

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический университет»

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Курс лекций

Майкоп 2019

УДК 621.3(07)
ББК 31.24
Т 38

Составитель: Старков Н.Н., кандидат технических наук, доцент

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лекция 1. Введение	4
2. Лекция 2. 1. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ.....	7
3. 1.1. Общая характеристика газовой изоляции	7
4. Лекция 3. 1.2. Виды ионизации в газе	12
5. 1.2.1. Ударная ионизация	12
6. 1.2.2. Фотоионизация в объёме газа	12
7. 1.2.3. Термическая ионизация	12.
8. 1.2.4. Ионизация на поверхности электродов	13.
9. 1.2.5. Лавина электронов	14
10. Лекция 4. 1.3. Разряд в однородном поле. Закон ПАШЕНА	15
11. 1.3.1. Формирование разряда. Условие самостоятельности	15
12. Лекция 5. 1.3.2. Разрядное напряжение. Закон ПАШЕНА	18
13. 1.4. Разряд в неоднородном поле	19
14. 1.4.1. Слабонеоднородные и резконеоднородные поля	19
15. Лекция 6. 1.4.2. Условия самостоятельности разряда в слабонеодно- родном поле. Закон подобия разрядов	20
16. 1.4.3. Разряд в резконеоднородном поле. Влияние полярности	21
17. Лекция 7. 1.4.4. Барьеры в резконеоднородном поле	26
18. Лекция 8. 1.5. Молния	28
19. 1.5.1. Структура времени разряда	29
20. Лекция 9. 1.5.2. Вольт-секундные характеристики	31
21. Лекция 10. 2. Коронный разряд на линиях электропередачи	33
22. 2.1. Корона на проводах при постоянном напряжении	33
23. Лекция 11. 2.2. Корона на проводах при переменном напряжении	35
Литература	40

Лекция 1. Введение

В развитии электроэнергетики Российской Федерации важное место занимает применение высоких напряжений для передачи электрической энергии на большие расстояния. В настоящее время протяженность линий передачи, работающих при напряжениях 330—500 кВ, составляет 30 тыс. км, введена в строй опытно-промышленная электропередача 750 кВ, ведутся разработки электропередач переменного тока напряжением 1150 кВ и постоянного тока напряжением 1500 кВ. Использование высоких напряжений в электрических системах требует решения сложных научно-технических проблем, среди которых может быть выделен комплекс вопросов, касающихся электрической изоляции. Объединенный единством цели — обеспечить безаварийную работу изоляции всех элементов электрической системы — этот комплекс вопросов связан с изучением разнородных физических явлений. Рассматриваемая проблема, получившая название «Техника высоких напряжений в энергетике», предусматривает как изучение физических процессов в изоляции, так и изучение форм и величин напряжений, воздействующих на изоляцию в эксплуатации.

Изоляция электрических установок может быть разделена на внешнюю и внутреннюю изоляцию. К внешней изоляции относятся воздушные промежутки (например, между проводами линии электропередачи, между проводами и опорой) и части изоляционных конструкций, которые соприкасаются с воздухом. Внутренняя изоляция находится внутри корпуса трансформатора или аппарата, кабельной оболочки и т. д.; она состоит из комбинации различных жидких, твердых и газообразных диэлектриков.

Под влиянием больших напряженностей электрического поля, которые могут возникать в процессе эксплуатации, возможна частичная или полная потеря изоляцией ее диэлектрических свойств — пробой изоляции. Характер повреждения и его последствия различны для внешней и внутренней изоляции. После пробоя воздушного промежутка или перекрытия вдоль, поверхности изолятора и устранения причины пробоя электрическая прочность воздуха полностью восстанавливается. Нежелательные последствия пробоя воздуха — это возможность возникновения устойчивой дуги. На линиях электропередачи дуговое замыкание на землю или между проводами приводит к отключению линии на время, необходимое для восстановления изоляции. Следовательно, пробой воздушной изоляции связан с кратковременным перерывом электроснабжения, но не с повреждением изоляции. В противоположность этому нарушение электрической прочности внутренней изоляции представляет собой необратимый процесс, ведущий к выходу из строя дорогостоящей аппаратуры.

На протяжении всего срока службы изоляция находится под воздействием рабочего напряжения установки. В таблице приведена шкала номинальных напряжений, т. е. средних междуфазных рабочих напряжений. В процессе эксплуатации имеют место отклонения от номинального напряжения, обусловленные падением напряжения в элементах электрической системы. При этом наибольшие рабочие напряжения в системе не должны превосходить значений, указанных в таблице. Там же приведены величины наибольших фазных

напряжений, которые прикладываются к изоляции между токоведущими частями и землей.

Номинальные и наибольшие (максимальные) рабочие напряжения электрических систем

Наибольшее рабочее напряжение	U _{НОМ} , кВ											
	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
U _{РАБ.МАКС} , кВ	при изолированной нейтрали					при заземленной нейтрали						
	3,5	6,9	11,5	23	40,5	126	172	252	363	525	787,5	1200
$\frac{U_{Ф.МАКС}}{U_{РАБ.МАКС}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$, кВ	2,0	4,0	6,65	13,8	23,4	72,8	100	146	210	304	455	695

Примечание. Расчет рабочего напряжения производится по формуле $U_{РАБ.МАКС}=1,15U_{НОМ}$ для номинальных напряжений 3-220 кВ; $U_{РАБ.МАКС}=1,1U_{НОМ}$ для 330 кВ и $U_{РАБ.МАКС}=1,05U_{НОМ}$ для 500-1150 кВ.

Поскольку изоляция постоянно находится под рабочим напряжением, а также испытывает механические, термические и другие воздействия, она (за исключением воздушных промежутков) постепенно теряет свои первоначальные свойства, и ее электрическая прочность снижается — изоляция подвергается старению. Необходимо, чтобы в течение всего срока службы, на который рассчитана установка, так называемая длительная прочность изоляции не снизилась бы до величины наибольшего рабочего напряжения установки.

Однако требования к изоляции определяются не только рабочим напряжением. В процессе эксплуатации в электрических установках кратковременно возникают значительные повышения напряжения — так называемые перенапряжения.

Перенапряжения могут быть разделены на две группы:

грозовые перенапряжения, связанные с разрядами молнии в токоведущие части установки или в землю поблизости от нее; внутренние перенапряжения, возникающие в результате различных нормальных или аварийных коммутаций в системе.

Атмосферные перенапряжения возникают при поражении электрической установки грозовыми разрядами. Как показывает опыт, явление это довольно частое. С грозовым разрядом при отсутствии специальной защиты связано возникновение волн перенапряжений, достигающих нескольких миллионов вольт. Такие перенапряжения достаточны для перекрытия и повреждения изоляции установок любого номинального напряжения.

Атмосферные перенапряжения распространяются в электрической системе в форме волн и проникают во все элементы системы, в частности в аппаратуру и обмотки трансформаторов. Возникающие при этом переходные процессы приводят к резкому повышению напряжений, действующих на внутреннюю изоляцию трансформаторов и аппаратов. Поэтому защита от атмосферных перенапряжений является обязательным элементом надежной работы электрической системы. Уже в довоенные годы были разработаны основные технические мероприятия, способные обеспечить почти полную грозоупорность сетей. Однако с экономической точки зрения полная грозоупорность может быть целесообразной

только для систем высшего класса напряжения. В целях удешевления строительства сетей, а это в настоящее время является основной задачей, внедряются экономичные конструкции линий, обладающие сниженными показателями в отношении грозоупорности, удешевляются трансформаторы и аппаратура путем снижения уровней изоляции. Все эти мероприятия ставят перед техникой защиты от перенапряжений наиболее трудную задачу — путем улучшения характеристик защитного оборудования обеспечить достаточно надежную работу сетей в новых условиях.

Внутренние перенапряжения возникают при переключениях в сети, при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, а также при резонансных явлениях, возникающих на длинных линиях в несимметричных режимах. Внутренние перенапряжения, которые существенно зависят от характеристик оборудования, в первую очередь выключателей, и схем сети, имеют обычно амплитуды в пределах 2,5—3,5 фазного напряжения сети. Изоляция электрических установок рассчитывается на воздействие внутренних перенапряжений. По мере роста рабочего напряжения сетей, когда изоляция становится основным фактором, влияющим на экономичность электропередач, проблема ограничения внутренних перенапряжений становится все более актуальной. Согласование уровней изоляции электрических установок с воздействующими перенапряжениями, которые в свою очередь зависят от характеристик защитных аппаратов и условия развития перенапряжений в заданной системе, носит название координации изоляции. Чем шире наши знания в области техники высоких напряжений, тем более обоснована координация изоляции, а, следовательно, тем экономичнее могут быть выполнены линии и подстанции. Координация изоляции тесно связана с режимом нейтрали системы. Системы с изолированной нейтралью требуют при прочих равных условиях существенно более высокого уровня изоляции, что связано с возможностью длительного повышения напряжения на фазах до линейного напряжения сети. Поэтому в России сети напряжением 110 кВ и выше имеют глухозаземленную нейтраль. В этих системах основным видом внутренних перенапряжений являются кратковременные коммутационные перенапряжения, связанные с отключением и включением участков сети, в основном линий и трансформаторов. По мере того как добиваются снижения амплитуд коммутационных перенапряжений, все большую роль в координации изоляции начинают играть повышения напряжения рабочей частоты в системе. Эти повышения ограничиваются с помощью системной автоматики в первую очередь автоматическим регулированием возбуждения генераторов и схемными мероприятиями.

Лекция 2.

1. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

1.1. Общая характеристика газовой изоляции

Воздух или другие газы в той или иной степени всегда присутствуют в любой изоляционной конструкции. Шины распределительных устройств, провода линий электропередачи, выводы высокого напряжения трансформаторов и других аппаратов изолированы друг от друга воздушными промежутками, в которых воздух играет роль единственного изолирующего вещества. Опорные изоляторы подстанций, подвесные изоляторы линий электропередачи и другие изоляционные конструкции находятся в воздушной среде. Нарушение электрической прочности изоляторов и изоляционных конструкций может произойти путем пробоя твердого диэлектрика, из которого изготовлен изолятор, или путем развития разряда в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика. Так как пробой диэлектрика приводит к полному выходу изолятора из строя, а перекрытие по поверхности в большинстве случаев не приносит изолятору существенного вреда, напряжение пробоя изолятора всегда стараются сделать больше напряжения перекрытия по поверхности. Таким образом, фактическая электрическая прочность очень многих изоляционных конструкций определяется электрической прочностью воздуха, знание которой приобретает принципиально важное значение.

Но воздух или другой газ имеют значение не только естественной газовой среды, в которой находятся изоляционные конструкции, как это было в приведенных выше примерах. Газ может использоваться также в качестве одного из основных изоляционных материалов в кабелях, конденсаторах и других электрических аппаратах.

Основным недостатком, газовой изоляции является ее недостаточная электрическая прочность. Например, слой воздуха толщиной $0,5\text{ см}$ выдерживает напряжение порядка 17 кВ , а слой чистого трансформаторного масла той же толщины около 150 кВ . Поэтому целесообразность применения газовой изоляции тесно связана с возможностью увеличения ее электрической прочности.

