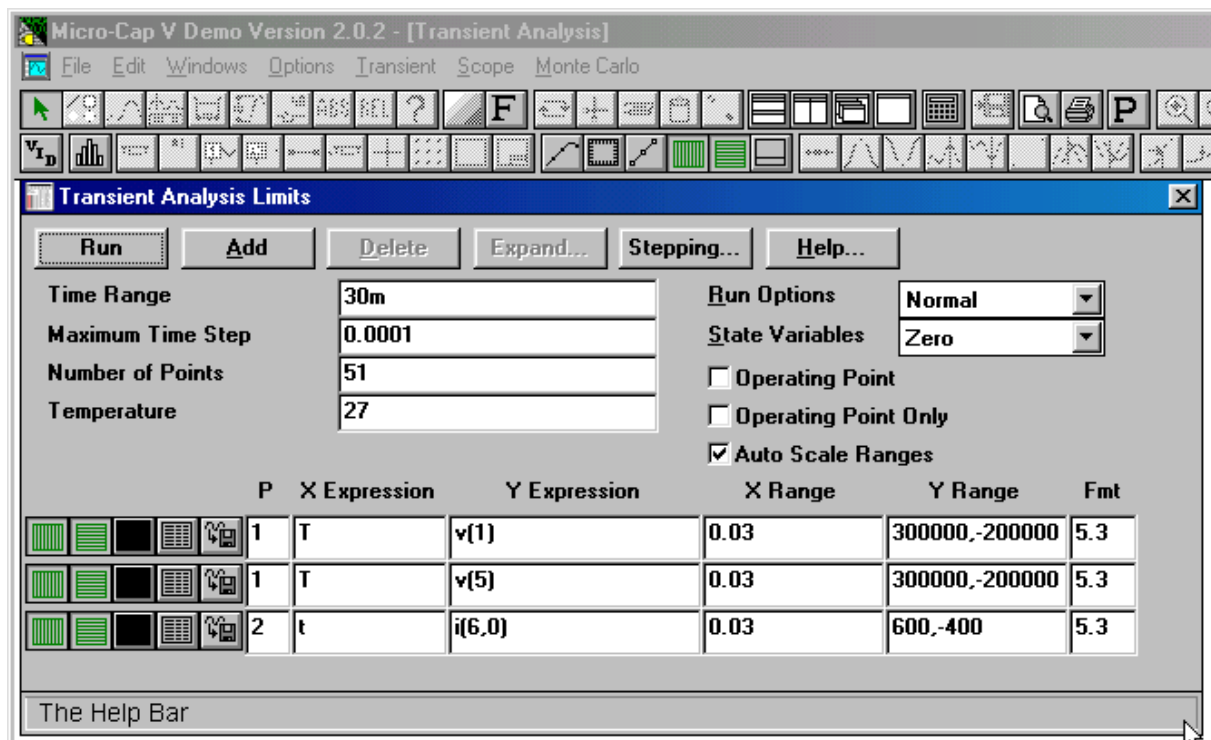


Рис. 27.2. Окно установки параметров построения графиков

и ток в цепи ($i(6,0)$), для которых требуется построение графиков.

Нажатие левой клавишей мыши на кнопку “Run” запустит программу на расчет и на экране будет выведено окно с графиками, представленное на рис. 27.3.

