

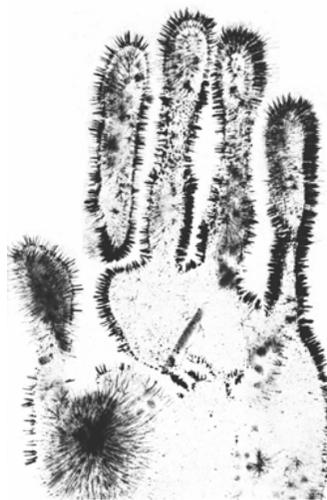
Томский политехнический университет

УДК 533.9:004.14+537.523.3

Шустов М.А., Протасевич Е.Т. **Теория и практика газоразрядной фотографии.** – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2001. – 252 с. 100 экз.

**М.А. ШУСТОВ, Е.Т. ПРОТАСЕВИЧ**

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ФОТОГРАФИИ



**Томск-2001**

Описаны теория и техника фотографирования объектов живой и неживой природы, помещенных в слаботочный газовый разряд. Рассмотрены физико-химические процессы, протекающие в таком разряде.

Предназначена для студентов, инженерно-технических и научных работников, интересующихся прикладными проблемами газового разряда и фотографией.

Табл. 7. Илл. 143. Библ. 131. Прилож.

## **Рецензенты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор *Ю.Д. Копытин*

доктор физико-математических наук,  
профессор *В.И. Шишковский*

ISBN 82-78-25-035-9

Ш 160 412 0000

© М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич, 2001

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5		
<b>Глава 1.</b> Физические основы газоразрядной фотографии .....	9		
1.1. Основные сведения по физике газового разряда .....	10		
1.2. Роль паров воды в газоразрядной фотографии .....	18		
1.3. Физико-химические процессы, происходящие при ионизации влажного воздуха .....	32		
<b>Глава 2.</b> Методы получения высокого напряжения ..	41		
2.1. Классификация генераторов высокого напряжения .....	41		
2.2. Высокочастотные трансформаторы <i>Тесла</i> .....	43		
2.3. Моделирование электрических процессов в резонансном трансформаторе .....	50		
2.4. Высокочастотные аппараты <i>Д'Арсонваля</i> ..	58		
2.5. Мостовые резонансные преобразователи напряжения .....	61		
2.6. Преобразователи с умножением напряжения в первичной цепи .....	67		
2.5. Высокочастотные преобразователи с индуктивными накопителями энергии .....	71		
2.6. Преобразователи напряжения с внешним возбуждением .....	74		
2.7. Автоколебательные преобразователи напряжения .....	80		
2.8. Другие способы получения высокого напряжения .....	83		
<b>Глава 3.</b> Техника газоразрядной фотографии .....	87		
3.1. Варианты конструкций		высокочастотных трансформаторов .....	87
		3.2. Электрические разрядники, коммутационные элементы и их полупроводниковые аналоги .....	102
		3.3. Пассивные элементы высоковольтных преобразователей .....	117
		<b>Глава 4.</b> Измерительные ячейки и электроды .....	129
		4.1. Требования, предъявляемые к ячейкам, электродам и материалам .....	130
		4.2. Конструкции ячеек и электродов, используемых в газоразрядной фотографии .....	134
		4.3. Применение прозрачных токопроводящих электродов в технике получения газоразрядных изображений .....	158
		4.4. Конструкции разрядно-оптических и других преобразователей .....	163
		<b>Глава 5.</b> Схемотехника генераторов и преобразователей высокого напряжения для газоразрядной фотографии .....	169
		5.1. Генераторы высокой частоты с использованием трансформатора <i>Тесла</i> ...	174
		5.2. Преобразователи напряжения с внешним возбуждением и индуктивными накопителями энергии .....	208
		5.3. Автогенераторные преобразователи напряжения с индуктивной обратной связью .....	219
		5.4. Другие виды генераторов высокого напряжения .....	231
		<b>Приложение:</b> Техника безопасности при выполнении работ по газоразрядной фотографии ..	236
		<b>Литература</b> .....	239

## ВВЕДЕНИЕ

Под *газоразрядной фотографией* обычно понимают процесс получения изображения исследуемого объекта в слаботочном газовом разряде. Реализация метода заключается в переносе изображения исследуемого предмета на фотобумагу или другой регистрирующий материал. Для этого регистрирующий материал располагают между двумя электродами, причем в качестве одного из них служит исследуемый объект. В разряде кроме очертания или формы объекта можно определить и некоторые его характеристики: неоднородность поверхностного слоя материалов, состояние поверхности и пр.

Поскольку разряд является слаботочным, то с помощью газоразрядной фотографии исследуют объекты как живой, так и неживой природы. У истоков развития газоразрядной фотографии стояли белорусский ученый *Я.О. Наркевич-Йодко* (конец XIX – начало XX вв.) и супруги *С.Д. и В.Х. Кирлиан* (Россия, сороковые-пятидесятые годы XX в). В частности, в 1949 г. *С.Д. Кирлиан* впервые получил авторское свидетельство на способ реализации «*высокочастотной*» фотографии. В качестве источника высокого напряжения он использовал резонансный трансформатор. Позднее в отечественной и зарубежной литературе появились такие понятия как «*Кирлиан-эффект*», метод «*кирлиановской*» фотографии, «*кирлианография*», а в англоязычной литературе – «*Kirlian effect, Kirlian photography, Kirlianography*».

Однако в 60-е годы XX века наряду с газоразрядной фотографией стали говорить о газоразрядной визуализации

предметов. Следует отметить, что термин «*визуализация*» не совсем точно отражает смысл явления. Обычно в физике под *визуализацией* изображений понимают методы преобразования двухмерного распределения некоторого параметра физического поля, характеризующего исследуемый объект, но, невидимого для человеческого глаза, в видимое изображение. В качестве примера можно указать на визуализацию полей инфракрасного или ультрафиолетового излучений, относящихся, в частности, к плазме газового разряда.

В случае же газоразрядной визуализации речь идет о разряде, как о средстве «подсветки» или выделения на окружающем фоне исследуемого объекта. При этом роль высокого напряжения и газового разряда, инициируемого им состоит в выявлении индивидуальных свойств и особенностей исследуемого предмета. В какой-то мере и термин «*газоразрядная фотография*» является недостаточно корректным. Однако он принадлежит к числу устоявшихся. По этой причине мы его вынесли в заглавие книги.

Изучение предметов по их свечению в газовом разряде включает не только эффект *Кирлиана*. В общем случае для него характерны три основных направления исследований газоразрядной фотографии:

а) *лавинная*, основанная на разрядах при малых межэлектродных расстояниях (менее 1 мм) и атмосферном давлении;

б) *поверхностная*, в основе которой заложено получение и расшифровка фигур *Лихтенберга*, образующихся при скольжении по поверхности диэлектрика разряда;

в) *вакуумная* – когда изображение исследуемого объекта при пониженном давлении газа переносится на специальный люминесцентный экран.

Строго говоря, исследовать предмет можно еще с помощью одного вида свечения – *огней св. Эльма*. Этот вид свечения обусловлен преимущественно дроблением водяных капель и эмиссией электронов с их поверхностей в сильных электрических полях. Рассмотрение *огней св. Эльма* выходит за рамки данной монографии. Более подробно об этом интересном явлении можно прочитать в специальной литературе.

Несмотря на некоторую общность перечисленных явлений, эти направления исследований различаются между собой как по характеру физико-химических процессов, протекающих в разрядах, так и по аппаратному обеспечению, необходимому для их реализации.

Цель настоящей работы – дать читателям определенные представления о газоразрядной фотографии как о методе *лавиной газоразрядной визуализации* и описать практические схемы для его осуществления.

В дальнейшем вместо сочетания слов «*метод лавинной газоразрядной фотографии (визуализации)*» мы будем говорить просто о *газоразрядной фотографии*, включая в это понятие и «*кирлиановский*» эффект.

В настоящее время вопросам газоразрядной фотографии посвящена обширная литература. Среди последних зарубежных изданий необходимо отметить монографию *Newton C. Braga* “Electronic Projects from the Next Dimension”, опубликованную в 2000 г. на 256 страницах в *Вели-*

*кобритании*, а также монографии и статьи российских и зарубежных авторов, обширный библиографический список которых насчитывает около 500 наименований.

Уже из самого определения газоразрядной фотографии следует, что для ее реализации необходимо знать физику и химию газоразрядных процессов, а также иметь для практического освоения метода соответствующее техническое обеспечение: источники высокого напряжения, измерительные ячейки, регистрирующую аппаратуру и материалы, средства автоматизации измерений, технику и методику обработки экспериментального материала.

В процессе подготовки рукописи книги авторы распределили свой труд следующим образом: аннотация, введение и глава 1 написаны д.ф.-м.н. *Е.Т. Протасевичем*, остальное: главы 2-5 и приложение – к.х.н. *М.А. Шустовым*.

Если у читателей в ходе изучения материала возникнут вопросы или замечания, авторы с благодарностью и вниманием готовы их обсудить.

Адреса для контактов/Addresses for contacts:

***Россия, 634050, г. Томск-50, аб. ящ. 763.***

***Протасевичу Евгению Трофимовичу***

***Russia, 634050, Tomsk-50, P.O. Box 763.***

***Eugeny T. Protasevich***

***Шустову Михаилу Анатольевичу***

***Michael A. Shustov***

***E-mail: shustov@mail2000.ru***

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ФОТОГРАФИИ

Для лучшего представления метода газоразрядной фотографии рассмотрим основные физические процессы, происходящие при электрическом разряде в межэлектродном промежутке. Ионизация такого воздушного промежутка при малых расстояниях между электродами к настоящему времени исследована еще недостаточно хорошо. На наш взгляд, существует три основных причины, препятствующие изучению разрядных процессов в таких условиях.

Во-первых, в зависимости от характера исследуемого объекта (являющегося частью живой или неживой природы) существует большой разброс состава газовой смеси, выделяющейся в процессе ионизации между электродами, что влияет на повторяемость результатов измерений.

Во-вторых, свойства и параметры газового разряда определяются в значительной степени такими внешними факторами, как характеристики ионизирующего излучения (частота, длительность, напряженность и пр.), так и состоянием поверхности электродов, когда в качестве одного из них служит исследуемый объект.

В-третьих, на практике существует ограниченное число технических приложений, в которых используется пробой воздуха при атмосферном давлении при малых расстояниях между электродами. По этой причине разряд такого типа исследуется неохотно, и публикации по разрядам данного типа в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют.

Рассмотрение процесса ионизации воздушного промежутка необходимо начать с некоторых представлений из физики газового разряда.

### 1.1. Основные сведения по физике газового разряда

Под электрическим пробоем следует понимать процесс превращения непроводящего вещества (в рассматриваемом контексте – воздуха) в проводник в результате приложения к нему достаточно сильного электрического поля [1]. Первичным и определяющим элементом пробоя является электронная лавина.

В общем случае ионизованный газ представляет собой плазму с радиусом Дебая  $r_D$ , который значительно меньше линейных размеров области ионизации  $l$ :

$$r_D = \sqrt{T_i / 4\pi n e^2} \approx 500 \sqrt{T_i / n} \ll l, \quad (1)$$

где  $T_i$  – температура ионов плазмы, как наименьшая из  $T_e$  и  $T_i$ , в эВ;  $n$  – плотность плазмы в  $\text{см}^{-3}$ ;  $r_D$  и  $l$  – в см,  $e$  – элементарный заряд.

Плазма состоит из заряженных частиц: положительных и отрицательных ионов и электронов. Её характерной особенностью является квазинейтральность зарядов, т. е.  $N^- = N^+ = n$ . Здесь  $N^- = n_e + N_i^+$  – плотность отрицательно заряженных частиц,  $N^+$  и  $N_i^+$  – плотности положительных и отрицательных ионов;  $n_e$  – плотность электронов плазмы.

При атмосферном давлении практически у всех типов разряда получается слабоионизованная плазма, в которой частота столкновений электронов  $v_{ea}$  и ионов  $v_{ia}$  с атомами и молекулами много больше частоты их столкновений друг с другом, т. е.

$$v_{ea} \gg v_{ei}; \quad v_{ee}; \quad v_{ia} \gg v_{ii}, (m_e / M_i) v_{ei}, \quad (2)$$

где  $M_i$  – масса ионов.

Средняя плотность положительных и отрицательных ионов в нижней атмосфере составляет  $N_0 = 300 \text{ см}^{-3}$ . Если принять число заряженных частиц в отдельных лавинах за  $10^5$ - $10^6 \text{ см}^{-3}$  (на самом деле эти значения сильно завышены), то размеры *дебаевского* радиуса приближаются к 1 мм. В этом случае выполнение условия (1) нарушается, поскольку расстояние между электродами при газоразрядной фотографии получается меньше радиуса *Дебая*. По этой причине более корректно при рассмотрении газоразрядной фотографии употреблять термин «*электрический разряд*», а не «*плазма*». Под электрическим разрядом в газах понимают прохождение электрического тока через газовую среду, сопровождающееся изменением состояния газа (за счет его ионизации).

В [2] на основе известных соотношений по теории газового разряда рассмотрено движение заряженных частиц при атмосферном давлении воздуха в переменном электрическом поле (частота порядка  $10 \text{ кГц} \dots 1 \text{ МГц}$ ) для воздушного зазора  $0,01 \dots 0,1 \text{ мм}$  в присутствии диэлектрика. Перечисленные условия являются оптимальными с точки зрения эффективности реализации газоразрядной фотографии. По этой причине нет смысла дублировать такое рассмотрение. Остановимся лишь только на некоторых принципиальных моментах.

На заряженную частицу в электрическом поле действует сила  $eE$  (где  $e$  – заряд электрона), которая сообщает ей ускорение  $eE/m_e$  или  $eE/m_a$ , соответственно для электрона с массой  $m_e$  или иона с массой  $m_a$ .

Скорость электрона может быть рассчитана по формуле:

$$v = 5,93 \cdot 10^7 \sqrt{\varepsilon[\text{эВ}]} \text{ см/с}, \quad (3)$$

а скорость частицы с относительной атомной массой  $A$  –

$$v = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\varepsilon[\text{эВ}]/A} \text{ см/с}. \quad (4)$$

Так как разряд в малых газовых промежутках можно считать стационарным, и электрон на своем пути испытывает множество столкновений, то потери энергии при столкновениях примерно равны кинетической энергии электрона, получаемой им на длине свободного пробега. Скорость нарастания энергии электрона в осциллирующем поле при учете одних лишь упругих столкновений ( $E = E_a / \sqrt{2}$ ) равна [3]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = (\Delta\varepsilon_E - \Delta\varepsilon_{\text{упр}}) v_m = \left[ \frac{e^2 E^2}{m(\omega^2 + v_m^2)} - \frac{2m}{M} \varepsilon \right] v_m, \quad (5)$$

где  $v_m$  – частота столкновений электронов с тяжелыми частицами (здесь индексы у  $m$  и  $M$  опущены).

В свою очередь, частота столкновений зависит от давления и температуры [36]:

$$v_m \cong v_{ea} = 0,63 \cdot 10^{-8} n_g \left( \frac{T_e}{0,026} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $n_g$  – плотность воздуха, определяющая давление  $p$  ( $p = nkT$ ).

В установившемся режиме существует баланс между энергией, получаемой электроном от поля и теряемой им при столкновениях. Величина кинетической энергии, приобретаемой заряженной частицей между столкновениями, зависит от соотношения  $E/p$ , поскольку её ускорение пропорционально  $E$ , а расстояние, на котором оно происходит,  $l \sim 1/p$ .

Из экспериментов известно, что газовая среда (воздух) в области разряда является слабоионизированной и неравновесной, т. е. выполняется соотношение:

$$T_e > T_i \sim T_g. \quad (7)$$

Здесь  $T_g$  – температура газа.

Поскольку температура является характеристикой плазмы, подчиняющейся *максвелловскому* распределению, то в нашем случае, когда речь идет о разряде, и это распределение нарушается, имеет смысл говорить только о средней энергии заряженных частиц, а не об их температуре.

В обзоре [4] рассмотрены и обобщены публикации различных авторов, касающиеся формирования изображений разнообразных предметов в электромагнитных полях высокой напряженности. Анализ фотографий показывает, что изображения слагаются из отдельных точек, каждая из которых является результатом засветки фотоматериала и формируется за счет воздействия на фотоматериал локальной электронной лавины. Эта лавина развивается при достаточно высокой напряженности электрического поля из отдельных участков исследуемого объекта благодаря наличию фоновых заряженных частиц или электронов, эмитированных с поверхности объекта. Время жизни электронной лавины составляет  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с, так как в процессе ее развития на диэлектрической поверхности носителя накапливается отрицательный заряд, который экранирует электрическое поле в области лавины и тем самым снижает его напряженность до величины, недостаточной для дальнейшего развития разрядного процесса.

Таким образом, первичным и основным элементом сложного процесса разряда является электронная лавина, которая развивается в газе под действием электрического

поля.

В простейшем случае действие такой лавины можно представить следующим образом. Под действием электрического поля электрон приобретает энергию и, когда его энергия превышает потенциал ионизации, электрон ионизует молекулу газа, теряя при этом энергию. В результате ионизации образуются уже два медленных электрона, которые, ускоряясь полем, производят также ионизацию других молекул, что приводит к появлению уже четырех электронов и т. д.

Рассмотренный процесс наблюдается независимо от того, является ли поле постоянным или переменным. Другими словами, перемещаются ли электроны в определенном направлении (от катода к аноду) или совершает колебательные движения в такт изменения переменного электромагнитного поля.

Развитие лавины тормозят потери энергии электронов при столкновениях, что отражено в выражении (5), и потери самих электронов. Последнее обстоятельство может привести к обрыву цепной реакции размножения электронов. Цепная реакция, в свою очередь, зависит от многих факторов, в частности, от рода газа, давления и пр.

В физике газового разряда существует понятие *потенциала зажигания*. Эта величина соответствует напряжению, при котором происходит пробой разрядного промежутка. Потенциал зажигания зависит от рода газа, материала катода, давления  $p$  и длины разрядного промежутка  $d$ . Экспериментальные кривые изменения потенциала зажигания, зависящие от произведения  $pd$ , обычно называются кривыми *Пашена*. На рис. 1. приведены типичные кривые *Пашена* для воздуха и азота. Из приведенных рисунков следует, что по мере уменьшения давления напря-

жение пробоя (потенциал зажигания) уменьшается. Минимум напряжения пробоя  $U_{np}$  наблюдается при малых  $pd$  и, в частности, для воздуха  $pd_{min}=80 \text{ Па}\cdot\text{см}$  [5].