Электрическая прочность газа увеличивается при повышении давления от атмосферного до более высоких. Например, тот же слой воздуха толщиной $0,5\text{ см}$ при давлении 15 ат будет иметь прочность около 190 кВ , т. е. больше, чем у трансформаторного масла. С другой стороны, известно, что прочность воздуха сильно возрастает и при глубоком вакууме. В промышленной изоляции глубокий вакуум в сочетании с другими изоляционными материалами, которые, соприкасаясь с вакуумом, выделяют газы и тем самым приводят к постепенному увеличению давления и уменьшению прочности изоляции. В таких конструкциях вакуум практически невозможно поддерживать и в промышленной изоляции для увеличения электрической прочности преимущественно применяют повышенные давления, а не глубокий

вакуум.

Газ, применяемый в качестве изоляции, должен удовлетворять следующим основным требованиям.

Газ должен быть химически инертным и не вступать в реакции с диэлектриками, в комбинации с которыми он применяется, и с другими материалами, использованными в конструкции аппарата.

При ионизации газа, которая в какой-то степени всегда возможна в аппаратах высокого напряжения, также не должно выделяться химически активных веществ.

Газ должен обладать низкой температурой сжижения, так как в противном случае его нельзя будет применять при повышенных давлениях (при увеличении давления температура, при которой газ превращается в жидкость, возрастает).

Газ должен обладать, возможно, большей электрической прочностью и высокой теплопроводностью. Последнее особенно важно в тех случаях, когда газ одновременно является и изолирующей и охлаждающей средой.

Стоимость газа должна быть достаточно низкой, чтобы сделать его применение экономически оправданным.

Воздух имеет большое преимущество с точки зрения предельно низкой стоимости, поэтому при повышенных давлениях нашел некоторое применение в конденсаторах, кабелях и др. Но он не удовлетворяет второму требованию, так как ионизация воздуха сопровождается выделением озона, окиси и закиси азота, вызывающих интенсивную коррозию всех металлических частей аппарата и окисление органической изоляции, приводящее к постепенному ухудшению ее изолирующих свойств. Поэтому вместо воздуха чаще применяют азот, который имеет такую же электрическую прочность, невысокую стоимость и является инертным газом.

Для того чтобы электрическая прочность воздуха или азота сделалась соизмеримой с прочностью твердых или жидких диэлектриков, таких как масло, слюда, фарфор и т. д., давление в этих газах необходимо поднимать до 10—15 ат. Применение столь высоких давлений, естественно, утяжеляет, всю конструкцию и создает серьезные затруднения в эксплуатации. Поэтому в последнее время серьезное внимание уделяется различным газам, имеющим электрическую прочность, значительно большую, чем у воздуха и азота. Некоторые из этих газов приведены в табл. 1

Таблица 1

Относительная электрическая прочность некоторых газов

Газ	Химический состав	Электрическая проч-ность по отношению к воздуху	Температура сжижения, град
Воздух	—	1,0	
Водород	H ₂	0.6	
Азот	N ₂	1.0	

Элегаз (гексафторид серы)	SF ₆	2.5	-62
Фреон (дихлордифторметан)	CCl ₂ F ₂	2.5	-30
Трихлорфторметан	CCl ₃ F	4.5	+49
Тетрахлорметан	CCl ₄	6.3	+76

Наиболее широко применяются в качестве изолирующей среды два газа: фреон и элегаз, имеющие приблизительно одинаковую электрическую прочность. Оба эти газа химически инертны, но при ионизации выделяют некоторое количество химических веществ, вызывающих коррозию. Преимуществом элегаза является его более низкая температура сжижения, позволяющая использовать его при давлениях до 20 ат, в то время как фреон можно сжимать только до 6 ат. Но даже при давлении в 3 ат, применение которого не вызывает существенных технических трудностей, напряжение, выдерживаемое слоем фреона или элегаза толщиной 0,5 см, достигает 140 кВ, т. е. имеет тот же порядок, что и для трансформаторного масла.

Общим недостатком этих двух газов является их большая стоимость, которая, однако, существенно снижается при массовом изготовлении.

Идеальный газ состоящий только из нейтральных молекул, абсолютно не проводит электрического тока. В реальных газах за счет различных внешних воздействий (ультрафиолетовое излучение солнца, радиоактивное излучение почвы, космические лучи и т. д.) всегда имеется некоторое количество ионов и электронов, сообщающих газу определенную проводимость.

Весьма существенна также следующая особенность прохождения тока через газ. При напряжениях меньше разрядного, непременным условием прохождения тока является наличие внешнего ионизатора, непрерывно создающего электроны и ионы в межэлектродном пространстве. Если этот внешний ионизатор убрать, ток в промежутке немедленно прекращается, прекращается и ионизация под действием сил электрического поля. Процесс является несамостоятельным, т.е. он не может поддерживаться только за счет внутренних ресурсов самого промежутка. При напряжении, равном разрядному, процесс приобретает самостоятельный характер, т. е. он больше не нуждается в помощи внешнего ионизатора. Поэтому часто говорят, что условием пробоя промежутка является условие превращения разряда в самостоятельный.

Как известно, высокую проводимость газ может приобретать только в особом состоянии, называемом плазмой, когда значительная часть молекул газа ионизирована, причем проводимость плазмы возрастает по мере увеличения числа ионов, содержащихся в единице объема. Количество положительных и отрицательных зарядов в единице объема плазмы практически одинаково, причем носителями положительных зарядов являются ионы, а носителями отрицательных зарядов — ионы и электроны.

Содержащиеся в плазме электроны собственно и обеспечивают ее

проводимость, природа которой, таким образом, весьма сходна с природой проводимости металлов. Существенное различие между газом в состоянии плазмы и металлическим проводником заключается в том, что в плазме заряды разных знаков все время рекомбинируют друг с другом, следовательно, в объеме, заполненном плазмой, непрерывно должен идти процесс ионизации, поддерживающий плотность зарядов на неизменном уровне. В противном случае газ постепенно вернется к своему нормальному нейтральному состоянию. Одним из основных механизмов ионизации в плазме является термическая, ионизация, осуществляемая благодаря ее высокой температуре, которая достигается за счет непрерывных столкновений электронов, двигающихся под действием поля, с молекулами и ионами плазмы. Чем больше число двигающихся электронов, т. е. чем больше проходящий через плазму ток, тем выше ее температура, а следовательно, и проводимость.

Таким образом, разряд в газе сопровождается переходом в состояние плазмы всего пространства между электродами или его части. Устанавливающийся при этом в промежутке режим может приобретать различные качества в зависимости от конфигурации электрического поля, мощности источника и давления газа. Можно назвать следующие основные виды разряда.

Тлеющий разряд возникает в промежутке при малых давлениях газа, когда плазма даже при высокой степени ионизации не может приобрести большую проводимость из-за недостаточного числа молекул газа в единице объема. Поэтому абсолютная величина тока, проходящего в газе, не может быть очень большой, невелико также и взаимодействие между отдельными ионами, находящимися в промежутке. Тлеющий разряд обычно занимает все пространство между электродами. Характерным примером является тлеющий разряд, используемый в газосветных трубках, лампах дневного света и др.

Искровой разряд образуется в промежутке при достаточно больших давлениях газа p и расстояниях между электродами s ($ps > 1000 \text{ см} \cdot \text{мм рт. ст.}$) в случае, если мощность источника питания невелика или если напряжение приложено к промежутку на очень короткое время. При больших давлениях газа разряд уже не занимает всего поперечного сечения промежутка, а развивается в виде узкого канала. Концентрация ионов в плазме, заполняющей этот узкий канал, может достигать больших величин, поэтому по каналу мог бы проходить значительный ток, однако его величина ограничивается мощностью источника. Благодаря этому интенсивность термической ионизации в канале может оказаться недостаточной для поддержания его проводимости и канал разряда распадается. Это, например, имеет место при переменном напряжении, когда разряд в газовом промежутке происходит в виде перемежающихся искр, последовательно возникающих между электродами.

Дуговой разряд является последующей стадией искрового разряда при большой мощности источника. В этом случае через промежуток может проходить большой ток, который способствует разогреву канала, возрастанию

его проводимости, а, следовательно, дальнейшему увеличению тока, В конце концов, будет достигнуто состояние равновесия, когда тепловые потери из канала прекратят дальнейшее повышение температуры. Этот процесс длительный, вследствие чего искровой разряд не переходит в дуговой в случае приложения напряжения на очень короткое время. Канал дугового разряда характеризуется, следовательно, высокими температурами и значительной степенью ионизации газа.

Коронный разряд является своеобразной формой разряда, характерной для резко неоднородных полей, когда ионизация возникает только в небольшой области вблизи электрода. При этом между электродами промежутка не возникает сквозного проводящего канала, что исключает возможность прохождения большого тока независимо от давления газа и мощности источника. Таким образом, образование коронного разряда не означает полной потери газовым промежутком изолирующих свойств, однако в изоляционных конструкциях образование коронного разряда является нежелательным.

Лекция 3.

1.2. Виды ионизации в газе

1.2.1. Ударная ионизация

Если какая-либо частица с массой m (электрон, ион или нейтральная молекула), летящая со скоростью v , столкнется с нейтральным атомом или молекулой, то кинетическая энергия летящей частицы может быть затрачена на совершение акта ионизации, если выполнено неравенство

$$\frac{mv^2}{2} \geq W_{\text{и}} \quad (1), \text{ где}$$

$W_{\text{и}}$ – энергия ионизации;

1.2.2. Фотоионизация в объеме газа

Вторым важным источником образования свободных электронов является фотоионизация, т. е. ионизация газа под действием коротковолнового излучения. Для того чтобы воздействие на газ излучения

с частотой ν (длиной волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$, c — скорость света) привело к ионизации газа, необходимо выполнить условие

$$h\nu \geq W_{\text{и}} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{ch}{W_{\text{и}}} \quad (2), \text{ где}$$

$h=6.5 \cdot 10^{-27}$ эрг.сек – квантовая постоянная

Мощным источником фотоионизации является газовый разряд. Переход возбужденных молекул и ионов в нормальное состояние, процесс рекомбинации, приводят к появлению большого количества фотонов, значительная часть которых обладает энергией, превышающей энергию ионизации газа.

1.2.3. Термическая ионизация

Под термической ионизацией понимаются все процессы ионизации, обусловленные тепловым состоянием газа. При высокой температуре имеются следующие возможности ионизации:

- а) ионизация при соударениях между молекулами газа, которые при высоких температурах двигаются с большими скоростями;
- б) фотоионизация за счет теплового излучения нагретого газа;
- в) ионизация при соударениях молекул с электронами, образовавшимися в результате первых двух процессов.

1.2.4.Ионизация на поверхности электродов

До сих пор мы связывали появление в газе свободных электронов и ионов с процессами объемной ионизации, т. е. с ионизацией самого газа находящегося в пространстве между электродами. Между тем электроны в газе могут появляться и путем эмиссии с катода. Освобождение электрона из толщи металла также требует совершения определенной работы, называемой энергия выхода, которая у разных металлов различна и зависит от состояния их поверхности. В табл.3 приведены значения энергии выхода для некоторых чистых металлов и окислов.