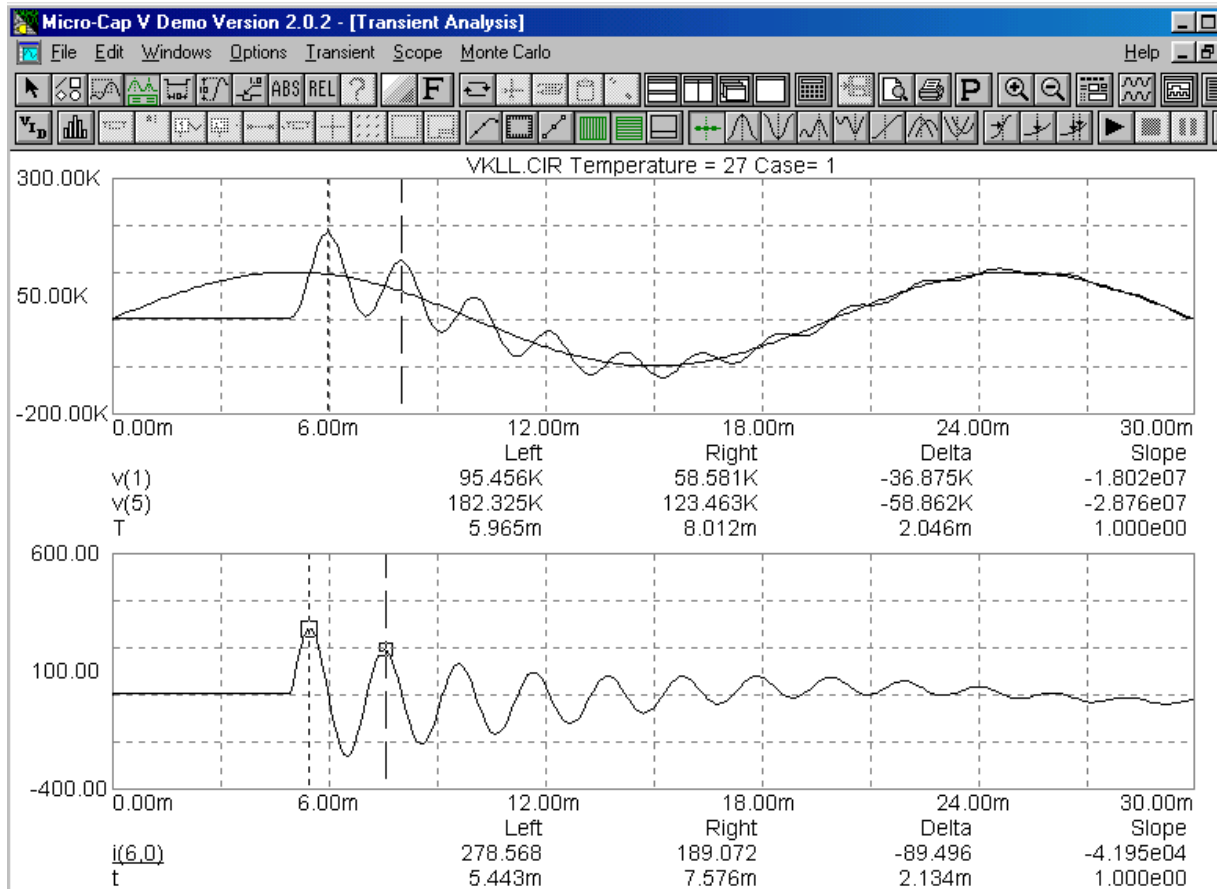


Рис.27.3. Окно с результатами расчета

Для получения численных значений напряжений и токов следует левой клавишей мыши нажать на четвертую кнопку первого ряда. Далее подвести кончик курсора мыши на соответствующую точку на кривой и нажать левую клавишу мыши. За тем подвести кончик курсора мыши на другую точку на кривой и нажать правую клавишу мыши. Внизу под кривыми получим численные значения мгновенных значений напряжений, тока и времен. Такая обработка кривых показана на рис. 27.3.

Если есть необходимость более детального рассмотрения кокой-то части кривой, то следует нажать левой клавишей мыши третью кнопку первого ряда, подвести курсор мыши в верхнюю левую точку предполагаемой зоны рассмотрения нажать левую клавишу мыши и не отпуская отвести курсор в нижнюю правую точку и отпустить.

Возврат в окно с расчетной схемой осуществляется нажатием на клавиатуре “F3”.

Для определения влияния сопротивления земли на кратность перенапряжений при включении ненагруженной линии нужно провести еще хотя бы два дополнительных расчета при других значениях $R2$, в два раза больших и два раза меньших чем в предыдущем расчете. Для замены значения необходимо на расчетной схеме повести курсор мыши на соответствующий элемент (в данном случае на $R2$), нажать левую клавишу мыши после этого нажать ее еще два раза с коротким промежутком времени между нажатиями. Появится дополнительное окно ввода (см. рис. 27.4).

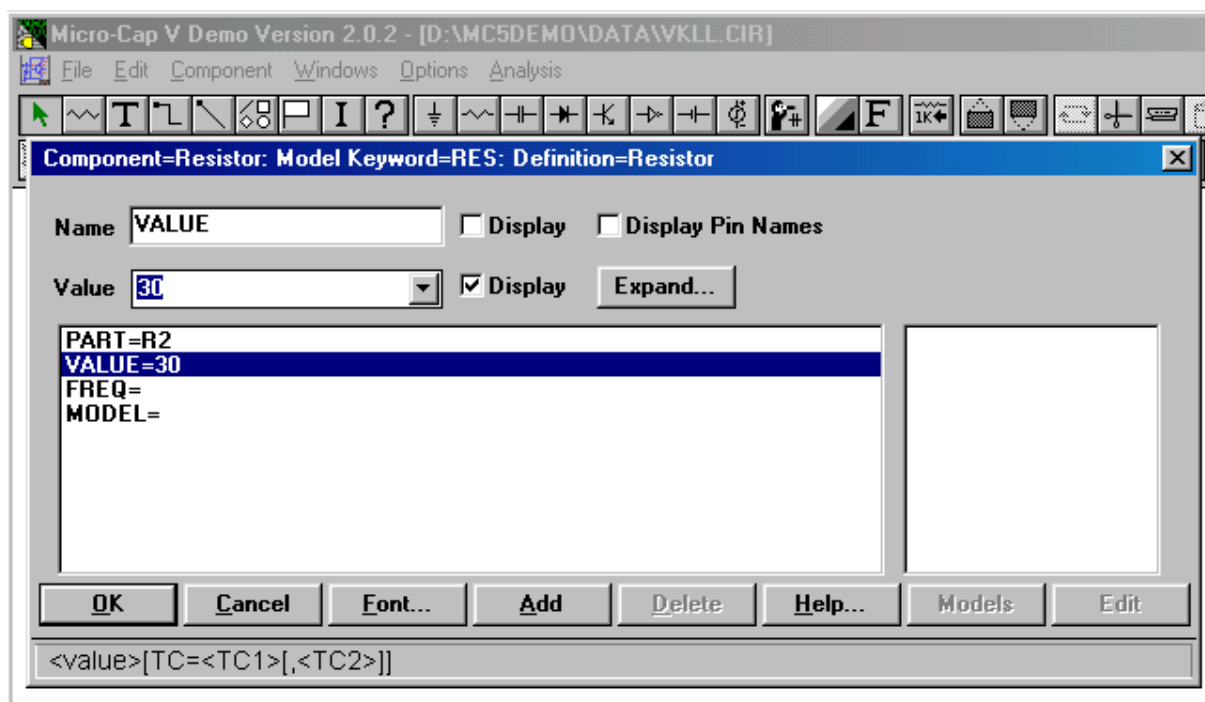


Рис. 27.4. Окно ввода данных

В окно “Value” следует подвести курсор, нажать левую клавишу мыши, на клавиатуре набрать нужное значение и левой клавишей мыши нажать кнопку “OK”.

Значения сопротивлений и кратностей перенапряжений, определяемых как отношение перенапряжений к воздействию напряжению (в нашем случае 100 кВ) необходимо записать для оформления отчета.

Следует заметить, что значение сопротивления должно быть таким, чтобы наложенные высокочастотные колебания затухли в течение примерно 30 мс. Это имеет место на осциллограммах, полученных при включении реальной линии.

27.4. Определение зависимости величины перенапряжений от фазы включения

Влияние фазы включения определяется из расчетов, проведенных при разных значениях времени включения выключателя SS . Рекомендуется

установить значение сопротивления $R2$ таким, при котором высокочастотные колебания затухают в течении 30 мс и провести расчеты при времени включения 5, 2, 4, 6, 8 и 10 мс. Для этого в окне “Value” для SS нужно ввести $t,5m,1$, где t означает временной, $5m$ – момент включения в миллисекундах и 1 – момент отключения в секундах. Окно с результатами расчета при 5 мс следует вывести на печать для оформления отчета. Для этого после проведенного расчета нужно обработать кривые так, как показано на рис. 27.3, нажать левую клавишу мыши на “File”, в выпавшем меню – на “Print Preview. Появится окно см. рис. 27.5.

