

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические станции»

ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАШИН И АППАРАТОВ.  
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.

Учебно-методическое пособие по дисциплинам  
«Техника высоких напряжений», «Изоляция и перенапря-  
жения», «Основы диагностики изоляции»  
для студентов специальностей  
1-43.01.01 «Электрические станции»,  
1-43.01.02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43.01.03 «Электроснабжение»

Минск 2003

УДК 621.3.027.4

Степанчук К.Ф. Испытания электрической прочности высоковольтной изоляции машин и аппаратов. Испытательные установки: Учебно-метод. пособие для студентов специальностей 1-43.01.01 «Электрические станции», 1-43.01.02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43.01.03 «Электроснабжение» - Мн.: БНТУ, 2003. - 48с.

Данное методическое пособие представляет собой курс лекций, в котором рассматриваются вопросы испытаний электрической изоляции высоковольтного оборудования. Уделено внимание условиям проведения испытаний и оценке результатов. Рассмотрены основные высоковольтные испытательные установки переменного и постоянного тока, а также импульсные испытательные установки. Курс лекций предназначен для специальностей, связанных с эксплуатацией электрооборудования.

Рецензент Сергей И.И.

Учебное издание

СТЕПАНЧУК Климентий Филиппович

**ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ  
ИЗОЛЯЦИИ МАШИН И АППАРАТОВ. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ  
УСТАНОВКИ.**

Учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-43.01.01 «Электрические станции», 1-43.01.02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43.01.03 «Электроснабжение».

# 1. ЗАДАЧИ И СПОСОБЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗОЛЯЦИИ МАШИН И АППАРАТОВ.

## 1.1. Необходимость высоковольтных испытаний машин и аппаратов и экономическое обоснование испытаний

В процессе эксплуатации высоковольтная изоляция подвергается воздействию различного рода напряжений.

Во-первых, это рабочие, длительно действующие напряжения. Величина их близка к номинальному напряжению или может на 10-15% его превышать. При конструировании, испытаниях и эксплуатации линий электропередач, электрооборудования подстанций, машин и аппаратов необходимо обеспечить надежную, безаварийную работу изоляции при непрерывном воздействии **рабочего напряжения** в течении всего принятого срока эксплуатации.

Во-вторых, на изоляцию воздействуют **внутренние перенапряжения**, которые возникают при включениях и отключениях линий и электрооборудования, аварийных и несимметричных режимах работы, резонансных явлениях. Эти перенапряжения воздействуют на изоляцию, как правило, сравнительно кратковременно (от тысячных долей секунды до десятков секунд и более), но их величина  $U_{вн}$  может превышать рабочие напряжения в несколько раз.

По длительности воздействия внутренние перенапряжения можно условно разделить на две группы: **длительные** или квазистационарные (перенапряжения емкостного эффекта в длинных ненагруженных линиях 330 кВ и выше, феррорезонансные перенапряжения, связанные с неполнофазными и несимметричными режимами электроустановок, перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью) и **коммутационные перенапряжения**, которые воздействуют на изоляцию при включениях и отключениях электрооборудования и в циклах АПВ.

Хотя опасность воздействия на изоляцию внутренних перенапряжений зависит не только от величины, но также от их формы, длительности и повторяемости, основной характеристикой внутреннего перенапряжения  $U_{вн \max}$  является его краткость по отношению к амплитудному значению номинального фазового напряжения  $U_{фm}$ .

Наиболее вероятны воздействия на изоляцию коммутационных перенапряжений. Эти перенапряжения носят чаще всего характер периодического затухающего импульса (рис. 1.1, а) с частотой, превышающей промышленную. Заканчивается переходный процесс установившимся или квазиустановившимся режимом, при этом вынужденная составляющая установившегося режима  $U_{уст}$  может быть повышенной по отношению к рабочему напряжению.

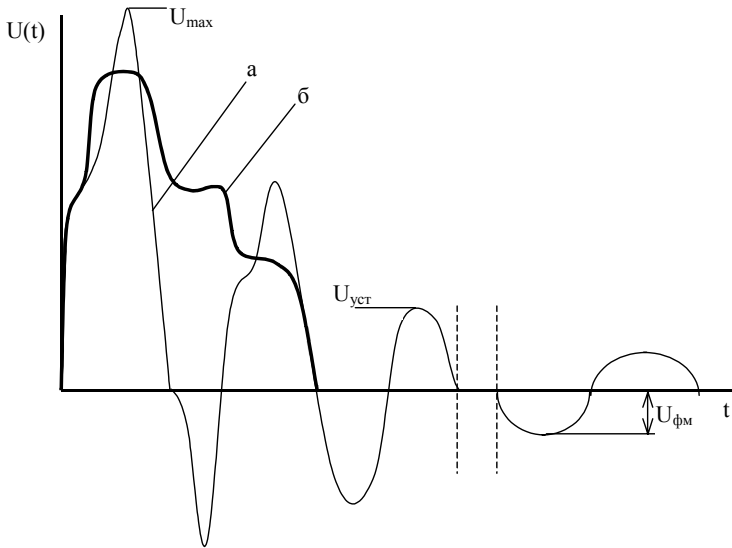


Рис. 1.1. Изменение напряжения в системе при коммутационных перенапряжениях.

Таким образом:

$$K_{вн} = \frac{U_{вн\ max}}{U_{уст}} \cdot \frac{U_{уст}}{U_{фм}} = K_{уд} \cdot K_{уст}, \quad (1.1)$$

где  $K_{уст}$  – кратность установившегося перенапряжения;  $K_{уд}$  – ударный коэффициент.

Краткость внутренних перенапряжений не должна превышать определенных величин, зависящих от номинального напряжения системы, вида и длительности перенапряжений. Допустимые кратности находятся на основании технико–экономических расчетов с учетом установленного при высоковольтных испытаниях уровня изоляции оборудования и мер по ограничению перенапряжений. В табл. 1.1 приведены допустимые кратности коммутационных перенапряжений  $K_{доп}$  и допустимое возможное повышение рабочего напряжения  $U_{работax}$  по отношению к номинальному  $U_n$ .

Иногда характер внутренних перенапряжений выражается в виде аperiодического импульса (рис. 1.1, б) с наложением колебаний повышенной частоты и определенным декрементом затухания.

Таблица 1.1

Допустимые кратности коммутационных перенапряжений

Параметры	Режим нейтрали							
	изолированная			заземленная				
$U_n, кВ$	3-10	15-20	35	110-220	330	500	750	1150
$U_{работax} / U_n$	1,2	1,2	1,15	1,15	1,1	1,0 5	1,05	1,05
$K_{доп} (РВ)$	4,5	4,0	3,5	3,0	2,7	2,5	2,1	1,8
$K_{доп} (ОПН)$	4,5	4,0	3,5	2,4	2,4	2,1	1,75	1,6

До напряжения 220 кВ кратности коммутационных перенапряжений в электроустановках не превышают указанных в табл. 1.1 величин, и специальных мер по ограничению коммутационных перенапряжений в этих установках практически не требуется.

При напряжениях 330 кВ и выше кратность коммутационных перенапряжений ограничивается до приведенных в табл. 1.1 величин с помощью специальных разрядников (РВ), ограничителей перенапряжений (ОПН) и схемных решений. Ограничение длительных перенапряжений возможно, в основном, с помощью схемных и режимных мер.

Третьим видом напряжений, воздействующих на изоляцию, являются **грозовые** или **атмосферные перенапряжения**. Эти перена-

пряжения возникают при ударах молнии в электроустановку или вблизи нее. Волны перенапряжений, возникающие в токоведущих частях при ударах молнии, распространяются со скоростями, сравнимыми со скоростью света, проникая в обмотки трансформаторов, машин, воздействуя на изоляцию линий и аппаратов. Время воздействия атмосферных перенапряжений очень мало (от единицы до сотен миллионных долей секунды), однако величины этих перенапряжений при отсутствии специальных мер защиты могут достигать миллионов вольт.

Такие высокие напряжения не может выдержать изоляционная конструкция практически любого номинального напряжения. Поэтому необходимо ограничивать величины атмосферных перенапряжений до приемлемых значений.

Основным аппаратом грозозащиты являются разрядники и ОПН. Разрядник (ОПН) устанавливается параллельно изоляции и ограничивает напряжения до величины более низкой, чем напряжение, при котором пробивается изоляция. Волна перенапряжения, попадающая на изоляцию, оказывается сниженной до допустимого уровня. Изоляция электрических устройств должна выдерживать неоднократные воздействия волн атмосферных перенапряжений, которые, несмотря на все защитные мероприятия, могут значительно превышать номинальные напряжения.

Таким образом, для обеспечения безаварийной работы изоляция электрических установок должна выдерживать все виды напряжений, которые могут на нее воздействовать, т.е. иметь определенный **уровень**. Уровень изоляции практически устанавливается с помощью испытательных выдерживаемых или разрядных напряжений. Так как уровень изоляции в значительной мере определяет габариты и стоимость электрооборудования, то его по возможности стремятся снизить.

До напряжения 220 кВ включительно уровень изоляции определяется в основном атмосферными перенапряжениями, так как оказывается, что если изоляция выдерживает импульсные атмосферные перенапряжения, она, как правило, выдерживает и коммутационные перенапряжения, возможные в установках этих классов напряжений. Отсюда следует необходимость дальнейшего совершенствования грозозащиты и важность импульсных характеристик и испытаний для изоляции электрических установок до 220 кВ. Совершенств-

ование мер грозозащиты привело к тому, что при напряжении 220 кВ и выше определяющую роль в выборе уровня изоляции стали играть внутренние перенапряжения, что потребовало специальных мер по ограничению внутренних перенапряжений. Для того чтобы габариты и стоимость оборудования на напряжение 750 кВ и выше были приемлемыми, следует ограничивать внутренние перенапряжения до (2,2 – 1,8) и ниже.

Уровень изоляции необходимо согласовывать с воздействующими на изоляцию напряжениями, защитными мерами и целесообразными запасами, обеспечивающими необходимую надежность. Такое согласование называется **координацией изоляции**. В понятие координации изоляции входит также принятие более высоких уровней изоляции (больших запасов) для дорогостоящего и трудно восстанавливаемого оборудования или оборудования, выход из строя которого может привести к тяжелой аварии и большим материальным потерям. Таким образом, задача координации изоляции является многомерной, и оптимальное ее решение находится в результате технико-экономического расчета, обеспечивающего наибольший народнохозяйственный эффект, т.е. минимум «приведенных затрат», при этом должны быть также учтены ограничения по технике безопасности, защите окружающей среды, габаритам и т.д.

Для определения соответствия изоляции вновь изготовленного оборудования принятому уровню она подвергается испытаниям. В комплекс заводских испытаний включаются испытания импульсным напряжением и повышенным напряжением промышленной частоты, а при напряжениях 330 кВ и выше – коммутационными импульсами. Величины испытательных напряжений и методы испытаний нормированы ГОСТами.