Энергия, необходимая электрону для выхода из металла, может сообщаться ему различными способами.

Таблица 3

Энергия выхода электронов из различных металлов

Металл	Энергия выхода, эВ
Алюминий	1,8
Медь	3,9
Окись меди	5,34
Железо	3,9
Серебро	3,1
Платина	3,6
Окись бария	1,0

Нагреванием катода, которое сопровождается увеличением скорости электронов. Если при этом кинетическая энергия электрона превысит энергию выхода, он может перескочить через потенциальный барьер и покинуть пределы электрода (термоэлектронная эмиссия).

Бомбардировкой поверхности металла какими-либо частицами (например, положительными ионами), обладающими достаточной энергией.

Облучением поверхности металла коротковолновым излучением, обладающим достаточно малой длиной волны (фотоэффект).

Наложением сильного внешнего поля (холодная эмиссия).

Первый способ поверхностной ионизации имеет решающее значение в электронных приборах, в которых катод нагревается специально для освобождения большого числа электронов. В изоляционных конструкциях в начальных стадиях разряда этот процесс не имеет места, но в дуговом разряде в месте соприкосновения с дугой катод нагревается до температуры в несколько тысяч градусов и термоэлектронная эмиссия приобретает важное значение снабжения канала дуги свободными электронами.

Для осуществления поверхностной ионизации внешнее поле должно иметь очень большую величину порядка 1 000 кВ/см, что в промышленных изоляционных конструкциях бывает крайне редко. Поэтому в газовых промежутках, с которыми приходится иметь дело в технике высоких напряжений, основное значение имеет бомбардировка поверхности металла частицами и облучение ее коротковолновым излучением. При этом следует

иметь в виду, что наличие внешнего поля, напряженность которого недостаточна для осуществления холодной эмиссии, несколько уменьшает энергию выхода электрона из металла и тем самым способствует осуществлению других видов ионизации на поверхности.

1.2.5. Лавина электронов

Рассмотрим газовый промежуток между двумя электродами и допустим, что вблизи катода этого промежутка появился один электрон. Если напряженность поля у катода достаточно велика, то, летя к аноду, электрон будет осуществлять ударную ионизацию. Первое ионизирующее столкновение с молекулой газа приведет к образованию еще одного электрона, который также будет ионизировать. Поэтому при следующем ионизирующем столкновении число электронов увеличится до четырех, затем до восьми и далее будет расти в геометрической прогрессии. Такой постепенно усиливающийся поток электронов получил название лавины. Двигающиеся электроны оставляют позади себя положительные ионы, которые перемещаются к катоду приблизительно в 100 раз медленнее, чем электроны летят к аноду (при разрядных напряженностях поля скорость электронов при атмосферном давлении имеет порядок $2 \cdot 10^7$ см/сек, а скорость положительных ионов около $2 \cdot 10^5$ см/сек).

1.3.Разряд в однородном поле. Закон ПАШЕНА.

1.3.1. Формирование разряда. Условие самостоятельности

Возникновение лавины и даже пересечение ею всего расстояния между электродами еще не означает пробоя промежутка и превращения разряда в самостоятельный. Действительно, канал лавины заполнен положительными ионами и, хотя движение этих ионов к катоду и создает в промежутке ток, этот ток прекращается после ухода на катод всех ионов. Для возобновления ионизации необходимо образование нового электрона, и если этот новый электрон может быть создан только внешним ионизатором, разряд остается несамостоятельным и сопровождается прохождением в промежутке отдельных импульсов тока, частота повторения которых зависит только от интенсивности внешнего ионизатора.

Для превращения разряда в самостоятельный необходимо образование новых электронов (их обычно называют вторичными) за счет процессов, происходящих в самом промежутке, и еще до того, как первая лавина полностью прекратила свое существование. Развитие первой лавины создает для этого благоприятные условия. Вторичные электроны могут создаваться под действием:

- а) бомбардировки катода созданными лавиной положительными ионами;
- б) фотоионизации на катоде, осуществляемой излучением начальной лавины;
- в) фотоионизации в объеме за счет излучения начальной лавины.

При различных давлениях газа удельный вес этих процессов будет различным. Ионизация на поверхности катода положительными ионами происходит довольно интенсивно. В среднем один электрон выбивается с поверхности после удара нескольких десятков ионов. Но при атмосферном давлении этот процесс является весьма медленным. Так как большая часть ионов сосредоточена в головке лавины, для осуществления ионизации на катоде они должны пересечь практически весь промежуток между электродами. Даже при небольшом расстоянии между электродами $s = 1$ см, на это требуется время порядка 5 мксек. При уменьшении давления скорость ионов пропорционально, увеличивается (если напряженность поля сохраняется неизменной) и поэтому для ионизации на катоде требуется меньшее время. Фотоионизация на катоде для своего развития не требует такого большого времени, так как фотоны распространяются со скоростью света.

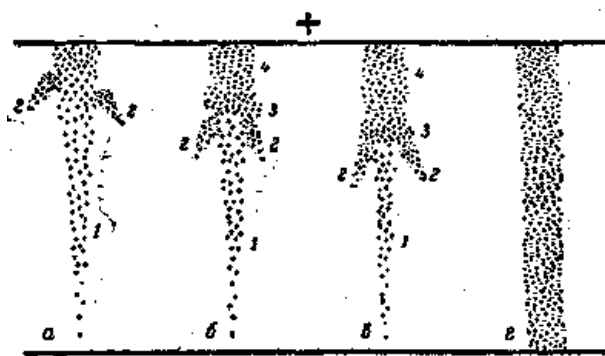


Рис.1. Возникновение и развитие анодного стримера.
1 — начальная лавина; 2 — вторичные лавины; 3 — скопление положительных зарядов на головке стримера; 4 — анодный стример.

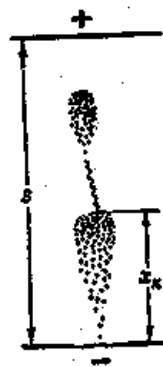


Рис.2. Развитие разряда в однородном поле при напряжении выше начального.

Образованные этими фотонами вторичные электроны дадут начало новым лавинам, электроны которых будут притягиваться объемным положительным зарядом, расположенным в головке начальной лавины (рис.1,а). В пространстве, заполненном объемными зарядами, средняя напряженность поля невелика, поэтому большое количество проникших туда электронов превращается в отрицательные ионы, и в месте расположения положительного объемного заряда образуется канал, заполненный плазмой— так называемый стример (рис1,б).

Канал стримера является проводящим, плазма обладает тем большей проводимостью, чем больше ионов содержится в единице ее объема), поэтому на его конце создается повышенная напряженность поля. Между тем продолжающаяся фотоионизация в объеме приводит к образованию все новых лавин, которые двигаются в направлении наиболее сильного поля, т. е. к головке стримера. Электроны этих лавин уходят в канал стримера, а ионы создают вблизи его головки объемный положительный заряд, который притягивает последующие лавины, превращающие его в плазму (рис.1,б и в). Таким образом, канал стримера постепенно удлиняется, прорастая к катоду, причем этот процесс идет со все возрастающей скоростью, так как напряженность поля на головке стримера по мере его продвижения в глубь промежутка непрерывно увеличивается. После пересечения стримером всего пространства между электродами пробой можно считать завершенным, так как в промежутке образовался сквозной проводящий канал, заполненный плазмой (рис.1,г).

Если напряженность поля между электродами увеличить, то достаточное для возникновения фотоионизации в объеме искажение поля наступает еще до того, как начальная лавина пересечет весь промежуток между электродами ($X_K < S$). В этом случае вторичные электроны возникают не только позади головки начальной лавины, но и перед ней (рис.2). В промежутке одновременно развивается несколько лавин, каждая из которых должна пройти только часть расстояния между электродами, поэтому время развития разряда существенно уменьшается.

Очевидно, что при минимальном напряжении, при котором еще возможен пробой промежутка, начальная лавина успевает пересечь все пространство между электродами. Для того чтобы при этом возникла достаточно интенсивная фотоионизация в объеме, необходима определенная степень искажения внешнего поля, т. е. определенная величина заряда начальной лавины. Заряд начальной лавины пропорционален числу электронов в ее головке, т. е. величине $e^{\alpha S}$. Поэтому условие образования стримера, а следовательно, и условие пробоя в однородном поле можно записать следующим образом:

$$e^{\alpha S} = const$$

Лекция 5.

1.3.2. Разрядное напряжение. Закон ПАШЕНА

Для определения разрядного напряжения используем полученное условие самостоятельности разряда, $\alpha S = \ln \frac{1}{\gamma}$ аналитическое выражение для коэффициента объемной ионизации электронами $\alpha = A p e^{-\frac{B p}{E}}$ и связь между электронами $E = \frac{U}{s}$. Из этих трёх соотношений нетрудно получить:

$$A p s e^{-\frac{B p s}{U}} = \ln \frac{1}{\gamma}$$

или

$$U_0 = \frac{B p s}{\left(\frac{A p s}{\ln \frac{1}{\gamma}} \right)} \quad (5)$$

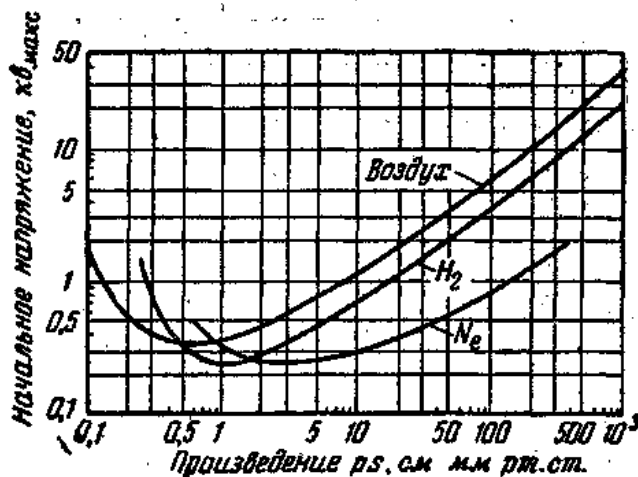


Рис. 3 Зависимость разрядного напряжения, в однородном поле от произведения ps для некоторых газов.

Полученное выражение имеет принципиально важное значение. Прежде всего следует отметить, что давление и расстояние входят в (5) только в виде произведения. Это обстоятельство является математическим выражением установленного экспериментально закона Пашена, который гласит:

При неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления газа на расстояние между электродами.

В общем виде закон Пашена может быть записан следующим образом:

$$U_0 = f(ps) \quad (6)$$

Опытные зависимости разрядного напряжения от ps для различных газов приведены на рис. 3. Как видно, при уменьшении ps разрядное напряжение сначала уменьшается, проходит через минимум, а затем снова возрастает. Для воздуха минимум наступает при $(ps)_0 = 0,57$ см·мм рт. ст., что при расстоянии $s = 1$ см соответствует давлению 0,57 мм рт. ст., т. е. значительно ниже атмосферного. При

таких низких давлениях, как указывалось выше, основную роль играют процессы на катоде, и постоянные формулы 5 имеют следующие приближенные значения

$$A = 14,6 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт.см}}, B = 365 \frac{v}{\text{см} \cdot \text{мм} \cdot \text{рт.см}}, \ln \frac{1}{\gamma} \approx 4.$$

1.4.Разряж в неоднородном поле

1.4.1.Слабонеоднородные и резконеоднородные поля

Характерной особенностью неоднородного поля является неравномерное распределение напряженности в пространстве между электродами. Если электроды имеют одинаковую форму, то на поверхности электродов напряженность, поля имеет максимальное значение, а в середине промежутка — минимальное. При разной форме электродов наибольшую величину напряженность поля имеет на поверхности электрода с меньшим радиусом кривизны, а область минимальной напряженности смещается, к противоположному электроду.