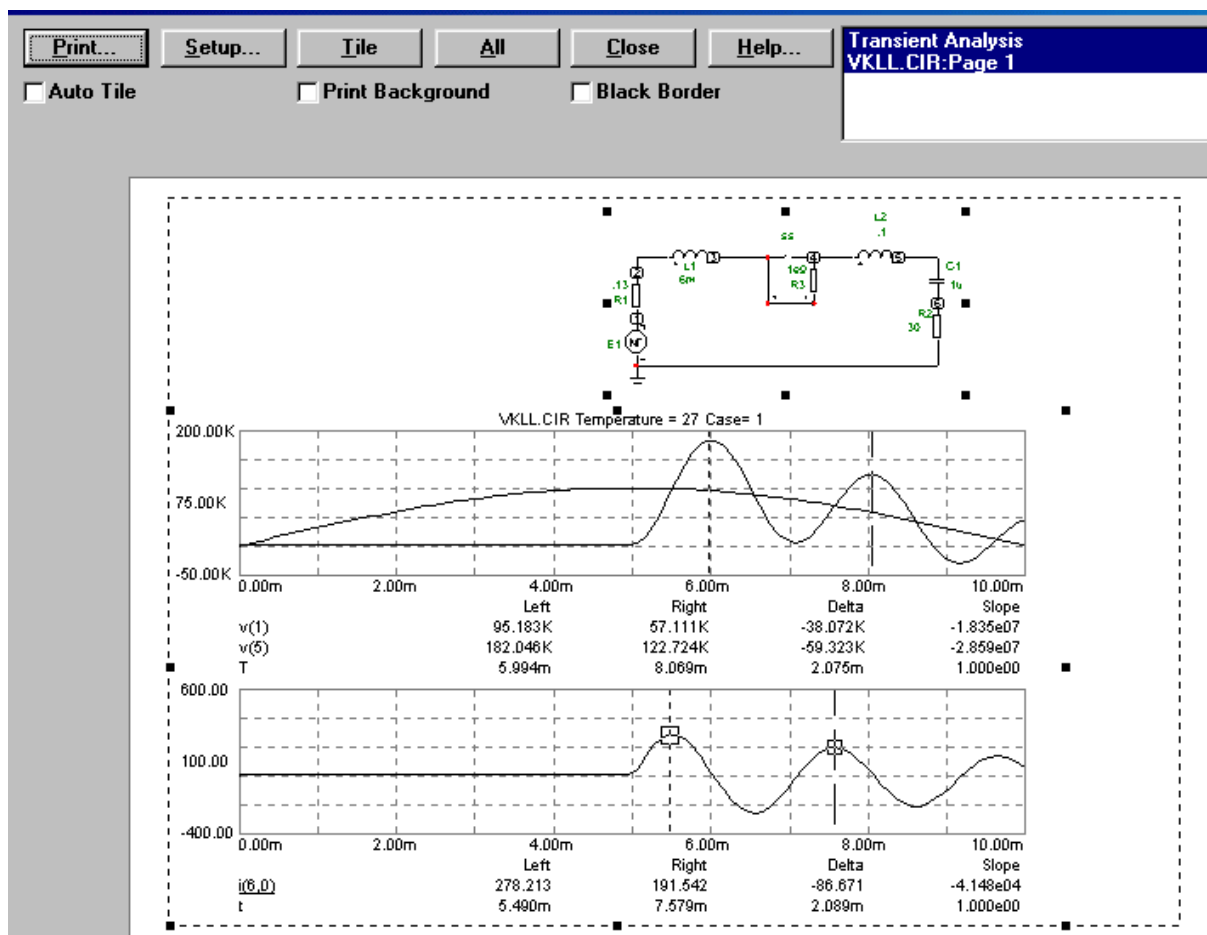


Рис.27.5. Окно предварительного просмотра

Если в окне будет отражено все, что необходимо для отчета (как на рис. 27.5), то нажмите левой клавишей мыши на кнопку “Print”.

В отчете привести графическую зависимость кратности перенапряжений от фазы включения.

27.5. Определение зависимости величины перенапряжений от длины линии

Влияние длины линии на величину перенапряжений при включении определяется из расчетов, проведенных при разных длинах линии. Реко-

мендуется провести расчеты при увеличении и уменьшении в два раза длины линии по сравнению с исходной в п. 27.4. при времени включения 5 мс. В отчете привести графическую зависимость кратности перенапряжений от длины линии.

27.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) расчет параметров;
- б) распечатку результатов расчета для случая, когда высокочастотные колебания затухают в течение примерно 30 мс;
- в) график зависимости кратности перенапряжений от фазы включения;
- г) график зависимости кратности перенапряжений от длины линии;
- д) выводы по работе.

28. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОЙ ЛИНИИ С ПОВТОРНЫМИ ПРОБОЯМИ МЕЖКОНТАКТНОГО ПРОМЕЖУТКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

28.1. Программа работы

1. Определить зависимость кратности перенапряжений от момента пробоя межконтактного промежутка выключателя.
2. Определить зависимость кратности перенапряжений от длины линии.

28.2. Пояснения к работе

Высоковольтные выключатели рассчитаны на отключения тока короткого замыкания порядка 40 – 45 кА. Емкостный ток ненагруженной линии составляет по отношению к этому току очень незначительную величину. Поэтому при отключении ненагруженной линии погасание дуги на контактах выключателя происходит при существенно меньших расстояниях между контактами, чем при отключении короткого замыкания. Погасание дуги на контактах выключателя происходит в момент перехода тока через нулевое значение, когда напряжение на линии имеет максимальное значение. После погасания дуги на линии остается неизменное напряжение, а с другой стороны выключателя, со стороны питания, напряжение продолжает изменяться по синусоидальному закону. В результате к промежутку между контактами выключателя оказывается приложенной разность этих напряжений, которая приводит к повторным пробоям промежутка. После пробоя межконтактного промежутка емкость линии перезаряжается в переходном процессе от напряжения на линии одной полярности до напряжения питающей сети, имеющего, в самом неблагоприятном

случае, противоположную полярность. В результате такого переходного процесса на линии возникают достаточно опасные перенапряжения.