В процессе эксплуатации под воздействием повышенных температур, механических нагрузок электрического поля и окружающей среды электрические характеристики изоляции постепенно ухудшаются. Это ухудшение электрических свойств связано с химическим перерождением (старением) изоляции, появлением в ней местных дефектов, увлажнением, загрязнением и т. п. Изоляция при этом может ухудшиться настолько, что уровень ее станет ниже возможных перенапряжений, и она будет повреждена. Пробой изоляции в процессе работы электрической установки часто приводит к очень серьезной аварии, поэтому надо знать ее состояние и при

опасном ухудшении электрических свойств восстановить или заменить ее во время ремонта.

Для определения состояния изоляции эксплуатируемого оборудования проводятся профилактические испытания. Правильное, квалифицированное заключение о состоянии изоляции можно дать после проведения комплекса испытаний и анализа их результатов. Это требует хорошего понимания физических основ и методов профилактических испытаний изоляции.

Высоковольтные испытания и исследования невозможны без специального оборудования. Конструкции этого оборудования, режимы его работы, способы измерений при высоких и сверхвысоких напряжениях составляют особый раздел высоковольтной техники, и будут рассмотрены в разделе 2 данного методического пособия, издание которого предполагается в 2005г.

## **1.2. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции электрооборудования и электроустановок на напряжение 3 кВ и выше**

Испытания изоляции повышенным напряжением, как заводские, так и профилактические являются основными испытаниями определяющими и гарантирующими необходимый уровень электрической прочности электрооборудования и электроустановок.

Общие условия испытаний: расположение объекта испытаний на испытательном поле, требования к объекту испытаний; возможные отклонения и погрешности по отношению к нормированным значениям; статистическая оценка результатов испытаний; критерии отбраковки оборудования, не выдержавшего испытания строго нормированы ГОСТ 1516-97.1.2; ГОСТ 1516-96.3 и другими соответствующими стандартами и нормативными материалами. Учитывая различную зависимость электрической прочности изоляции от атмосферных условий, а также влияние других факторов и особенностей, испытательные напряжения нормируются отдельно для внешней и для внутренней изоляции.

Внешняя изоляция испытывается трехкратным приложением напряжения промышленной частоты при плавном подъеме без после-



дующей выдержки времени. В зависимости от условий работы отдельные изоляторы и внешняя изоляция РУ испытываются в сухом состоянии или под дождем. Предусматриваются испытания внешней изоляции полными и срезанными грозowymi импульсами и коммутационными (для напряжения 330 кВ и выше) импульсами.

Испытания электрической прочности внешней изоляции в условиях загрязнения проводятся при воздействии на изолятор загрязнений (соленого тумана) или перед испытанием изолятор заранее загрязняется.

Внутренняя изоляция в зависимости от вида и условий работы испытывается переменным, импульсным или постоянным напряжением. Испытания переменным напряжением (50 Гц) проводятся методом одноминутного напряжения - однократным приложением к изоляции нормированного испытательного напряжения в течение 1 мин., если основная изоляция керамическая, жидкая или бумажно-масляная, и 5 мин., если изоляция состоит из твердых органических материалов или кабельных масс. Большие выдержки под напряжением не соответствуют реальным условиям при перенапряжениях и могут привести к опасному для изоляции развитию частичных разрядов (ЧР). Изоляция считается выдержавшей испытания, если не наблюдалось полного разряда или недопустимых повреждений: не было слышно разряда в баке, не выделялся дым, приборы не указывали на возникновение опасных ЧР.

Импульсные испытания внутренней изоляции проводятся по трехударному методу, т.е. трижды к испытываемому объекту прикладывается полный грозовой импульс и затем еще три раза - срезанный.

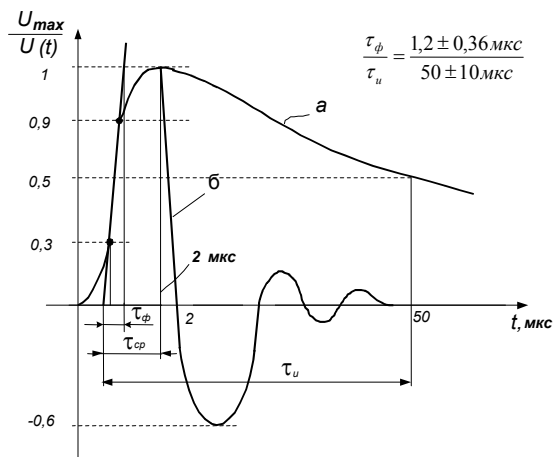


Рис. 1.2.

а - полный грозовой импульс  $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,36 \text{ мкс}$ ,  $\tau_u = 50 \pm 10 \text{ мкс}$ ;  
 б - грозовой импульс, срезанный на фронте,  $\tau_{cp} = 2 \text{ мкс}$

ГОСТом предусмотрены также заводские испытания внутренней изоляции 330, 500 и 750 кВ коммутационными импульсами. Для силовых трансформаторов 220 кВ и выше нормированы испытания длительным напряжением промышленной частоты. При этом должно проводиться измерение интенсивности ЧР. При типовых испытаниях в случаях, когда возможен тепловой пробой, например при основной волокнистой органической изоляции, ГОСТ предусматривает испытания на стойкость изоляции в отношении теплового пробоа.

Оборудование, предназначенное для работы в установках, которые вообще не подвергаются воздействию грозowych перенапряжений (например, подстанции, связанные только с кабельными сетями), может быть выполнено с облегченной изоляцией. Такое оборудование испытывается только напряжением промышленной частоты.

Для электрооборудования 3-220 кВ расчетная величина испытательного полного грозового импульса  $U_{расч}$  определяется по формуле  $U_{расч} = 1,1U_{ост} + 15 \text{ кВ}$ , где  $U_{ост}$  - остающееся напряжение на раз-

ряднике при максимально допустимом импульсном токе  $I_{p\ max}=5$  кА.

При напряжении 330 кВ и выше  $U_{расч} = 1,1U_{ост}$  для трансформаторов и  $U_{расч} = 1,2U_{ост}$  для аппаратов ( $I_{p\ max} = 10$  кА). Для внешней изоляции с учетом возможного влияния атмосферных условий испытательное напряжение несколько повышается по отношению к расчетному:  $U_{исп} = U_{расч}/0,84$ . Для внутренней изоляции учитывается кумулятивный эффект, т.е. накопление частичных повреждений при многократных импульсных воздействиях:  $U_{исп} = 1,1U_{расч}$ . При испытании невозбужденных трансформаторов импульсные испытательные напряжения повышаются на  $0,5U_n$ . При срезанных грозовых импульсах испытательные напряжения увеличиваются на 15-25 % по отношению к напряжению полного импульса для внешней изоляции и на 10-20 % для внутренней.

Координация внутренней изоляции оборудования подстанций при коммутационных перенапряжениях заключается в определении одномоментных испытательных напряжений промышленной частоты. В расчетные кратности коммутационных перенапряжений при определении величин одномоментных испытательных напряжений вносят поправки на несоответствие методики и условий испытаний форме и длительности перенапряжений, а также условиям в эксплуатации. Учитываются также возможность кумулятивного эффекта и статистические закономерности воздействующих перенапряжений и электрической прочности изоляции:

$$U_{исп.1мин} = \frac{k_{вн} U_{р.макс}}{k_u k_k}, \quad (1.2)$$

где  $k_{вн}$  - расчетная кратность коммутационных перенапряжений;  
 $k_u \approx 1,3 - 1,35$  - коэффициент импульса для типичных конструкций внутренней изоляции;  
 $k_k \approx 0,85-0,95$  - коэффициент кумулятивности.

Тщательная координация изоляции по внутренним перенапряжениям особенно важна для оборудования 330 кВ и выше. Значительное несоответствие режима одномоментных испытаний формы и длительности воздействия при коммутационных перенапря-

жениях привело к введению специальных испытаний коммутационными импульсами для внутренней изоляции электрооборудования 330 и 500 кВ. Величина  $U_{исп}$  при этом определяется по выражению 1.2, но без учета  $k_u$ .

В связи с совершенствованием средств грозозащиты, внедрением ОПН и ограничением кратности атмосферных и внутренних перенапряжений при напряжениях 220 кВ и выше уровень изоляции может определяться не только перенапряжениями, но и длительно действующими максимальными рабочими напряжениями. Поэтому для такой изоляции предусматриваются испытания и при длительном действии напряжения с регистрацией характеристик ЧР. При этом интенсивность ЧР не должна превысить определенный уровень.

Найденные по описанным методам величины испытательных напряжений для внешней и внутренней изоляции нормированы ГОСТ 1516.3-96 и частично приведены ниже (табл. 1.2)

Таблица 1.2.

**1.3. НОРМИРОВАННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ**  
**Нормированные испытательные напряжения электрооборудования классов напряжения**  
**от 3 до 35 кВ с нормальной изоляцией (ГОСТ 1516.3-96)**

Класс напряжения	Уровень изоляции <sup>1)</sup>	Испытательное напряжение внутренней и внешней изоляции, кВ							
		грозового импульса			кратковременное (одноминутное) переменное				
		полного		срезанного	в сухом состоянии			под дождем	
		Электрооборудование относительно земли и между фазами (полюсами) <sup>2)</sup> , между контактами выключателей и КРУ с одним разрывом на полюс	Между контактами разъединителей, предохранителей и КРУ с двумя разрывами на полюс	Трансформаторы силовые и напряжения, шунтирующие реакторы относительно земли и между фазами <sup>2)</sup>	Электрооборудование относительно земли (кроме силовых трансформаторов, масляных реакторов) и между полюсами <sup>2)</sup> , между контактами выключателей и КРУ с одним разрывом на полюс	Силовые трансформаторы, шунтирующие и дугогасящие реакторы относительно земли и других обмоток	Между контактами разъединителей предохранителей и КРУ с двумя разрывами на полюс	Электрооборудование относительно земли и между полюсами <sup>2)</sup> , между контактами выключателей	Между контактами предохранителей
1		3	4	5	6	7	8	9	10
3	а	40	46	50	10	10	12	10	12
	б				24	18	28		
6	а	60	70	70	20/28 <sup>4)</sup>	20	23	20	23
	б				32	25	37		

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	a	75	85	90	28/38 <sup>4)</sup>	28	32	28	38
	б				42	35	48		
15	a	95	110	115	38/50 <sup>4)</sup>	38	45	38	45
	б				55	45	63		
20	a	125	145	150	50	50	60	50	60
	б				65	55	75		
24	a	150	165	175	60	60	70	60	70
	б				75	65	90		
27	a	170	190	200	65	65	85	65	75
	б				80	70	95		
35	a	190	220	220	80	80	95	80	95

<sup>1)</sup> Уровень изоляции: а – для электрооборудования с бумажно-масляной, литой изоляцией, разработанного с требованием проверки изоляции на отсутствие частичных разрядов для остального электрооборудования - устанавливается соглашению между изготовителем и потребителем, уровень изоляции б – для электрооборудования, разработанного без требования проверки изоляции на отсутствие частичных разрядов.