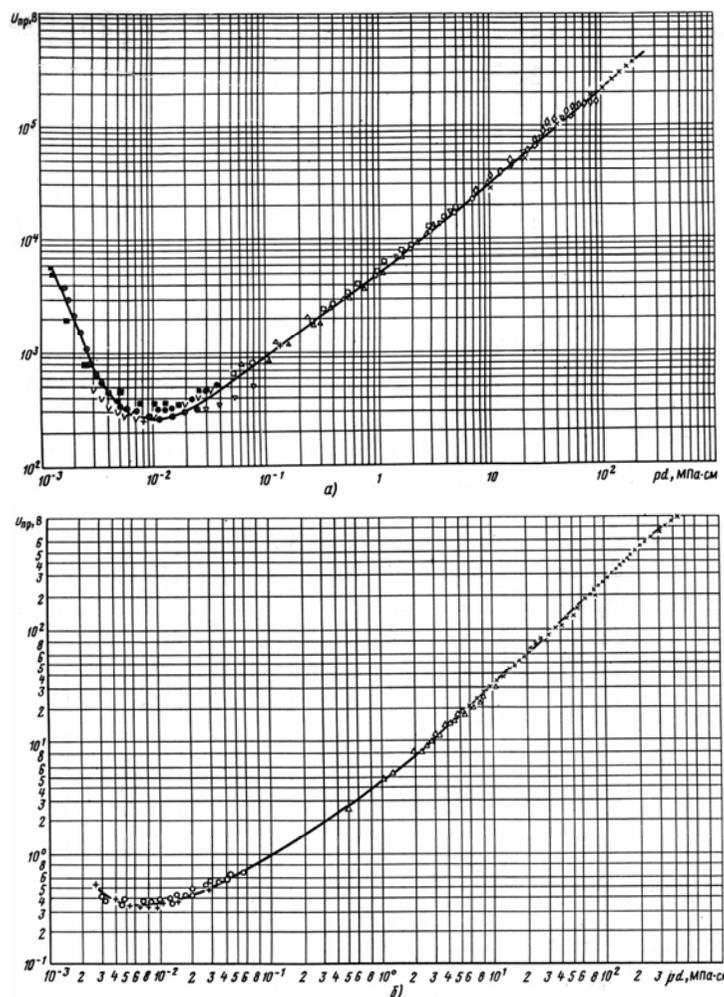


Рис. 1. Кривые Пашена для азота (а) и воздуха (б)

Однако в [6] экспериментальным путем обнаружено, что при пробое малых разрядных промежутков, подобных тем, что используются при газоразрядной фотографии, начальный участок кривой Пашена претерпевает значительные искажения. Поскольку эти результаты имеют прямое к нам отношение, остановимся на их анализе подробнее.

Эксперименты были проведены на установке, позволяющей получать искровые разряды между двумя плоскими электродами, выполненными из стали, при приложении к ним постоянного электрического поля. Межэлектродное расстояние  $h$  менялось от 0,007 до 1 мм с точностью 0,001 мм. Рабочие поверхности стальных электродов имели чистоту поверхности с величиной среднего стандартного отклонения профиля, не превышающей 0,8 мкм от средней линии. Давление воздуха в разрядном промежутке было постоянным и составляло приблизительно 760 Торр. Результаты измерений приведены на рис. 2 в виде зависимости  $E_{np}=f(h)$ .

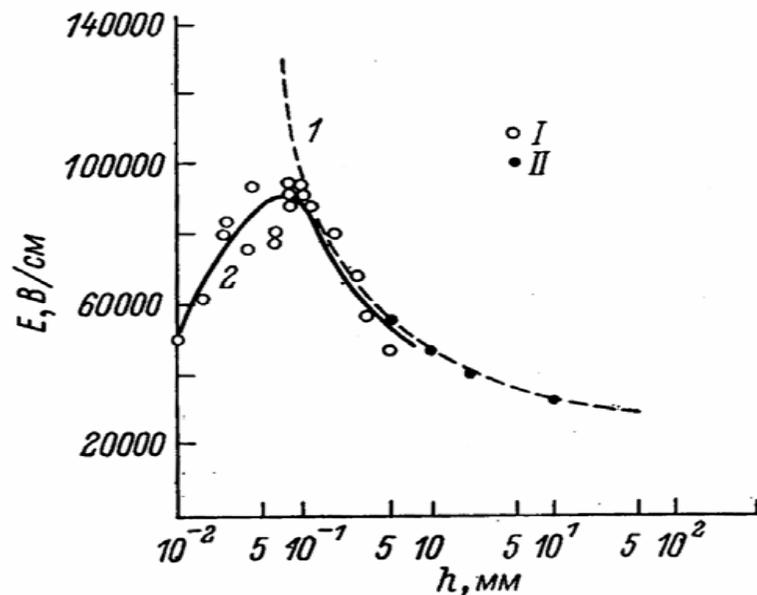
Из рис. 2 видно, что зависимость напряженности, вызывающей пробой  $E_{np}$ , от величины пробойного промежутка  $h$ , имеет максимум напряженности при  $h \cong 0,1 \text{ мм}$ .

Авторы работы [6] впервые качественно объясняют характер изменения кривой  $E_{np}=f(h)$  на основе ряда положений квантовой механики, а именно, за счет эффекта Шоттки и «туннельного» эффекта.

Сущность эффекта Шоттки заключается в уменьшении работы выхода электронов из твердого тела под влиянием внешнего ускоряющего их электрического поля.

Далее авторы [6] рассмотрели процесс ионизации молекул с учетом эффекта Шоттки и показали, что вероятность ионизации молекул газа под действием электрического поля выше, чем при таунсендовской ионизации. При

этом максимальное значение вероятности ионизации происходит не при бесконечно большой напряженности поля, а при некотором конечном его значении.



**Рис. 2.** Зависимость напряженности пробоя от величины газового промежутка. I — экспериментальные данные [6], II — для плоских электродов [7]

Явление туннельного эффекта приводит к появлению новых процессов образования заряженных частиц на катоде и в межэлектродном промежутке. В числе таких процессов авторы [6] называют автоионизацию молекул газа и автоэлектронную эмиссию. Далее следует вывод, что при рассмотрении пробоя малых промежутков помимо таунсендовских процессов участвуют также и квантовомеханические процессы, которые являются определяющими при рассмотрении газоразрядной фотографии.

Очевидно, что характер ионизации в межэлектродном пространстве значительно усложняется при работе с объектами, являющимися частью живой природы (человек, растения, животные), поскольку на процессы ионизации начинают оказывать сильнейшее внимание продукты органики и выделяющаяся влага (вода).

## 1.2. Роль паров воды в газоразрядной фотографии

В работе [8] исследованы процессы эмиссии электронов во влажном воздухе при атмосферном давлении. Токи эмиссии были зарегистрированы только в неоднородных электрических полях у катода, и их величина зависела от влажности воздуха. Авторы полагают, что наблюдаемая в таких условиях автоэлектронная эмиссия обусловлена усилением поля у катода вследствие образования двойного электрического слоя. В [2] произведена качественная оценка влияния адсорбированных дипольных молекул воды на распределение тока автоэлектронной эмиссии по поверхности катода в зависимости от распределения поля у его поверхности. Расчетным путем показано возможное образование заметного тока автоэлектронной эмиссии из-за усиления поля примерно на два порядка у поверхности электродов по причине образования двойных электрических слоев на микровыступах в уже приложенном поле напряженностью до 1 МВ/м.

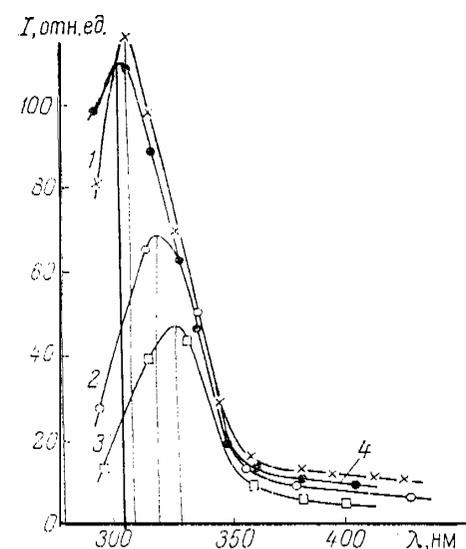
Для проверки данного предположения в [2] был поставлен следующий изящный эксперимент. В качестве источника неоднородности электрического поля использовались листья растений, которые размещались в зазоре между электродами. По мнению авторов, это позволило без изменения внешних условий эксперимента, в частности, тем-

пературы и относительной влажности окружающей среды, в течение короткого времени изменять влажность воздуха непосредственно вблизи электродов. Такое предположение основано на факте, что в процессе жизнедеятельности свежего листа у его поверхности создается относительная влажность воздуха, близкая к 100%, которая затем по мере увядания листа стремилась к влажности окружающего воздуха.

Свежесрезанный лист растения размещался между электродами разрядного устройства. Само устройство помещалось в светонепроницаемой камере напротив входной щели монохроматора люминесцентной установки. Это позволяло регистрировать спектры излучения разряда в ультрафиолетовой и видимой областях и контролировать интенсивность свечения электроразрядных процессов в коротких разрядных промежутках на избранных длинах волн (в пределах спектральной области, которая могла быть выделена монохроматором). При регистрации спектра ширина входной щели монохроматора МДР-4 не превышала 0,1-0,2 мм. Результаты измерений огибающей спектра приведены на рис. 6. Из рис. 6 отчетливо следует, что при снижении относительной влажности воздуха со 100% до 90% (кривые 1 и 3), т. е. на 10% наблюдается сдвиг максимума огибающей спектра излучения приблизительно на 20 нм, сопровождающийся изменением интенсивности излучения. Повторное увлажнение листа возвращает максимум огибающей в начальное положение ( $\lambda \approx 312$  нм).

По мнению авторов работы [2], зарегистрированный экспериментально сдвиг максимума огибающей (с  $\lambda = 312$  нм до  $\lambda = 332$  нм) объясняется увеличением энергии электронов, вырывааемых из электрода, вследствие усиления электрического поля за счет образования двойного элек-

трического слоя из дипольных молекул воды. Далее из их расчетов следует, что важнейшей особенностью разряда в рассматриваемых условиях является существенная роль автоэлектронной эмиссии, интенсивность которой, с одной стороны, определяется эффектом Шоттки, т. е. снижением работы выхода электрона из материала электрода в электрическом поле высокой напряженности, а, с другой стороны, туннелированием электронов. Вклад последнего явления в образовании газоразрядного изображения возрастает по мере уменьшения расстояния между электродами.



**Рис. 3. Огибающие спектров свечения листа растений при различном содержании свободной жидкости. 1 — свежесрезанный лист; 2, 3 — через 30 и 60 минут после срезки; 4 — после увлажнения [2]**

Не умаляя главенствующую роль приэлектродных процессов при реализации метода газоразрядной фотографии, мы хотели бы обратить внимание читателей на то, что

присутствие в разряде молекул воды приводит не только к образованию двойного электрического слоя, но и вызывает протекание в разряде большого количества плазмохимических реакций (свыше двухсот). Эти реакции влияют и на развитие электронных лавин, и на качество изображения исследуемого объекта.

Кроме того, утверждение, что основной вклад в спектр излучения разряда во влажном воздухе вносят возбужденные молекулы азота и воды [2], является недостаточно корректным. В настоящее время накоплен определенный опыт при изучении разрядов в условиях переменной влажности воздуха [9, 10] и его, видимо, также желательно использовать при рассмотрении газоразрядных процессов в малых межэлектродных промежутках.

Представленное объяснение сдвига огибающей максимума излучения (см. рис. 3) при изменении относительной влажности воздуха со 100% до 90% вряд ли можно считать исчерпывающим, поскольку оно учитывает лишь влияние двойного электрического слоя, состоящего из дипольных молекул воды.

Обратимся еще раз к рис. 3. Строго говоря, максимум излучения, приведенный на кривой 4, приходится в первоисточнике [2] не на 312, а на 306 нм. В пределах стандартной погрешности спектральных измерений аналогичное утверждение справедливо и для максимума, показанного на кривой 1. Другими словами, при относительной влажности воздуха, близкой к 100%, наиболее интенсивным является излучение на длине волны  $\lambda \approx 306$  нм. Исследование газового разряда во влажном воздухе указывает на то, что излучение на  $\lambda \approx 306,4$  нм принадлежит гидроксилу *ОН*. Это предположение прекрасно согласуется с тем, что при относительной влажности воздуха порядка 100% происходит

интенсивная диссоциация молекул воды с образованием гидроксила *ОН*.

Для понимания природы диссоциации молекул воды обратимся к рис. 4, на котором представлены зависимости доли энергии, теряемой электронами по различным каналам электрон-ионного взаимодействия [11]. Расчеты выполнены в предположении максвелловской функции распределения электронов по энергиям. Из рис. 4 видно, что при температуре электронов  $T_e \leq 1,5$  эВ разложение молекул воды определяется в основном колебательным возбуждением.

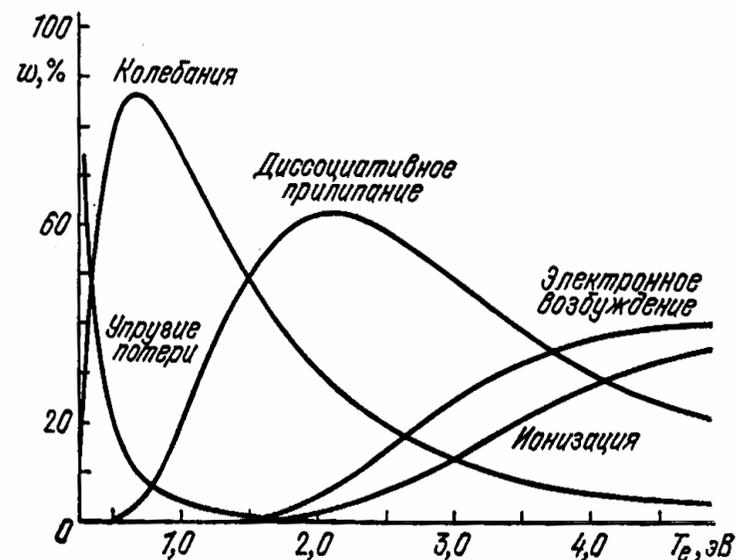


Рис. 4. Распределение энергии, теряемой электронами в  $H_2O$  по различным каналам возбуждения [11]

В [11] рассмотрен следующий механизм разложения молекул воды через колебательно-возбужденное состояние:

- ◆ возбуждение электронами нижних колебательных уровней  $H_2O$ ;
- ◆ заселение высоко-возбужденных состояний в процессе  $IV$ -релаксации;
- ◆ химические реакции, определяющие процесс разложения молекул воды, осуществляются по неразветвленному цепному механизму, инициируемому диссоциацией:

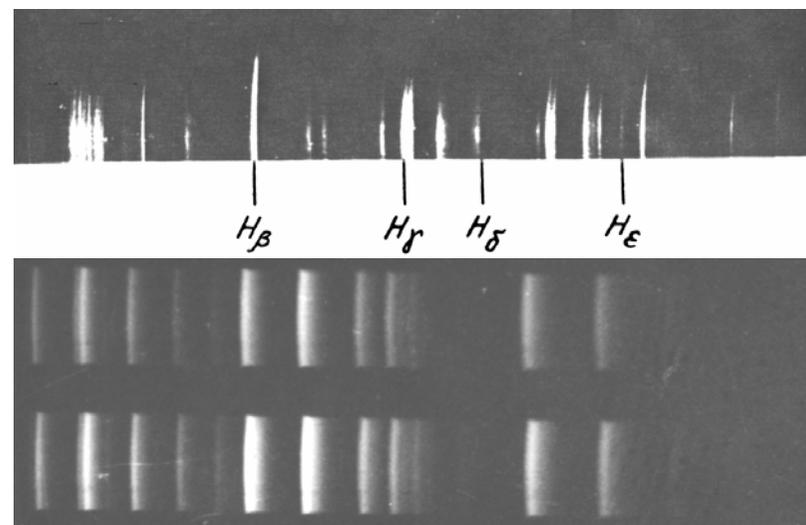


Таким образом, максимум огибающих спектра разряда при 100% относительной влажности воздуха на рис. 3 хорошо согласуется с протеканием реакции (8).

На рис. 5 представлены эмиссионные спектры разряда, записанные с помощью спектрографа *ИСП-51*, для влажного и сухого воздуха. Даже читателю, далекому от спектроскопии, хорошо видны те различия, которые зафиксированы на фотопленке: в первом случае спектр линейчатый, представленный, преимущественно, линиями водорода серии *Бальмера* ( $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$  и  $H_\epsilon$ ), а во втором – полосовой (молекулярный азот).

Из рис. 5 и экспериментов по изучению высокочастотного разряда во влажном воздухе также следует [9, 10], что по мере уменьшения относительной влажности воздуха в спектрах излучения исчезают линии, принадлежавшие продуктам диссоциации молекул воды, и все более отчетливо регистрируется спектр азота, характерный для сухого воздуха. В этом отношении результат, представленный на рис. 3, не является исключением. При уменьшении относи-

тельной влажности воздуха до 90% максимум огибающей спектра излучения приходится на  $\lambda \approx 332$  нм. С учетом погрешности измерений здесь, видимо, следует говорить о длине волны не 332, а 337,1 нм, который принадлежит уже азоту, а не гидроксилу  $OH$ .



**Рис. 5. Спектры газового разряда при пониженном давлении:**

вверху – во влажном воздухе при относительной влажности  $\varphi$ , близкой 100%; внизу – в сухом воздухе, когда  $\varphi \leq 70\%$  для двух случаев энерговклада (на нижнем спектре более высокий энерговклад)

Проведенное рассмотрение процесса диссоциации молекул воды в газовом разряде полностью не отрицает роль двойного электрического слоя, состоящего из дипольных молекул воды на поверхности исследуемого объекта, однако указывает на существенную роль объемных процессов, протекающих в межэлектродном зазоре. Кроме того, про-

дукты разложения молекул воды влияют и на величину потенциала зажигания.

Укажем еще на одно важное обстоятельство, которое необходимо принимать во внимание при рассмотрении физико-химических процессов, сопровождающих газоразрядную фотографию. Повышенная влажность воздуха определяется не только метеоусловиями, но и характером исследуемого объекта (от листа растения до отдельных органов человека), поверхность которого содержит в том или ином виде влагу (в частности, пот). И здесь в газоразрядных процессах наряду с разложением молекул  $H_2O$  большую роль играют свойства разряда, изменяющиеся под влиянием повышенной влажности воздуха.

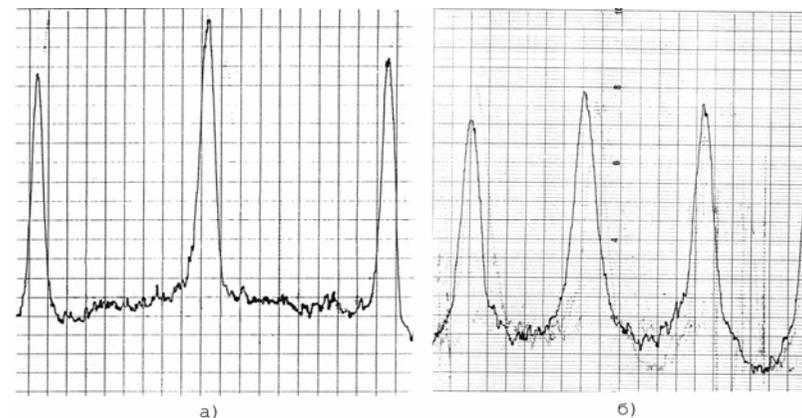
Из курса спектроскопии известно, что по форме спектральных линий можно рассчитать важнейшие характеристики разряда: температуру нейтральных и заряженных частиц, функцию распределения излучающих частиц по скоростям и пр. Однако процесс обработки спектральных линий является достаточно трудоемким и выходит за рамки данной монографии. Отметим лишь, что определение газовой температуры  $T$  производится по полуширине измеренной спектральной линии  $\Delta\nu$  с использованием соотношения [12]:

$$\Delta\nu = 7,16 \cdot 10^{-7} \nu_0 \sqrt{T/\mu}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – атомная масса, а  $\nu_0$  – резонансная частота спектральной линии, записанной на интерферометре *Фабри-Перо*.