Степень неоднородности поля можно характеризовать отношением максимальной напряженности поля E_m к средней $E_{cp} = \frac{U}{s}$. Для однородного поля коэффициент $k = \frac{E_m}{E_{cp}}$ равен единице, а в неоднородных полях он увеличивается при увеличении расстояния между электродами и уменьшении их радиуса кривизны.

В промежутке с неоднородным полем возможны три основных случая возникновения самостоятельного разряда:

1. Начальная лавина пересекает весь промежуток и после этого образуется анодный стример (как в однородном поле). Такие условия имеют место, например, в промежутке между двумя шарами при $s < D/2$ и в цилиндрическом конденсаторе при $s < r$.

2. Начальная лавина пересекает только часть промежутка, но после образования стримера напряженность поля в оставшейся непробитой части промежутка обеспечивает распространение этого стримера вплоть до противоположного электрода.

3. Начальная лавина пересекает незначительную часть всего промежутка, и образовавшиеся стримеры не могут распространиться до противоположного электрода. Самостоятельный разряд, который охватывает только часть промежутка, прилегающую к электроду с малым радиусом кривизны, называется коронным разрядом. Поскольку часть пространства остается неионизированной, между электродами не возникает сплошной проводящий путь и ток в промежутке не может достигнуть таких больших величин, как при полном пробое. Для осуществления полного пробоя промежутка в этом случае необходимо напряжение между электродами поднять значительно выше напряжения зажигания самостоятельного разряда.

Поля, соответствующие первым двум случаям разряда, принято называть

слабо неоднородными. В слабо неоднородных полях корона не возникает и выполнение условий самостоятельности разряда всегда приводит к полному пробое промежутка. Третий случай соответствует резко неоднородным полям, в которых пробивное напряжение может быть значительно больше напряжения появления короны, и сильно сказывается влияние полярности электродов.

Установить четкую границу между этими двумя видами неоднородных полей трудно. Можно принять, что для слабонеоднородных полей коэффициент неоднородности $k < 2$, а характерные особенности развития разряда в резко неоднородных полях начинают четко проявляться при $k > 4$.

Лекция 6.

1.4.2. Условие самостоятельности разряда в слабо неоднородном поле. Закон подобия разрядов.

В слабонеоднородных полях возникновение стримера обеспечивает полный пробой промежутка. Поэтому условие образования стримера (условие самостоятельности), так же как и в однородном поле, одновременно является и условием пробоя. Так как в неоднородном поле коэффициент ударной ионизации α изменяется вдоль силовых линий, то условием самостоятельности разряда будет:

$$\int_1^2 \alpha dx = const, \quad (6)$$

где интегрирование ведется вдоль наиболее короткой силовой линии от одного электрода до другого,

Получить для неоднородного поля аналитическую формулу разрядного напряжения можно только в немногих частных случаях, поэтому ограничимся установлением общей закономерности, являющейся обобщением закона Пашена для случая неоднородного поля. Эта зависимость носит название закона подобия разрядов и может быть сформулирована следующим образом:

В слабонеоднородном поле разрядное напряжение является функцией произведения относительной плотности воздуха на расстояние между электродами (или другой геометрический размер) и отношения к расстоянию (или к этому геометрическому размеру) всех остальных определяющих геометрических размеров промежутка:

$$U_0 = f\left(\delta s, \frac{r_1}{s}, \frac{r_2}{s}, \dots\right) \quad (7)$$

Если, изменяя расстояние между электродами, одновременно изменять и размеры самих электродов таким образом, чтобы отношение основных размеров, определяющих конфигурацию поля, оставалось постоянным, т. е. использовать геометрически подобные промежутки, то разрядное напряжение будет функцией только δs . Следовательно, если в геометрически подобных промежутках при неизменной температуре изменять давление обратно пропорционально изменению геометрических размеров, то разрядное напряжение останется постоянным. Закон подобия разрядов показывает, что, как и в однородном поле, эффективным средством увеличения электрической прочности промежутка со слабонеоднородным

полем является повышение давления газа.

1.4.3. Разряд в резко неоднородном поле. Влияние полярности

В однородных полях при напряжении меньше разрядной ионизация в промежутке практически отсутствует.

Начальная лавина в однородном поле развивается практически при отсутствии объемного заряда. Приблизительно такие же условия имеют место и в слабо неоднородном поле. В резко неоднородных полях условия развития разряда совершенно другие.

Рассмотрим промежуток острие (стержень) — плоскость, являющийся характерным примером резко неоднородного поля. Предварительная ионизация в этом промежутке будет развиваться в области наиболее сильного поля, т. е. у стержня, а искажения поля создаваемыми при этом объемными зарядами будут различными при положительной и отрицательной полярностях стержня.

При положительной полярности стержня (рис. 4,а) образовавшийся в промежутке электрон, двигаясь к стержню и попадая в область

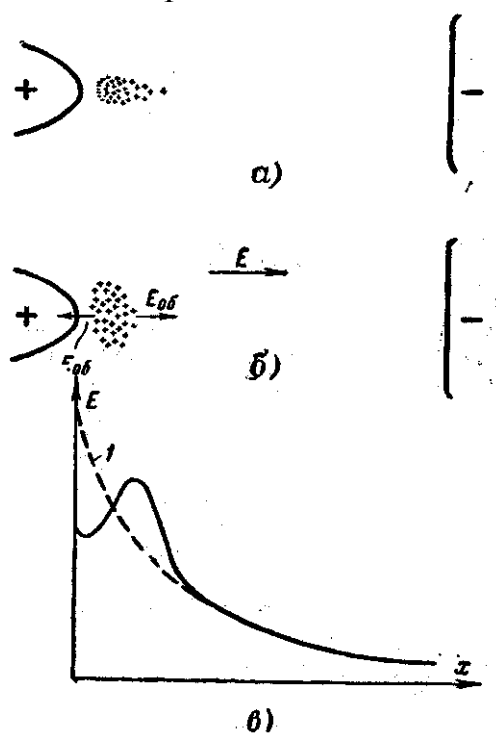


Рис. 4 Искривление напряженности поля в промежутке положительный стержень — плоскость в стадии несамостоятельного разряда.

сильного поля, начинает ионизировать и образует лавину электронов. Если напряжение между электродами возрастает медленно, то еще до образования короны (до выполнения условия самостоятельности разряда) в промежутке может образоваться достаточно большое число таких лавин. Когда каждая из этих лавин доходит до стержня, электроны лавины уходят на электрод, а положительные ионы остаются в пространстве, медленно перемещаясь к противоположному электроду. Таким образом, вблизи стержня создается положительный объемный заряд, как это показано на рис. 4 б, где направление напряженности внешнего поля E и поля объемных зарядов $E_{об}$ показано стрелками. Присутствие положительного объемного заряда уменьшает поле вблизи стержня и несколько усиливает его во внешнем

пространстве (рис. 4, в). Поэтому

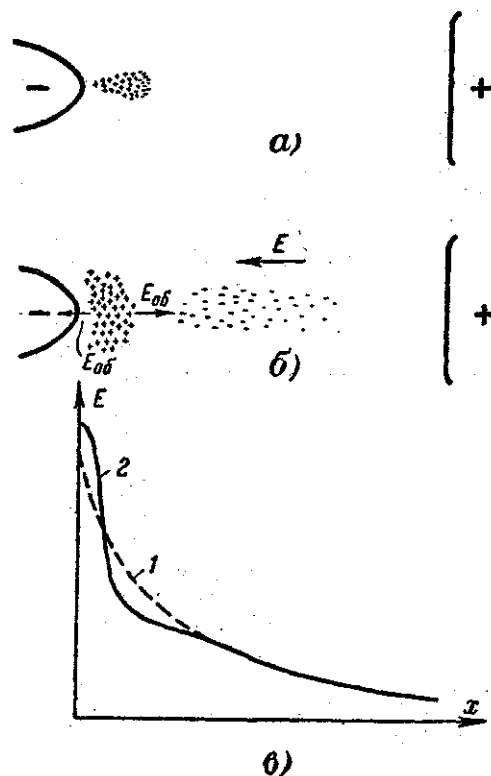


Рис 5. Искажение напряженности поля в промежутке отрицательный стержень — плоскость в стадии несамостоятельного разряда.

дальнейшая ионизация вблизи стержня ослабляется, а это затрудняет выполнение условия самостоятельности разряда, т. е. образование короны,

При отрицательной полярности стержня (рис.5, а) образованные на поверхности катода электроны сразу попадают в сильное поле и образуют лавины,двигающиеся к плоскости. Когда электроны лавин выходят из области сильного поля, они перестают осуществлять ионизацию и с постепенно уменьшающейся скоростью летят к аноду. Часть из них долетает до анода и там нейтрализуется, а другая часть захватывается атомами кислорода с образованием отрицательных ионов, после чего скорость перемещения отрицательных зарядов к аноду резко уменьшается. Положительные ионы лавин постепенно уходят на стержень, но так как скорость их относительно мала, в непосредственной близости от стержня всегда имеется положительный объемный заряд. Таким образом вблизи стержня имеется весьма компактный положительный объемный заряд, а в глубине промежутка — рассеянный отрицательный заряд. В силу своей малой плотности объемный отрицательный заряд не оказывает существенного влияния на внешнее поле, а положительный объемный заряд искажает его так как показано на рис. 5в кривая 2. Напряженность поля вблизи стержня возрастает, и выполнение условий самостоятельности разряда облегчается.

Из сделанного анализа следует что напряжение возникновения короны в промежутке стержень - плоскость при положительной полярности стержня должно быть выше, чем при отрицательной, что полностью подтверждается результатами непосредственных наблюдений. Для выяснения влияния полярности на разрядные напряжения не обходимо рассмотреть дальнейший стадии разряда.