<sup>2)</sup> Для электрооборудования трехфазного (трех полюсного) исполнения.

<sup>3)</sup> Для электрооборудования категории размещения 1 (кроме силовых трансформаторов и реакторов).

<sup>4)</sup> В знаменателе указаны значения для опорных изоляторов категорий размещения 2,3 и 4; в числителе – для остального электрооборудования.

Таблица 1.3.

**Нормированные испытательные напряжения электрооборудования классов напряжения  
от 110 до 220 кВ (ГОСТ 1516.3-96)**

Испытательное напряжение внутренней и внешней изоляции, кВ																										
грозового импульса										кратковременное (одноминутное) переменное																
полного										срезанного																
в сухом состоянии и под дождем <sup>1)</sup>																										
Класс напряжения	Силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы		Трансформаторы напряжения, конденсаторы связи, токоограничивающие реакторы		Трансформаторы тока, аппараты <sup>2)</sup>		Изоляторы		Выключатели с повышенным уровнем изоляции		Выключатели без повышенного уровня изоляции		Разъединители, предохранители		Силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы		Электромагнитные трансформаторы напряжения		Силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы		Трансформаторы напряжения и тока, конденсаторы связи, токоограничивающие реакторы, аппараты относительно земли <sup>2)</sup> , между контактами выключателей		Изоляторы относительно земли		Между контактами разъединителей и предохранителей	
	относительно земли и между фазами (полюсами)										между контактами					относительно земли и между фазами										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15											
110	480	450		450/550 <sup>3)</sup>	520	450	570	550		200		200/230 <sup>4)</sup>		200/230 <sup>3)</sup>	230											
150	550	650			750	650	790	600	750	230	275	275/300 <sup>4)</sup>		275	315											
220	750	950	900	950	1050	900	1100	835	1100	325	395	395/440 <sup>4)</sup>		395	460											

<sup>1)</sup> Под дождем – для электрооборудования категории размещения 1 (кроме силовых трансформаторов, реакторов и изоляции между контактами разъединителей).

<sup>2)</sup> Для аппаратов трехполюсного исполнения – также и между полюсами.

<sup>3)</sup> В знаменателе указаны значения для вводов, в числителе – для других изоляторов.

<sup>4)</sup> В знаменателе указаны значения для испытания в сухом состоянии аппаратов с немажляной изоляцией без проверки качества выполнения на отсутствие частичных разрядов или другими дополнительными методами, в числителе – для остального электрооборудования, а также для испытания под дождем.

Таблица 1.4..

Класс напряжения	Уровень изоляции <sup>1)</sup>	Испытательное напряжение внутренней и внешней изоляции, кВ																		
		грозового импульса							коммутационного импульса в сухом состоянии и под дождем <sup>2)</sup>				Кратковременное (одноминутное ) переменное							
		Полного			срезанного				Силовые трансформаторы				Силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы		Электромагнитные трансформаторы напряжения		Емкостные трансформаторы напряжения, трансформаторы тока, изоляторы, конденсаторы связи, аппараты относительно земли		Между контактами выключателей	
		Силовые трансформаторы	Шунтирующие реакторы, электромагнитные трансформаторы	Емкостные трансформаторы напряжения, трансформаторы тока,	Между контактами	Силовые трансформаторы	Шунтирующие реакторы, электромагнитные трансформаторы	Электрооборудование относительно земли					Между фазами силовых трансформаторов (внутренняя изоляция)	Между контактами выключателей и разъединителей						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
330	а	950	1050		1255		1050	1175	850	1275	950	395	525	460	460		575			
	б	1050	1175		1380	1450	1150	1300	950	1425	1245	460	575		510/560 <sup>5)</sup>		750			
500	а	1300	1425		1425	1725	1400	1550	1050	1575	1330	570	800	630	630		815			
	б	1550	1675	1550	1550	2050	1650	1800	1230	1845	1660	630	830		680/760 <sup>5)</sup>		1030			
750	а	1800	1950		1950	2250	1950	2100	1425	2400	2000/1675 <sup>4)</sup>		750	1100	-	830		1250/950		
	б	2100	2250	2100	2100	2400	2250	2400	1550/1675 <sup>3)</sup>		2550	2250/1800 <sup>4)</sup>		800/900 <sup>3)</sup>		1250	950		1400/1100	

<sup>1)</sup> Уровень изоляции а – при применении для защиты ограничителей перенапряжения (ОПН); уровень изоляции б – при применении для защиты вентильных разрядников.

<sup>2)</sup> Под дождем – для электрооборудования категории размещения 1 (кроме силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов и изоляции между контактами разъединителей).

<sup>3)</sup> В знаменателе указаны значения для шунтирующих реакторов, в числителе – для остального электрооборудования.

<sup>4)</sup> В числителе указаны значения для выключателей, в знаменателе – для разъединителей.

<sup>5)</sup> В знаменателе указаны значения для аппаратов с немасляной изоляцией без проверки качества выполнения изоляции на отсутствие частичных разрядов или другими дополнительными методами, в числителе – для остального электрооборудования.



## **2. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

### **2.1. Общие сведения**

Установки высокого напряжения предназначены для проведения испытаний различных высоковольтных устройств при их изготовлении и в процессе эксплуатации и для решения и разработки различных теоретических вопросов в области высоковольтной техники. В заводских лабораториях ТВН проводятся испытания выпускаемой продукции, а также выполняются исследования, связанные с данным производством. Лаборатории ТВН энергетических систем предназначены для проведения профилактических и приемных испытаний изоляции оборудования и ЛЭП, для наблюдения за состоянием устройств защиты от перенапряжений, их испытаний и диагностики. В лабораториях научно-исследовательских институтов проводятся фундаментальные исследования и технические разработки крупных проблем в области ТВН. Лаборатории ТВН учебных заведений предназначены для учебных целей и выполнения различных научно-исследовательских работ. Оборудование высоковольтных лабораторий состоит из установок для генерирования переменного, постоянного и импульсного напряжений и токов, измерительных приборов и устройств, а также вспомогательного оборудования (дождевальные установки, подъемно-транспортные механизмы и т.д.). Выбор оборудования лабораторий определяется в основном уровнем испытательных напряжений и техническими характеристиками объектов испытания в соответствии с требованиями ГОСТ, ведомственных норм и рекомендаций Международной электротехнической комиссии (МЭК).

### **2.2. Испытательные установки переменного тока**

**Высоковольтный испытательный трансформатор** является основным элементом оборудования лаборатории ТВН и входит в состав испытательных установок переменного, постоянного и им-

пульсного напряжений. Испытательные трансформаторы, как правило, изготавливаются однофазными. Обмотки высокого напряжения выполняются преимущественно слоевыми, изоляция между слоями - из кабельной бумаги и цилиндров из изолирующего материала. Такие обмотки подвергаются меньшей, чем обмотки других типов опасности повреждения под влиянием перенапряжений, возникающих в момент разряда.

Испытательные трансформаторы в отличие от силовых работают обычно непродолжительное время, в течение которого напряжение трансформатора повышается до разряда на объекте, после чего трансформатор отключается. Для защиты обмотки трансформатора от токов при разряде и ограничения перенапряжений последовательно с обмоткой включают внешний защитный резистор  $R$ , сопротивление которого принимают порядка 1 Ом на 1В номинального напряжения трансформатора. Запас электрической прочности изоляции испытательных трансформаторов невелик и обычно не превышает 20-30 %.

Мощность испытательных трансформаторов определяется током, потребляемым испытуемым объектом при наиболее неблагоприятных условиях испытания (например, под дождем). Опыт лабораторий показывает, что при испытаниях объектов с небольшой емкостью (примерно до 1000 пФ) высоковольтная обмотка трансформаторов на номинальные напряжения до 100-150 кВ должна быть рассчитана на ток 0,2-0,3 А, для трансформаторов на 500 кВ - на 0,5 А и для трансформаторов на более высокие напряжения - на ток 1А и более. В специальных случаях, например для испытания кабелей большой длины, необходимая мощность трансформатора определяется по формуле

$$S=U^2\omega C \quad (2.1)$$

где  $U$  - испытательное напряжение, кВ;  $C$  - емкость испытуемого объекта, мкФ;  $S$  - мощность трансформатора, В·А.

Испытательные трансформаторы выполняются с одним или двумя выводами. В схеме с одним выводом высокого напряжения ВН (рис. 2.1,а) второй конец обмотки соединяется с сердечником и баком трансформатора непосредственно или через измерительный прибор (амперметр, шунт). Эта схема позволяет производить испы-

тания объектов оборудования в условиях, близких к эксплуатационным, т.е. с одним заземленным полюсом, но при этой схеме необходима изоляция одного из выводов обмотки на полное напряжение, что приводит к увеличению габаритов трансформатора. По такой схеме изготавливают обычно трансформаторы на напряжения до 500кВ.

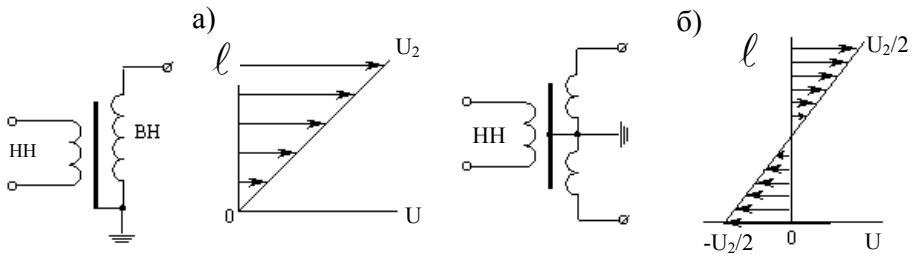


Рис. 2.1. Испытательные трансформаторы и распределения напряжений

В схеме с двумя выводами (рис. 2.1, б) с сердечником и баком трансформатора соединяется средняя точка обмотки. Из кривой распределения напряжения видно, что в этом случае изоляция выводов должна быть рассчитана на половинное напряжение, что является достоинством схемы. В этой схеме один вывод ВН также может быть заземлен. Так как при этом сердечник и бак трансформатора приобретают потенциал  $0,5U_2$  по отношению к земле и обмотке низшего напряжения НН, то обмотка НН должна быть изолирована на указанное напряжение от корпуса, а сам трансформатор - от земли и заземленного оборудования, что требует большего места для установки.

Основным преимуществом схемы с двумя выводами является облегчение изоляции обмотки и выводов ВН в два раза; изготавливаются трансформаторы по такой схеме на напряжения до 750 кВ.