Примеры записи спектральных линий для аргона и водорода приведены на рис. 6б и 7б. Обычно значения температуры, полученные вследствие использования выражения (9), оказываются завышенными (иногда в не-

сколько раз), поскольку расчет производится без выделения доплеровского уширения  $\Delta\nu_D$ . Для повышения точности измерений необходимо учитывать аппаратный контур интерферометра *Фабри-Перо*  $k(\nu - \nu')$ . Его вид также показан на рис. 6а и 7а.



**Рис. 6.** Аппаратный контур интерферометра *Фабри-Перо* (случай а) и измеренный им контур линии аргона (случай б) для высокочастотного разряда ( $f=37,0$  МГц,  $I = 10,0$  мА,  $p \approx 20$  Торр)

Выделение истинного контура спектральной линии  $\varphi(\nu)$  по измеренному  $f(\nu)$  сводится к решению интегрального уравнения *Фредгольма I рода* типа свертки [13]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(\nu - \nu') \varphi(\nu') d\nu' = f(\nu). \quad (10)$$

Процесс нахождения  $\Delta\nu_D$  подробно рассмотрен в [10, 13]. Отметим лишь, что для расчета температуры в (9) необходимо подставлять  $\Delta\nu_D$ , а не  $\Delta\nu$ .

Температура электронов  $T_e$  определяется по относительной интенсивности спектральных линий водорода  $H_\gamma$  ( $\lambda = 434,047$  нм) и  $H_\delta$  ( $\lambda = 410,174$  нм) по формуле [14], пересчитанной для водорода:

$$T_e = \frac{0,837 \cdot 10^3}{\lg(I_{H_\gamma} / I_{H_\delta}) - 0,2271}, \quad (11)$$

где  $I_{H_\gamma}$  и  $I_{H_\delta}$  – интенсивности линий водорода серии Бальмера  $H_\gamma$  и  $H_\delta$  (см. рис. 5а).

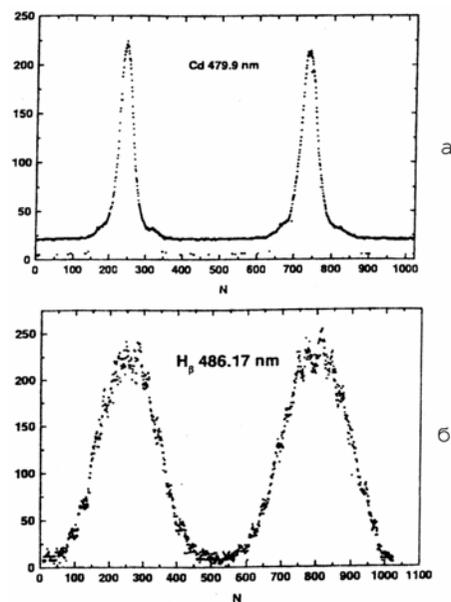


Рис. 7. Линия  $Cd$ , являющаяся аппаратным контуром интерферометра Фабри-Перо типа  $RC\ 150$  (США) и измеренный им контур линии  $H_\beta$ . Случаи а и б, соответственно ( $f=27,0$  МГц,  $I = 15,0$  мА,  $p \approx 20$  Торр)

Строго говоря, по формуле (11) рассчитывается не температура электронов  $T_e$ , а температура возбуждения  $T_b$ , однако для *больцмановского* заселения уровней часто отождествляют обе температуры, полагая, что  $T_e \geq T_b$ , [15].

Максимум излучения радикала  $OH$  приходится на  $\lambda \sim 306,4$  нм. При хорошей разрешающей способности спектрографа наряду с этой линией в эксперименте легко регистрируются и другие линии как это приведено в табл. 1; здесь  $K$  – квантовое число вращательных уровней).

Таблица 1

Линии вращательного спектра радикала  $OH$ , регистрируемые в слаботоочном разряде при нормальном атмосферном давлении

$K$	4	5	6	10	13
$\lambda, \text{нм}$	308,32	308,52	308,73	309,86	311,02

Из спектроскопии известно [12], что по измеренным линиям радикала  $OH$  может быть рассчитана вращательная температура  $T_r$ . Для этой цели пригодна методика, изложенная в [16]. Однако нам неизвестны случаи хорошей записи спектра гидроксила применительно к газоразрядной фотографии. Одной из причин этого является низкая чувствительность фотопластинок или фотопленок, вследствие чего не удается зарегистрировать эмиссионный спектр слаботоочного разряда.

В [9, 10] экспериментальным путем показано, что в высокочастотном разряде при относительной влажности воздуха ( $\varphi_{\text{отн}} \cong 95-98\%$ ) образуется холодная неравновесная плазма, у которой газовая температура  $T$  близка к комнатной, а температура электронов  $T_e$  не превышает  $0,2$  эВ (или  $2000$  К). На рис. 8 показаны кривые изменения этих

температур в зависимости от относительной влажности воздуха  $\varphi$ . Видимо, аналогичное охлаждение всех компонент газового разряда происходит и при изучении живого объекта (или же исследовании его физиологического состояния). Человек, как правило, слабо реагирует на электрические разряды при правильном выборе режима их работы. На его коже не остаются следы ожога, что позволяет использовать метод газоразрядной фотографии при работе с биологическими объектами. Это обстоятельство является косвенным подтверждением, что мы имеем дело с «холодными» заряженными и нейтральными частицами.

Выше отмечалось, что реализация метода газоразрядной фотографии происходит в слаботочном режиме (ток менее  $1 \text{ mA}$ ). Выполнение этого требования является непременным условием при работе с живыми организмами. В противном случае возможно протекание необратимых процессов. Величина тока в разряде напрямую связана с температурой заряженных частиц (точнее с их средней энергией). При этом, чем больше ток, тем выше температура. Применительно к высокочастотному разряду это обстоятельство отражено на рис. 9.

Плотность заряженных частиц зависит от длительности ионизирующего воздействия. Электроны, как правило, «нагреваются» быстрее. На рис. 10 представлены расчетные зависимости изменения плотности заряженных частиц от длительности импульса высокочастотного излучения. Из рис. 10 видно, что спустя 2-3  $\mu\text{s}$  от начала процесса ионизации концентрация частиц остается практически постоянной.

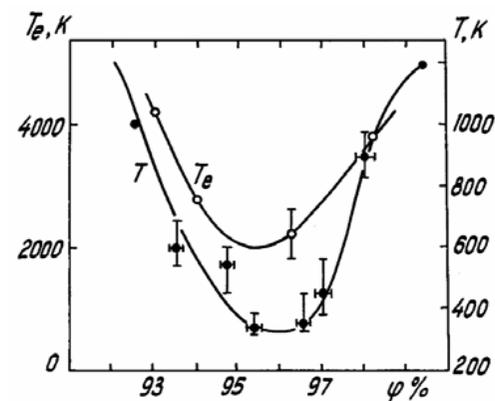


Рис. 8. Зависимость газовой температуры  $T$  и температуры  $T_e$  от относительной влажности воздуха

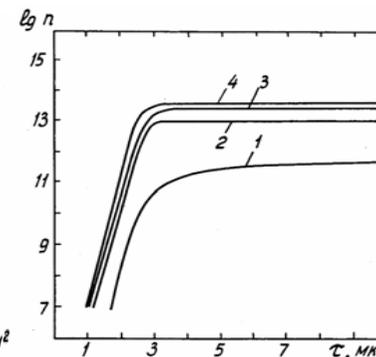
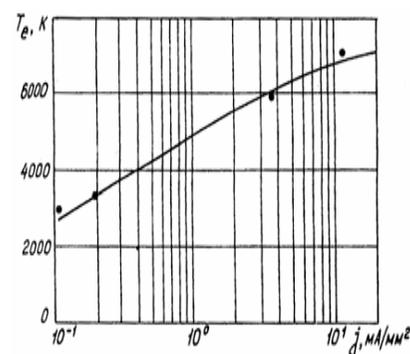


Рис. 9. Изменение температуры электронов при разряде во влажном воздухе в зависимости от плотности разрядного тока

Рис. 10. Зависимость плотностей ионов и электронов от времени, полученные при пониженном давлении: 1 -  $[O_2^-]$ ; 2 -  $[O_2^+]$ ; 3 -  $[N_2^+]$ ; 4 -  $n_e$

Аналогичным образом изменяется и энергия заряженных частиц. Однако электроны в разряде нагреваются значительно быстрее, чем ионы (рис. 11).

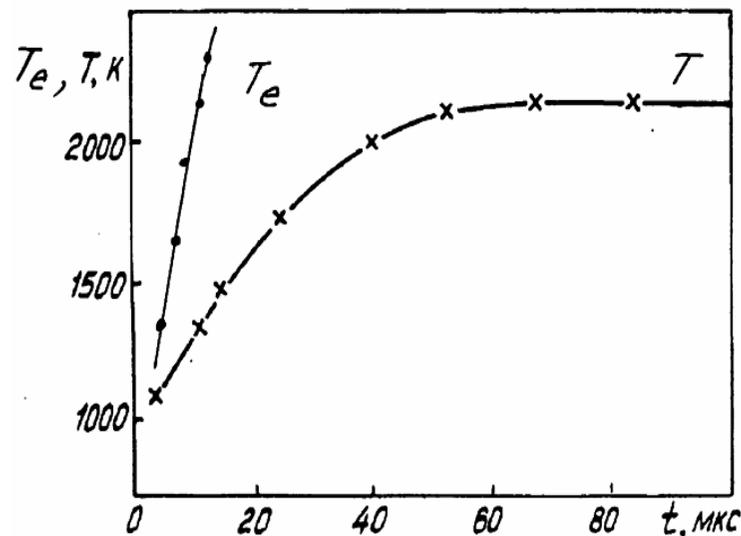


Рис. 11. Газовая температура  $T$  и температура электронов  $T_e$  как функция длительности действия ионизирующего излучения.  $f=2,4$  ГГц,  $P=200$  Вт,  $\tau_u = 1,50-1,75$  мс,  $F=300$  Гц (частота повторения импульсов)

Большую сложность представляет описание и моделирование плазмохимических процессов в разряде. Грубая оценка показывает, что в зависимости от условий эксперимента число плазмохимических реакций во влажном воздухе может превысить две сотни. В их число входят как прямые, так и обратные реакции. Ниже будет произведен их анализ.

### 1.3. Физико-химические процессы, происходящие при ионизации влажного воздуха

Как известно, понижение температуры приводит к появлению у холодной неравновесной плазмы ряда специфических свойств, отличающих ее от свойств *дебаевской* низкотемпературной плазмы [10, 17]. В работах [18, 19] для определения механизмов охлаждения плазмы была произведена предварительная оценка сечений взаимодействия  $\sigma$  и констант скоростей  $k$  важнейших плазмохимических реакций.

Принимая во внимание результаты экспериментов, в качестве основных механизмов охлаждения плазмы рассмотрены процессы, связанные с диссоциативным прилипанием электронов к молекулам  $H_2O$  и с возбуждением колебательных уровней молекулы воды с последующим ее распадом.

В [19] произведен анализ известных сечений возможных плазмохимических реакций и установлены из них основные, определяющие механизмы охлаждения плазмы. В результате такого рассмотрения была записана следующая система уравнений, которая описывает ионизацию воздуха, насыщенного парами воды:

$$\frac{d[N_2^+]}{dt} = k_{i_1} n_e [n_g] - k_{r_1} n_e [N_2^+], \quad (12)$$

$$\frac{d[O_2^+]}{dt} = k_{i_2} n_e [n_g] - k_{r_2} n_e [O_2^+], \quad (13)$$

$$\frac{d[H_2O]}{dt} = -n_e [H_2O] (k_r + k_{a_1} + k_{a_2}) - k_{com_1} [O^-] [H_2O], \quad (14)$$

$$\frac{d[O^-]}{dt} = k_{a_1} n_e [H_2O] - k_{d_1} n_e [O^-] - k_{conv_1} [O^-] [H_2O], \quad (15)$$

$$\frac{d[O_2^-]}{dt} = K_1 [O_2] n_e [O_2] + K_3 [O_2] n_e [H_2O] - K_2 [O_2^-] [H_2O] [O_2], \quad (16)$$

$$\frac{d[H^-]}{dt} = k_{a_2} n_e [H_2O] - k_{d_2} n_e [H^-] - k_{ad} [H^-] [O_2] - k_{conv_2} [H^-] [H_2O], \quad (17)$$

$$n_e = [N_2^+] + [O_2^+] - [O^-] - [O_2^-] - [H^-]. \quad (18)$$

Здесь квадратными скобками обозначены концентрации соответствующих частиц,  $n_e$  – концентрация электронов,  $n_g$  – концентрация газа.

Уравнения (12) и (13) описывают наработку и гибель положительных молекулярных ионов азота  $N_2^+$  и кислорода  $O_2^+$ . Первые слагаемые справа соответствуют первичным ионизационным процессам – ионизации молекул газа  $N_2$  и  $O_2$  в поле электромагнитной волны  $E_0 \exp(i\omega t)$  с константами скоростей [20]  $k_{i_{1,2}} = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $k_i \sim v_i$ , где  $v_i$  – частота ионизации. В слабых полях ( $T_e \ll I$ , где  $I$  – потенциал ионизации) главная зависимость  $v_i$  от  $T_e$  характеризуется [3] *больцмановским* законом  $v_i \sim \exp(-I/T_e)$ , в зависимости от поля  $v_i \sim \exp(-const/E^2)$ , где  $E = E_0 / \sqrt{2}$  – среднеквадратичное значение поля. Последние слагаемые описывают уход положительных ионов за счет диссоциативной рекомбинации [21]:  $k_{r_{1,2}} = (2-3) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Константы скорости диссоциативной рекомбинации слабо зависят от температуры электронов и нейтралов, но

характер этих зависимостей разнообразен и определяется механизмом процесса для конкретного иона. В частности, для реакций диссоциативной рекомбинации электронов с ионами  $N_2^+$  и  $O_2^+$  известны соответственно следующие экспериментальные зависимости [22]:

$$k_{r_1} \sim 3 \cdot 10^{-7} (T_e/300)^{-0,02}, \quad (19)$$

$$k_{r_2} \sim 2 \cdot 10^{-7} (T_e/300)^{-0,7}.$$

Уравнение (14) определяет изменение концентрации паров воды за счет распада молекул  $H_2O$ , постоянная скорости которого в рамках однотемпературного приближения (приближения равновесия колебательных мод) может быть записана в виде [11]:

$$k_r = k_{vv}^0 (E_d / T_v)^s \exp(-E_d / T_v),$$

где  $k_{vv}^0 = 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$  – константа скорости резонансного  $vv$ -обмена;  $s=3$  – эффективное число колебательных степеней свободы  $H_2O$ ;  $E_d \approx 5,12 \text{ эВ}$  – энергия диссоциации молекул  $H_2O$ ;  $T_v$  – температура возбуждения колебательных уровней  $H_2O$ . Поскольку колебательные уровни молекулы  $H_2O$  близко лежат друг к другу, то достаточно определить  $k_r$  для одного из этих уровней  $k_r (T_v \approx 5400 \text{ К}) \approx (10^{-17} - 10^{-18}) \text{ м}^3/\text{с}$ .

Накопление в системе атомарных  $O^-$ ,  $H^-$  и молекулярных  $O_2^-$  отрицательных ионов описывается уравнениями (15)-(17). При этом образование атомарных ионов кислорода  $O^-$  и водорода  $H^-$  происходит в основном за счет диссоциативного прилипания электронов к молекулам  $H_2O$  соответственно с константами скоростей  $k_{a_1} = 1,3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $k_{a_2} = 5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ . Диссоциативное прилипание существенным оказывается при  $T_e > 1,5 \text{ эВ}$  и определяет эффективное разложение  $H_2O$  быстрыми электронами.

Процесс диссоциативного прилипания носит резонансный характер. Константа скорости диссоциативного прилипания с учетом резонансного характера процесса имеет вид [11]:

$$k_{a_{1,2}} \sim \sigma_a(E_{\max}) \sqrt{2E_{\max} / mc^2} \cdot c(\Delta E / T_e) \exp(-E_{\max} / T_e).$$

Здесь  $E_{\max}$  – энергия электронов, соответствующая резонансу;  $\Delta$  – его ширина;  $\sigma_a(E_{\max})$  – сечение диссоциативного прилипания электронов к  $H_2O$ , соответствующее резонансному пику. В процессах с образованием атомарных ионов  $O^-$  и  $H^-$  соответственно

$$E_{\max} = \begin{cases} 8,6 \text{ эВ} \\ 6,5 \text{ эВ} \end{cases}; \Delta E = \begin{cases} 2,1 \text{ эВ} \\ 1,0 \text{ эВ} \end{cases}; \sigma_a(E_{\max}) = \begin{cases} (1-1,3) \cdot 10^{-22} \text{ м}^2 \\ (5-7) \cdot 10^{-22} \text{ м}^2. \end{cases}$$

Гибель ионов  $O^-$  и  $H^-$  происходит в результате их разрушения электронным ударом с константами скорости  $k_{d_1} = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $k_{d_2} = 4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ , а также в реакциях ионно-молекулярной конверсии, ведущих к образованию устойчивого отрицательного иона гидроксила и молекулярного водорода. Постоянные скорости этих реакций соответственно равны [22]:  $k_{conv_1} = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $k_{conv_2} = 3,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ . Указанные процессы описываются вторыми и последними слагаемыми в уравнениях (15) и (19). Третье слагаемое в (19) описывает гибель атомарных ионов  $H^-$  в результате ассоциативного отрыва электрона в ионно-молекулярных реакциях с константой скорости  $k_{ad} = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Образование молекулярных ионов  $O_2^-$  более эффективно идет в реакциях с участием трех частиц (первые два слагаемых в уравнении (16), протекающих по известному механизму *Блоха-Брэдбери* [11] с константами скорости  $K_1 \approx K_3 = 1,4 \cdot 10^{-41} \text{ м}^6/\text{с}$ . Трехчастичное прилипание в газе

сравнительно высокого давления (превышающего  $13,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ), а также при небольших энергиях электронов может стать основным каналом гибели электронов. В отличие от диссоциативного прилипания этот процесс не требует заметных затрат энергии электронов, благодаря чему в интересующем нас диапазоне ( $T_e = 11600 \text{ К}$ ) его константа скорости слабо зависит от температуры электронов [22]:

$$K_1 \approx K_3 = 1,4 \cdot 10^{-41} (300 / T_e) \exp(-600 / T_e).$$

Последнее слагаемое в уравнении (16) описывает гибель ионов  $O_2^-$  в бинарной реакции с константой скорости  $K_2 = 1,6 \cdot 10^{-40} \text{ м}^6/\text{с}$ . Процессами, связанными с ионизацией молекул  $H_2O$  и образованием ионов  $H_2O^+$  мы пренебрегаем, так как  $\sigma_{iH_2O} \ll \sigma_{iN_2, O_2}$ . Константы скоростей ионизации  $k_{i_1}$  и  $k_{i_2}$  вычисляются по формуле  $\langle \sigma_i \bar{v}_e \rangle = k_i$  при  $T_e = 11600 \text{ К}$  и в наших численных расчетах берутся неизменными;  $\bar{v}_e$  – средняя скорость электронов при максвелловском распределении электронов по скоростям.