Если стержень положительный напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина справа от объемного заряда (рис. 6, а), электроны которой смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала анодного стримера, заполненный плазмой (рис. 6, б). Заряды плазмы стримера находятся в электрическом поле, поэтому они будут распределяться неравномерно и на головке стримера будет располагаться некоторый избыточный положительный заряд. Этот заряд частично компенсирует поле в канале самого стримера и создает повышенную напряженность на его головке, как показано кривой 2 на рис. 6, г. Наличие области сильного поля перед головкой обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера,

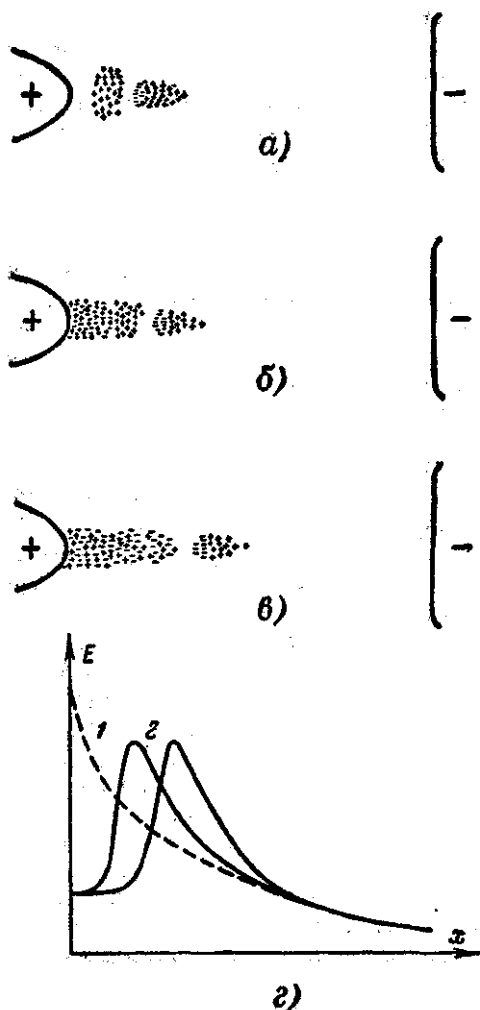


Рис. 6. Образование анодного стримера в промежутке положительный стержень — плоскость.

а ионы создают показанный на рис. 6, б положительный объемный заряд, приводящий к дальнейшему усилению поля перед головкой стримера. Вновь образованные лавины превращают этот объемный заряд в продолжение канала стримера, который, таким образом, постепенно удлиняется, прорастая к аноду (рис. 6, в).

В зависимости от степени неоднородности поля и напряжения между электродами напряженность поля на головке стримера по мере его удлинения может расти или падать. В первом случае обеспечено распространение стримера до противоположного электрода, т. е. полный пробой промежутка; во втором случае развитие стримера после достижения определенной длины прекращается, т. е. будет иметь место коронный разряд.

При отрицательной полярности стержня образование стримера вблизи стержня (в этом случае он называется катодным стримером) оказывается сильно затрудненным. Сильное поле непосредственно около стержня приводит к образованию большого числа лавин, распространяющихся по направлению к окружающему стержень положительному объемному заряду. Именно в силу большого числа одновременно развивающихся лавин не возникает условий для образования заполненного плазмой узкого канала, а создается более или менее однородный плазменный слой, как показано на рис. 7, а. Этот слой играет роль как бы экрана с гораздо большим радиусом кривизны, чем стержень, и благодаря его возникновению напряженность поля изменяется приблизительно так, как показано на рис. 7, г (кривая 2). При дальнейшем возрастании напряжения ионизация длительное время продолжает происходить только в пространстве между стержнем и плазменным слоем, который постепенно увеличивается в объеме и несколько вытягивается в сторону противоположного электрода. Напряженность поля на внешней поверхности плазменного слоя постепенно растет и при дальнейшем возрастании напряжения возникают лавины электронов справа от этого слоя (рис. 7, б), Положительные заряды этих лавин, вызывают дальнейшее возрастание напряженности на границе плазменного слоя, благодаря чему появляется большое число новых лавин, слияние которых приводит к удлинению плазменного слоя по направлению к аноду и превращению его в стример. Однако, так же как и в начале про

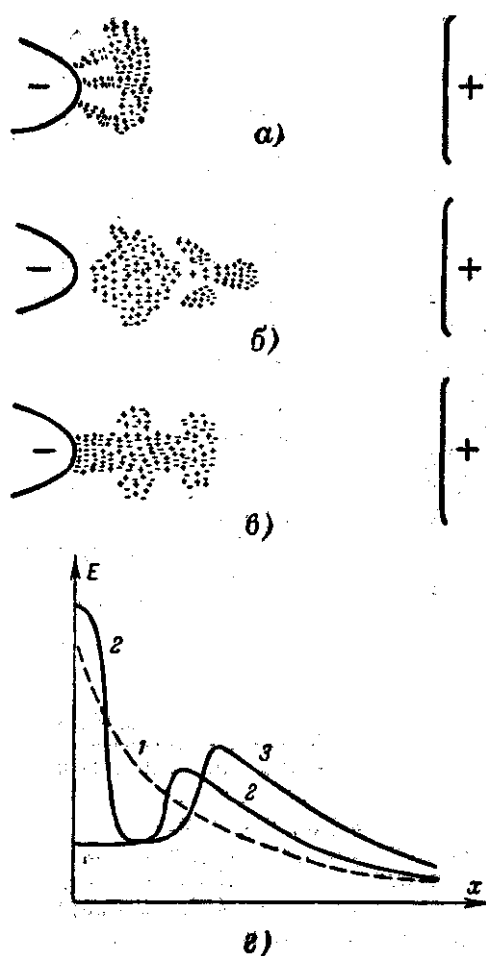


Рис. 7 Образование катодного стримера в промежутке отрицательный стержень - плоскость.

цесса, благодаря большому числу возникающих лавин головка стримера

оказывается размытой (рис. 7, г) и возрастание напряженности поля на головке оказывается гораздо меньшим, чем при положительном стержне (рис.7, г, кривая 3).

В силу рассмотренных выше особенностей развитие стримера при отрицательном стержне происходит с гораздо большими трудностями, поэтому и разрядное напряжение при отрицательном стержне значительно выше, чем при положительном (в 2-2,5 раза).

При обеих полярностях стержня пересечение стримером всего промежутка между электродами обеспечивает полный пробой, но не является последней стадией разряда. Канал стримера является проводящим и напряженность поля в канале относительно невелика. Поэтому стример служит как бы продолжением стержня и его головка имеет потенциал, близкий к потенциалу стержня (но, конечно, меньше на величину падения напряжения в канале). Когда расстояние между головкой стримера и плоскостью делается очень малым, напряженность поля в еще непробитой части промежутка сильно возрастает, возникает весьма интенсивная ионизация, превращающая этот промежуток в плазму с очень высокой плотностью ионов, гораздо большей, чем в канале стримера. Распределение поля в промежутке в этот момент показано на рис.8. Большая напряженность поля на границе вновь образовавшегося канала приводит к постепенному распространению зоны интенсивной ионизации по направлению к стержню. Этот процесс обычно называется обратным (или главным) разрядом. Обратный разряд развивается от плоскости к стержню, т. е. в направлении, обратном движению, стримера,

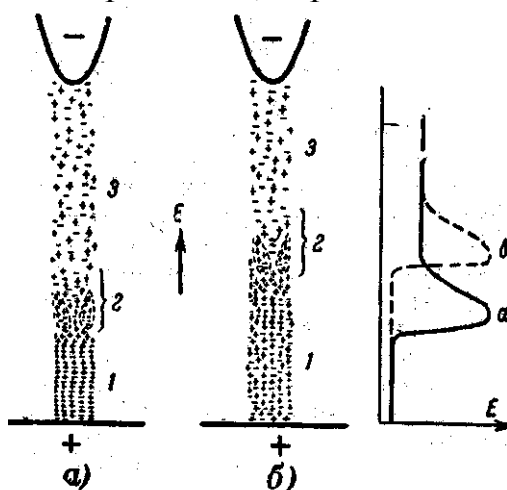


Рис.8 Последовательные стадии развития обратного разряда и распределение продольной напряженности электрического поля в канале.

с очень большой скоростью порядка $10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ и обеспечивает создание между электродами канала высокой проводимости, через который после этого начинает проходить ток короткого замыкания источника.

Лекция 7.

1.4.4. Барьеры в резко неоднородном поле.

Барьером называется тонкая пластинка из изолирующего материала, обычно имеющая плоскую или цилиндрическую форму, которая устанавливается в газовом промежутке или промежутке, заполненном маслом, для увеличения его электрической прочности. В газовом промежутке, который мы сейчас рассматриваем, электрическая прочность самого барьера не играет существенной роли; в качестве барьера, например, с успехом может использоваться тонкий лист плотной бумаги, собственная электрическая прочность которого ничтожна. Значительное влияние, которое оказывают барьеры в газовой среде на разрядное напряжение, связано с изменением пространственного объемного заряда, созданного в процессе развития ионизации.

Рассмотрим в качестве примера промежутки стержень — плоскость, в котором установлен плоский барьер, как показано на рис.9, а. При положительной полярности стержня образующиеся вблизи него положительные ионы при отсутствии барьера формируют концентрированный объемный положительный заряд, напряженность поля на границе которого сильно возрастает (рис.9). Наличие области усиленного поля является основной причиной распространения ионизации вглубь промежутка и завершения его полного пробоя.

При установке барьера положительные ионы задерживаются барьером и растекаются по его поверхности, причем распределение положительных зарядов на барьере оказывается тем более равномерным, чем дальше от стержня он установлен. Напряженность поля во внеш-

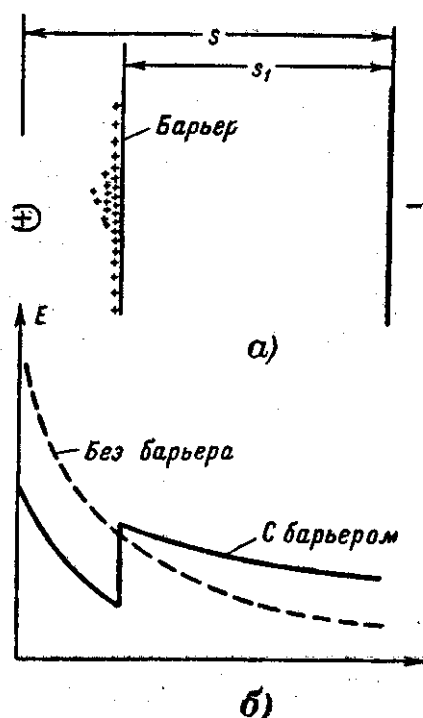


Рис. 9 Распределение напряженности поля в промежутке положительный стержень — плоскость при наличии барьера.

нем пространстве (справа от объемного заряда) по-прежнему увеличивается, но теперь это повышение напряженности распределяется более или менее равномерно на весь промежуток между барьером и плоскостью и сильного повышения напряженности на поверхности барьера не происходит (рис.9, б). Поэтому при

положительной полярности стержня барьер, установленный вблизи от стержня (не в непосредственной близости от него), приводит к значительному увеличению разрядного напряжения.

Иначе обстоит дело при отрицательной полярности стержня. Электроны,двигающиеся от стержня, попадая на барьер, теряют свою скорость и большинство из них вместе с атомами кислорода образуют отрицательные ионы, распределяющиеся по поверхности барьера. Таким образом, барьер способствует созданию концентрированного отрицательного объемного заряда, который при отсутствии барьера имел меньшую величину (часть электронов доходила до плоскости) и был сильно рассеян в пространстве (рис. 5). Поэтому, если без барьера основную роль играл положительный объемный заряд, уменьшавший напряженность поля во внешнем пространстве (рис. 5, в), то при наличии барьера значительную роль начинает играть отрицательный заряд, сконцентрированный на барьере, который увеличивает напряженность поля во внешнем пространстве. Поэтому следует ожидать, что при отрицательной полярности стержня установленный в средней части промежутка барьер будет уменьшать разрядное напряжение.