Наиболее надежной и распространенной, а для наружных установок единственно возможной конструкцией испытательного трансформатора является конструкция с масляной изоляцией в металлическом баке. Однако она связана с необходимостью применения дорогих и сложных проходных изоляторов ВН, что намного увеличивает размеры установки и затрудняет ремонт трансформа-

тора. Поэтому изготавливаются и сухие испытательные трансформаторы на напряжения до 1000 кВ. Их преимуществом являются небольшой вес и габариты (вследствие отсутствия масла, бака и проходного изолятора), легкий доступ к обмотке и элементам изоляции, простота ремонта. Основным недостатком сухих трансформаторов является опасность увлажнения изоляции (поэтому их нельзя устанавливать на открытом воздухе).

Для получения напряжений выше 500-750 кВ применяют каскадные схемы включения испытательных трансформаторов (элементов), что дает возможность путем несложных переключений получать также высокое напряжение трехфазного тока с

$$U_{л} = \sqrt{3}U_2.$$

Возможен ряд вариантов схем каскадного включения трансформаторов и их питания. Наиболее распространена схема питания каскада, когда для питания последующих элементов служат обмотки связи ОС предыдущих элементов каскада. Обмотки ОС электрически соединены с выводом ВН и имеют по отношению к обмотке НН элемента коэффициент трансформации, равный единице. На рис. 2.2 приведена схема автотрансформаторного питания каскада из трех трансформаторов с двумя выводами. Начало обмотки ВН первого трансформатора соединено с землей, следовательно, относительно земли его бак имеет потенциал  $0,5U_2$ , а напряжение на выходе равно  $U_2$ ; баки второго и третьего трансформаторов имеют потенциалы  $1,5U_2$  и  $2,5U_2$ , а напряжения на их выходе относительно земли соответственно равны  $2U_2$  и  $3U_2$ . Так как в данной схеме баки всех трансформаторов находятся под напряжением, то от земли должны быть изолированы все три трансформатора каскада с применением специальных изоляторов (И).

Основным преимуществом каскадной схемы включения трансформаторов является облегчение изоляции отдельных трансформаторов, при трех элементах изоляция каждого из них выполняется на  $1/3$  или  $1/6$  общего напряжения каскада. Это дает возможность получать высокие испытательные напряжения (1; 1,5 и 2,25 МВ), применяя освоенные производством и надежные в эксплуатации трансформаторы на более низкие напряжения (330, 500 и 750 кВ). Каскад трансформаторов позволяет также собирать необходимые для работы схемы испытательных установок - трехфазную, схему параллельной работы нескольких трансформаторов и т.п. При выходе из

стройка одного из элементов каскада работа в лаборатории не прерывается и может быть продолжена на оставшихся элементах.

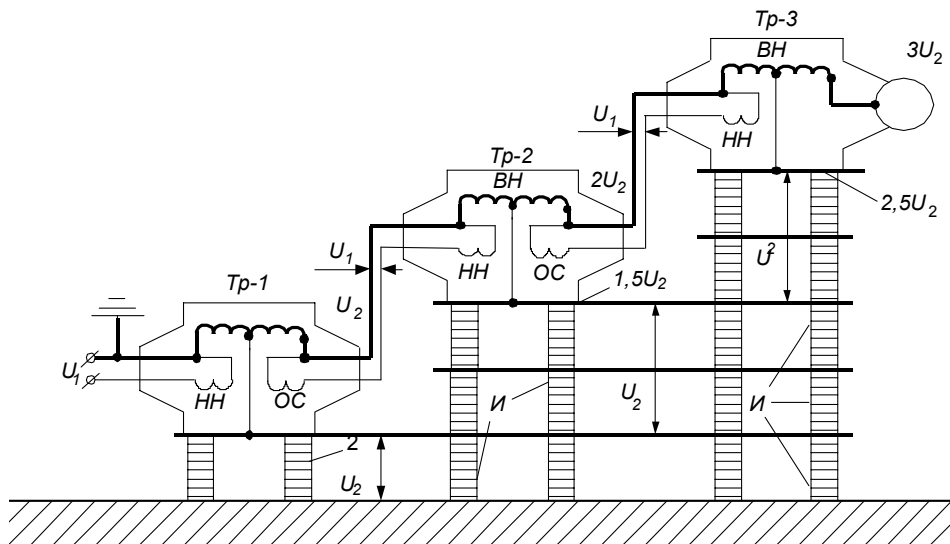


Рис. 2.2. Схема каскада из трех трансформаторов с двумя выводами ВН

Недостатками каскадной схемы являются значительная площадь, занимаемая ею, высокая (20-30%) реактивность по сравнению с реактивностью единичного трансформатора того же напряжения (6-8 %) и повышенная установленная мощность. Действительно, мощность обмотки НН первого трансформатора, через которую питаются все три элемента каскада (рис. 2.2), равна  $3U_2I_2$ , а мощность обмоток НН второго и третьего элементов -  $2U_2I_2$  и  $U_2I_2$ . Таким образом, мощность каскада из трех элементов  $S_k=6U_2I_2$  будет в два раза превышать полезную мощность, равную  $3U_2I_2$ .

## Регулирование напряжения испытательных трансформаторов

Режимы работы испытательных трансформаторов требуют регулирования их напряжения от нуля до заданной величины. Это производится при помощи регуляторов напряжения, включаемых в цепь первичной обмотки трансформатора. Регуляторы напряжения должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) регулирование напряжения должно быть по возможности плавным, в регуляторах со скользящими контактами искрение должно отсутствовать;
- 2) регулятор должен подавать на вход испытательного трансформатора напряжение от нуля до  $U_{\text{ном}}$  неискаженной синусоидальной формы;
- 3) мощность регулятора напряжения должна быть не меньше мощности испытательного трансформатора.

Совершенным устройством для регулирования напряжения является **двигатель-генератор**, состоящий из синхронного генератора, смонтированного на одном валу с двигателем постоянного или переменного тока. Регулирование напряжения осуществляется изменением возбуждения генератора. Чтобы выдерживать механические усилия, возникающие в обмотках при разряде на объекте испытания, генератор должен иметь усиленное крепление лобовых частей. Этот способ питания обеспечивает плавность регулирования и практическую синусоидальность кривой напряжения.

При наличии двигателя постоянного тока имеется возможность регулировать в определенных пределах частоту испытательного напряжения; синхронный двигатель обеспечивает строгое постоянство частоты в соответствии с частотой сети питания.

Недостатком способа является высокая по сравнению с другими регуляторами стоимость, поэтому двигатели-генераторы применяют только для питания мощных испытательных установок.

Более простым и недорогим устройством для регулирования напряжения являются **индукционные регуляторы**, которые выполняются или в виде трансформаторов и автотрансформаторов с перемещающейся обмоткой, или в виде заторможенного асинхронного двигателя с фазным ротором (потенциал регуляторы). Индук-

ционные регуляторы характеризуются плавностью регулирования напряжения и не имеют скользящих контактов. Современные индукционные регуляторы обеспечивают получение регулируемого напряжения по форме, близкой к синусоидальной. Индукционные регуляторы напряжения выпускаются различной мощности и применяются для питания испытательных установок любого напряжения.

**Трансформаторы и автотрансформаторы** типа ЛАТР, в которых напряжение регулируется при помощи скользящих контактов плавно или ступенями, относятся к самым простым и дешевым регуляторам напряжения. Их слабым местом является система контактов, которая при переключениях значительных токов может обгорать, в результате чего возникает искрение, возможны разрывы цепи тока и связанные с этим опасные перенапряжения. Применяются такие устройства для регулирования напряжения испытательных трансформаторов мощностью до 50-100 кВ·А

Таким же простым и дешевым устройством для регулирования напряжения являются **реостаты со скользящим контактом**, включаемые в сеть как потенциометры. При значительных токах скользящие контакты реостатов сильно нагреваются и обгорают, поэтому реостаты применяют для регулирования напряжения испытательных трансформаторов малой мощности напряжения (1-2 кВ). Работу скользящих контактов можно во всех случаях улучшить и рабочие токи увеличить в 2-3 раза, погрузив коммутатор в изоляционное масло. В любых элементах испытательной установки нельзя допускать насыщения магнитной системы, так как это сопровождается появлением высших гармонических, передаваемых в цепь высокого напряжения испытательного трансформатора, т.е. приводит к искажению формы кривой высокого напряжения.

### 2.3. Испытательные установки постоянного тока

Для получения высоких напряжений постоянного тока применяют различные выпрямительные установки и электростатические генераторы. Типовые схемы выпрямления, применяемые чаще всего для получения напряжений до 200 кВ приведены на рис. 2.3. В схеме однополупериодного выпрямления (рис. 2.3, а) вентиль  $V_1$  про-

водит ток в течение одного полупериода переменного тока, при этом конденсатор  $C_1$  заряжается; в течение следующего полупериода клапан заперт и конденсатор  $C_1$  разряжается на сопротивление нагрузки  $R_n$ . Падение напряжения  $\Delta U$  в элементах схемы и пульсация напряжения  $\delta U$ , обусловленная разрядом конденсатора  $C_1$ , определяются током нагрузки, и при  $I_n=0$  ( $R_n=\infty$ ) значения  $\Delta U$  и  $\delta U$  будут также равны нулю (рис. 2.3, г). Конденсатор  $C_1$  в этом случае будет заряжен до напряжения, равного амплитуде вторичного напряжения трансформатора  $U_2$ .

В схеме рис. 2.3, б, конденсатор  $C_1$  заряжается через клапан  $B_1$  в полупериоды одной полярности, а конденсатор  $C_2$  - через клапан  $B_2$  в полупериоды противоположной полярности. Каждый из конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  может быть заряжен до напряжения, близкого к амплитуде напряжения  $U_2$ . Напряжение на выходе схемы относительно земли и равно сумме напряжений конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , т.е. близко к двойному амплитудному значению напряжения  $U_2$ . Поэтому схема и называется **схемой удвоения напряжения**.