Для определения температуры  $T_e$  электронов плазмы используем известное уравнение [3]:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = - \sum_k k_{ek} v_m (T_e - T_g) + \frac{1}{3} \sum_k \frac{e^2 E_0^2 c^2 v_m}{mc^2 (v_m^2 + \omega^2)},$$

где  $T_g$  – температура газа, в нашем случае  $T_g \ll T_e$  и  $\omega^2 \ll v_m^2$  ( $\omega = 2\pi f$ ).  $k_{ek}$  – средний коэффициент передачи энергии от электронов тяжелым частицам, зависящий от  $T_e$  и связанный с упругими и неупругими столкновениями:  $v_k^l = \langle \sigma_k^l \bar{v}_e \rangle N_l$  – частота столкновений, соответствующая взаимодействию сорта “ $k$ ” с сечением  $\sigma_k$ ,  $N_l$  – плотность тяжелых частиц сорта  $l$ , участвующих во взаимодействии:  $\bar{v}_e = (8/3) \cdot c(2 \cdot T_e / \pi (mc^2))^{1/2}$  – средняя скорость электронов;

$\nu_m = \sum_l \nu_k^l$  – эффективная частота столкновений, которая определяется в основном упругими столкновениями электронов с нейтралами:

$$\nu_{en} = 4 \cdot 10^{-8} \sum_l n_g^{(l)} T_e^{1/2},$$

и ионами [10]:

$$\nu_{ei} \sim 0,44 \cdot 10^{-5} \sum_l n_i^{(l)} / T_e^{3/2}.$$

Для упругих столкновений коэффициент передачи энергии определяется отношением масс взаимодействующих частиц  $k_{ek} \sim 2m/M_1 \ll 1$  и поэтому, несмотря на сравнительно высокую частоту столкновений, упругие взаимодействия в рассматриваемой системе дают низкий вклад в отбор энергии от электронов. Отбор энергии от электронов происходит в основном за счет неупругих взаимодействий  $k_{ev} = (\epsilon_v / 1,5 T_e)$ , связанных с возбуждением колебательных уровней молекул  $H_2O$  с  $\epsilon_v \approx (0,17-0,2) \text{ эВ}$  [10],  $\nu_{ev} = \sigma_v \bar{v}_e^0 N_m^0 \cdot T_e^{1/2}$ , где  $N_m^0$  – концентрация молекул воды в основном состоянии,  $\bar{v}_e^0$  – средняя скорость электронов в поле,  $\sigma_v = 6 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2$  [3].

В качестве начальных значений плотности ионов  $N_2^+$  и  $O_2^+$  были взяты их фоновые значения, а начальные концентрации отрицательных ионов равны нулю:

$$[O^-] \Big|_{t=0} = [H^-] \Big|_{t=0} = [O_2^-] \Big|_{t=0} = 0,$$

$$[O_2^+] \Big|_{t=0} = [N_2^+] \Big|_{t=0} = 10^9 \text{ м}^{-3},$$

$$[H_2O] \Big|_{t=0} \sim 10^{21} - 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

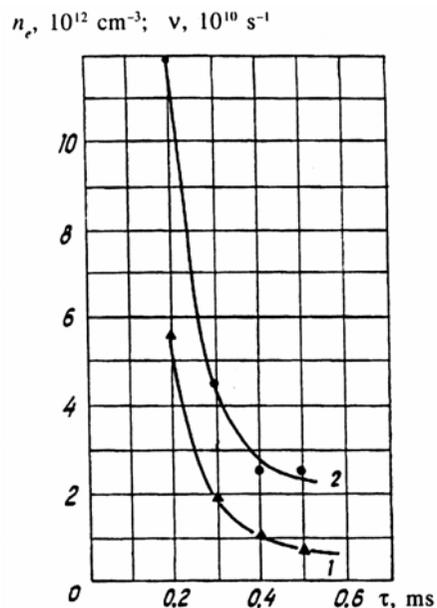
Температура электронов в момент  $t=0$  составляет  $T_{e0} = 11600 \text{ К}$ . Концентрация электронов находилась из условия квазинейтральности плазмы (18).

Отметим, что на сложную картину плазмохимических процессов оказывает заметное влияние также испарение в разряде воды и конденсация на заряженных частицах водяного пара. Наряду с существованием в разряде отрицательных ионов молекулярного кислорода  $O_2^-$  происходит также образование и накопление ионов  $OH^-$ , обладающих значительным дипольным моментом. Наличие радикала  $OH$  отчетливо регистрируется в спектре разряда (см. рис. 5). И когда речь идет об образовании двойного электрического слоя и об усилении электрического поля, то необходимо также принимать во внимание действие ионов гидроксила  $OH^-$ .

Опыты показывают [10], что при атмосферном давлении и значениях относительной влажности воздуха, равной 95-98%, в разряде сохраняется также электронная компонента, как это показано на рис. 12.

Таким образом, из изложенного следует, что вряд ли представляется возможным при рассмотрении газоразрядных процессов все сводить только к явлению автоэлектронной эмиссии или эффекту *Шоттки*, как это сделано в более ранней монографии [2]. Видимо, при газоразрядной визуализации поверхности твердых тел и живых объектов в разрядах протекают совершенно разные физические процессы. Общим для них лишь является свечение воздуха. В первом случае преобладают эффекты, рассмотренные в [2], а во втором – проявляется специфика разряда во влажном воздухе, описанная выше. Опыт работы с углеводородами дает основания полагать, что характер процессов, проте-

кающих в разряде с их участием, аналогичен тем, что наблюдается во влажном воздухе.



**Рис. 12. Характеристики плазмы при относительной влажности воздуха, равной 96,5%:**

- 1 – изменение во времени концентрации электронов;
- 2 – изменение частоты столкновения электронов с ионами

На наш взгляд, весьма дискуссионным представляется рассмотрение вопроса, каким именно образом происходит регистрация изображения в газоразрядной фотографии. В [23] предполагается, что существующие неоднородности электрических полей в межэлектродном пространстве стимулирует перенос (по направлению нормали) к поверхности исследуемого объекта влаги (или иных реагентов), которая осаждается затем на противоположном электроде. Этот процесс, видимо, усиливается за счет зарядки отрица-

тельными ионами (и электронами) регистрирующей пленки (фотобумаги и пр.). В [24] показано, что скорости конденсации (а затем и коагуляции) водяного пара (и капель воды) определяется квадратом напряженности электрического поля  $E^2$ . Это обстоятельство хорошо объясняет причину формирования изображений металлических предметов во влажном воздухе [23].

Что касается газоразрядного фотографирования живой ткани, то испарение влаги с поверхности растений или кожи человека приводит к уменьшению парциального давления водяного пара у поверхности исследуемого объекта, что приводит к перегонке влаги из более глубоко лежащих слоев на поверхность, т. е. способствует осушению поверхности объекта. Одновременно испарение влаги вызывает дополнительное охлаждение поверхности исследуемого объекта, в результате чего живое существо не получает ожог.

При газоразрядной фотографии на фотобумаге регистрируется чаще всего не сами объекты исследований (например, пальцы рук), а ореолы от них. Видимо, это вызвано тем, что сопротивление кожи в месте контакта с электродом оказывается больше, чем сопротивление воздушного промежутка электрод – наружная поверхность пальцев. В результате этого напряжение пробоя непосредственно через кожу оказывается выше, чем напряжение пробоя воздуха. А поскольку поверхности прижатых к электроду пальцев имеют в поперечном сечении квазиовальную форму, то по мере увеличения расстояния от электрода до поверхности пальцев, видимо, существует минимальное значение напряжения пробоя, который и регистрируется на фотобумаге в виде ореола вокруг пальцев испытуемого (см. например, [1]).

## Глава 2.

### МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Непрерывным условием получения изображения объектов в методе газоразрядной фотографии является наличие электрического разряда в газе. Такой разряд может быть создан при использовании источников высоковольтного напряжения переменного, постоянного, импульсного, модулированного тока.

Известно большое разнообразие способов генерации напряжения высокого уровня и схемных решений для их реализации. В этой связи уместно привести ниже краткую классификацию генераторов высокого напряжения, рассматриваемых в рамках настоящей монографии.

#### 2.1. Классификация генераторов высокого напряжения

1. Генераторы импульсно-периодических затухающих колебаний на электрических разрядниках, их аналогах и коммутаторах:

1.1. С емкостными накопителями энергии:

1.1.1. Резонансные трансформаторы *Тесла*.

1.1.2. Аппараты *Д'Арсонваля*.

1.1.3. Мостовые резонансные преобразователи напряжения.

1.1.4. Преобразователи с умножением напряжения в первичной цепи.

1.2. С индуктивными накопителями энергии:

1.2.1. Индукторы.

2. Генераторы незатухающих колебаний с активными элементами на основе электронных ламп или полупроводниковых элементов:

2.1. Однотактные и двухтактные генераторы с внешним возбуждением:

2.1.1. Немодулируемые.

2.1.2. С использованием модуляции:

- широтно-импульсной.
- частотно-импульсной.
- амплитудно-импульсной.
- смешанных видов.

2.2. Однотактные и двухтактные автогенераторы, генераторы с положительной обратной связью:

2.2.1. С индуктивной (трансформаторной, автотрансформаторной) обратной связью.

2.2.2. С емкостной обратной связью.

2.2.3. Генераторы релаксационных колебаний.

3. Другие виды генераторов:

3.1. Мостовые *LC*-генераторы с ключевым управлением.

3.2. Генераторы на коммутируемых конденсаторах, генераторы импульсных напряжений.

3.2. Преобразователи напряжения на конденсаторах с модулируемой емкостью.

3.3. Преобразователи с модулируемой индуктивностью.

3.4. Генераторы на основе пьезоэлектрических трансформаторов.

## 2.2. Высокочастотные трансформаторы *Тесла*

Одним из наиболее доступных и простых методов получения высоковольтного напряжения является использование резонансного трансформатора *Тесла* (рис. 13) [25-27].

Устройство работает следующим образом. Сетевое напряжение промышленной частоты через разделительный трансформатор *T* подается на выпрямитель (полупроводниковый или вакуумный диод *VD*). Пульсирующее напряжение, снимаемое с выхода выпрямителя, подается на времязадающую *RC*-цепочку. В результате происходит постоянный подзаряд конденсатора *C* до напряжения, равного в пределе  $\sqrt{2}U_{II}$ , где  $U_{II}$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора *T*.

Заряд конденсатора до такого значения напряжения мог происходить в случае, если бы в схеме отсутствовал разрядник *FV1*, либо напряжение его пробоя превышало значение  $\sqrt{2}U_{II}$ .

После подачи напряжения на схему (рис. 13) начинается периодически повторяющийся процесс заряда и разряда конденсатора *C*. Напряжение на его обкладках возрастает со скоростью, определяемой напряжением источника питания  $U_{num.}$  и *RC*- постоянной зарядной цепи [28]:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{num.}}{RC} \exp\left(-\frac{t_{np.}}{RC}\right) = \frac{U_{np.}}{RC}.$$

Когда напряжение на обкладках конденсатора достигнет значения, равного напряжению пробоя газового разрядника *FV1* или эквивалентного ему элемента, происходит практически мгновенный разряд конденсатора *C* на низкоомную первичную обмотку высокочастотного трансформатора *L1*.

Время разряда конденсатора зависит от величины омического сопротивления, на которое происходит разряд. Это сопротивление складывается из сопротивления газового промежутка разрядника *FV1*, величины омического сопротивления катушки индуктивности *L1* и омического сопротивления проводников.

Сопротивление газового промежутка при протекании разрядного тока не является постоянной величиной и не может быть выражено в аналитическом виде. Величина этого сопротивления колеблется во времени и зависит от времени прохождения тока, температуры и т. д. Ток в разрядной цепи прервется, когда напряжение на обкладках конденсатора снизится ниже напряжения гашения электрического разряда  $U_{гашен.}$  разрядника.

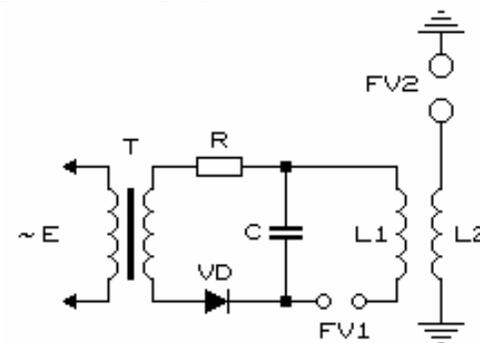


Рис. 13. Электрическая схема генератора высоковольтного напряжения с использованием резонансного трансформатора *Тесла*

Форма импульса тока определяется параметрами разрядной цепи. При условии  $R_n > 2\sqrt{L/C}$ , где  $R_n$  – активная составляющая сопротивления в цепи разряда конденсатора, нарастание тока от нуля до максимального значения про-

исходит за короткий промежуток времени, зависящий от индуктивности нагрузки. Затем ток экспоненциально спадает до такого значения, при котором разрядник  $FV1$  гаснет, ток в разрядной цепи прерывается.

Скорость процесса разряда определяется как:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{num.}}{R_n^2 C} \exp\left(-\frac{t}{R_n C}\right).$$

Такая форма разряда называется апериодической. В случае, если  $R_n < 2\sqrt{L/C}$ , ток имеет вид периодически затухающих колебаний, частота которых равна [28]:

$$\omega = \sqrt{(1/LC) - (R_n^2/4L^2)}.$$

Поскольку обычно время заряда намного превышает время разряда, частота следования импульсов целиком определяется параметрами зарядной цепи:

$$f = \frac{1}{RC \ln[1 - (U_{проб.} / U_{num.})]}.$$

Таким образом, время заряда конденсатора  $C$  при использовании источника постоянного стабилизированного напряжения  $U_{num.}$  до напряжения, равного напряжению пробоя газового разрядника  $U_{проб.}$ , можно определить из выражения:

$$\tau_1 = RC \ln \frac{U_{num.}}{U_{num.} - U_{проб.}}. \quad (20)$$

Отсюда следует, что частота таких разрядов определяется произведением  $RC$  и, поскольку при  $U_{num.} > U_{проб.}$ , логарифм отношения напряжений близок единице, в очень малой степени, напряжением питания генератора.

С некоторым приближением временной интервал процесса разряда можно оценить с использованием следующего выражения:

$$\tau_2 \cong (R_{FV1} + R_{L1})C \ln \frac{U_{проб.}}{U_{гашен.}}. \quad (21)$$

Отсюда можно вычислить период собственных колебаний  $T$  генератора:  $T \cong \tau_1 + \tau_2$ , где  $\tau_1 \gg \tau_2$ . Частота повторения импульсов  $F = 1/T$ , или, поскольку  $\tau_1 \gg \tau_2$ ,  $F \cong 1/\tau_1$ . Обычно частота следования таких импульсов лежит в пределах от единиц  $\Gamma\text{ц}$  до нескольких  $\kappa\Gamma\text{ц}$ .

Итак, в результате разряда конденсатора  $C$  на обмотку первичного контура, в последнем возникают периодические затухающие колебания высокой частоты. Соответственно, во вторичном контуре трансформатора возникают затухающие электрические колебания.

Электрическая энергия  $W_C$ , запасенная в конденсаторе  $C$  на момент пробоя газового разрядника, равна:

$$W_C = \frac{CU_{разр.}^2}{2}.$$

Соответственно, средняя энергия, выделяющаяся в разрядной цепи при прохождении одного импульса тока будет равна:

$$W = \frac{C(U_{проб.} - U_{гашен.})^2}{2}.$$

Средняя мощность, выделяемая в этой цепи, будет равна этой энергии, умноженной на количество импульсов, прошедших за 1 с, или пропорциональна частоте следования разрядных импульсов.

Полученные выше выражения можно применять в расчетах, если в электрической схеме высоковольтного преобразователя использован коммутирующий элемент иного принципа действия – динистор, тиристор и т. д. В любом случае такой элемент будет характеризоваться величиной пробойного и остаточного напряжений, максимальным током коммутации, временем переключения, собственной емкостью.

При разряде конденсатора на катушку индуктивности напряжение на конденсаторе будет уменьшаться, ток в катушке индуктивности – расти. В случае полного разряда конденсатора вся энергия в колебательном контуре будет сосредоточена в катушке индуктивности  $L$ :

$$W_L = \frac{LI^2}{2}. \quad (22)$$

Далее будет происходить обратный процесс: энергия из катушки индуктивности будет переходить обратно в конденсатор. Произойдет перезарядка конденсатора. После чего процесс будет повторяться снова и снова. Из закона сохранения энергии при отсутствии потерь следует:

$$W_C = W_L = const.$$

На практике процесс этот не может продолжаться до бесконечности: часть энергии будет расходоваться на нагрев проводников, часть будет излучаться в окружающее пространство. Обычно коэффициент полезного действия трансформатора *Тесла* не превышает 80%.

Поскольку резонансный трансформатор представляет собой систему связанных контуров, в колебательном контуре, образованном вторичной обмоткой, будут наводиться высокочастотные колебания. Частоту высокочастотных ко-

лебаний, возникающих в первичном контуре, можно определить из выражения:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}.$$

В силу того, что энергия возбуждения подводится именно к этому колебательному контуру, его произведение  $L_1C_1$  в значительной мере определяет рабочую частоту трансформатора (рис. 13, 14).

Для выполнения условия резонанса ( $f_1=f_2$ ) должно выполняться соотношение  $L_1C_1=L_2C_2$ .

Если это условие не выполняется, за счет последовательного обмена энергией в системе связанных колебательных контуров возникают результирующие колебания. Форма этих колебаний и их частотные характеристики определяются биениями частот, присущих каждому из контуров. Таким образом, на выходе трансформатора будут присутствовать высокочастотные колебания с частотами  $f_1$ ,  $f_2$ , а также  $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ .

Частота импульсов ударного возбуждения  $F$ , как правило, на два-три порядка ниже резонансной частоты любого из колебательных контуров. Наличие этих импульсов определяет внешний вид огибающей высокочастотных колебаний.

Исходя из того, что трансформатор предназначен для получения высокого напряжения и является повышающим, число витков вторичной обмотки  $\omega_2$  должен во много раз превышать число витков первичной  $\omega_1$ . Соотношение количества витков, называемое коэффициентом трансформации, определяется как  $\omega_2/\omega_1$ . С достаточным приближением можно считать, что при выполнении условия резонанса:

$$L2 \cong L1 \frac{\omega_2}{\omega_1}, \text{ а } C2 \cong C1 \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Рабочее напряжение конденсатора  $C2$  должно по меньшей мере в  $\omega_2 / \omega_1$  раз превышать рабочее напряжение конденсатора  $C1$ .

Как известно, добротность колебательного контура, определяющая скорость затухания электрических колебаний в связи с потерями на омическом сопротивлении  $R$  катушки индуктивности  $L$ , определяется как:

$$Q = \frac{\omega L}{R}.$$

Как показано в [26], степень связи между контурами  $k_{св.}$  можно вычислить из выражения:

$$k_{св.} = M \sqrt{Q_1 Q_2}, \text{ или } k_{св.} \sim M / \sqrt{L_1 L_2},$$

где  $M$  – коэффициент взаимной индукции.

При «сильной» связи ( $k_{св.} > 1$ ) в системе взаимосвязанных контуров возникают биения частот. При «слабой» связи ( $k_{св.} < 1$ ) колебания наблюдаются только на одной частоте – резонансной.

Коэффициентом связи можно управлять, изменяя расстояние между колебательными контурами, между обмотками, перемещая соосно обмотки относительно друг друга, влияя на свойства сердечника трансформатора или окружающей среды и т. д. При чрезмерно слабой связи эффективность передачи энергии из одного контура в другой резко снижается.

Как показывают экспериментальные исследования, выполняемые в НИИ ВН при ТПУ, наибольшая эффективность передачи энергии в трансформаторе *Тесла* возможна при коэффициенте связи контуров 0,6...0,7.