При расположении барьера в непосредственной близости от положительного стержня его роль уменьшается, так как распределение объемных зарядов на барьере делается резко неравномерным, напряженность поля на поверхности барьера оказывается достаточно большой для возникновения ионизации по другую сторону барьера. Образованные там положительные ионы барьером не задерживаются и способствуют развитию разряда в глубь промежутка. Барьер, расположенный в непосредственной близости от отрицательного стержня, т. е. в области очень сильного поля, уже не способен задерживать электроны, которые летят с большой скоростью и проходят сквозь барьер, поэтому значительного отрицательного объемного заряда на поверхности барьера не создается. Положительные ионы, образованные ионизацией по другую сторону барьера, заряжают его положительно и приводят к еще более сильному уменьшению поля во внешнем пространстве. Поэтому при расположении барьера в непосредственной близости, от отрицательного стержня, разрядное напряжение может несколько возрасти.

Таким образом, установка барьера у стержня на расстоянии порядка (0,25—0,3) длины промежутка может очень сильно (более чем в 2 раза) увеличить разрядное напряжение при положительной полярности стержня, и поэтому газовый промежуток с барьером является простейшим примером изоляционной конструкции, в которой применена удачная комбинация двух диэлектриков - твердого и газообразного. С подобными комбинациями мы будем неоднократно встречаться в дальнейшем при рассмотрении конкретных изоляционных устройств, применяемых в электрических аппаратах и машинах. Требования к каждому диэлектрику, входящему в состав комбинированной изоляции, вытекают из его назначения. Барьер в газовой среде предназначен задерживать ионы, поэтому, как отмечалось выше, его собственная электрическая прочность не имеет существенного значения. Однако он не должен быть пористым и появление в барьере даже мельчайших отверстий (например, в результате пробоя промежутка) может полностью уничтожить его положительное действие. При переменном напряжении пробой происходит во время полупериода той полярности, при которой разрядное напряжение меньше.

Поэтому при промышленной частоте влияние барьеров такое же, как и при постоянном напряжении положительной полярности.

Лекция 8.

1.5. Молния

Одной из разновидностей искрового разряда в длинных воздушных промежутках является молния, основные количественные характеристики которой и её воздействие на электрические установки будут рассматриваться в разд. 2 настоящей книги. Особенности разряда молнии, отличающие его от лабораторной искры, заключаются не только в гигантских размерах разряда, но и в своеобразии одного из электродов - грозового облака.

В настоящее время предложено большое число теорий, объясняющих электризацию грозовых облаков, на которых мы за недостатком места останавливаться не будем. В облаках происходит разделение электрических зарядов, причем источником энергии являются мощные восходящие потоки воздуха, способствующие росту грозового облака по вертикали. Многочисленные измерения распределения зарядов в облаках показали, что это распределение имеет сложный и нерегулярный характер, но в основных чертах соответствует картине, показанной на рис. 10. Как правило, в результате действия процессов электризации в нижней части облака скапливаются заряженные отрицательно капельки воды, а в верхней части — заряженные положительно капельки воды или кристаллики льда. Благодаря турбулентному характеру движения воздушных масс отрицательные заряды могут сосредоточиваться в виде отдельных изолированных друг от друга заряженных объемов. В ряде случаев в нижней части облака может также возникнуть концентрированный положительный заряд, как это показано на рис. 10. В боль-

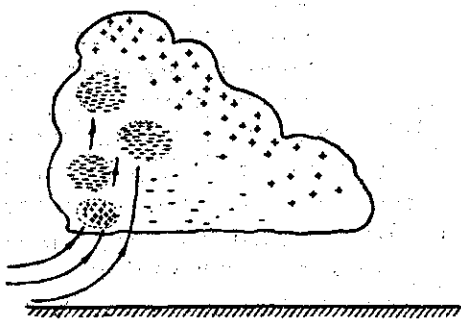


Рис. 10 Возможное распределение зарядов в грозовом облаке.

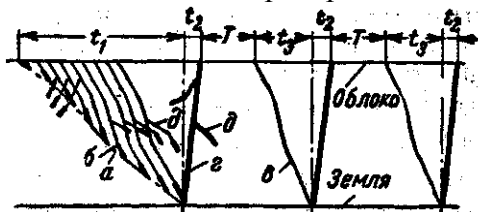


Рис. 11 Стилизованная фоторазвертка: многократного разряда молнии.

a — область предварительной ионизации перед головкой ступенчатого лидера;
 $б$ — ступенчатый лидер; $в$ — стрелковый лидер; $г$ — обратный (главный) разряд;
 $д$ — разветвления от основного канала разряда. Средние значения интервалов времени: $t_1=0,01$ сек; $t_2=50 \cdot 10^{-6}$ сек; $t_3=0,001$ сек; $T=0,03$ сек.

большинстве случаев положительный объемный заряд играет роль инициатора разряда, так как он увеличивает напряженность поля в области отрицательных зарядов, но иногда величина положительного заряда может оказаться настолько большой, что разряд на землю произойдет непосредственно из этого скопления зарядов. Таким образом, в большинстве случаев (80—90%) разряды молнии имеют отрицательную полярность, но иногда полярность разряда может быть и противоположной.

Размещение отрицательных разрядов в отдельных изолированных друг от друга объемах приводит к тому, что разряд молнии обычно бывает многократным и состоит из нескольких, следующих друг за другом по одному и тому же пути разрядов. Каждый отдельный разряд происходит из своего скопления зарядов, причем вначале разряжаются на землю нижние скопления зарядов, а затем верхние.

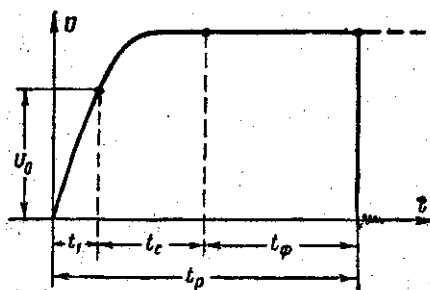
Стилизованная фотография молнии, полученная на фотокамере с вращающейся пленкой, показана на рис. 11. Обращает на себя внимание своеобразный характер развития лидера первого разряда многократной молнии. Как видно из рисунка, лидер первого разряда продвигается к земле не непрерывно, а ступенями, разделенными одна от другой интервалами времени порядка 50 мксек. Скорость развития каждой ступени весьма велика (более 10^9 см/сек), но благодаря наличию интервалов времени между ними скорость всего процесса в целом значительно меньше ($1,5—2 \times 10^7$ см/сек). Лидеры последующих разрядов молнии имеют обычный стреловидный характер и аналогичны лидерным разрядам лабораторной искры.

Количество отдельных разрядов молнии может изменяться в широких пределах 1—20; в среднем молния состоит из трех разрядов.

Благодаря большой длине канала молнии скорость обратного разряда можно надежно определить с помощью фоторазверток. Эксперименты показали, что эта скорость обычно лежит в пределах (0,05—0,5) скорости света.

1.5.1. Структура времени разряда

Предположим, что к произвольному газовому промежутку приложено напряжение, которое с некоторой скоростью возрастает от нуля до максимума, а затем остается неизменным (рис. 12). Если U_0 — напряжение, при котором выполняется условие самостоятельности разряда, то до момента времени t_1 разряд в промежутке принципиально произойти не может. Однако даже и в момент t_1 разряд может не начаться. Для развития разряда вблизи катода должен появиться хотя бы один эффективный электрон, т. е. электрон, образующий начальную лавину. Свободные



электроны вблизи катода образуются или благодаря бомбардировке катода положительными ионами, всегда содержащимися в воздухе, или путем освобождения электронов из отрицательных ионов, или, наконец, под действием внешнего ионизатора. Все эти процессы носят статистический характер, поэтому интервалы времени между двумя последовательными актами образования электронов могут быть различными.

Таким образом, развитие разряда в промежутке начнется не в момент времени t_1 , а в момент $t_2 = t_1 + t_c$, где t_c — так называемое статистическое время запаздывания, является временем ожидания первого эффективного электрона.

Но в момент t_2 разряд только начнет развиваться. Должно пройти еще некоторое время, которое называется временем формирования разряда t_ϕ , прежде чем произойдет полный пробой промежутка.

Итак, полное время разряда t_p состоит из трех слагаемых

$$t_p = t_1 + t_c + t_\phi, \quad (8)$$

причем сумму

$$t_p = t_1 + t_c + t_\phi, \quad (9)$$

часто называют временем запаздывания разряда.

Судьба свободных электронов, образующихся у катода, может быть различной. Электрон может прилипнуть к атому с образованием отрицательного иона; некоторые электроны снова возвращаются на катод или выходят за пределы сильного поля, так и не совершив ни одного акта ионизации. Поэтому статистическое время запаздывания связано с ожиданием не любого свободного электрона, а эффективного электрона, т. е. такого, который образует начальную лавину.

Время ожидания эффективного электрона от разряда к разряду изменяется, поэтому целесообразно ввести понятие о среднем времени статистического запаздывания. Пределы отклонения действительных величин от средней определяются главным образом экспериментально в коротких промежутках с однородным полем, где время формирования разряда мало и время запаздывания практически равно времени ожидания первого эффективного электрона.

Среднее статистическое время запаздывания зависит от многих факторов — интенсивности внешнего ионизатора, материала катода и состояния его поверхности, напряжения между электродами.

Время формирования разряда также обладает статистическим характером, который наиболее ярко проявляется в длинных искровых промежутках с резконеоднородным полем. Можно назвать несколько причин разбросов времени формирования разряда:

1. Развитие стримера тесно связано с последовательным возникновением большого количества лавин электронов. Поэтому время формирования разряда в какой-то мере включает в себя и время ожидания эффективных электронов, дающих начало этим лавинам. Это время, конечно, гораздо меньше, чем статистическое

время запаздывания, так как начальные электроны вторичных лавин возникают в условиях весьма интенсивного излучения, испускаемого развивающимся разрядом. Однако оно имеет конечную величину и обладает статистическим характером.

2. Расположение в пространстве вторичных электронов также носит случайный характер, следовательно, изменяется и создаваемое объемными зарядами лавин искажение поля, от которого зависит скорость распространения стримера.

3. Траектория разряда, особенно в длинных искровых промежутках, сильно искривлена, поэтому фактическая длина канала не равна расстоянию между электродами и изменяется от разряда к разряду.

Лекция 9.

1.5.2. Вольт-секундные характеристики

Так как обе составляющие времени запаздывания разряда в сильной мере зависят от приложенного напряжения, полное время разряда при разных напряжениях должно быть различным. Зависимость времени разряда от амплитуды приложенного напряжения называется вольт-секундной характеристикой искрового промежутка. Но время разряда зависит не только от амплитуды приложенного напряжения, но и от закона его изменения во времени.