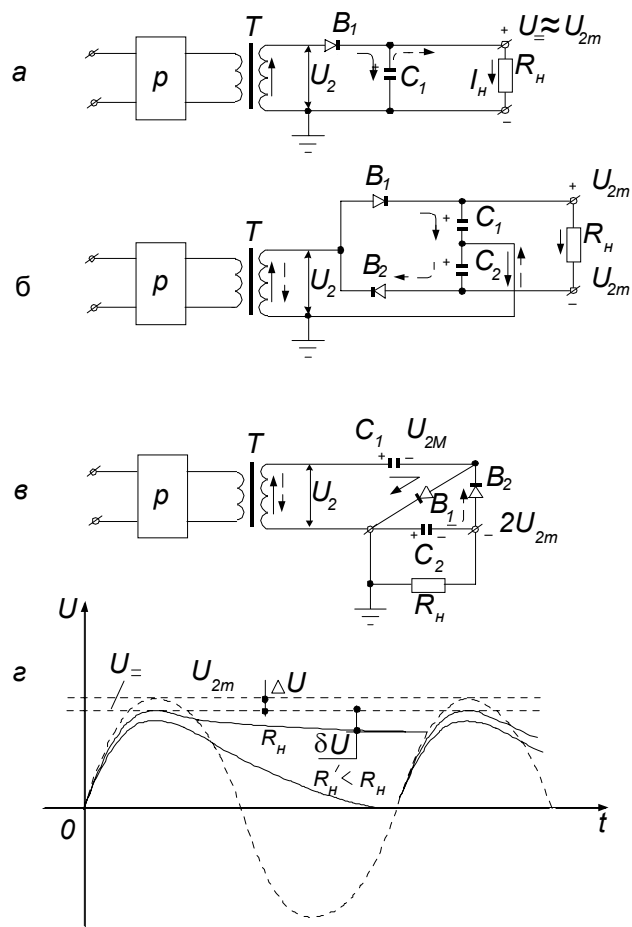


Рис. 2.3. Схемы получения высокого выпрямленного напряжения: однополупериодная (а), двухполупериодные (б, в) и диаграмма выпрямленного напряжения (г)

В схеме рис. 2.3, в, которая принадлежит к схемам удвоения напряжения, конденсатор  $C_1$  заряжается примерно до амплитудного значения напряжения  $U_2$  в те полупериоды, когда вентиль  $B_1$  открыт. В полупериоды противоположной полярности открывается вентиль  $B_2$  и конденсатор  $C_2$  оказывается включенным на напряжение, равное сумме напряжения  $U_{2m}$  трансформатора  $T$  и напряжения

$U_{2m}$  уже заряженного конденсатора  $C_1$ . На выходе схемы получают несимметричное относительно земли напряжение, по величине близкое к удвоенной амплитуде напряжений  $U_2$ .

При выборе вентилялей нужно иметь в виду, что во всех рассмотренных схемах напряжение на вентилялях в непроводящую часть периода равно  $2U_{2m}$ .

Для получения напряжения свыше 200 кВ обычно применяют схемы умножения (каскадные генераторы постоянного тока - ГПТ).

Нижняя часть схемы умножения (рис. 2.4, а), образованная трансформатором  $T$ , вентилялями  $B_1$  и  $B_2$  и конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ , повторяет схему рис. 2.3, в. При наиболее благоприятных условиях конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  в этой схеме оказываются заряженными до напряжений  $U_{2m}$  и  $2U_{2m}$ . По мере того как заряжаются конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , от них с некоторым запаздыванием во времени заряжается пара конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$ ; по мере зарядки конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$  от них начинают заряжаться конденсаторы  $C_5$  и  $C_6$  и т.д. В результате каждый из четных конденсаторов ( $C_2, C_4$  и т.д.) оказывается заряженным до  $2U_{2m}$ , а вся цепочка этих конденсаторов теоретически даст относительно земли напряжение  $n2U_{2m}$ , где  $n$  - число конденсаторов в цепочке (ступеней ГПТ).

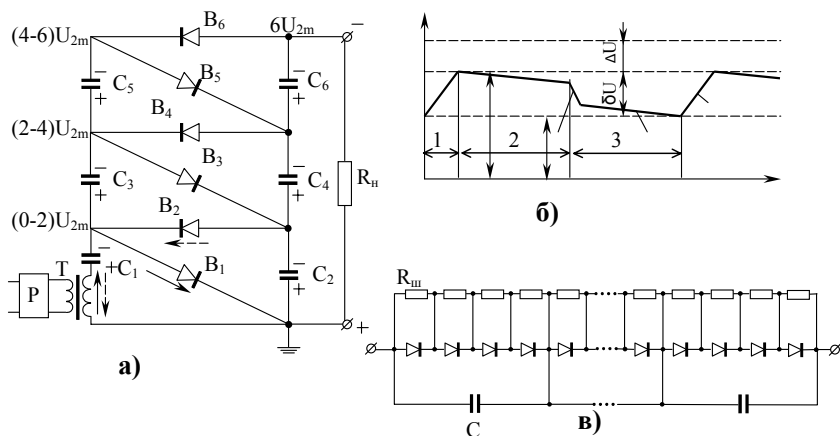


Рис. 2.4. Каскадный генератор постоянного тока (а); диаграмма выпрямленного напряжения (б); последовательное включение кремниевых диодов в блоке (в)

Реально получаемое на выходе каскадного генератора напряжение отличается от теоретического на величины  $\Delta U$  и  $\delta U$  (рис. 2.4, б). Участок 1 выходного напряжения соответствует зарядке конденсаторов левой группы, участок 2 - зарядке конденсаторов правой группы, участок 3 - разрядке конденсаторов на сопротивление нагрузки. Анализ режима работы ГПТ приводит к следующим упрощенным выражениям величин падения напряжения  $\Delta U$  и пульсации напряжения  $\delta U$  (при  $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ ):

$$\Delta U = \frac{I_n}{fC} \left( \frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{n}{6} \right); \quad (2.2)$$

$$\delta U = \frac{I_n(n+1) \cdot n}{2fC}, \quad (2.3)$$

где  $n$  - число ступеней генератора;  $I_n$  - среднее значение тока нагрузки;  $f$  - частота сети, питающей генератор.

Из выражений (2.2) и (2.3) следует, что для уменьшения  $\Delta U$  и  $\delta U$  в рассмотренной схеме последовательного питания конденсаторов нужно брать минимальное число  $n$  ступеней схемы, не выходя за допустимые пределы тока нагрузки  $I_n$ , применять по возможности большие емкости  $C$  конденсаторов схемы и повышать частоту питания  $f$  (например, 400 Гц вместо 50). Генераторы постоянного тока строятся обычно на напряжения до 1-1,5 МВ и токи нагрузки, не превышающие обычно 50 мА. В качестве вентилях в рассмотренных схемах применяются преимущественно полупроводниковые вентили.

Использование в качестве вентилях кремниевых полупроводниковых диодов позволяет значительно упростить конструкцию высоковольтной установки постоянного тока. Недостатками полупроводниковых диодов являются сравнительно низкие допустимые обратные напряжения, не превышающие 600-1000 В и значительный разброс параметров. Поэтому для работы в высоковольтных установках их соединяют последовательно и для обеспечения равномерного распределения обратного напряжения каждый диод шунтируют резистором  $R_{ш}$  (порядка 2 МОм), а группы диодов - конденсаторами  $C$  (рис. 2.4, в). Резисторы обеспечивают равномерное рас-

пределение напряжения при его медленных изменениях, а конденсаторы - при быстрых. Соединенные таким образом диоды выполняются конструктивно в виде залитых эпоксидным или другим компаундом блоков на 10-40 кВ, из которых и комплектуется выпрямитель на требуемое напряжение.

## 2.4. Генераторы импульсных напряжений

Генератор импульсных напряжений (ГИН) представляет собой установку, предназначенную для генерирования грозовых импульсов. Впервые схема ГИН была предложена и выполнена профессором Московского университета В. Аркадьевым в 1914 г. Схема ГИН из трех конденсаторов ( $n=3$ ) изображена на рис. 2.5, а.

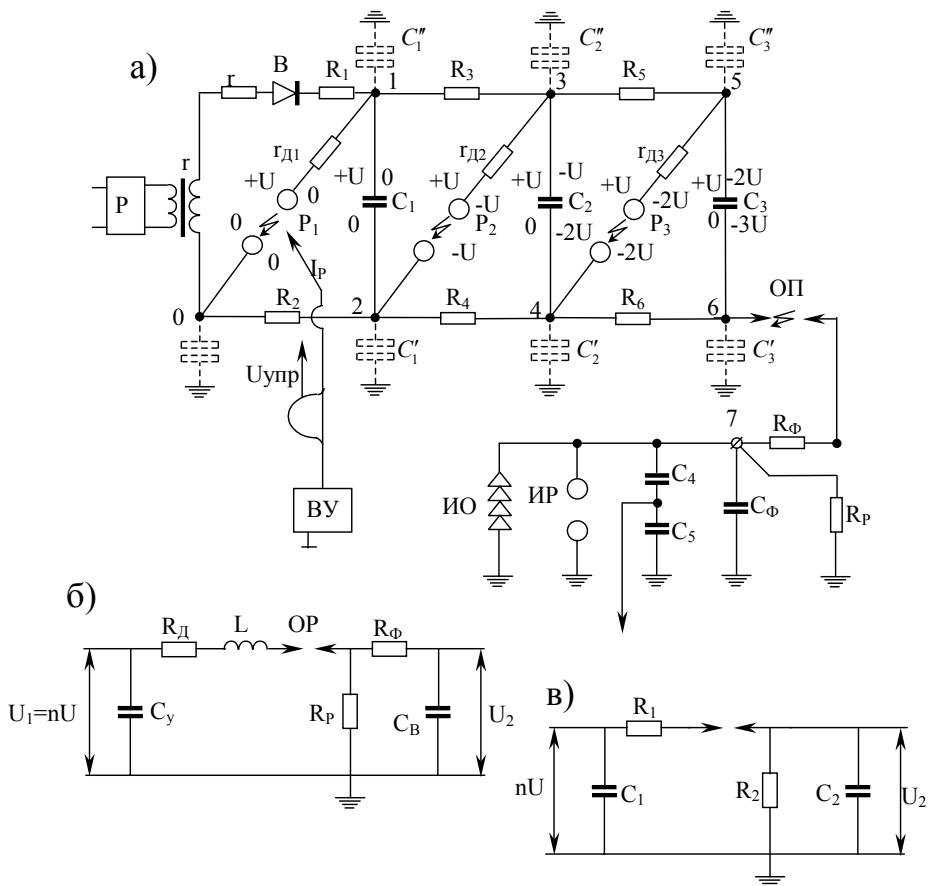


Рис. 2.5. Генератор импульсных напряжений:

- а - принципиальная схема (потенциалы слева от электродов конденсаторов соответствуют концу зарядки, справа разрядному режиму ГИН);
- б – схема замещения при разряде;
- в – расчётная схема для приближённого вычисления параметров импульса.