### 2.3. Моделирование электрических процессов в резонансном трансформаторе

Для изучения и иллюстрации процессов, протекающих в резонансном трансформаторе, может быть использована программа схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых радиоэлектронных устройств *Electronics Workbench* (начиная с версии 6.0 – *Multisim*).

Схема генератора высоковольтного напряжения с резонансным трансформатором *Тесла*, использованная для моделирования электрических процессов в программе *Electronics Workbench 5.12*, представлена на рис. 14.

В связи с отсутствием в составе отмеченной программы электрического разрядника, в качестве заменяющего его элемента использован полупроводниковый аналог на основе диода с модифицированными под разрядник характеристиками.

Рабочая точка на вольтамперной характеристике аналога разрядника задавалась регулировкой потенциометра. Резонанс колебательных контуров первичной и вторичной обмоток достигался подбором емкостей соответствующих конденсаторов того и другого контуров.

Осциллограммы электрических процессов, наблюдаемых на колебательном контуре первичной обмотки и резистивном делителе, подключенном к выводам вторичной обмотки, показаны на рис. 15.

Как следует из представленных осциллограмм, колебания во вторичном контуре затухают гораздо медленнее, чем в первичном контуре. Частота возбуждающих высокочастотные колебания импульсов примерно на два-три порядка ниже инициируемых ими высокочастотных колебаний.

Для детального исследования электрических процессов, протекающих в цепи заряда-разряда конденсатора  $C$ , была использована схема (рис. 16). Схема отвечает по структуре схеме возбуждения трансформатора *Тесла* (его соответствующей части) и представляет собой релаксационный генератор импульсов. Нагрузку генератора можно переключать при помощи переключателя  $SA$ .

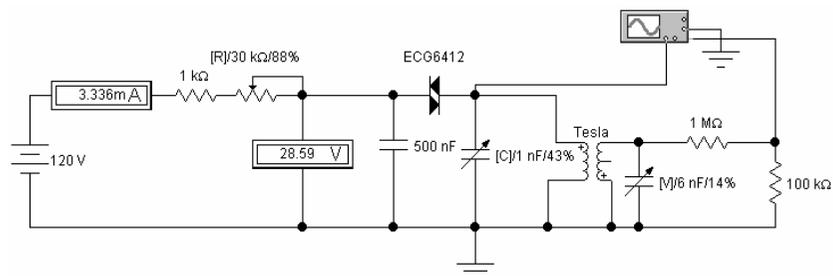


Рис. 14. Моделирование электрических процессов в трансформаторе *Тесла* с использованием программы *Electronics Workbench 5.12*

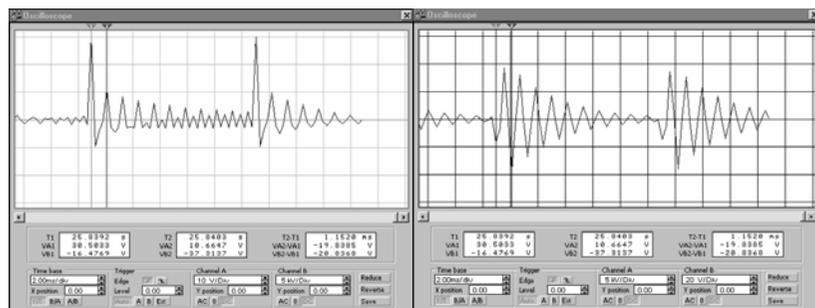


Рис. 15. Осциллограммы переходных процессов в трансформаторе *Тесла*. Слева – процессы в первичном контуре, справа – во вторичном. *Electronics Workbench 5.12*

Диаграммы (осциллограммы) электрических процессов, протекающих в схеме (рис. 16), представлены на рис. 17 и 18.

На рис. 17а показаны осциллограммы, наблюдаемые на конденсаторе  $C$  при короткозамкнутой нагрузке. Как следует из рисунка, заряд конденсатора  $C$  до напряжения пробоя разрядника  $U_{проб.}$  происходит по квазиэкспоненциальному закону (20). Разряд конденсатора до напряжения гашения разрядника  $U_{гашен.}$  происходит практически мгновенно в соответствии с выражением (21). Скорость падения напряжения определяется внутренним сопротивлением аналога разрядника в проводящем состоянии.

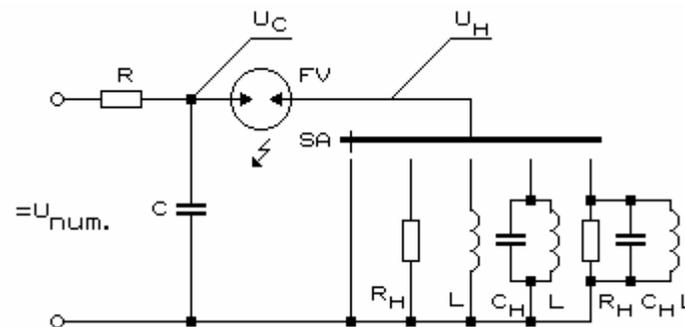


Рис. 16. Экспериментальная схема для исследования переходных процессов в первичной обмотке резонансного трансформатора

Следующие диаграммы характеризуют электрические процессы в электрической цепи при активной нагрузке – динамику изменения напряжения на времязадающем конденсаторе  $C$  (рис. 17b) и на резистивной нагрузке (рис. 17c).

Как следует из этих диаграмм, напряжение, при котором происходит переключение разрядника из проводящего состояния в непроводящее (точка  $C$ ), возрастает на величину

ну падения напряжения на сопротивлении нагрузки. Это объясняется тем, что к источнику питания оказывается подключенной последовательная цепочка токопроводящих элементов: времязадающего резистора  $R$ , сопротивления разрядника в проводящем состоянии, сопротивления нагрузки.

Полагая величину сопротивления довольно нестабильного элемента электрической цепи – разрядника много меньшей других резистивных элементов, можно вычислить разницу в пороге отключения разрядника по формуле:

$$\Delta U = U_{\text{питан.}} \frac{R_n}{R + R_n}.$$

При  $R_n \rightarrow 0$  или при  $R \gg R_n$   $\Delta U \rightarrow 0$ .

Период колебаний релаксационного генератора импульсов  $T$  складывается из времени (периода) нарастания импульса  $\tau_1$  (заряда времязадающего конденсатора  $C$ ) и времени его разряда  $\tau_2$ . Соответствующие участки кривых на диаграмме (рис. 17b) – обозначены отрезками АВ (заряд) и ВС (разряд).

Динамика электрических процессов на омическом сопротивлении нагрузки показана на рис. 17с. Как следует из рисунка, участку АВ отвечает возрастание тока через сопротивление нагрузки, регистрируемое синхронно с нарастанием напряжения на времязадающем конденсаторе  $C$ . Этот процесс связан с наличием тока утечки у аналога электрического разрядника.

Спад напряжения на нагрузке при разряде конденсатора  $C$  (рис. 17с) происходит в две стадии. Первая часть процесса (участок ВС) определяется экспоненциальным спадом напряжения на обкладках конденсатора  $C$  при его разряде на последовательную цепочку: электрический раз-

рядник – сопротивление нагрузки. На втором участке кривой стремительный спад напряжения обусловлен практически мгновенным разрывом цепи за счет отключения разрядника.

Амплитуда ступеньки (точка С, рис. 17с) характеризует остаточное напряжение на сопротивлении нагрузки. Оно обусловлено протеканием тока от источника питания через времязадающее сопротивление  $R$ , разрядник  $FV$ , а также сопротивление нагрузки  $R_n$  и соответствует разнице в пороге отключения разрядника  $\Delta U$  (см. выше).

На следующей диаграмме (рис. 18) показана динамика электрических процессов в цепи индуктивной нагрузки и нагрузки, имеющей комбинированный характер, максимально приближенный к реальным условиям работы резонансного высокочастотного трансформатора.

На рис. 18а показано, как затухают электрические колебания в цепи с идеализированной индуктивной нагрузкой. Амплитуда генерируемых высокочастотных колебаний довольно высока, однако сами колебания затухают практически мгновенно.

Если в цепь нагрузки включен колебательный контур (рис. 18b) и отсутствуют омические потери, в зависимости от соотношения  $L/C$  электрические колебания имеют выраженный затухающий характер и поддерживаются продолжительное время. Спад огибающей амплитуды сигналов и их форма описывается приближенным выражением [29]:

$$U_n(\tau) = \frac{\Pi_{\text{имп.}} e^{-\alpha\tau}}{C_n} \left( \cos \omega\tau - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega\tau \right),$$

где  $\Pi_{\text{имп.}}$  – площадь импульса возбуждения при его представлении в виде импульса прямоугольной формы.

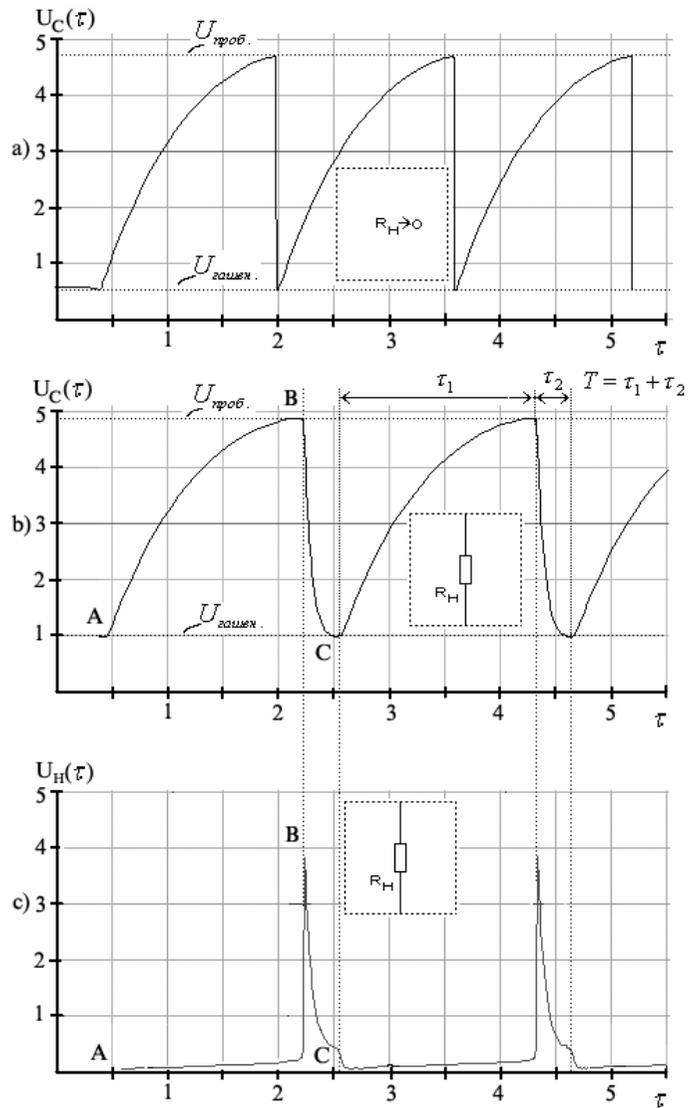


Рис. 17. Диаграммы сигналов на конденсаторе  $C$  (a, b) и активном сопротивлении нагрузки  $R_H$  (c)

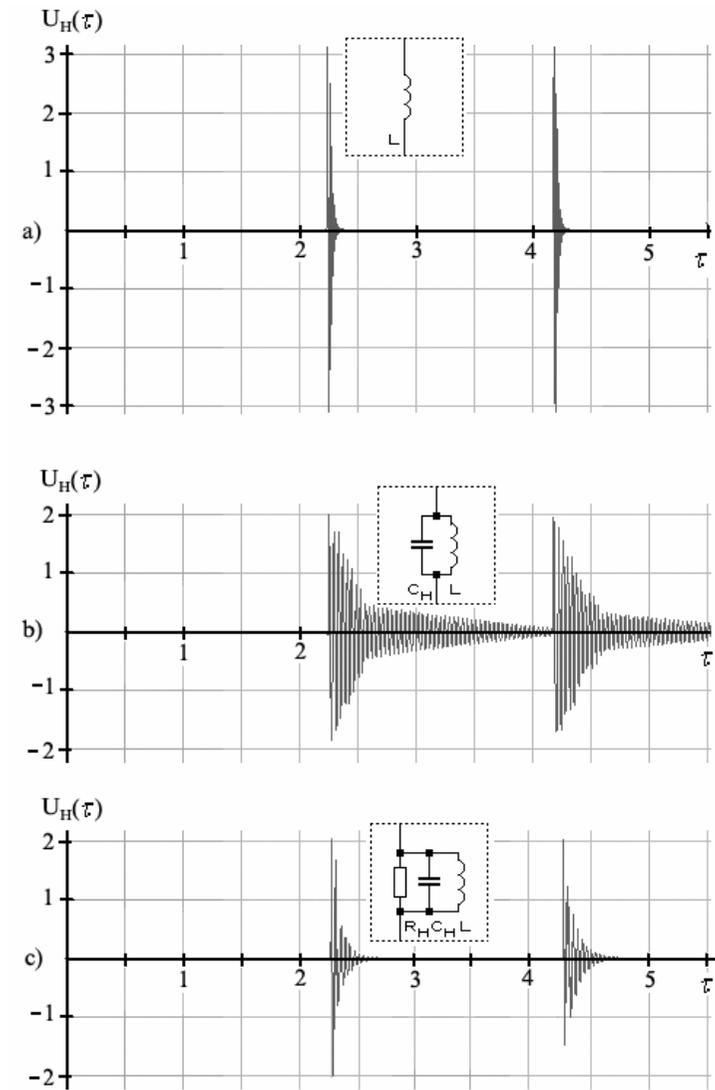


Рис. 18. Диаграммы сигналов на  $L$ - нагрузке (a),  $LC$ - нагрузке (b),  $RLC$ - нагрузке (c)

Электрические колебания в контуре продолжаются и после отключения разрядника (см., например, соответствующие кривые на рис. 17с и 18b).

Реальная нагрузка любого устройства имеет емкостную, индуктивную и омическую составляющие. Для формирования необходимых пользователю характеристик нагрузочной цепи в ее состав обычно включают дополнительные  $R$ ,  $L$  или  $C$  - компоненты.

Диаграмма, представленная на рис. 18с, характеризует электрические процессы при разряде конденсатора на  $RLC$ -нагрузку. Как следует из диаграммы, затухание электрических колебаний в такой цепи также происходит по экспоненциальному закону, причем скорость спада напряжения обратно пропорциональна величине омического сопротивления нагрузки.

При реальных воплощениях высокочастотных преобразователей с использованием трансформатора *Тесла* в целях управления выходной мощностью генерируемых импульсов используют переключаемые накопительные конденсаторы. Разумеется, при этом изменяется и период следования импульсов. Частоту следования импульсов можно также задавать, варьируя в ограниченных пределах величиной времязадающего резистора. Пределы эти обусловлены необходимостью выбора рабочей точки генератора на определенном участке вольтамперной характеристики активного элемента (газового разрядника или его аналога).

Скорость затухания высокочастотных колебаний является функцией сопротивления нагрузки, следовательно, при съемке объектов с динамически изменяющимся сопротивлением (например, биологических объектов), скорость затухания колебаний будет определяться состоянием нагрузки и изменения её параметров в процессе съемки.

## 2.4. Высокочастотные аппараты *Д'Арсонваля*

Генераторы импульсов высоковольтного напряжения, разработанные *Д'Арсонвалем* [1], являются преобразователями напряжения с емкостными накопителями энергии. Эти аппараты точно так же, как и аппараты *Тесла*, содержат источник накачки (питания), последовательно включенные емкостной накопитель(и) энергии, разрядник и катушку индуктивности, трансформатор или автотрансформатор.

Основное различие заключается в том, что для питания аппарата *Д'Арсонваля* используется источник низкочастотного переменного тока напряжением до 10...15 кВ, подключенный к электрическому разряднику (рис. 19). В трансформаторе *Тесла* (рис. 13) источник питания постоянного или пульсирующего монополярного тока подключен к накопительному конденсатору через резистор.

Варианты схем получения высоковольтного напряжения, предложенные *Д'Арсонвалем* [1], представлены на рис. 19. Источник переменного тока низкой частоты и высокого напряжения заряжает конденсаторы  $C$ . При достижении определенного напряжения на обкладках конденсаторов в момент действия одного из полупериодов низкочастотного переменного тока, в искровом промежутке разрядника  $F$  проскакивает искра, и в цепи  $CLCF$  возникает серия затухающих колебаний.

Выходными параметрами преобразователя (напряжением, мощностью) можно управлять, изменяя расстояние между электродами разрядника, варьируя (переключая) емкость конденсатора (конденсаторов)  $C$ , а также подключая параллельно катушке индуктивности  $L$  регулируемый резистивный шунт или дроссель.

Частота генерируемых высокочастотных колебаний аппаратом *Д'Арсонваля* при условии равенства емкостей конденсаторов, входящих в состав колебательного контура (рис. 19), может быть вычислена из выражения:

$$f = \frac{1}{\pi\sqrt{2LC}}.$$

Для варианта схемы, в которой для регулировки выходных параметров используют переключение конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , выражение это примет вид:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LC_1C_2}{C_1+C_2}}}.$$

При коммутации конденсаторов изменяется не только частота высокочастотного заполнения генерируемых сигналов, но и средняя мощность, выделяемая в нагрузку.

Для повышения выходного напряжения до сотен киловольт используют резонансный трансформатор, представляющий собой малый соленоид с большим количеством витков, один конец которого подключается к катушке самоиндукции колебательного контура (рис. 19, правая половина) [1].

Емкость вторичного контура состоит из собственной емкости катушки и емкости между катушкой и землей. Емкость и самоиндукцию подбирают так, чтобы получить резонанс с колебаниями, возникающими в основном контуре.

Следует отметить, что в 1939 году *С.Д. Кирлианом* именно на модификации аппарата *Д'Арсонваля* были получены электроразрядные фотоснимки, названные позже *кирлиановской фотографией*.

На рис. 20 показаны осциллограммы импульсов, снимаемых с аппарата *Д'Арсонваля*. Импульсы эти имеют ха-

рактерную колоколообразную форму. Правая половина рис. 20 является растянутым в 5 раз по оси абсцисс изображением колоколообразного импульса (вид слева).

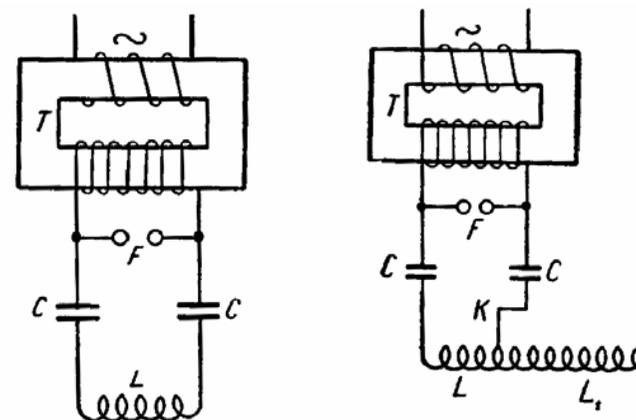


Рис. 19. Варианты выполнения высоковольтных аппаратов *Д'Арсонваля*

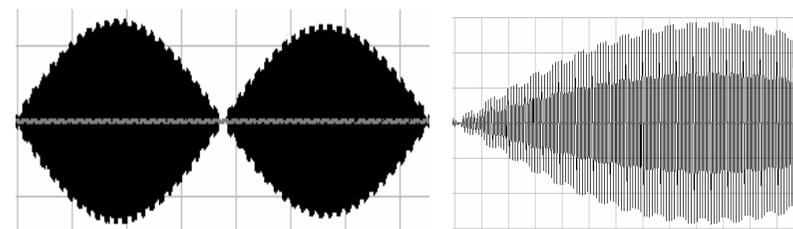


Рис. 20. Осциллограммы импульсов, получаемых на аппарате *Д'Арсонваля*

Частота высокочастотных колебаний аппаратов *Д'Арсонваля* и их современных разновидностей обычно лежит в пределах от 15 до 500  $\kappa\Gamma\upsilon$ . Средняя мощность, выделяемая в нагрузку, невелика (доли-единицы  $Bm$ ). Пиковое выходное напряжение устройства может достигать до нескольких долей  $MВ$ .