28.3. Определение зависимости кратности перенапряжений от момента пробоя межконтактного промежутка выключателя

Определение зависимости кратности перенапряжений от момента пробоя межконтактного промежутка выключателя рекомендуется проводить при тех же параметрах расчетной схемы, как и в п. 27.3, при длине линии 100 км. Вызвать файл “otkl”. Окно с расчетной схемой для этого случая показано на рис. 28.1.

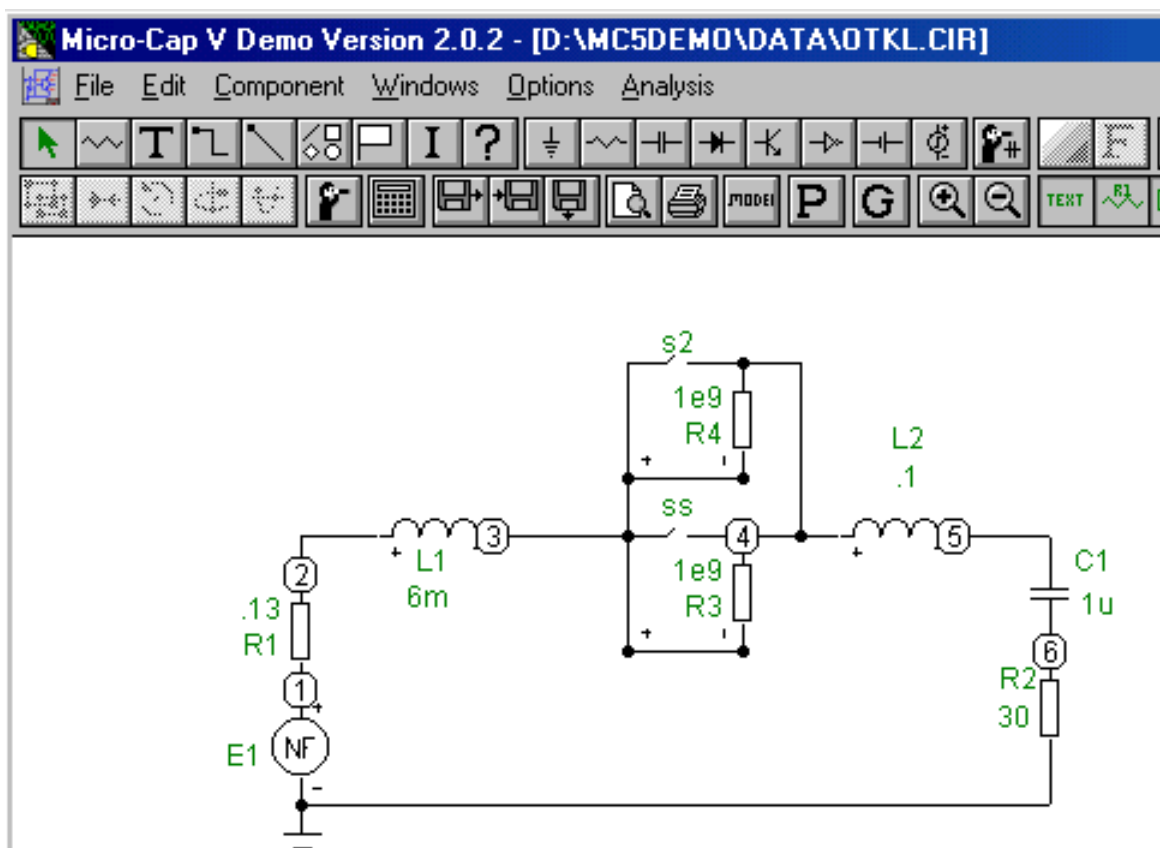


Рис. 28.1. Окно с расчетной схемой

Параметры выключателя *SS* нужно установить $t, 0,5m$ точно таким же способом, как описано в п. 27.3. Здесь t означает временной, 0 – момент включения и $5m$ – момент отключения в миллисекундах. Параметры выключателя *S2* необходимо сделать $t, 15m, 1$ и провести расчет. Как будет видно из полученных расчетных кривых, при этих временных значениях выключателей отключение тока произойдет в момент его перехода через нуль, а повторный пробой – в момент максимума напряжения противоположной полярности по отношению к напряжению на линии.

Для оформления отчета окно с результатами расчета нужно обработать так, как это сделано в п. 27.3 и вывести на печать.

Для определения зависимости кратности перенапряжений от момента пробоя межконтактного промежутка рекомендуется провести дополнительные расчеты для моментов включения выключателя S_2 , равных 8, 10 и 12 мс. Полученные результаты кратностей перенапряжений оформить в виде графических зависимостей.

28.4. Определение зависимости кратности перенапряжений от длины линии

Зависимость кратности перенапряжений от длины линии при ее отключении с повторными пробоями межконтактного промежутка выключателя определяется из расчетов, проведенных при разных длинах линии. Рекомендуется провести расчеты при увеличении и уменьшении в два раза длины линии по сравнению с исходной, равной 100 км. В отчете привести графическую зависимость кратности перенапряжений от длины линии.

28.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) расчет параметров;
- б) распечатку окна для момента повторного пробоя 5мс;
- в) график зависимости кратности перенапряжений от момента пробоя межконтактного промежутка выключателя;
- г) график зависимости кратности перенапряжений от длины линии;
- д) выводы по работе.

29. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ ХОЛОСТОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЕГО ОТКЛЮЧЕНИИ ВАКУУМНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

29.1. Программа работы

1. Определить кратность перенапряжений от величины тока среза.
2. Определить кратность перенапряжений от величины емкости, шунтирующей трансформатор.