Работа ГИН складывается из двух последовательных режимов: зарядного режима и разрядного (рабочего режима). Конденсаторы  $C$

генератора заряжаются от выпрямительного устройства, содержащего трансформатор  $T$ , клапан  $B$  и резистор  $r$  (порядка  $10^6$  Ом). Этот резистор защищает клапан и трансформатор от перегрузки и ограничивает толчки тока в первые моменты зарядки конденсаторов. При зарядке все конденсаторы  $C$  подключены к источнику напряжения через зарядные резисторы  $R_1 - R_6$  параллельно. Большие значения сопротивлений этих резисторов нежелательны с точки зрения процесса заряда, однако их уменьшению препятствует разряд (после срабатывания ГИН) конденсаторов  $C$  на свои резисторы  $R$ , поэтому обычно выбирают  $R \approx 5 \cdot 10^4$  Ом. Тогда при  $C = 0,1$  мкФ получим  $\tau_{RC} = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot 0,1 \text{ мкФ} = 5 \cdot 10^3$  мкс, что превышает длину стандартной волны более чем в 100 раз; следовательно, разрядом конденсаторов  $C$  на резисторы  $R$  можно пренебречь. Так как  $R \ll r$ , то можно считать, что через некоторое время, определяемое постоянной цепи разряда и составляющее в ряде случаев десятки секунд все конденсаторы  $C$  окажутся заряженными до одинакового напряжения  $U$ .

$$\tau = \frac{8n^2 RC}{\pi^2} + rnC \quad (2.4)$$

Разряд ГИН начинается в тот момент, когда зарядное напряжение в точке 1 достигает величины пробивного напряжения запального разрядника  $P_1$ , или на разрядник  $P_1$  подается фиксированный управляющий  $U_{упр}$  от специального вспомогательного устройства ВУ. В этом случае  $P_1$  срабатывает как триггер и конструкции  $P_1$  обеспечивают срабатывание ГИН в широком диапазоне изменения  $U$  (например, использование в качестве  $P_1$  политриггаторов – от  $0,5U$  до  $U$ , где  $U$  – напряжение разряда в  $P_1$  без управляющего импульса  $U_{упр}$ ).

После пробоя разрядника точка 1 оказывается соединенной с землей через демпферный резистор  $r_{дл}$  (порядка 10-50 Ом) и сопротивление искры разрядника, ее потенциал мгновенно снижается до нуля. Так как потенциал верхнего электрода конденсатора  $C_1$  (точка 1) перед пробоем был равен  $+U$ , а после пробоя стал равен нулю, то потенциал его нижнего электрода (точка 2) изменяется от нуля до  $-U$ ; такой же потенциал приобретает и нижний электрод разрядника  $P_2$ . Конденсатор  $C_2$  представляющий собой емкость элементов кон-

струкции ГИН относительно земли (паразитную емкость), не может мгновенно разрядиться по контуру  $C''_2 - R_3 - r_{\partial 1} - P_1$ - земля -  $C''_2$ , поэтому потенциал точки 3 и верхнего электрода разрядника  $P_2$  сохраняется равным  $+U$ ; в результате под действием разности потенциалов  $2U$  разрядник  $P_2$  пробивается, и точка 3 оказывается соединенной с точкой 2 через сопротивление искры и резистор  $r_{\partial 2}$ .

В итоге потенциалы верхнего и нижнего электродов конденсатора  $C_2$  изменяются до значений  $+U$  и  $-2U$ , разрядник  $P_3$  под действием разности потенциалов  $3U$  пробивается, и все три конденсатора ГИН оказываются соединенными последовательно. Под действием напряжения  $3U$  пробивается отсекающий промежуток ОП, который разъединял цепь объекта и измерительных устройств от собственного ГИН до его срабатывания, и напряжение  $3U$  оказывается приложенным к выходной цепи (точка 7).

Рассмотрим как влияют на форму импульса отдельные элементы ГИН, (рис. 2.5, б). Емкость  $C_6$  на выходе ГИН представляет собой сумму емкостей испытуемого объекта ИО, измерительного разрядника ИР, делителя напряжений  $C_4 - C_5$ , фронтовой емкости  $C_\phi$ , специально подключаемой для настройки ГИН, и паразитных емкостей элементов ГИН относительно земли.

Емкость  $C_y$  называется **ударной емкостью** ГИН, она равна емкости последовательно соединенных конденсаторов  $C_1, C_2, \dots, C_n$ . Обычно  $C_1 = C_2 \dots = C_n = C$ , поэтому  $C_y = C/n$ . Для лучшего использования ГИН его емкость в ударе  $C_y$  принимают равной не менее 5-10  $C_6$ . Индуктивность  $L$  контура разряда ГИН, в которую входят индуктивность проводов и конденсаторов ГИН и индуктивность внешней цепи разряда, может быть рассчитана лишь ориентировочно. В практических конструкциях ГИН на напряжение порядка 1 МВ индуктивность  $L$  мала, и с ее влиянием на форму волны в приближенных расчетах можно пренебречь.

Резистор  $R_d$  носит название демпфирующего, его сопротивление равно сумме сопротивлений резисторов  $r_{\partial}$ , включенных последовательно с разрядниками  $P$ . Резистор  $R_\phi$  представляет собой фронтовое сопротивление, вместе с  $R_d$  он определяет длительность зарядки емкости  $C_6$ , т.е. длительность фронта импульса. Демпфирующие резисторы необходимы, чтобы ослабить возможность возникновения высокочастотных колебаний при разрядке ГИН, наложение которых может значительно исказить стандартную форму импульса и

явиться причиной значительной погрешности при определении импульсных характеристик изоляции. По ГОСТ 1516-96.3 наложение высокочастотных колебаний на кривую импульсного напряжения допускается, если повышение амплитуды импульса при этом не превышает 5 % амплитуды стандартной волны. Значение сопротивлений резисторов  $R_d$  и  $R_\phi$  должны удовлетворять условию аперидичности разряда.

$$R_d + R_\phi \geq 2\sqrt{\frac{L}{C_3}}, \quad (2.5)$$

где  $C_3 = \frac{C_B C_Y}{C_B + C_Y} \approx C_B$  (так как  $C_Y \gg C_B$ ),

$L$  - индуктивность контура разряда ГИН.

После пробоя отсекающего промежутка емкость  $C_6 = C_2$  (рис. 2.5, в) заряжается от емкости  $C_Y$  через резисторы  $R_d$  и  $R_\phi$ . Расчетная схема ГИН (рис. 2.5, в) при  $L=0$  представляет разряд емкости  $C_1$  на  $R_1, R_2 || C_2$ , где:  $C_1 = C_Y = \frac{C}{n}$ ;  $R_1 = R_\phi + \Sigma R_d$ ;  $C_2 = C_B$ ;  $R_2 = R_P$ .

Решение дифференциального уравнения для такой разрядной схемы приводит к выражению для напряжения на объекте испытания (ОИ):

$$U_2 = U_1 n \eta (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}), \quad (2.6)$$

где  $\eta$  - коэффициент использования схемы;  $T_1$  - постоянная времени разряда емкостей  $C_1$  и  $C_2$ ;

$T_2$  - постоянная времени заряда емкости  $C_2$ .

Приближенно эти величины находятся по формулам:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &\approx (C_1 + C_2)(R_1 + R_2) & T_1 &\approx C_1 R_2 \\ T_2 &\approx \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} & T_2 &\approx C_2 R_1 \end{aligned} \right\} \text{при } \begin{aligned} R_1 &\ll R_2 \\ C_1 &\gg C_2 \end{aligned}$$



$$\eta \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Физический смысл приведенных соотношений можно уяснить, анализируя процесс разряда цепи (рис. 2.5, в).

Емкость  $C_1$  с напряжением  $nU_1$  разряжается на сопротивление  $R_2$  и емкость  $C_2$ . В первый момент при разряде емкости  $C_1$  напряжение на емкости  $C_2$  сохраняет нулевое значение. После пробоя промежутка ОП емкость  $C_1$  начинает заряжать емкость  $C_2$ . Одновременно с зарядом емкости  $C_2$  происходит разряд емкости  $C_1$  на сопротивление  $R_2$ . После того, как напряжения на емкостях  $C_1$  и  $C_2$  уравниваются, обе емкости разряжаются на  $R_2$ . Чтобы напряжение  $U_2$  значительно не снижалось при разряде емкости  $C_2$  от емкости  $C_1$  принимают условия  $C_1 \gg C_2$  и  $R_1 \ll R_2$ .

Постоянная времени разряда  $T_1$  характеризует разряд емкости  $C_1$  на сопротивление  $(R_1 + R_2)$  и емкости  $C_2$  на сопротивление  $R_2$ . Постоянная времени  $T_2$  характеризует заряд емкости  $C_2$ .

Форма волны напряжения  $U_2$  описываемая уравнением (2.6), графически может быть представлена разностью экспонент с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ , как это изображено на рис. 2.6. Первая экспонента с постоянной времени  $T_1$  спадает медленнее второй экспоненты с постоянной времени  $T_2$  и напряжение  $U_2$ , быстро пройдя через максимум, снижается до нуля.

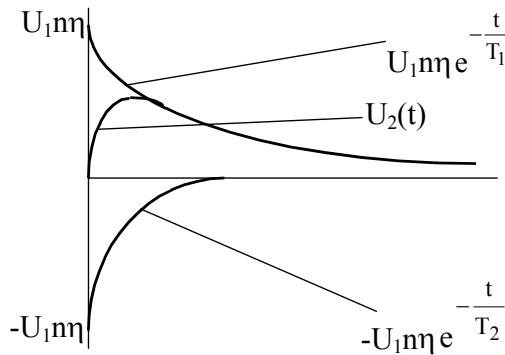


Рис. 2.6. Форма импульса  $U_2(t)$  в соответствии со схемой замещения 2.5, б.

Можно считать, что процесс зарядки заканчивается и напряжение на емкости  $C_в$  достигает максимума через время, равное  $(2,5-3)T_1$ , поэтому длина фронта импульса ориентировочно равна

$$\tau_{\phi} \approx (2,5 - 3)T_1 \approx (2,5 - 3)(R_{Д} + R_{\phi})C_{B} \approx (2,5 - 3)R_1 C_2. \quad (2.7)$$

После того как напряжение на емкости  $C_в$  достигнет максимума, начинается разряд емкости  $(C_у + C_в)$  через резистор  $R_p$ , определяющий длину импульса. Можно показать, что связь длины стандартного импульса  $\tau_{и}$  и постоянной времени разряда  $T_2 \approx (C_у + C_в)R_p = (C_1 + C_2)R_2$  определяется выражением  $\tau_{и} \approx 0,67T_2$ , поэтому

$$\tau_{и} \approx 0,67(C_у + C_в)R_p. \quad (2.8)$$

Так как значения  $C_у$  и  $C_в$  генератора обычно заданы, то для получения стандартного импульса по выражениям (2.7) и (2.8) определяют сопротивления резисторов  $R_{Д}$ ,  $R_{\phi}$  и  $R_p$ . Точный подбор этих резисторов производится опытно, форма волны при этом контролируется путем осциллографирования.

Параметрами ГИН являются номинальное (теоретически возможное) напряжение  $nU$ , емкость в ударе  $C_у$ , энергия в ударе  $W = \frac{(nU)^2 C_у}{2}$  и коэффициент использования (2.6)  $\eta$ , представляющий собой отношение реально получаемой амплитуды напряжения к теоретически возможной.

Из приведенных выше соотношений для  $\eta$  следует, что коэффициент использования снижается при увеличении емкости нагрузки, а также сопротивления резистора  $R_1$  и уменьшении длины импульса (так как при этом уменьшается  $R_2$ ). Для современных ГИН коэффициент использования достигает значений 0,85-0,95.