## 2.5. Мостовые резонансные преобразователи напряжения

Как следует из анализа работы классических преобразователей напряжения с емкостным накопителем энергии, см., например, рис. 17, изменение напряжения на конденсаторе во времени происходит крайне неравномерно.

Линеаризировать процесс зарядки можно за счет искусственного разделения накопителя энергии на две равные части. На рис. 21 приведена предложенная нами электрическая схема мостового генератора – резонансного преобразователя напряжения.

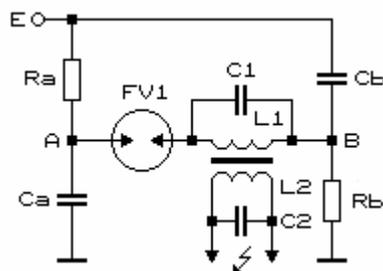


Рис. 21. Электрическая схема мостового резонансного преобразователя напряжения

Устройство работает следующим образом. При включении источника питания  $E$  происходит зарядка конденсаторов  $Ca$  и  $Cb$  через резисторы  $Ra$  и  $Rb$ , соответственно. Этот процесс можно наблюдать на осциллограммах (рис. 22, 23). Для наглядности кривые (рис. 22) сдвинуты вверх и вниз на 1,5 усл. ед. относительно нулевой линии.

Когда разность напряжений в точках  $A$  и  $B$  сравнивается с напряжением пробоя газового разрядника  $FV1$ , произойдет его пробой. Конденсаторы разрядятся на первичную обмотку высокочастотного трансформатора.

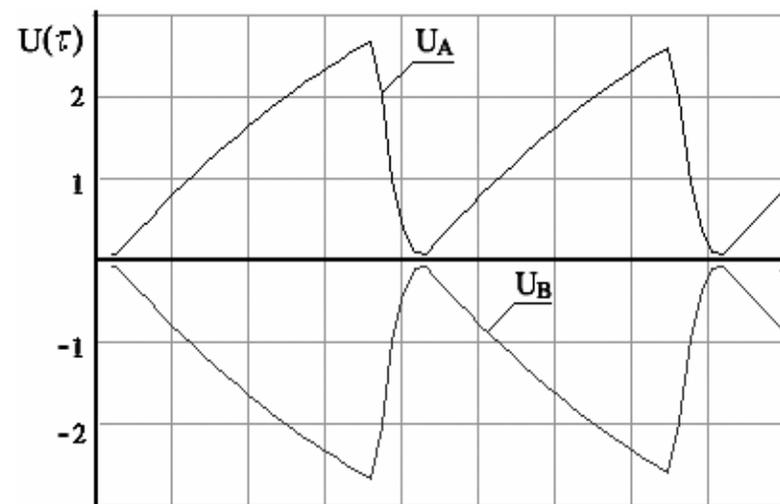


Рис. 22. Электрические процессы в точках  $A$  и  $B$  мостового генератора импульсов при активной нагрузке

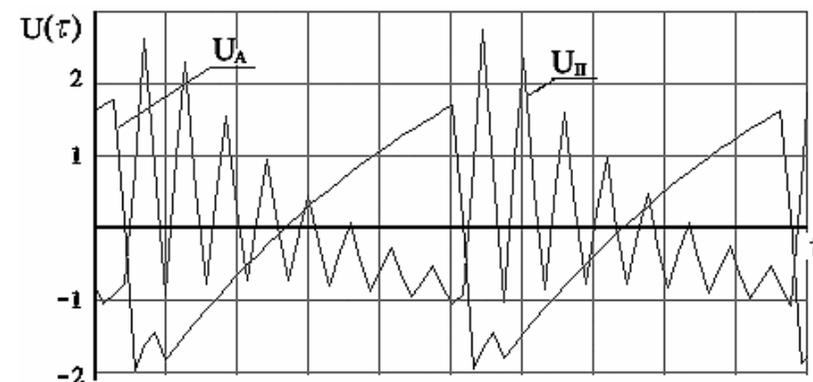
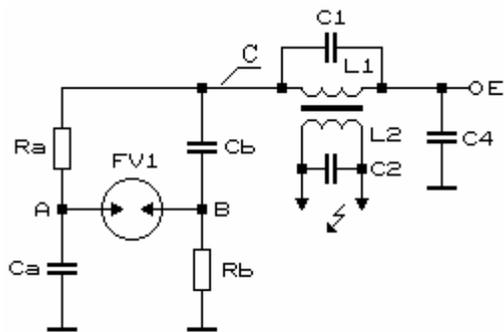


Рис. 23. Переходные процессы в мостовом резонансном преобразователе напряжения в точке  $A$  ( $U_A$ ) и в выходном контуре  $L2C2$  ( $U_{II}$ )

В результате во вторичной обмотке трансформатора генерируется последовательность затухающих во времени высокочастотных импульсов (рис. 23).

Резонансный преобразователь напряжения мостового типа преобразуется в традиционный в случае, если  $C_b \rightarrow 0$ ;  $R_b \rightarrow 0$ .

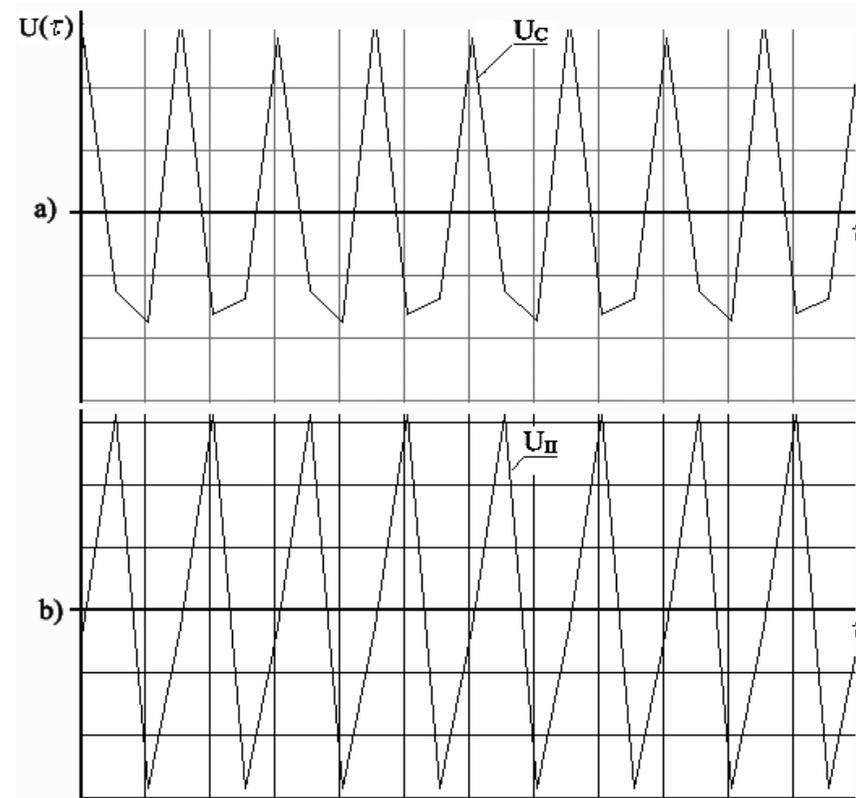
В преобразователе напряжения (рис. 21) первичная обмотка трансформатора включена последовательно с электрическим разрядником. Если эту обмотку включить последовательно мостовой схеме, схема преобразователя реорганизуется следующим образом (рис. 24).



**Рис. 24. Электрическая схема резонансного преобразователя напряжения мостового типа с последовательной нагрузкой**

Предполагается, что индуктивность первичной обмотки высокочастотного трансформатора невелика, т. е. энергия запасается, преимущественно, на конденсаторах  $C_a$  и  $C_b$ . Временные диаграммы процессов, происходящих в резонансном преобразователе мостового типа с последовательной нагрузкой представлены на рис. 25.

Интересно отметить, что совокупность наблюдаемых на диаграммах импульсов больше напоминает периодические процессы, свойственные генераторам-преобразователям незатухающих колебаний.



**Рис. 25. Временные диаграммы электрических процессов в резонансном преобразователе напряжения мостового типа с последовательной нагрузкой в точке C ( $U_C$ ) и в выходном контуре  $L_2C_2$  ( $U_{II}$ )**

Особенностью мостовых преобразователей является то, что первичная обмотка высокочастотного трансформатора находится в «подвешенном» состоянии. Её выводы напрямую не соединены с общим проводом, заземлением.

Для того, чтобы обеспечить соединение одного из выводов высокочастотного контура первичной (и вторичной) обмоток, можно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 26. Для питания моста (рис. 26) могут быть также использованы два разнополярных источника постоянного тока напряжением  $E/2$  с заземленной общей точкой.

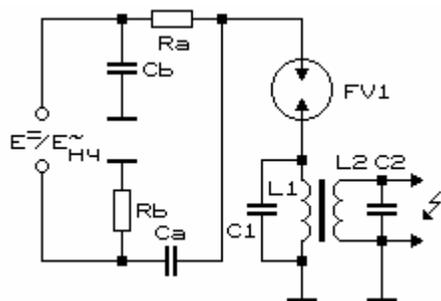


Рис. 26. Электрическая схема мостового преобразователя с заземленным выводом трансформатора

Попутно отметим, что питание мостовых преобразователей можно осуществлять не только от источников постоянного тока, но и сети переменного низкочастотного тока, источников пульсирующего напряжения, импульсов постоянного тока регулируемой скважности.

Форма выходных импульсов в каждом случае будет иметь свои специфические особенности. В частности, при питании моста (рис. 21) от источника переменного низкочастотного тока форма выходных импульсов преобразователя будет иметь вид, показанный на рис. 27.

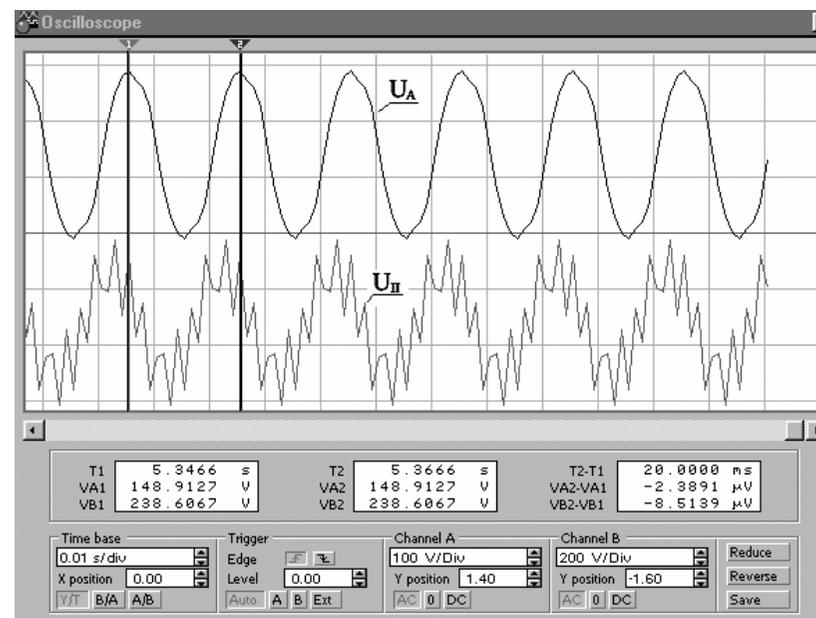


Рис. 27. Осциллограммы электрических процессов в точке A и на выходной обмотке мостового преобразователя (рис. 21) при его питании переменным током частотой 50 Гц

Форма выходных импульсов, вырабатываемых преобразователем при питании от сети переменного низкочастотного тока, в существенной мере зависит от свойств высокочастотного трансформатора, в частности, от индуктивности и сопротивления его первичной обмотки, индуктивности рассеяния.

Такой преобразователь при настройке индуктивно-емкостных компонентов контуров может быть также использован в качестве одно- или многокаскадного умножителя частоты.

## 2.6. Преобразователи с умножением напряжения в первичной цепи

Для питания преобразователей, рассмотренных выше, порой требуется использование источников довольно высокого напряжения. Удвоить или даже утроить напряжение, подводимое в импульсе к первичной обмотке резонансного трансформатора можно в преобразователях напряжения с умножением напряжения в первичной цепи.

На рис. 28 показана электрическая схема такого преобразователя.

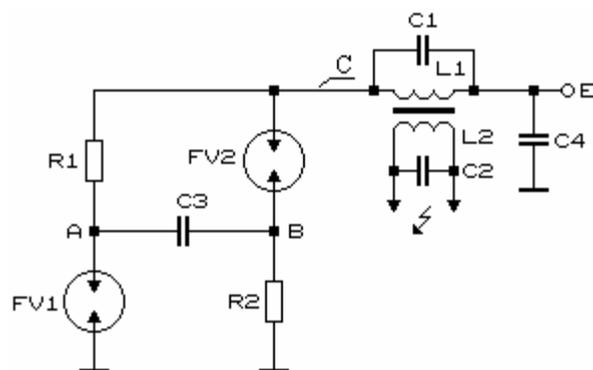


Рис. 28. Электрическая схема преобразователя напряжения с удвоением напряжения в первичной цепи

Устройство работает следующим образом. При включении преобразователя происходит заряд конденсатора  $C3$  через резисторы  $R1$  и  $R2$ . Предполагается, что индуктивность первичной обмотки трансформатора невелика, а её омическое сопротивление намного ниже сопротивлений  $R1$  и  $R2$ . Когда напряжение на обкладках конденсатора  $C3$

сравнивается с напряжением пробоя газовых разрядников  $FV1$  и  $FV2$ , произойдет их пробой.

В результате конденсатор  $C3$  окажется подключенным последовательно с источником питания. Напряжение на его обкладках суммируется с напряжением питания устройства. Это напряжение на время, определяемое токопроводящим состоянием газовых разрядников, окажется приложенным к колебательному контуру первичной обмотки резонансного трансформатора  $L1C1$  (рис. 29).

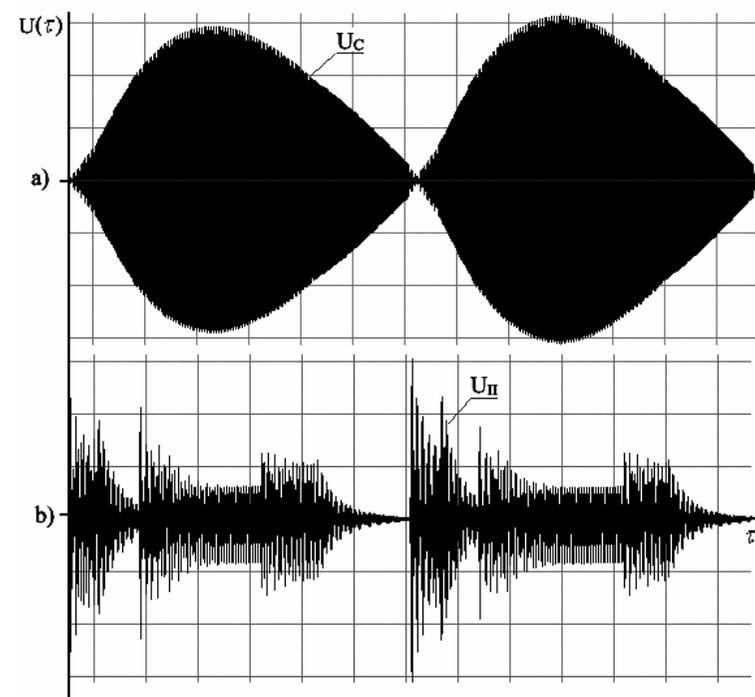
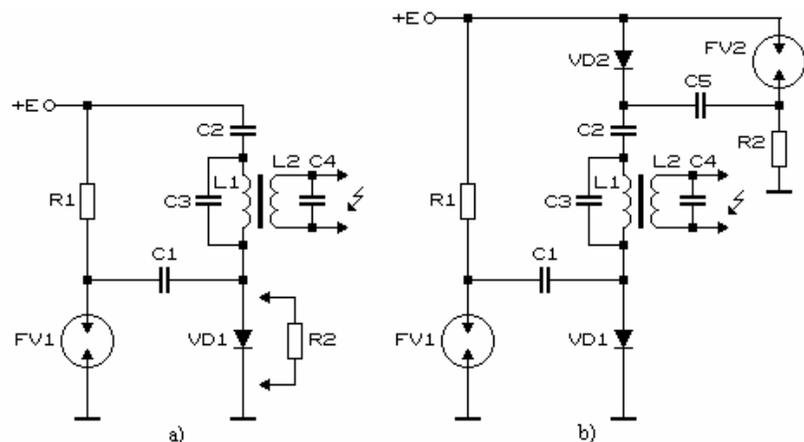


Рис. 29. Диаграммы электрических процессов, наблюдаемых в точке  $A$  преобразователя напряжения (рис. 28) и на выходе преобразователя

Генерируемые устройством сигналы имеют довольно сложную форму, определяемую соотношением входящих в состав схемы  $RLC$  - элементов.

Недостатком преобразователя (рис. 28) является необходимость подбора разрядников с идентичными характеристиками.

Более простой схемой удвоения напряжения в первичной цепи является схема (рис. 30а).



**Рис. 30. Электрическая схема преобразователя напряжения с удвоением напряжения в первичной цепи**

Устройство работает таким образом. При включении преобразователя через резистор  $R1$  и диод  $VD1$  (или заменяющий его резистор  $R2$ ) происходит заряд конденсатора  $C1$  до напряжения пробоя газового разрядника  $FV1$ .

При пробое газового промежутка положительно заряженная обкладка конденсатора  $C1$  (правая по схеме) оказывается подключенной к общей шине устройства. Его отрицательно заряженная обкладка оказывается подключен-

ной к резонансному колебательному контуру  $L1C3$  трансформатора. Поскольку к диоду  $VD1$  будет приложено обратное напряжение, его электрическое сопротивление, определяемое обратным током, будет весьма велико (десятки  $MOm$ ).

Таким образом, к колебательному контуру будет приложено напряжение, равное сумме напряжения источника питания и напряжения на обкладках конденсатора  $C1$  (напряжения пробоя газового разрядника  $FV1$ ).

После снижения напряжения на обкладках конденсатора  $C1$  ниже напряжения гашения разряда, газовый разрядник или его электронный (полупроводниковый) аналог переключается в токонепроводящее состояние, и процесс заряда-разряда конденсатора  $C1$  повторяется снова и снова.

Конденсатор  $C2$ , емкость которого должна намного превышать емкость конденсатора  $C1$ , предназначен для исключения протекания постоянного тока от источника питания через обмотку трансформатора.

Вместо этого конденсатора может быть использован газовый разрядник, напряжение пробоя которого должно превышать напряжение питания устройства.