Поэтому при экспериментальном определении вольт-секундных характе

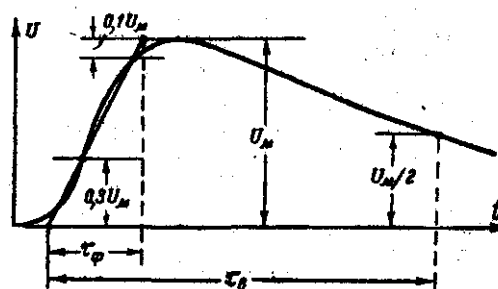


Рис.13 Определение длины фронта и длины волны стандартного импульса.

ристик следует прежде всего ввести *стандартную* форму волны напряжения, одинаковую для всех испытаний изоляции.

Стандартная волна имеет форму импульса (рис. 13), у которого напряжение быстро возрастает от нуля до максимума (фронт волны); а затем относительно медленно спадает до нуля (хвост волны). Форма импульсной волны характеризуется длиной фронта τ_f , т. е. временем нарастания напряжения от нуля до максимума, и длиной волны τ_B , т. е. временем, в течение которого напряжение уменьшается до половины амплитуды.

Так как импульсные волны, получаемые в лабораториях, имеют весьма пологую начальную часть фронта и эта начальная часть для развития разряда существенного значения не имеет, фронт волны заменяется эквивалентным косоугольным фронтам. Для этого на фронте отмечаются точки с ординатами $0,3 U_{\text{макс}}$ и $0,9 U_{\text{макс}}$ (рис. 13) и через них проводится прямая линия. Пересечение этой прямой с осью абсцисс и с горизонтальной прямой, проведенной на уровне амплитуды, определяет длину фронта волны.

По международным рекомендациям стандартная волна должна иметь длину фронта $1,2 \text{ мксек}$ с отклонениями $\pm 30\%$ и длину волны 50 мксек с отклонениями $\pm 20\%$. В

России используется стандартная импульсная волна с длиной фронта 1,5 мксек и длиной волны 40 мксек (сокращенное обозначение — волна 1,5/40), которая удовлетворяет международным правилам.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные требования к газу, применяемому в качестве изоляции.
2. Назовите основные виды разрядов и их характеристики.
3. Перечислите виды ионизации в газе.
4. Что такое лавина электронов?
5. Назовите условие самостоятельности разряда в однородном поле.
6. Назовите условия создания вторичных электронов.
7. Что такое стример и какие процессы в нем происходят?
8. Закон Пашена. Определение и математическая запись.
9. Какая характерная особенность имеется у неоднородного поля?
10. Перечислите случаи возникновения самостоятельного разряда в неоднородном поле.
11. Закон подобия разрядов.
12. Развитие разряда в резконеоднородном поле при положительной полярности стержня.
13. Развитие разряда в резконеоднородном поле при отрицательной полярности стержня.
14. Влияние барьеров в газовой среде на разрядное напряжение.
15. Опишите процесс возникновения заряда в грозовом облаке.
16. Назовите причины разбросов времени формирования разряда.
17. Что такое вольт-секундная характеристика искрового промежутка?
18. Назовите основные характеристики стандартной волны напряжения.

2.КОРОННЫЙ РАЗРЯД НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ионизационные процессы в коронном разряде происходят лишь вблизи электрода с малым радиусом кривизны, вблизи провода, в узкой зоне, которая обычно называется *чехлом* короны. Чехол коронного разряда на проводах далеко не всегда бывает однородным, особенно при достаточно больших напряжениях. При отрицательной короне ионизация происходит вблизи большого числа точек на поверхности провода и чехол короны состоит из многочисленных проводящих нитей. При положительной полярности, помимо сплошного чехла, на проводе образуются стримеры, длина которых может быть достаточно большой, но, конечно, гораздо меньше расстояния между электродами.

За счет процессов ударной ионизации в чехле короны непрерывно создаются заряженные частицы обоих знаков. Частицы того же знака, что и коронирующий электрод, под действием электрического поля выходят из чехла короны во внешнюю область и постепенно перемещаются к противоположному электроду.

Если к промежутку приложено постоянное напряжение, то в стационарном режиме вся внешняя область короны, т. е. область, в которой ионизация отсутствует, оказывается заполненной объемным зарядом того же знака, что и коронирующий провод. При этом заряд, уходящий в единицу времени на противоположный электрод, в точности равен заряду, выделяющемуся за это же время во внешнюю область из чехла короны, так что суммарный объемный заряд остается неизменным.

Для чехла короны характерны быстрые процессы, происходящие со скоростью электронов или стримеров. Поэтому ток короны, помимо медленно меняющейся составляющей, определяемой перемещением объемного заряда, содержит большое количество кратковременных пиков, соответствующих развитию стримеров или групп лавин. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, который соответствует радиотехническому диапазону. Излучаемые коронирующей линией радиоволны создают помехи радиоприему (особенно сильные вблизи линии), которые могут достигнуть недопустимого уровня.

Таким образом, появление коронного разряда на проводах линий электропередачи сопровождается потерями энергии и радиопомехами. Необходимость ограничения до приемлемых значений уровня потерь энергии и радиопомех приводит к тому, что рациональная конструкция проводов и арматуры линий электропередачи в значительной мере определяется, коронным разрядом, особенно при наивысших номинальных напряжениях.

2.1.Корона на проводах при постоянном напряжении

При постоянном напряжении различают два различных вида коронного разряда — *униполярный* и *биполярный*.

Униполярная корона возникает в том случае, когда коронирующие провода в промежутке имеют одинаковую полярность [например, промежуток провод — плоскость (рис. 14, а)]. При униполярной короне вся внешняя зона заполнена

зарядами того же знака, что и коронирующий провод (или провода).

Биполярная корона возникает в том случае, когда коронирующие провода имеют противоположную полярность [например, промежуток провод — провод (рис. 14, б)]. Во внешней зоне биполярной короны ионы разных знаков движутся навстречу друг другу.

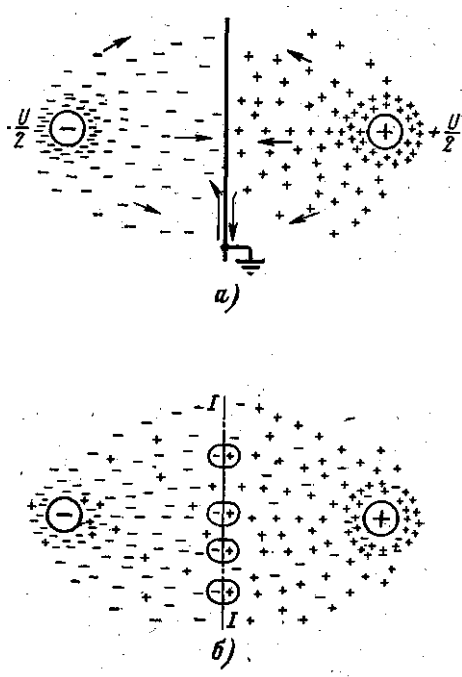


Рис. 14 Распределение объемного заряда униполярной (а) и биполярной (б) короны.

Если бы на границе нулевого потенциала 1—1 происходила полная рекомбинация ионов, биполярная корона состояла бы из двух не зависящих друг от друга униполярных коронных разрядов. В действительности на границе раздела происходит лишь частичная рекомбинация ионов, и значительная их часть проникает во внешнюю зону провода противоположной полярности, уменьшая суммарный объемный заряд этой зоны. Для того чтобы восстановить начальную напряженность поля на поверхности провода, ионизация в чехле короны должна возрасти и из чехла короны должен выделяться больший заряд, часть которого тратится на нейтрализацию заряда противоположного знака. Благодаря этому ток короны, а следовательно, и потери энергии в биполярной короне значительно больше, чем в униполярной. Увеличение потерь в биполярном режиме по сравнению с униполярным связано также с распадом (явлением, обратным прилипанию) отрицательных ионов в зоне ионизации провода, имеющего положительную полярность. Отрицательные ионы приходят к положительному проводу от отрицательного коронирующего провода и в результате распада создают в зоне ионизации дополнительные свободные электроны.

Появление таких электронов в зоне ионизации приводит к увеличению тока короны, а следовательно, и потерь на корону. Кроме того, появление в зоне ионизации дополнительных свободных электронов равнозначно увеличению коэффициента вторичной ионизации γ . Увеличение же γ обеспечивает поддержание

самостоятельного разряда при меньших напряженностях. Напряженность на поверхности провода в условиях развитой короны называется критической — E_k . Для определения потерь энергии на корону при постоянном напряжении необходимо проанализировать движение объемного заряда во внешней зоне.

Потери энергии при общей короне равны:

$$P = I_{CP} \cdot U = G \cdot U^2 \cdot (U - U_k), \quad (10) \text{ где}$$

U_k — критическое напряжение.

Коэффициент G определяется геометрическими размерами линий, коэффициентами подвижности и рекомбинации ионов. Потери энергии и очень быстро растут при увеличении напряжения.

Потери сильно зависят от погоды и резко увеличиваются в тех случаях, когда на поверхности провода оседают капли дождя или кристаллы льда, создающие дополнительные области повышенной напряженности поля. Так как условия погоды могут быть самыми разнообразными, это обстоятельство крайне затрудняет создание чисто теоретических методов расчета потерь на корону, и значение теоретического анализа заключается главным образом в установлении закономерностей, с помощью которых обобщаются данные, полученные из непосредственных измерений.

Лекция 11.

2.2. Корона на проводах при переменном напряжении

Анализ движения объемного заряда в пространстве между проводами при переменном напряжении показывает, что основная масса нерекombинировавшего заряда совершает возвратно-поступательное движение в окрестности каждого провода, не удаляясь от него на расстояние, большее нескольких десятков сантиметров. Только очень небольшая доля объемного заряда проникает к соседним проводам. Это обстоятельство позволяет рассматривать

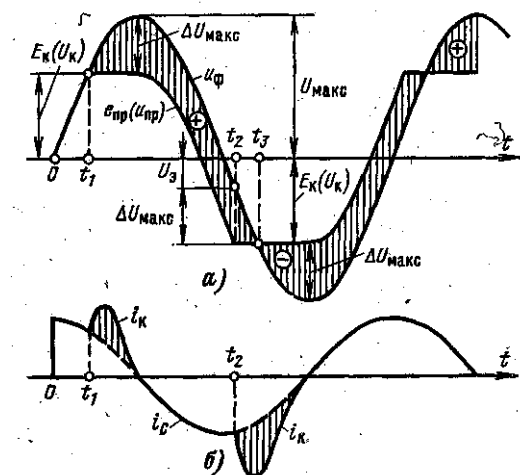


Рис.15. Корона при переменном напряжении.

a — изменение во времени приложенного напряжения (u) и напряженности поля на поверхности провода ($E_{ГП}$); b — емкостной ток i_c и ток короны i_k .

процессы, происходящие вблизи проводов различных фаз, независимо друг от

друга. Вследствие возвратно-поступательного характера движения зарядов отрицательные ионы, возникшие в отрицательный полупериод изменения напряжения, возвращаются в зону ионизации в положительный, полупериод и, распадаясь, приводят к снижению напряженности поля у провода до критической.