В настоящее время в ряде лабораторий высоких напряжений имеются ГИН на напряжение 3000 - 10000 кВ. Емкость в ударе таких генераторов лежит обычно в пределах 0,001 - 0,02 мкФ, а энергия в ударе составляет 60 - 300 кВт·с.

## 2.5. Генераторы коммутационных перенапряжений

В последние годы большое значение приобрел вопрос исследования поведения изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений. Исследования в этой области показали, что коммутационные перенапряжения могут иметь форму аperiodического или колебательного импульса (рис. 1.1). Параметры этих импульсов могут меняться в широких пределах, например, частота колебательного импульса лежит в диапазоне от 50-100 Гц для дальних электропередач и до  $10^4$  Гц и выше для коротких линий.

Для получения **аperiodических** импульсов применяют схемы генераторов импульсных напряжений, аналогичные изображенной на рис. 2.5. Параметры таких ГИН выбирают так, чтобы обеспечить получение стандартного аperiodического коммутационного импульса. По ГОСТ 1516.2-97, он должен иметь время подъема напряжения  $T_n=250\pm 50$  мкс и длительность  $T_u=2500\pm 750$  мкс (обозначение импульса "250/2500"). В ряде случаев, оговоренных стандартами на отдельные виды электрооборудования, допускается применение аperiodических импульсов 100/2500, 500/2500 и 1000/5000.

Стандартный **колебательный коммутационный** импульс должен иметь время подъема напряжения в течение первого полупериода  $T_n$ , равное 50, 100 или 4000 мкс (в зависимости от вида испытываемой изоляции), и длительность  $T_u$  первого полупериода 500, 1000 или 7500 мкс соответственно (импульсы 50/500, 100/1000 и 4000/7500).

Источником колебательных коммутационных импульсов в лабораторных условиях являются генераторы коммутационных перенапряжений (ГКП), базирующиеся на использовании испытательных высоковольтных трансформаторов или ГИН.

На рис. 2.7 представлен вариант схемы ГКП на основе каскада испытательных трансформаторов. Первичные обмотки трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  питаются от двух включенных встречно колебательных контуров  $L_1C_1$  и  $L_2C_2$ , настроенных на различные частоты  $f_1$  и  $f_2$ , обычно  $f_2=(3-5)f_1$ .

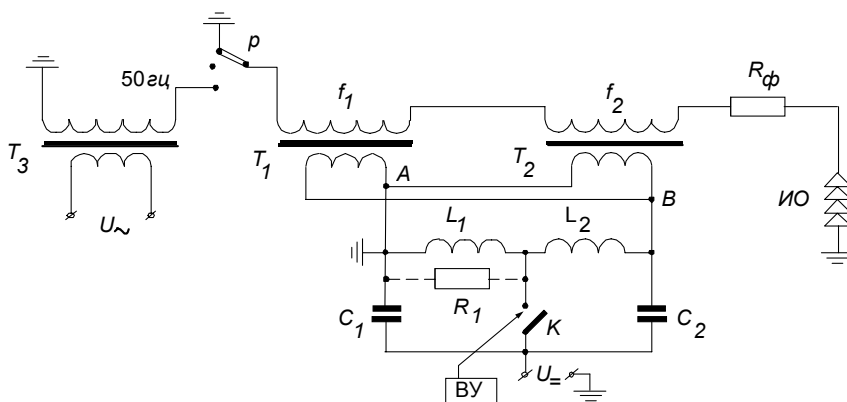


Рис. 2.7. Схема генератора коммутационных перенапряжений с использованием трансформаторов

После того как конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  зарядятся от источника постоянного напряжения  $U$ , напряжение между точками А и В питания обмоток НН трансформаторов будет равно нулю до момента замыкания контактора ( $K$ ). В качестве  $K$  может быть использован шаровой разрядник с поджигом разряда от вспомогательного устройства ВУ. После замыкания  $K$  это напряжение будет возрастать более или менее быстро в зависимости от соотношения частот  $f_1$  и  $f_2$ . На стороне ВН трансформаторов получится суммарное напряжение, изменение которого во времени можно регулировать в широких пределах. Если одну из индуктивностей, например  $L_1$ , заменить резистором  $R_1$ , то напряжение между точками А и В будет представлять результат наложения колебательного напряжения контура  $L_2C_2$  на аperiodическое напряжение контура  $C_1R_1$ .

Если последовательно с трансформаторами  $T_1$  и  $T_2$  включить трансформатор  $T_3$ , питаемый от сети с частотой 50 Гц, то на синусоидальное напряжение промышленной частоты трансформатора  $T_3$  наложится напряжение трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ . Результирующую форму напряжения можно менять в широких пределах в зависимости от условий испытания.

ГКП на основе испытательных трансформаторов применяют для получения напряжений сравнительно большой длительности ( $T_u \geq 1000$  мкс).

Схема ГКП с использованием ГИН показана на рис. 2.8. ГКП (рис. 2.8, а) состоит из двух одинаковых частей ГИН, в котором одна из зарядных цепей образована резисторами  $R$ , а вторая - индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$ . Благодаря подключению к точке  $m$  двух индуктивностей и разрядника  $P_2$  обе половины ГИН в разрядном режиме включаются встречно. При этом частота затухающих колебаний левой половины ГИН определяется параметрами контура  $L_1C_1$ , а правой -  $L_2C_2$ . Если индуктивности  $L_2$  заменить резисторами  $R_2$ , то разряд правой части ГИН будет аperiодическим.

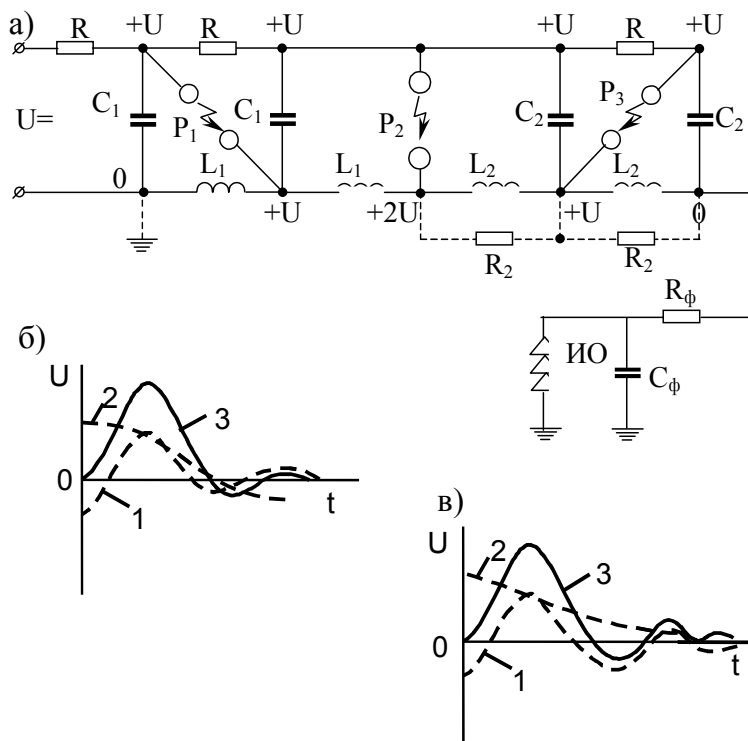


Рис. 2.8. Схема генератора коммутационных перенапряжений с использованием ГИН (а); формы напряжения на выходе (б, в).

Напряжение на выходе (кривая 3, рис. 2.8 б, в) ГКП при срабатывании всех разрядников  $P$  вначале будет равно нулю из-за встречного включения половинок ГИН. В дальнейшем оно нарастает и изменяется в зависимости от закона изменения его составляющих в левой и правой половинах ГИН. Например, оно может иметь вид колебаний повышенной частоты (кривая 1), наложенных на колебания более низкой частоты (кривая 2), или вид колебаний, наложенных на апериодическую составляющую (рис. 2.8, в). Изменяя значения индуктивностей ГКП, можно получать различные частоты затухающих колебаний. Обычно схемы с использованием ГИН применяют для получения колебательных импульсов с  $T_u \leq 1000$  мкс.

Другие варианты выполнения ГКП базируются на использовании рассмотренных схем и различаются в основном лишь техническими деталями.

### **3. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ**

#### **3.1. Расположение объекта испытаний на испытательном поле**

Объект испытаний устанавливают на испытательном поле так, чтобы расстояние до посторонних окружающих предметов (стен, ограждений, испытательного оборудования) были не менее 150 % наименьшего изоляционного расстояния во внешней изоляции объекта (в воздухе между заземленными и имеющими высокий потенциал частями объекта испытаний). При испытании внешней изоляции объектов классов напряжения 500 кВ и выше в стандартах или технических условиях указывают высоту заземленного основания объекта испытания, а также расположение и конструкцию ошиновки вблизи объекта.

#### **3.2. Требования к объекту испытаний**

Испытания следует проводить на полностью собранном объекте. Перед испытанием изоляции в сухом состоянии поверхность изолирующих деталей, находящихся в воздухе, должна быть очищена от загрязнений, а при испытании дождем – также от жиров. Для протирки поверхности изоляционных деталей из органических материалов рекомендуется спирт.

Испытания изоляции газонаполненного оборудования проводят при минимальной плотности изоляционного газа. Минимальной плотности соответствует минимальное давление газа при нормальной температуре, равной 20 °С. Если температура газа во время испытания отличается от 20 °С, то давление газа должно быть таким, чтобы была обеспечена минимальная плотность. Испытания проводят после того, как испытуемый объект достигнет температуры окружающей среды. Допускается проводить испытание внешней изоляции при температуре объекта, превышающей температуру окружающей среды, но находящейся в диапазоне от 10 до 40 °С, если это обстоятельство не снижает электрические характеристики испытуемого объекта.

### 3.3. Условия при испытании изоляции под дождем

Испытуемый объект должен быть установлен в рабочее положение и на него должен падать равномерный дождь капельной структуры под углом примерно  $45^\circ$  к горизонтали. Зона действия дождя должна полностью перекрывать испытуемый объект.

Испытание изоляции под дождем следует проводить при соблюдении условий в части значений интенсивности дождя, температуры и удельного сопротивления воды, времени предварительного (до приложения испытательного напряжения) пребывания объекта под дождем (условий дождевания), указанных в таблице 3.1.

Интенсивность дождя определяют с помощью водосборника в течение не менее 30 с. Для условий дождевания 1 применяют раздельный водосборник с отверстиями площадью от 100 до 750 см<sup>2</sup>, расположенными соответственно на горизонтальной и вертикальной поверхностях его отделения. Отверстие на вертикальной поверхности должно быть расположено перпендикулярно к плоскости струи воды. Для условий дождевания 2 применяют водосборник с отверстием площадью от 100 до 750 см<sup>2</sup> на горизонтальной поверхности.