Аналогичным образом может быть реализована схема утроения напряжения в первичной цепи преобразователя (рис. 30б). При включении источника питания конденсаторы  $C1$  и  $C5$  заряжаются до напряжения пробоя газовых разрядников. В результате пробоя газовых промежутков разрядников образуется последовательно включенная цепочка источников напряжения: источника питания и двух последовательно включенных конденсаторов  $C1$  и  $C5$ .

Первичная обмотка трансформатора возбуждается импульсом напряжения, в ее вторичной обмотке наводятся импульсы высокочастотного высоковольтного напряжения.

## 2.7. Высокочастотные преобразователи с индуктивными накопителями энергии

Особую нишу в ряду устройств, предназначенных для получения высоковольтного напряжения, занимают так называемые индукторы [25-27]. При помощи этих устройств могут быть получены напряжения до 1 МВ.

В отличие от ранее рассмотренных конструкций накопителем энергии является катушка индуктивности. Как указывалось ранее, запасенную катушкой индуктивности энергию можно вычислить из выражения (22).

Электрическая схема индуктора представлена на рис. 31 [25, 27]. Устройство представляет собой последовательную RLC- цепь, питаемую от источника постоянного напряжения. Для модуляции тока в цепи используют коммутатор, периодически замыкающий конденсатор C1.

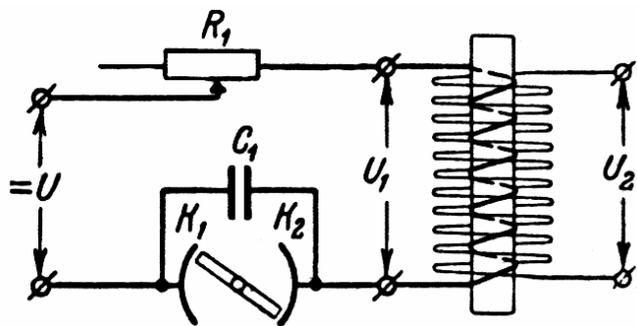


Рис. 31. Электрическая схема индуктора

В ранних моделях индукторов коммутация конденсатора производилась специальным быстродействующим коммутирующим устройством – механическим переключателем, позволяющим относительно простыми средствами решить задачу коммутации знакопеременных импульсов высокой амплитуды.

На рис. 32 показана модель индуктора, выполненная с использованием программы *Electronics Workbench 5.12*.

В качестве коммутирующего устройства схемы был применен ключевой элемент, управляемый сигналами прямоугольной формы функционального генератора. Варьируемыми величинами при изучении модели индуктора были частота и скважность коммутирующего сигнала, напряжение питания устройства, номиналы RLC- элементов с учетом собственной емкости и индуктивности обмоток трансформатора, наличие утечек.

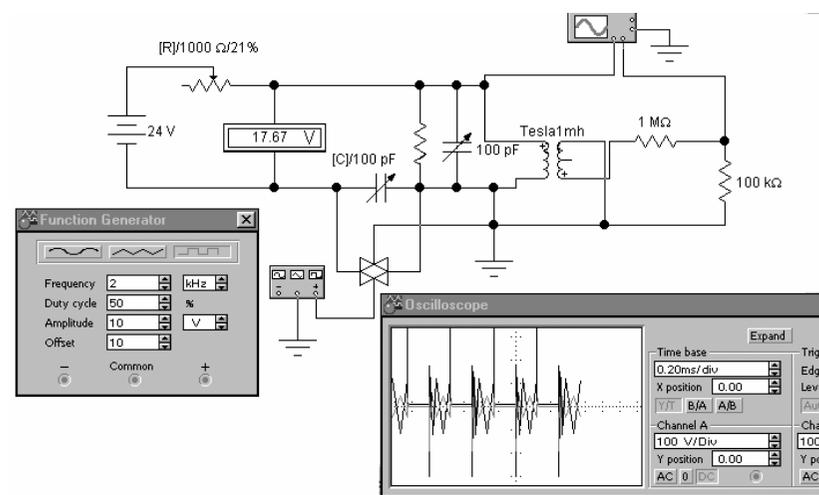


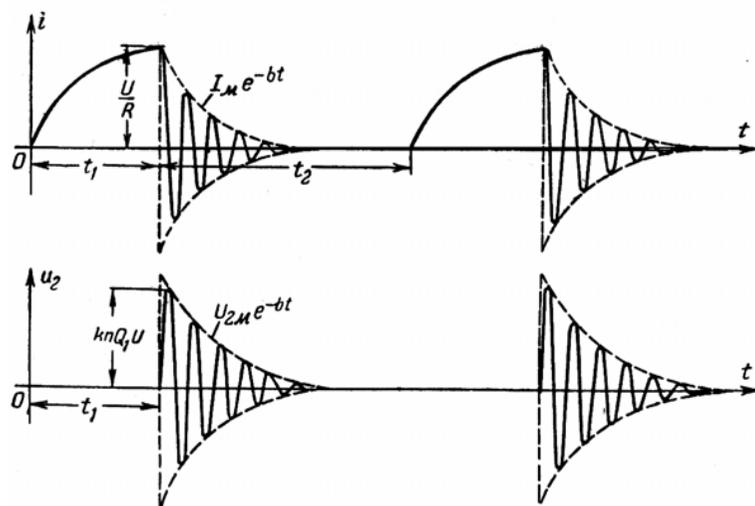
Рис. 32. Модель индуктора и осциллограммы процессов. *Electronics Workbench 5.12*

Как показали исследования модели индуктора, настройка его достаточно трудоемка даже для идеальных условий, которые обеспечивает электронное моделирование. Вероятно, в силу этих причин подобные конструкции не приобрели широкого распространения. К числу положительных моментов использования индукторов относится

то, что они позволяют при достаточно низковольтном питании получать на выходе значительные по амплитуде импульсы напряжения.

Теоретические выкладки [27], характеризующие работу этой разновидности преобразователей напряжения, довольно сложны для практического применения, хотя и используют ряд грубых приближений, заметно упрощающих расчет.

На приводимых ниже диаграммах (рис. 33) показана динамика электрических процессов в первичной (вверху) и вторичной (внизу) обмотках индуктора [27].



**Рис. 33. Графики тока в первичной обмотке индуктора и напряжения на вторичной обмотке**

При практической реализации подобного рода преобразователей следует учитывать то, что параллельно как первичной, так и вторичной обмоткам трансформатора оказываются подключенными паразитные емкости обмоток. Кроме того, при подключении нагрузки к выходу пре-

образователя, параллельно вторичной обмотке трансформатора оказывается подключенной не только резистивная нагрузка, заметно снижающая добротность колебательного контура и, соответственно, ускоряющая скорость затухания электрических колебаний на выходе трансформатора, но и ее емкостная составляющая.

Как и в рассмотренных ранее случаях, в зависимости от соотношения  $L1C1$  и  $L2C2$ , т. е. степени настройки контуров в резонанс (или степени расстройки) на выходе преобразователя могут присутствовать высокочастотные сигналы одной частоты, либо продуктов взаимодействия двух резонансных частот. Огибающая этих сигналов определяется низкочастотной модулирующей составляющей (импульсами ударного возбуждения).

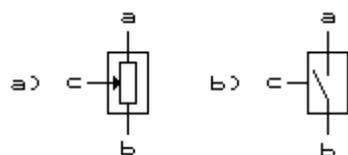
При условии настройки контуров в резонанс биения на выходе трансформатора могут также наблюдаться при степени связи между контурами  $K_{св.} > 1$  [27].

## 2.6. Преобразователи напряжения с внешним возбуждением

Для преобразования напряжения низкого уровня в напряжение высокого часто используют преобразователи напряжения с внешним возбуждением. Этот вид преобразователей характеризуется тем, что коммутацию накопителя энергии производят при помощи активных элементов с внешним, принудительным управлением.

В качестве коммутирующих элементов могут быть использованы линейные и нелинейные активные элементы. Ранее были рассмотрены преобразователи с ключевыми элементами с нестабильной характеристикой переключения (электрические разрядники и их аналоги), имеющие на

вольтамперной характеристике участок с отрицательным динамическим сопротивлением. Для управляемых извне преобразователей используют, преимущественно, линейные активные элементы, имеющие при приложении управляющего сигнала малой мощности плавно регулируемую проводимость (рис. 34а) или ключевые активные элементы, скачкообразно переходящие из одного граничного состояния в другое (рис. 34б). Управляющий электрод активных элементов на рис. 34 обозначен литерой *c*.



**Рис. 34. Линейные и ключевые активные элементы**

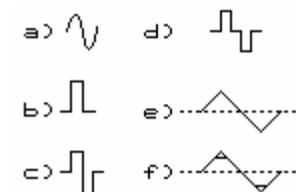
В качестве таких элементов могут быть использованы электронные лампы и полупроводниковые приборы, работающие на линейном участке зависимости тока через элемент от величины приложенного напряжения (рис. 34а) или на дальних границах этого участка – в ключевом режиме насыщения/отсечки (рис. 34б).

Линейные элементы первого вида характеризуют крутизной преобразования (отношением изменения тока через элемент при изменении напряжения на управляющем электроде). Элементы второго вида – ключевые элементы характеризуют величиной остаточного напряжения на открытом ключе и сопротивлением утечки в закрытом состоянии. Менее значимыми, особенно в области низких частот, являются значения межэлектродных емкостей.

В качестве управляющих сигналов преобразователей с внешним возбуждением используют сигналы синусоидаль-

ной формы (рис. 35а), прямоугольные монополярные (рис. 35б) или биполярные (рис. 35с) сигналы, симметричные биполярные сигналы прямоугольной формы с паузой между импульсами (рис. 35д), сигналы треугольной (рис. 35е) или трапецеидальной (рис. 35ф) формы.

Для управления работой ключевых элементов обычно используют сигналы одной полярности, имеющие два уровня, отвечающие состоянию «включено» и «выключено». Гораздо большую вариабельность свойств и промежуточных состояний допускают активные элементы с плавно управляемой характеристикой (рис. 34а).



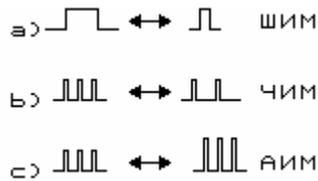
**Рис. 35. Основные формы управляющих сигналов**

Таким образом, преобразователи с активными элементами, работающими в режиме плавно управляемой характеристики, можно отнести к усилителям гармонических сигналов, к устройствам *аналоговой* техники.

Преобразователи, в состав которых входит активный управляемый извне элемент, имеющий два устойчивых состояния включено/выключено, относят к ключевым преобразователям с внешним возбуждением – устройствам *цифровой* техники.

Для обеспечения необходимых потребителю выходных параметров на выходе преобразователя и управления работой ключевых активных элементов используют модулированные сигналы. В соответствии с тем, каким способом осуществляется модуляция, различают модуляцию с

широтно-импульсным управлением или широтно-импульсную модуляцию (*ШИМ*), частотно-импульсную модуляцию (*ЧИМ*), амплитудно-импульсную модуляцию (*АИМ*) (рис. 36). Кроме перечисленных, встречаются фазово-импульсная модуляция, импульсно-кодовая модуляция, а также смешанные виды модуляции.

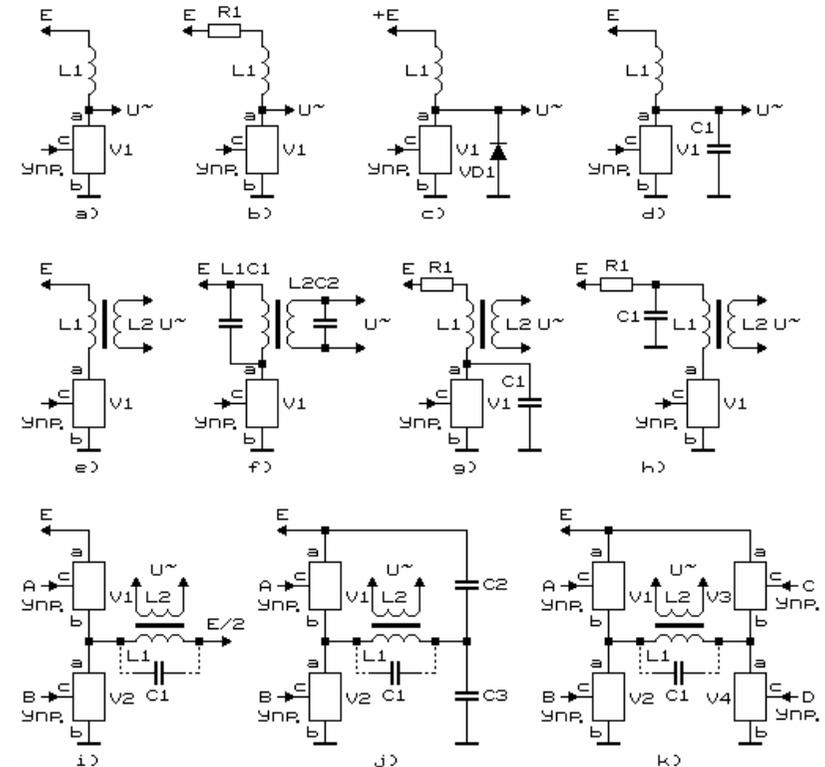


**Рис. 36. Основные виды модуляции импульсных сигналов**

Каждому виду модуляции свойственны свои преимущества и недостатки. Более подробно с характеристиками различных видов модуляции в технике преобразования напряжений можно ознакомиться в специализированной литературе [29].

Основные разновидности преобразователей напряжения с внешним возбуждением показаны на рис. 37. Так, например, преобразователь по схеме (рис. 37а) является преобразователем с коммутируемой катушкой индуктивности. При замыкании под действием внешнего сигнала ключа *V1* через эту катушку начинает протекать электрический ток. Катушка индуктивности *L1* запасает порцию энергии, определяемую длительностью управляющего сигнала. После размыкания цепи запасенная энергия передается в цепь нагрузки. При этом на выводах катушки индуктивности генерируются быстро затухающие во времени импульсы высокой амплитуды (рис. 18а).

Амплитудой этих импульсов, скоростью их затухания можно управлять, меняя длительность управляющего сигнала, добротность катушки индуктивности и т. д. В частности, на рис. 37б показан последовательно включенный с катушкой индуктивности токоограничивающий резистор.



**Рис. 37. Преобразователи напряжения с внешним возбуждением: однотактные (а-г) и двухтактные (и-к)**

В схеме (рис. 37с) параллельно активному элементу подключен обратносмещенный полупроводниковый диод.

Такая схема применяется для защиты активного элемента  $VI$  от импульсов напряжения, имеющего иную полярность. В ряде случаев параллельно активному элементу  $VI$  или параллельно катушке индуктивности, что для переменного тока значения не имеет, подключают конденсатор (рис. 37d). Нагрузка активного элемента преобразуется таким образом в колебательный контур. В ней при коммутации развиваются переходные процессы, показанные на рис. 18b.

На следующих рисунках показаны преобразователи, нагруженные на трансформатор (рис. 37e), резонансный трансформатор (рис. 37f). Отметим, что схема (рис. 37e) отвечает по построению одному из самых первых устройств, использованных в 1891 г. *Я.О. Наркевичем-Йодко* для получения газоразрядных фотографий, см. также гл. 3.

Схема преобразователя (рис. 37g) соответствует рассмотренному ранее в пп. 2.5 индуктору в его современной элементной интерпретации.

Преобразователь (рис. 37h) содержит вспомогательную  $RC$ - цепочку, соотношение постоянной времени которой к длительности (и частоте) управляющих сигналов предопределяет специфику развития переходных процессов на индуктивной нагрузке, и, соответственно, выходные параметры преобразователя.

На рис. 37i-k показаны двухтактные (двухтактно-мостовые и полумостовые) схемы преобразователей. Положительным моментом использования таких схем является то, что для их питания может быть использовано напряжение более высокого уровня. Недостаток двухтактных схем заключается в возможности возникновения сквозных токов через активные элементы.

Для управления двухтактными схемами используют биполярные сигналы, см., например, рис. 35c,d.

## 2.7. Автоколебательные преобразователи напряжения

Для преобразования постоянного напряжения низкого уровня в периодические *незатухающие* колебания высоковольтного напряжения используют автоколебательные (автогенераторные) преобразователи напряжения.

Такие преобразователи или генераторы с самовозбуждением, можно подразделить на одноктактные и двухтактные. Одноктактные преобразователи обычно выполняют по схеме с трансформаторной обратной связью (рис. 34a), индуктивной обратной связью (рис. 34b) и емкостной обратной связью (рис. 34c).

Легко заметить, что индуктивная обратная связь рис. 34b) является разновидностью трансформаторной (рис. 34a) обратной связи, или, говоря точнее, является авто-трансформаторной обратной связью.

Генераторы, использующие индуктивную обратную связь (рис. 34b), называют иногда по имени автора схемы – генераторами *Хартли* (1915 г.), или генераторами по схеме индуктивной трехточки. Генераторы с емкостной обратной связью (рис. 34c) именуют схемой *Колпитца* (1918 г.) или генераторами с емкостной трехточкой.

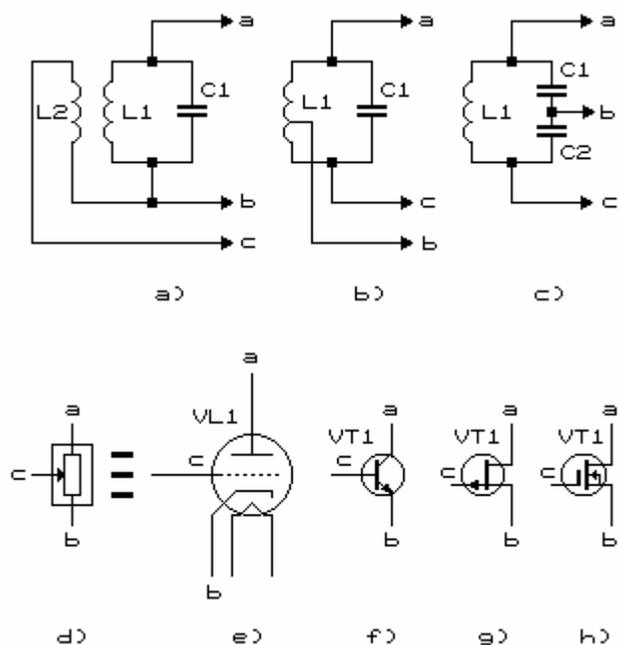
В качестве линейных активных элементов (рис. 34d) генераторов могут быть использованы вакуумные лампы (рис. 34e), биполярные (рис. 34f) и полевые (рис. 34g,h) транзисторы.

Активные элементы (рис. 34d-h) и  $LC$ - контуры (рис. 34a-c) соединяют между собой в соответствии с точками а, б, с. Промежуточные и вспомогательные элементы схем для упрощения описания опущены.

В соответствии с теорией *Ван-дер-Поля* [30], разработанной для описания работы автогенератора с индуктивной обратной связью типа (рис. 38а), коэффициент  $\varepsilon$ , характеризующий работу устройства, определяется как:

$$\varepsilon = \frac{S_0 M_0 / C - r}{\sqrt{L/C}},$$

где  $\varepsilon$  – параметр, эквивалентный затуханию в колебательном контуре, равном  $r/\sqrt{L/C}$ , взятом с противоположным знаком,  $S_0$  – крутизна характеристики активного элемента,  $M_0$  – приведенная взаимная индуктивность.