Рассмотрим изменение объемного заряда в окрестности одного из проводов и напряженности электрического поля на поверхности этого провода при синусоидальном напряжении источника. Допустим, что линия подключена к источнику в момент нуля напряжения. Показанная на рис 15 синусоида в различных масштабах дает фазовое напряжение источника и напряженность поля на поверхности провода, которые связаны друг с другом зависимостью, справедливой при отсутствии короны:

$$e_{\text{пр}} = \frac{u_{\phi} \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r} \quad (11),$$

где C — рабочая емкость линии.

Корона на проводе зажигается в момент времени t_1 когда напряженность поля на поверхности провода станет равной mE_0 . Для упрощения изложения будем в дальнейшем считать, что критическая напряженность E_K равна mE_0 , где $m=0,82-0,9$ — коэффициент гладкости провода.

Напряжение при этом равно $u_{\phi}=U_K$. После зажигания короны в пространстве вокруг провода накапливается объемный заряд того же знака, что и заряд на проводе. Объемный заряд уменьшает напряженность поля на поверхности провода, причем, как и для короны при постоянном напряжении, в процессе горения короны напряженность поля на поверхности провода остается неизменной и равной E_K .

Таким образом, после зажигания короны кривые напряжения и напряженности поля расходятся. Напряжение продолжает изменяться по синусоиде, а напряженность поля остается неизменной. В связи с этим остается неизменным и заряд на проводе $q_{\text{пр}} = 2\pi\varepsilon_0 r E_K$, а следовательно, и создаваемое этим зарядом

напряжение $u_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{пр}}}{C}$. Разница напряжений $\Delta u_{\text{об}} = u_{\phi} - u_{\text{пр}}$ (на рис. 15 заштрихована)

поддерживается объемным зарядом, который в процессе роста напряжения постепенно увеличивается и достигает $\Delta U_{\text{макс}}$.

Так как объемный заряд распределен в пространстве, суммарный заряд $q_{\Sigma} = q_{\text{пр}} + q_{\text{об}}$ оказывается существенно больше заряда $q = u_{\phi} C$, который был бы на проводе при том же напряжении, если бы корона отсутствовала. Таким образом, возникновение короны сопровождается увеличением суммарного заряда и возрастанием емкости линии от обычной величины C (она часто называется

«геометрической» емкостью) до эквивалентной емкости $C_{\Sigma} = \frac{q_{\Sigma}}{u_{\phi}}$, которая с ростом

напряжения возрастает в связи с постепенным удалением объемного заряда от коронирующего провода.

После того, как напряжение источника достигло максимума, общий заряд q_{Σ} должен начать уменьшаться. Так как заряд в объеме является малоподвижным, в первую очередь будет уменьшаться заряд на проводе. Это немедленно приведет к уменьшению напряженности поля и погасанию короны. Что касается объемного заряда, то первое время после максимума напряжения он будет продолжать

удаляться от провода, затем начнет двигаться в обратном направлении, но это перемещение будет происходить настолько медленно, что в первом приближении и объемный заряд и создаваемое им напряжение могут считаться неизменными.

В следующий полупериод корона загорится тогда, когда абсолютная величина напряженности поля на поверхности провода снова станет равной E_K . Так как в этот момент в промежутке еще сохранился оставшийся от предыдущего полупериода объемный заряд противоположного знака, мгновенное значение напряжения (U_3) будет значительно меньше начального.

Из графика, приведенного на рис. 15 следует, что

$$U_K = U_3 + \Delta U_{\text{МАКС}}$$

но так как $\Delta U_{\text{МАКС}} = U_{\text{МАКС}} - U_K$, то

$$U_3 = 2U_K - U_{\text{МАКС}}$$

Следовательно, если амплитуда напряжения источника $U_{\text{МАКС}}$ более чем в 2 раза превышает напряжение зажигания короны, отрицательная корона может возникнуть еще в положительный полупериод ($U_3 > 0$).

После зажигания короны в отрицательный полупериод вокруг провода образуется отрицательный объемный заряд, который постепенно компенсирует положительный заряд, оставшийся от предыдущего полупериода. К моменту t_3 положительный объемный заряд оказывается полностью скомпенсированным, а после достижения напряжением амплитудного значения избыточный отрицательный заряд становится численно равным максимальному заряду в предыдущий полупериод.

Далее процесс повторяется, и во все полупериоды, кроме первого, источник отдает линии двойной заряд $2q_{\text{ОБ}}$, половина которого тратится на компенсацию заряда противоположной полярности. На рис. 15, б приведена кривая изменения тока между проводами коронирующей линии. Во время горения короны ток значительно превышает емкостный ток $i_c = C \frac{du}{dt}$, определяемый геометрической емкостью линии и напряжением источника. Ток короны i_K показан в виде гладкой кривой, однако в действительности, так же как и при постоянном напряжении, на эту гладкую кривую накладываются многочисленные кратковременные импульсы, особенно мощные в положительный полупериод, которые являются источником радиопомех.

Для теоретического определения потерь на корону при переменном напряжении необходимо исследовать движение ионов в пространстве между проводами и изменение суммарного заряда. Если бы была известна зависимость суммарного заряда от напряжения (вольт-кулоновая характеристика), то потери мощности на корону

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \oint u dq \quad (12)$$

определялись бы площадью этой вольт-кулоновой характеристики,

Такая попытка теоретического определения потерь на корону была, предпринята немецким ученым Майром, который предложил использовавшуюся широко формулу, а также Хольмом и Залесским.

Однако сильная зависимость потерь на корону от условий погоды, как уже указывалось, выдвигает на первый план экспериментальные методы.

Проводившиеся в последние годы эксперименты позволили установить, что

потери на корону и радиопомехи в первую очередь зависят от максимальной напряженности поля на поверхности провода, которая при заданном напряжении определяется главным образом радиусом провода. Поэтому основным методом ограничения потерь на корону и радиопомех является увеличение радиуса провода. При очень высоких номинальных напряжениях пришлось бы применять провода чрезмерно большого сечения, в ряде случаев превышающего сечение провода, выбранное из условия передачи по линии заданной мощности.

Экономическое решение можно получить посредством применения так называемых *расширенных проводов*. Это провода достаточно большого диаметра, обеспечивающего необходимое снижение напряженности электрического поля на их поверхность. Для сохранения заданного сечения токоведущей части расширенные провода делаются полыми или заполняются непроводящей массой, например бумагой.

Другое решение, широко используемое у нас в стране, состоит в применении *расщепленных проводов*.

Для уменьшения потерь на корону вместо одного провода в фазе можно применить пучок проводников, находящихся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров. Такой пучок параллельно соединенных проводников называется *расщепленным проводом*.

При расчете потерь на корону в настоящее время принято различать следующие виды погоды:

хорошая погода. При этом поверхность провода остается сухой и чистой. Однако к хорошей погоде относят обычно и условия повышенной влажности воздуха, при которой на холодном проводе может конденсироваться влага. Хотя провода линии, находящейся под нагрузкой, нагреваются рабочими токами, благодаря чему конденсация влаги делается гораздо менее вероятной, измерения на действующих линиях обнаружили повышенные потери при повышенной влажности воздуха. Поэтому для хорошей погоды целесообразно принимать коэффициент гладкости, близкий к нижнему пределу возможных значений, т. е. примерно 0,85;

туман сопровождается довольно интенсивным оседанием капелек воды на поверхности провода. Коэффициент гладкости при тумане примерно равен 0,7;

иней, гололед, изморозь приводят к образованию на поверхности провода кристаллов льда, имеющих форму иголок, которые сильно искажают электрическое поле. Коэффициент гладкости примерно равен 0,6;

Совершенно естественно, что такое разделение всего многообразия атмосферных условий на пять видов погоды является грубым приближением и не учитывает ряд деталей. В частности, некоторые наблюдения показывают, что при возникновении дождя потери на корону сначала резко возрастают, а в дальнейшем заметно падают даже при неизменной интенсивности дождя. Это явление объясняется тем, что на проводе в начале дождя возникают отдельные изолированные друг от друга капельки воды, на поверхности которых напряженность поля сильно возрастает. В дальнейшем эти капельки воды сливаются друг с другом, шероховатость провода уменьшается и потери падают. Хорошо известно также явление "старения" провода, которое заключается в том, что при первом включении вновь построенной линии потери на корону всегда особенно велики, а с течением времени (месяцы) они постепенно уменьшаются до установившегося значения. Повышенные потери на новых линиях объясняются повреждением поверхности

провода, когда его протаскивают по земле при подвеске на опоры. Образовавшиеся при этом мелкие заусеницы являются очагами интенсивной местной короны, но за счет нагревания токами короны в присутствии образующихся при ионизации активных газов (атомарный кислород, озон, окись азота) постепенно разрушаются, благодаря чему потери на корону стабилизируются. Из этих примеров следует, что даже при одних и тех же условиях погоды потери на корону могут быть существенно различными, поэтому любые расчеты потерь на корону могут дать лишь средние величины.

Ток короны в каждом очаге ионизации состоит из ряда кратковременных импульсов, наиболее мощные из которых связаны с образованием стримеров в чехле короны. В линиях электропередачи все эти радиальные коронные токи складываются и создают некоторый продольный ток, проходящий по проводам линии и замыкающийся через источник. Так как и радиальный и продольный токи содержат очень высокие частоты, коронный разряд на линии сопровождается электромагнитным излучением, часть спектра которого находится в диапазоне от 0,15 до 100 МГц.

Расчеты показывают, что даже непосредственно под проводами линии высокочастотное электромагнитное поле в основном создается током в проводах, так как излучение радиального тока очень быстро затухает по мере удаления от очага ионизации. Поэтому все теоретические работы по радиопомехам посвящены анализу распространения коронного тока вдоль линии и возникающего при этом электромагнитного поля.

Так же как и потери на корону, радиопомехи сильно зависят от условий погоды.

Контрольные вопросы

1. Объясните, как происходит процесс ионизации в коронном разряде?
2. Назовите виды и основные характеристики коронных разрядов при постоянном напряжении.
3. Опишите процесс образования короны при переменном напряжении.
4. Назовите методы ограничения потерь на корону.
5. Объясните влияние атмосферных явлений на величину потерь на корону.

Литература

1. Техника высоких напряжений. Под редакцией Д. В. Разевига. “Энергия”, - М. 1976
2. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах. Госэнергоиздат. М.Л. 1962
3. Техника высоких напряжений. Под редакцией Д. В. Разевига. “Энергия”, - М. 1964
4. Электротехнический справочник. В четырех томах. Под общей редакцией профессоров московского энергетического института. Том 3. “Производство и распределение электрической энергии”, - М. Энергоатомиздат. 2002.
5. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередач и сетей. Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Сомова. Издание 2, перераб и доп. – М.: Энергия, 1975.
6. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – С.-Пб.: Энергоатомиздат, 2000.
8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети./ Под ред. А.А. Федорова и Г.Г. Сербиновского. – М.: Энергия, 1980.
9. Электрическая часть станций и подстанций. Учеб. для ВУЗов/ Под ред. А.А. Васильева. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. Справочник по проектированию подстанций 35-500 кВ/Под ред. С.С. Рокотьяна и Я.С. Самойлова. – М.: Энергиздат, 1982.
11. Рожкова Л.Д. Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – 3 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
12. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/ Под ред. Ю.Г. Барыбина и др.- М.: Энергоатомиздат, 1991.