Интенсивность дождя следует измерять около оси объекта (или его испытуемой части) как можно ближе к объекту, но так, чтобы в водосборник не попали отраженные капли воды. Измерения выполняют у верхней, средней и нижней точек объекта или только у средней, если высота объекта менее 1 м. Водосборник следует перемещать вверх и вниз вблизи точки измерения, при этом ширина зоны измерения должна соответствовать ширине испытуемого объекта, а высота зоны должна быть не более 1 м. При испытании объектов с горизонтальными размерами более 2 м измерения должны быть выполнены в двух или трех местах в горизонтальной плоскости, причем в каждом из этих мест – у верхней, средней и нижней точек объекта или только у средней точки.



Таблица 3.1.

Условия дождевания

Наименование условия	Значение условия	
	1	2
Среднее значение интенсивности дождя для всех измерений, мм/мин: -вертикальная составляющая -горизонтальная составляющая	от 1,0 до 2,0 от 1,0 до 2,0	$3 \pm 0,3$ не нормируется
Предельные значения интенсивности для любого отдельного измерения и для каждой составляющей, мм/мин	(среднее значение) $\pm 0,5$	от 2.25 до 3,75
Температура воды, °C	(температура окружающей среды) $\pm 15$	
Удельное сопротивление воды $\rho_{20}$ при температуре воды 20°C, Ом м	100 $\pm 15$	
Время предварительного пребывания объекта под дождем с нормированным сопротивлением воды, мин. не менее	15	1

### 3.4. Атмосферные условия

Нормальные атмосферные условия испытаний электрической прочности изоляции:

- температура воздуха  $t_0 - 20^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферное давление  $P_0 - 101300$  Па (1013 мбар или 760 мм рт.ст.);
- абсолютная влажность  $h_0 - 11$  г/м<sup>3</sup>.

Влажность измеряют с погрешностью не более 1 г/м<sup>3</sup>. Абсолютную влажность воздуха при испытаниях определяют по показаниям сухого и влажного термометров психрометра согласно рисунку 3.1.

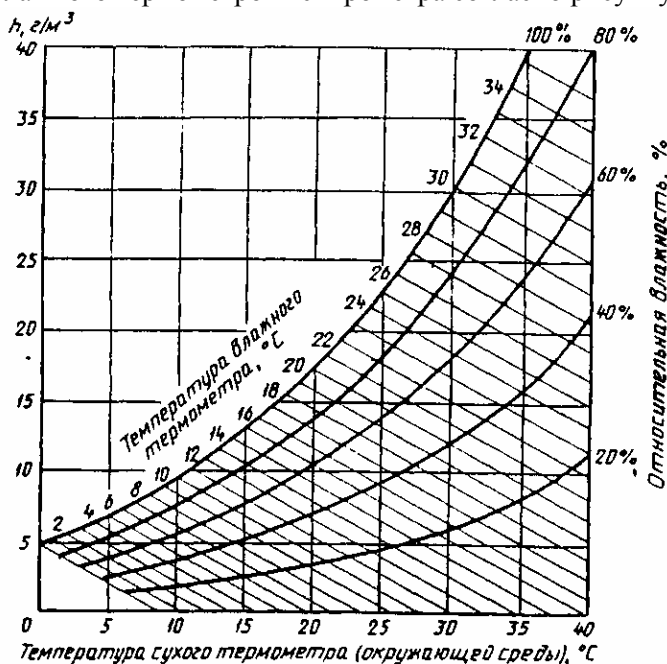


Рис. 3.1. Определение абсолютной влажности воздуха  $h$  по показаниям сухого и влажного термометров

Испытание изоляции в помещении рекомендуется проводить при температуре окружающего воздуха от 10 до 40 °С. Испытание внешней изоляции в сухом состоянии следует проводить при температуре не ниже минус 10 °С.

### 3.5. Поправочные коэффициенты на атмосферные условия

При испытании внешней изоляции при атмосферных условиях, отличающихся от нормальных, испытательные, выдерживаемые и разрядные напряжения должны быть приведены к нормальным атмосферным условиям. Испытательное напряжение  $U_{ui}$ , прикладываемое к объекту, должно быть равно нормированному испытательному напряжению  $U_{u0}$ , умноженному на коэффициент приведения  $K$ .

$$U_{ui} = U_{u0} \cdot K. \quad (3.1)$$

Выдерживаемое (разрядное) напряжение  $U_{e0}$  ( $U_{p0}$ ), приведенное к нормальным атмосферным условиям, должно быть равно измеренному при испытаниях  $U_{ei}$  ( $U_{pi}$ ), деленному на коэффициент приведения  $K$

$$U_{e0} = \frac{U_{ei}}{K}, \quad (3.2)$$

$$U_{p0} = \frac{U_{pi}}{K}. \quad (3.3)$$

Коэффициент приведения  $K$  равен произведению двух поправочных коэффициентов

$$K = K_1 \cdot K_2, \quad (3.4)$$

где  $K_1$  – поправочный коэффициент на плотность воздуха;

$K_2$  – поправочный коэффициент на влажность воздуха.

Примечание: при испытании изоляции под дождем и в условиях загрязнения поправочный коэффициент на влажность воздуха  $K_2=1$ .

Поправочный коэффициент на плотность воздуха определяется по формуле:

$$K_1 = \delta^m, \quad (3.5)$$

где  $m$  – показатель степени  
 $\delta$  – относительная плотность воздуха при испытании, определяемая по формуле:

$$\delta = \frac{P \cdot 293}{P_0 \cdot (273 + t)}, \quad (3.6)$$

где  $P$  – атмосферное давление при испытании, выраженное в тех же единицах, что и нормальное атмосферное давление  $P_0$ ;  
 $t$  – температура воздуха при испытании, °C.

Поправочный коэффициент на влажность воздуха определяют по формуле:

$$K_2 = \kappa^w,$$

где  $w$  – показатель степени,  $\kappa$  – параметр, зависящий от вида испытательного напряжения и отношения абсолютной влажности воздуха при испытании  $h$  к относительной плотности воздуха  $\delta$ .

В диапазоне значений отношения  $h/\delta$  от 1 до 15 значение параметра  $\kappa$  определяется по формулам:

для импульсного напряжения

$$\kappa = 1 + 0,01 \left[ \frac{h}{\delta} - 11 \right]$$

для переменного напряжения

$$\kappa = 1 + 0,012 \left[ \frac{h}{\delta} - 11 \right]$$

для постоянного напряжения

$$\kappa = 1 + 0,014 \left[ \frac{h}{\delta} - 11 \right].$$

Показатели степени  $m$  и  $w$  для поправочных коэффициентов на атмосферные условия, зависящих от вида разряда и напряжения, длины и формы разрядного промежутка, атмосферных условий, могут

быть определены по рисунку 3.2 с использованием параметра  $q$ , определяемого по формуле:

$$q = \frac{U}{L \cdot 500 \cdot \delta \cdot k},$$

где  $L$  – длина минимального разрядного промежутка на испытуемом объекте, м;

$U$  – 50% разрядное или ожидаемое разрядное напряжение (кВ) или, когда они неизвестны, 1,1 испытательного напряжения.

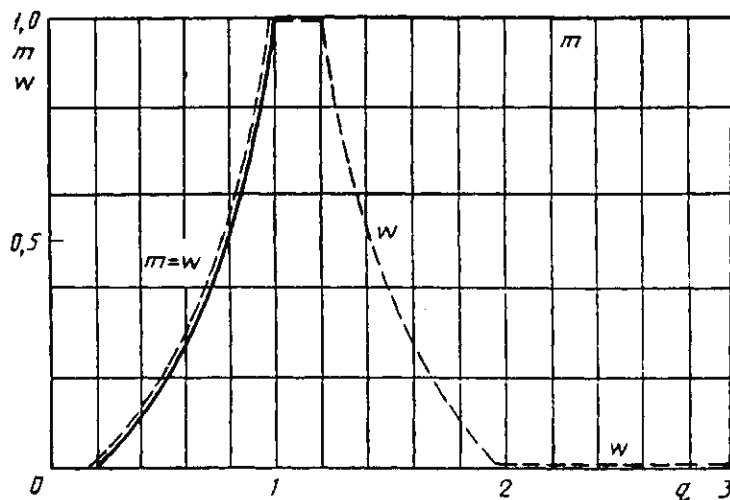


Рис. 3.2. Показатели степени  $m$  и  $w$

### 3.6. Проведение испытаний

Последовательность испытаний отдельными видами напряжения при необходимости устанавливаются в нормативных документах (НД) на электрооборудование отдельных видов. Результаты испытаний электрической прочности изоляции вносят в протокол испытаний или рабочий журнал, где должны быть зафиксированы данные наблюдений и измерений, с помощью которых выявляют наличие или отсутствие повреждения испытуемой изоляции, а также (при невыдержки-

вании испытания) данные о напряжении, при котором произошло повреждение изоляции (значение напряжения, длительность его выдержки до момента обнаружения повреждения, число приложений напряжения, предшествовавших повреждению, и т.д.), о месте и характере повреждения изоляции.

В протоколе испытания внешней изоляции указывают атмосферные условия (температуру воздуха, атмосферное давление и абсолютную влажность воздуха), при которых проводили испытание, а также указывают введение поправки на атмосферные условия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1516.2-97; ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 КВ и выше.
2. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Методика измерения характеристик частичных разрядов.
3. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки 3КВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением.
4. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений.– Мн.: Вышэйшая школа, 1982.
5. Степанчук К.Ф. Контроль и диагностика изоляции машин и аппаратов. – Мн.: Ротапринт БГПА, 1995.
6. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы.– Мн.: Тыздзень, 2000.
7. Справочник методический пособий по контролю состояния электрооборудования.–М.: АО Оргрэс, 1998.
8. Техника высоких напряжений / Под ред.Г.С.Кучинского. – С-Петербург, 2003.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Задачи и способы высоковольтных испытаний изоляции машин и аппаратов.	3
1.1. Необходимость высоковольтных испытаний машин и аппаратов и экономическое обоснование испытаний.	3
1.2. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции электрооборудования и электроустановок на напряжение 3 кВ и выше.	8
1.3. Нормированные испытательные напряжения.	12
2. Испытательные установки высокого напряжения	16
2.1. Общие сведения	16
2.2. Испытательные установки переменного тока	17
2.3. Испытательные установки постоянного тока	23
2.4. Генераторы импульсных напряжений	28
2.5. Генераторы коммутационных перенапряжений.	35
3. Общие условия испытаний	39
3.1. Расположение объекта испытаний на испытательном Поле	39
3.2. Требования к объекту испытаний	39
3.3. Условия при испытании изоляции под дождём	40
3.4. Атмосферные условия	42
3.5. Поправочные коэффициенты на атмосферные условия	43
3.6. Проведение испытаний.	45
4. Литература	47