29.2. Пояснения к работе

Электрическая дуга в вакуумных выключателях поддерживается благодаря выделению паров металла с поверхности электродов. При токах короткого замыкания количество этих паров достаточно для поддержания дуги, и поэтому процесс ее гашения практически не отличается от гашения, имеющего место в других видах выключателей. При отключении холостого трансформатора величина тока через выключатель составляет порядка 5 – 10 А. При таких значениях тока дуга между контактами выключателя

чатателя становится неустойчивой, и возникают возможности ее погасания еще до перехода тока через нуль. Такое отключение в литературе получило название среза тока. При срезе тока в индуктивности намагничивания трансформатора остается сосредоточенная энергия W_T :

$$W_T = \frac{L_2 I_0^2}{2},$$

где L_2 – индуктивность намагничивания, I_0 – величина тока среза.

Аналогично в собственных емкостях трансформатора, шин и другого оборудования, подключенного параллельно трансформатору,

$$W_C = \frac{C_2 U_0^2}{2},$$

где C_2 – собственные емкости трансформатора и оборудования на землю, U_0 – мгновенное значение напряжения на этих емкостях.

За счет энергии W_T происходит перезарядка емкости C_2 , в результате чего возникают опасные перенапряжения для изоляции трансформатора и оборудования, подключенного параллельно трансформатору.

29.3. Определить кратности перенапряжений от величины тока среза

Для определения зависимости перенапряжений от величины тока среза параметры схемы замещения со стороны питания могут быть такие же как и в схеме на рис. 28.1. Для исследования может быть использован силовой трансформатор ТРДН-30000/110, у которого $i_{xx} = 3\%$, $P_{xx} = 30$ кВт, $S = 30000$ кВА и номинальное рабочее напряжение $U = 110$ кВ. Индуктивность намагничивания

$$L_2 = \frac{U^2}{i_{xx} \omega S}.$$

Резистор, имитирующий потери в стали

$$R_6 = \frac{U^2}{P_{xx}}.$$

Емкость C_2 , равна сумме емкости самого трансформатора $C_{Tp} = 1700$ пФ, емкости трансформатора напряжения $C_T = 300$ пФ, емкости трансформатора тока $C_{ТТ} = 250$ пФ и емкости выключателя $C_{вык} = 250$ пФ. Для выполнения этого этой части программы следует открыть файл “otktr.cir”. Такое расчетное окно приведено на рис. 29.1. Последовательно включенное сопротивление $R5 = 100$ Ом используется для регистрации тока через трансформатор. Емкость $C1$ имитирует эквивалентную емкость на шинах подстанции, а сопротивление $R4$ – сопротивление земли. Перед проведением расчета необходимо в точках 3 и 4 установить начальные значения напряжений, равные 100 кВ. Для этого левой клавишей мыши нужно нажать на “Transient”, далее на “Transient Analysis” и далее в открывшемся окне – на “VID”. В открывшемся окне см. рис. 29.2 подвести курсор на

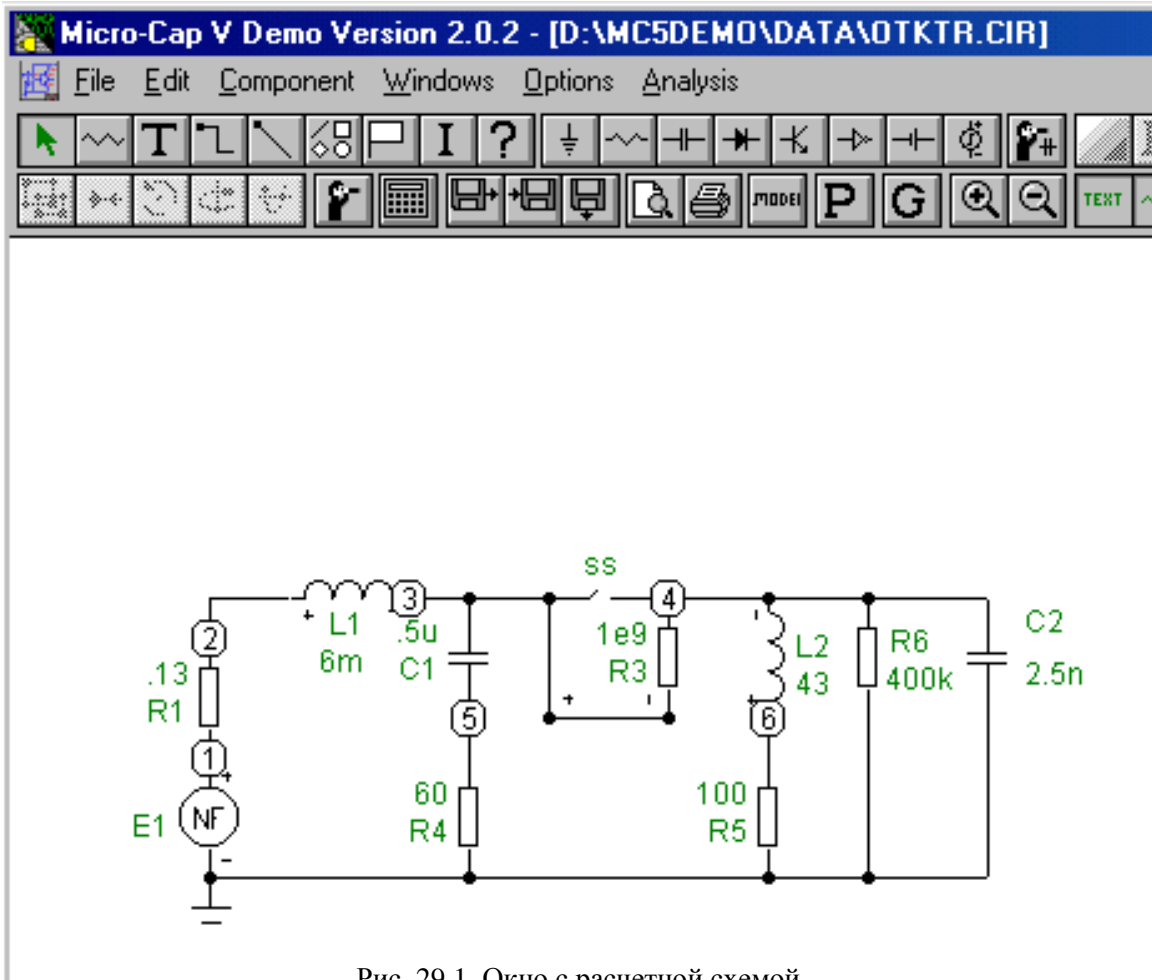


Рис. 29.1. Окно с расчетной схемой

The screenshot shows the State Variables Editor dialog box in Micro-Cap V Demo Version 2.0.2. The dialog has three sections: Node Voltages, Inductor Currents, and Node Levels. The Node Voltages section shows values for nodes 1 through 6. The Inductor Currents section shows values for L1 and L2. The Node Levels section is empty. The dialog includes buttons for Close, Clear, Read, Write, Print, .IC, and Help...

Node Voltages		Inductor Currents		Node Levels	
1	+0.00000e+000	L1	+0.00000e+000		
2	+0.00000e+000	L2	+0.00000e+000		
3	+1.00000e+005				
4	+1.00000e+005				
5	+0.00000e+000				
6	+0.00000e+000				

Рис. 29.2. Окно ввода начальных условий

нужную точку, нажать левую кнопку мыши, на клавиатуре набрать требуемое значение и левой клавишей мыши нажать на кнопку “Write”. Для того, чтобы узнать какие значения напряжений и токов там записаны следует нажать левой кнопкой мыши на кнопку “Read”. Уставки выключателя SS сделать $t,0,8m$ и запустить программу на расчет. В окне полученных результатов после нажатия левой клавишей мыши на четвертую кнопку первого ряда (см. рис. 27.3) следует подвести кончик курсора мыши на кривую тока в точку появления высокочастотных колебаний и нажать левую клавишу мыши. Под кривыми получим численные значения тока среза. Аналогично проделав такие действия с первой амплитудой напряжения, получим максимальные перенапряжения на трансформаторе. После этого окно следует распечатать для оформления отчета. Чтобы определить зависимость кратности перенапряжений от величины тока среза к этому расчету нужно добавить еще пять – шесть расчетов при изменении момента отключения выключателя SS в пределах от 5 до 10 мс.

29.4. Определение кратности перенапряжений от величины емкости, шунтирующей трансформатор

Определение кратности перенапряжений от величины емкости, шунтирующей трансформатор, производится путем проведения расчетов при различных значениях этой емкости. Рекомендуемые пределы – 2 – 20 нФ. Число расчетов – порядка пять-шесть.

29.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) расчет параметров схему и распечатку окна для момента отключения 8 мс;
- б) графическую зависимость кратности перенапряжений от величины тока среза;
- в) графическую зависимость кратности перенапряжений от величины емкости, шунтирующей трансформатор;
- г) выводы по работе.

30. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДНО-ЦИНКОВЫХ ВАРИСТОРОВ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

30.1. Программа работы

1. Измерить вольт-амперную характеристику варистора при напряжении промышленной частоты в диапазоне токов $10^{-5} - 10^{-3}$ А.
2. Определить зависимость мощности, выделившейся в варисторе, от приложенного напряжения при изменении тока в диапазоне $10^{-5} - 10^{-3}$ А.

30.2. Пояснения к работе

Ограничители перенапряжений являются основными аппаратами для защиты изоляции оборудования от атмосферных и коммутационных перенапряжений. Обычно они устанавливаются параллельно защищаемому оборудованию. Варисторы ОПН постоянно находятся под воздействием рабочего напряжения, и поэтому очень важно, чтобы сам ОПН оставался работоспособным при всех эксплуатационных режимах энергосистемы. Работоспособность ОПН при воздействии наибольшего рабочего напряжения сети определяется, в частности, мощностью, выделяющейся в варисторах. Основной характеристикой, определяющей защитные функции ограничителя перенапряжений, является вольт-амперная характеристика.

30.3. Измерение вольт-амперной характеристики варистора при напряжении промышленной частоты в диапазоне токов 10^{-5} - 10^{-3} А

Измерение вольт-амперной характеристики проводится на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 30.1. Все оборудование установки располагается в металлическом шкафу, содержащем три секции. Источником высокого напряжения переменного тока служит испытательный трансформатор $T2$, расположенный на секции третьего этажа. Питательное напряжение на него подается от сети с помощью автоматического выключателя SF , двух магнитных пускателей $KM1$ и $KM2$ и переключателя $S1$. Регулирование напряжения осуществляется автотрансформатором $T1$. Контроль напряжения, подаваемого на первичную сторону высоковольтного трансформатора, производится при помощи вольтметра V . Управление

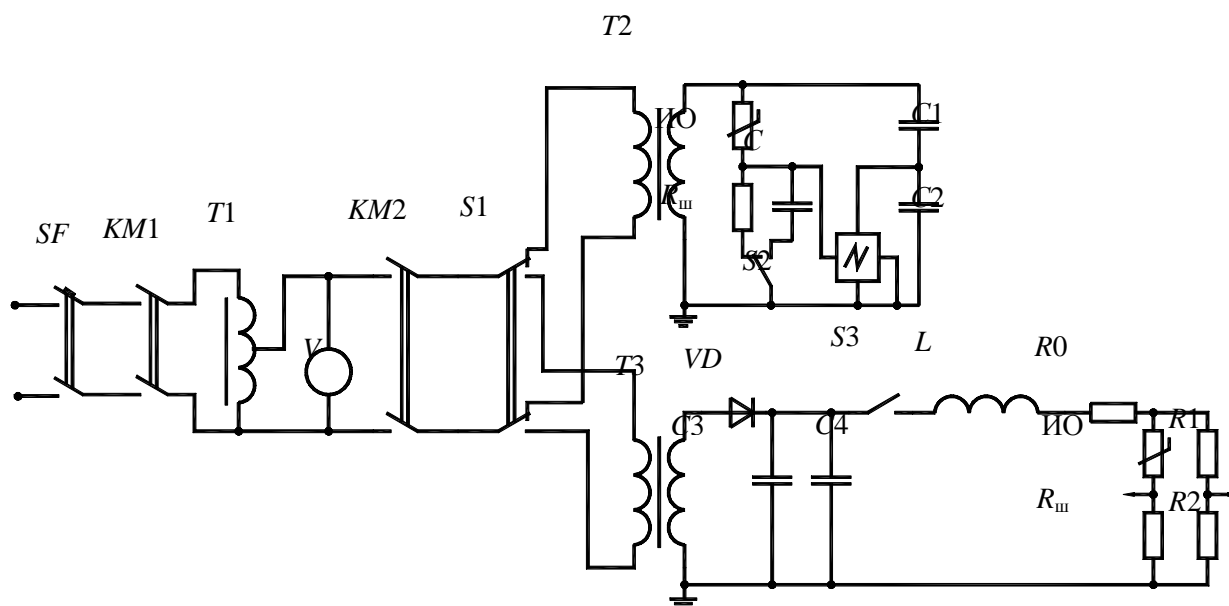


Рис.30.1. Принципиальная схема установки

ние пускателями осуществляется дистанционно при помощи кнопок, расположенных на передней панели шкафа установки.

Для измерения вольт-амперной характеристики варистора необходимо:

– исследуемый варистор поместить в зажим № 3, расположенный в секции третьего этажа шкафа установки;

– переключатель $S1$ на правой стенке шкафа установки перевести в положение “ U_{\sim} ”;

– переключатель $S2$, находящийся на правой стенке шкафа, установить в положение “ $R_{ш}$ ”;

– соединить измерительные кабели с электронным осциллографом С1-83. Кабель № 1 для измерения напряжения состыковать с входной клеммой первого канала осциллографа. Кабель № 2 для измерения тока подсоединить ко входу второго канала;

– снять заземляющую штангу с зажима № 3 и плотно закрыть дверь шкафа установки;

– включить при помощи кнопки первый магнитный пускатель, проверить по вольтметру V наличие напряжения. Если напряжение не равно нулю, то при помощи регулятора установить нулевое значение напряжения;

– включить при помощи кнопки второй магнитный пускатель. Установить чувствительность пластин осциллографа k_1 таким образом, чтобы напряжение, равное произведению сопротивления шунта $R_{ш}$ (его значение указано на правой стенке шкафа под переключателем $S2$) на минимальное значение измеряемого тока, дало отклонение луча первого канала осциллографа порядка 1 см. При помощи регулятора напряжения $T1$ поднять напряжение до получения небольшого отклонения луча.

Величина измеряемого тока определяется из соотношения

$$I_m = \frac{Y_1 k_1}{R_{ш}},$$

где Y_1 – отклонение первого луча, см, k_1 – чувствительность пластин осциллографа, определяемая по шкале на передней панели, В/см; $R_{ш}$ – сопротивление шунта. Величина измеряемого напряжения равна

$$U_m = Y_2 k_2 k_d,$$

где Y_2 – отклонение второго луча, см, k_2 – чувствительность пластин второго канала осциллографа, В/см, с учетом дополнительного делителя, расположенного у осциллографа; k_d – коэффициент деления напряжения (его значение указано на правой стенке шкафа под переключателем $S2$).

Для построения зависимости напряжения от тока через варистор необходимо провести 10 – 15 измерений тока при изменении приложенного напряжения, причем величина тока не должна выходить за пределы 10^{-5} – 10^{-3} А. Полученные значения тока и напряжения занести в таблицу для оформления отчета.

30.4. Определение зависимости мощности, выделившейся в варисторе, от приложенного напряжения

Для определения зависимости мощности, выделяющейся в варисторе необходимо:

- переключатель S_2 перевести в положение “С”;
- нажать кнопки “Х – Y”, находящиеся с левой и правой сторон от экрана осциллографа С1-83;
- определить масштабные коэффициенты по напряжению и заряду соответственно с соотношениями

$$m_u = k_2 k_d, \text{ В/см, и } m_q = C k_1, \text{ Кл/см,}$$

где C – интегрирующий конденсатор, величина емкости которого указана на правой стороне шкафа под переключателем S_2 ;

- в указанной в п.30.3 последовательности включить установку и поднять напряжение до значения, соответствующего минимальному значению тока, полученного в п.30.3;

– полученную на экране осциллографа вольт-кулоновую характеристику зарисовать на прозрачную бумагу.

Мощность, выделяющаяся в варисторе, определяется согласно соотношению

$$P = \frac{S m_u m_q}{T},$$

где S – площадь, ограниченная вольт-кулоновой характеристикой, см^2 , а T – длина периода приложенного напряжения, с.

Для построения зависимости мощности, выделяющейся в варисторе, от напряжения необходимо снять пять – десять вольт-кулоновых характеристик при изменении напряжения в пределах, полученных в п. 30.3 при измерении его вольт-амперной характеристики.

30.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) характерную осциллограмму для случая, когда активная составляющая тока начинает преобладать над емкостной составляющей;
- в) таблицу и графическую зависимость приложенного напряжения от тока, протекающего через варистор;
- г) таблицу и графическую зависимость мощности, выделяющейся в варисторе, от приложенного напряжения;
- д) выводы по работе.

31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОКСИДНО-ЦИНКОВЫХ ВАРИСТОРОВ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

31.1. Программа работы

Определить зависимость тока, протекающего через варистор, от приложенного импульсного напряжения.

31.2. Пояснения к работе

При воздействии рабочего напряжения сети через варисторы ОПН протекает длительный ток порядка долей миллиампера. Такой ток не является опасным для работоспособности самого защитного аппарата. В случае появления перенапряжений ток через варисторы, ввиду нелинейной вольт-амперной характеристики, резко увеличивается, что приводит к ограничению перенапряжений. Для того чтобы иметь возможность оценить степень защиты изоляции оборудования от перенапряжений, необходимо знать вольт-амперную характеристику варистора при импульсных воздействиях. В этой работе определяется зависимость тока через варистор от приложенного импульса напряжения грозового воздействия.

31.3. Определение зависимости тока, протекающего через варистор, от приложенного импульсного напряжения

Для определения зависимости тока, протекающего через варистор, от приложенного импульсного напряжения необходимо:

- исследуемый варистор поместить в зажим № 1, расположенный на втором этаже шкафа установки;
- переключатель $S1$, расположенный на правой стенке шкафа, установить в положение “ $U_{имп}$ ”;
- соединить измерительный кабель № 3 с цифровым амплитудным вольтметром, а кабель № 4 - с осциллографом типа С8-13;
- снять заземляющую штангу с зажима № 1 и закрыть плотно дверь шкафа установки;
- в указанной в п.30.3 последовательности включить установку и поднять напряжение, определяемое по стрелочному прибору “Зарядное напряжение батареи конденсаторов”, до величины порядка 2 кВ;
- кнопкой “Пуск” разрядить конденсаторную батарею установки.

По импульсу тока на экране осциллографа определить максимальное значение согласно соотношению

$$I_m = \frac{Y_1 k_1}{R_{ш}},$$

где Y_1 – отклонение луча, см, k_1 – чувствительность пластин осциллографа, определяемая по шкале на передней панели, В/см; $R_{ш}$ – сопро-

тивление шунта, величина которого указана на передней стенке шкафа установки.

Величину импульсного напряжения измеряется по цифровому вольтметру:

$$U_m = u_v k_d,$$

где u_v – показание цифрового вольтметра, k_d – коэффициент деления омического делителя напряжения, указанного на передней стенке шкафа.

Для построения зависимости напряжения от тока через варистор необходимо провести десять-пятнадцать измерений тока при изменении приложенного напряжения, причем величина тока не должна выходить за пределы от 10 А до 1 – 3 тысяч А в зависимости от типа варистора. Полученные значения тока и напряжения занести в таблицу для оформления отчета.

31.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) принципиальную схему установки;
- б) характерную осциллограмму;
- в) таблицу и графическую зависимость приложенного напряжения от тока, протекающего через варистор;
- г) выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоковольтные испытательные установки: Учеб. пособие / И.М. Богатенков, Э.И. Янчус; ЛПИ. Л., 1985. 70 с.
2. Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения: Учеб. пособие / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов; ЛПИ. Л., 1982. 56 с.
3. Гумель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
4. Измерение напряжений и токов в высоковольтных установках: Учеб. пособие / И.М. Богатенков, Э.И. Янчус; ЛПИ. Л., 1986. 62 с.
5. Коммутационные перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения: Учеб. пособие / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов; ЛПИ. Л., 1991. 100 с.
6. Техника высоких напряжений: Учеб. пособие / И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др.; Под ред. Г.С. Кучинского; СПбПЭИПК. СПб., 1998. 700 с.
7. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи: Учеб. пособие / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов; ЛПИ. Л., 1982. 79 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Разрядные напряжения воздушных промежутков при напряжении постоянного тока.....	3
2. Разрядные напряжения воздушных промежутков при напряжении переменного тока	7
3. Разряд в газе по поверхности твердого диэлектрика	9
4. Характеристики коронного разряда на проводах при напряжении постоянного тока	14
5. Характеристики коронного разряда на проводах при напряжении переменного тока....	17
6. Распределение напряжения по гирлянде изоляторов и разрядные напряжения	19
7. Разрядные напряжения воздушных промежутков при импульсных воздействиях грозового происхождения	22
8. Влияние параметров ГИН на форму генерируемого импульса.....	27
9. Генератор коммутационных импульсов напряжения	33
10. Экспериментальное определение параметров генератора импульсных напряжений....	42
11. Измерение напряжения промышленной частоты	47
12. Омический делитель напряжения	51
13. Экспериментальное определение параметров импульсной измерительной системы ...	52
14. Цепь “делитель напряжения – осциллограф”	58
15. Методы измерения больших импульсных токов	62
16. Измерение импульсных токов	68
17. Определение импульсных разрядных напряжений высоковольтных изоляторов	71
18. Вольт-секундные характеристики изоляторов.....	73
19. Испытание изоляторов грозowymi импульсами напряжения	75
20. Измерение электрической прочности бумажной изоляции.....	78
21. Зависимость разрядного напряжения промежутков с однородным полем от плотности газа	81
22. Защита от прямых ударов молнии.....	87
23. Перенапряжения в обмотках трансформатора.....	90
24. Волновые процессы в кабелях	93
25. Грозозащита подстанций от набегающих по линии волн.....	97
26. Дуговые перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью.....	101
27. Перенапряжения при включении ненагруженной линии электропередачи.....	106
28. Перенапряжения при отключении ненагруженной линии с повторными пробоями межконтактного промежутка выключателя	112
29. Перенапряжения на зажимах холостого трансформатора при его отключении вакуумным выключателем	114
30. Характеристики оксидно-цинковых варисторов при напряжении промышленной частоты	117
31. Определение характеристики оксидно - цинковых варисторов при импульсных воздействиях	121
Список литературы	122

БОГАТЕНКОВ Игорь Михайлович
БОЧАРОВ Юрий Николаевич
ГУМЕРОВА Нателла Идрисовна
ТИТКОВ Василий Васильевич
ХАЛИЛОВ Фирудин Халилович
ЯНЧУС Эдуард Иванович

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Лабораторный практикум

Редактор *О.В. Махрова*
Технический редактор *А.И. Колодяжная*
Оригинал-макет подготовлен авторами
Директор Издательства СПбГТУ *А.В. Иванов*

Свод. темплан 2012 г.
Лицензия ЛР N 020593 от 07.08.97

Подписано в печать Формат 60×84/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 200. Заказ С130

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство СПбГПУ,
член Издательско-полиграфической ассоциации вузов Санкт-Петербурга.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29