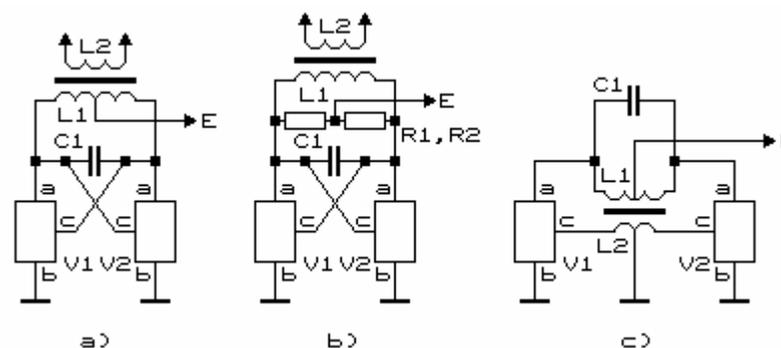


**Рис. 38. Способы осуществления обратных связей в автогенераторах (а-с) и активные элементы автогенераторов (d-h)**

В случае  $\varepsilon \ll 1$  устройство вырабатывает электрические колебания, близкие по форме синусоидальным [30].

При  $\varepsilon \gg 1$  генератор становится источником релаксационных колебаний [30]. Такой случай наблюдается при работе активного элемента в ключевом режиме.

Помимо рассмотренных выше генераторов, для преобразователей напряжения зачастую используют симметричные автоколебательные генераторы (рис. 39), позволяющие повысить выходную мощность и добиться более симметричного сигнала на выходе устройства.



**Рис. 39. Симметричные автоколебательные преобразователи напряжения**

Рабочая частота генераторов (рис. 39) определяется  $LC$ -произведением их колебательных контуров. Для питания схем генераторов по постоянному току используется средняя точка (рис. 39а,с), выполняемая отводом из середины катушки индуктивности.

Искусственная средняя точка (рис. 39b) может быть организована за счет ухудшения добротности катушки индуктивности введением резистивного делителя. Повышающая обмотка трансформатора на рис. 39с не показана.

## 2.8. Другие способы получения высокого напряжения

Известно довольно много самых разнообразных способов генерации высоковольтного напряжения. Большинство из них не имеет практического применения и представляет интерес более в теоретическом плане.

На рис. 40 показан мостовой LC-генератор с ключевым управлением. При отсутствии управляющего сигнала (ключ  $SI$ ) разомкнут, конденсаторы  $Ca$  и  $Cb$  заряжены до напряжения источника питания. При замыкании ключа  $SI$  под действием внешнего управляющего сигнала конденсатор  $Ca$  разряжается на обмотку  $Lb$ , а конденсатор  $Cb$  – на обмотку  $La$ . В образовавшихся таким образом колебательных контурах  $LaCb$  и  $LbCa$  возникают электрические колебания. Одновременно через последовательно соединенный по постоянному току обмотки  $L1$  и  $L2$  начинает протекать ток от источника питания.

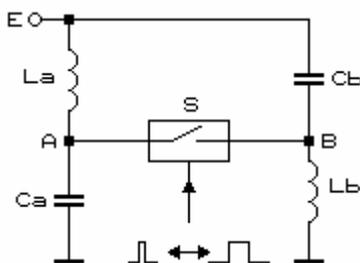


Рис. 40. Преобразователь напряжения на коммутируемых конденсаторах

После размыкания ключа  $SI$  схема преобразуется в два последовательных колебательных контура  $LaCa$  и  $LbCb$ . В зависимости от продолжительности и частоты коммутирующего сигнала на выходной обмотке преобразователя,

на схеме не показанной, будут формироваться высокочастотные импульсы напряжения.

Преобразователь (рис. 40) можно модифицировать, организовав индуктивную связь между катушками индуктивности  $L1$  и  $L2$ . При необходимости исключения протекания постоянной составляющей тока через катушки индуктивности последовательно с ключевым элементом  $SI$  следует включить конденсатор большой емкости.

Одним из способов получения импульсов высокого напряжения является использование переключаемых конденсаторов. Изначально несколько одинаковых конденсаторов, имеющих равную емкость и рабочее напряжение, одинаковое сопротивление утечки, включают параллельно и заряжают от источника постоянного тока до напряжения  $U$  (рис. 41). После этого при помощи механического или электронного коммутатора периодического действия конденсаторы переключают в последовательно соединенную цепочку. В результате напряжение всех конденсаторов аддитивно складывается и составляет в пределе  $nU$ , где  $n$  – количество конденсаторов.

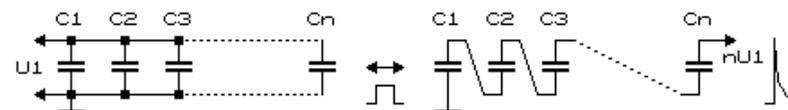


Рис. 41. Преобразователь напряжения на коммутируемых конденсаторах

Это напряжение достаточно быстро падает по экспоненциальному закону, поскольку конденсаторы разряжаются на сопротивление нагрузки и подключенное ему параллельно сопротивление утечки батареи конденсаторов.

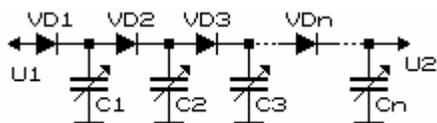
Такой способ получения высоковольтного напряжения не получил широкого распространения в связи с боль-

шими сложностями, возникающими при реализации электрических или механических коммутирующих устройств.

Близким по конструкции к вышеописанному преобразователю является многоступенчатый генератор импульсных напряжений, предложенный в 1911 г. *В.К. Аркадьевым* и *Н.В. Баклиным* [26, 27], в котором для автоматического переключения конденсаторов на последовательное соединение используется разряд в шаровых разрядниках, включаемых между конденсаторными ступенями.

Другой вид преобразователей напряжения на конденсаторах с модулируемой емкостью представлен на рис. 42. Принцип его действия заключается в первоначальном заряде первого из конденсаторов ( $C1$ ), емкость которого на момент зарядки максимальна. После зарядки емкость конденсатора принудительно ступенчато или плавно уменьшают до минимального значения. В результате напряжение

на обкладках конденсатора возрастает в  $n$  раз, где  $n = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}$ .

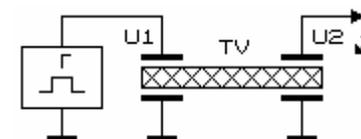


**Рис. 42. Преобразователь напряжения на конденсаторах с модулируемой емкостью**

Это напряжение заряжает следующий конденсатор в их последовательной цепочке. Цепочка последовательно соединенных диодов препятствует разряду последующих в цепи конденсаторов на им предшествующие. Модуляцию емкостей производят асинхронным вращением роторов конденсаторов или переключением самих конденсаторов.

На практике величина  $n$  для конденсаторов переменной емкости может достигать значения 30...50. В то же время подобная схема не может содержать большого количества конденсаторов, поскольку их размеры при работе на повышенном напряжении многократно возрастают. Кроме того, проблематичным становится использование высоковольтных полупроводниковых столбов, поскольку их рабочее напряжение, как правило, не превосходит нескольких киловольт.

Одним из достаточно перспективных способов генерации высоковольтных импульсов следует считать использование пьезоэлектрических трансформаторов (рис. 43).



**Рис. 43. Преобразователь напряжения с пьезоэлектрическим трансформатором**

Схема подобного преобразователя крайне проста: он содержит генератор импульсов низкого напряжения и собственно сам пьезоэлектрический трансформатор. На выходе такого трансформатора можно получить импульсы напряжением от единиц до десятков  $kV$ . Выходное напряжение преобразователя можно нарастить последовательным включением нескольких подобных трансформаторов.

Недостатком большинства рассмотренных в этом разделе устройств является их низкая нагрузочная способность.

С другими способами генерации напряжений высокого уровня более подробно можно ознакомиться в специализированной литературе, см., например, [27].

## ТЕХНИКА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ФОТОГРАФИИ

### 3.1. Варианты конструкций высокочастотных трансформаторов

Трансформаторы, используемые в технике газоразрядной фотографии, отличаются от обычных тем, что рассчитаны на работу при повышенном напряжении и при повышенных частотах. К конструкции высокочастотных высоковольтных трансформаторов предъявляются вполне определенные требования. Это повышенные требования к изоляции, как межвитковой, междуслойной, междуобмоточной, так и изоляции между обмотками и сердечником, если таковой предусмотрен.

Поскольку аппаратуру для фотографирования в поле токов высокой частоты нередко используют для съемки биологических объектов, должна быть полностью исключена вероятность поражения электрическим током.

Ниже рассмотрены основные варианты практического выполнения высокочастотных высоковольтных трансформаторов. Вначале будут представлены классические виды трансформаторов без магнитного сердечника.

Высоковольтный трансформатор *Тесла* на напряжение 1...2 МВ, имеющий конусообразную обмотку первичного контура, расположенную в нижней (заземленной) части трансформатора, показан на рис. 44 (слева) [27].

Внешний вид практической малогабаритной конструкции такого трансформатора, рассчитанного на напряжение порядка 40 кВ, приведен на рис. 44 (справа) [31].

Конусообразность выполнения первичной обмотки обеспечивает равномерность распределения напряженности электрического поля между первичной и вторичной обмотками. Токопроводящая поверхность земли представляет собой одну из обкладок распределенной емкости, входящей в состав взаимосвязанных колебательных контуров.

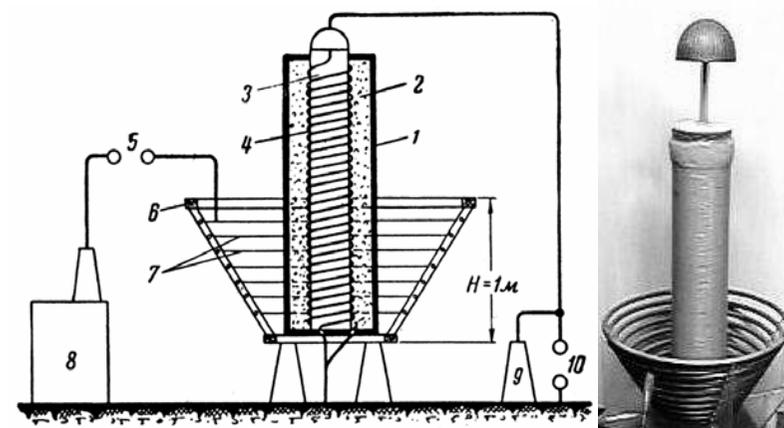


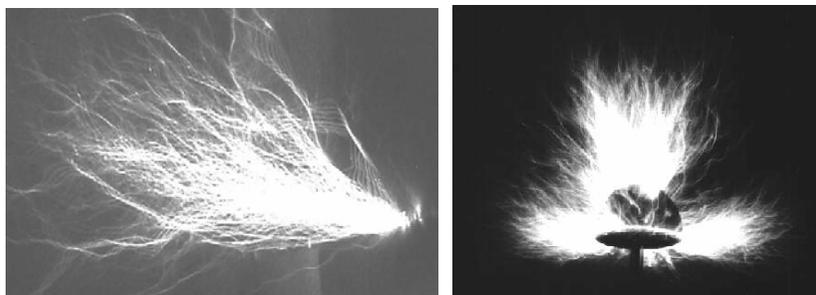
Рис. 44. Схематическое изображение (слева) и внешний вид (справа) резонансного трансформатора *Тесла*.

1 и 3 – диэлектрический цилиндр (гетинакс); 2 – парафиновая заливка; 4 – вторичная обмотка; 5 – разрядник; 6 – каркас первичной обмотки; 7 – первичная обмотка; 8 – питающее устройство; 9 – изолятор; 10 – шаровой разрядник

На рис. 45 показаны фотографии электрических разрядов, возникающих при работе высоковольтных резонансных трансформаторов [31, 32].

Электрическая схема резонансного трансформатора *Тесла*, содержащая в качестве источника энергии индуктор (катушка *Г. Румкорфа*), соединенный с накопительным

конденсатором  $C$  через дроссели  $Др1$  и  $Др2$ , приведена на верхней половине рис. 46. Параллельно конденсатору  $C$  через электрический разрядник  $FV1$  подключена первичная низковольтная обмотка высокочастотного воздушного трансформатора.



**Рис. 45. Фотоснимки электрических высоковольтных разрядов на воздухе**

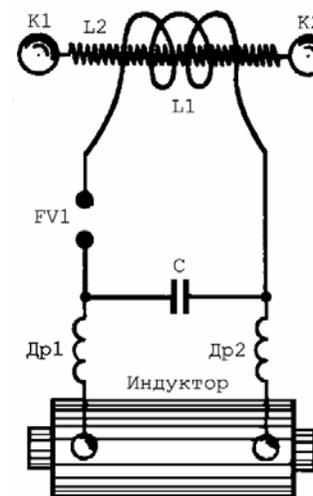
Дроссели  $Др1$  и  $Др2$  представляют собой своеобразные фильтры, имеющие для постоянного тока и токов низкой частоты малое сопротивление. Они препятствуют проникновению высокочастотных токов в индуктор (цепи питания).

При помощи подобного трансформатора (рис. 46) *Никола Тесла* получал напряжение свыше  $1\text{ МВ}$ .

Одна из разновидностей резонансного трансформатора конструкции *Брейта*, *Тюве* и *Даля*, ставшей классической, представлена на нижней половине рис. 46 [26, 27]. Первичная обмотка этого трансформатора выполнена в виде плоской секции, содержащей несколько витков. Диаметр вторичной обмотки, намотанной тонким изолированным проводом виток к витку,  $8\text{ см}$ ; длина –  $100\text{ см}$ .

Первичная обмотка имеет 5 витков. Количество витков вторичной обмотки достигает  $5\dots7$  тысяч. Подобная

конструкция трансформатора обладает повышенной электрической прочностью: поскольку первичная обмотка расположена посередине трансформатора, напряжение, наводимое во вторичной обмотке в этой точке (узел напряжения), равно нулю.



**Рис. 46. Электрическая схема (вверху) и внешний вид одной из конструкций высоковольтного трансформатора (внизу)**

Для предотвращения коронирования на концах вторичной обмотки закреплены два полированных металличе-

ских шара *K1* и *K2*. Для повышения надежности трансформатора витки высоковольтной обмотки обычно заливают парафином, эпоксидной смолой, либо погружают в трансформаторное масло при повышенном давлении. В последнем случае выходное напряжение трансформатора может быть доведено до 5 МВ. Коэффициент полезного действия подобной установки составляет несколько процентов.

В практике газоразрядной фотографии подобные напряжения, разумеется, не используют, ограничиваясь выходными напряжениями в пределах 10...20, реже 50...100 кВ, но принципы построения трансформаторов сохраняются.

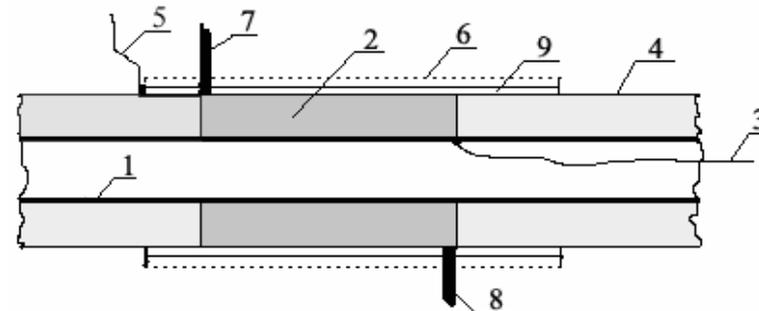
В своей монографии [33] *С.Д. и В.Х. Кирлианы* подробно описали порядок изготовления высокочастотного трансформатора, используемого в практике газоразрядной фотографии. Важнейший узел этого трансформатора – колебательный контур с катушкой самоиндукции, имеющей повышающую напряжение обмотку (резонатор *Удена*).

Для изготовления трансформатора [33] берут писчую бумагу и с помощью карандаша сворачивают трубку – 1 из 4-5 оборотов (рис. 47). Это будет основание катушки резонатора длиной 180 мм. При намотке катушки – 2 во избежание обрыва конец провода скручивают втрое, отодвинув карандаш. Отступив на 80 мм от края, прокалывают в трубке отверстие, куда просовывают провод – 3. Этот провод выводят из трубки на 80...100 мм. Карандаш наполовину вдвигают обратно. Выдвинутую часть карандаша зажимают в патроне дрели, после чего обматывают трубку.

Хорошо изолированный провод должен быть в диаметре 0,2...0,25 мм, эмаль с шелковой или бумажной оплеткой. Обмотку – 2 мотают в плотную, виток к витку, не более 100 витков в одном ряду – в противном случае меж-

ду смежными рядами будет слишком велика разность потенциала и произойдет междурядный пробой.

Каждый ряд обмотки оборачивают двумя или, если бумага тонкая, то тремя оборотами (с нахлесткой) чистой бумаги. Ширина изолирующего слоя бумаги – 4 равна длине трубки – 180 мм. На трубку, таким образом, наматывается до 30 рядов (3000 витков).



**Рис. 47. Внешний вид высоковольтного трансформатора *С.Д. Кирлиана***

После окончания обмотки ее покрывают слоем в три-четыре оборота писчей бумаги – 9, через которую пропускают конец обмотки – 5. Это – повышающая, т. е. вторичная, обмотка. Смещение первичной низковольтной обмотки – 6 по отношению к трубке обусловлено выходящим проводом – 3. Между проводом – 3 и шиной-выводом первичной обмотки – 8 может быть воздушное пробойное перекрытие во время работы генератора на больших напряжениях.

Первичную обмотку (выводы – 7 и 8) наматывают в том же направлении на вторичную медной шиной 3,5x1 мм либо проводом с эмалевой или бумажной изоляцией (диаметром 1,2 мм) в три параллельных проводника (наматыва-

ется 9-10 витков) Концы обмоток соединяют между собой через разделительный высоковольтный конденсатор на 2500  $n\Phi$  (см. схему на рис. 92, емкостная защита).

По окончании намотки автотрансформатора высокой частоты его необходимо часа три поварить в белом парафине, следя за тем, чтобы он не дымился [33]. Варить нужно до обезвоживания бумаги, до полного пропитывания катушки. Для этого катушку оставляют в парафине до начала отвердевания, затем вынимают и остужают. Потом снова нагревают парафин, погружают в него катушку и, не давая ей нагреться, быстро вынимают. Так поступают несколько раз, пока вся катушка не будет залита парафином и у обмотки не останется воздушных пузырьков.

Автотрансформатор [33] выдерживает до 200  $kV$  эффективного напряжения.

Подобная конструкция трансформатора, пригодного для использования в технике фотосъемки в поле токов высокой частоты, описана в работе [34].

Высокочастотный трансформатор (рис. 48) делается выносным и соединяется с прибором с помощью гибкого шнура [34]. Намотка трансформатора производится на фарфоровой, эбонитовой или резиновой трубке длиной 120  $mm$  с наружным диаметром 5...6  $mm$  и внутренним диаметром около 1  $mm$ .

В отверстие трубки плотно вставляется кусок медной голой луженой проволоки диаметром 1,2...1,5  $mm$ . С одного конца трубки эта проволока должна выходить на 10  $mm$ , а с другого – на 3  $mm$ . К короткому концу провода припаивается ленточка, вырезанная из медной или латунной фольги. Затем берется пропарафинированная бумага шириной 120  $mm$ , складывается в несколько слоев и накатывается на резиновую трубку так, чтобы сама трубка с проволочным

штырьком выходила наружу из накатанной бумажной трубки на 40  $mm$  (рис. 48). Вместе с бумагой аккуратно закатывается и латунная ленточка. Накатывать надо несколько слоев бумаги, чтобы диаметр бумажной трубки был равен примерно 8  $mm$ .

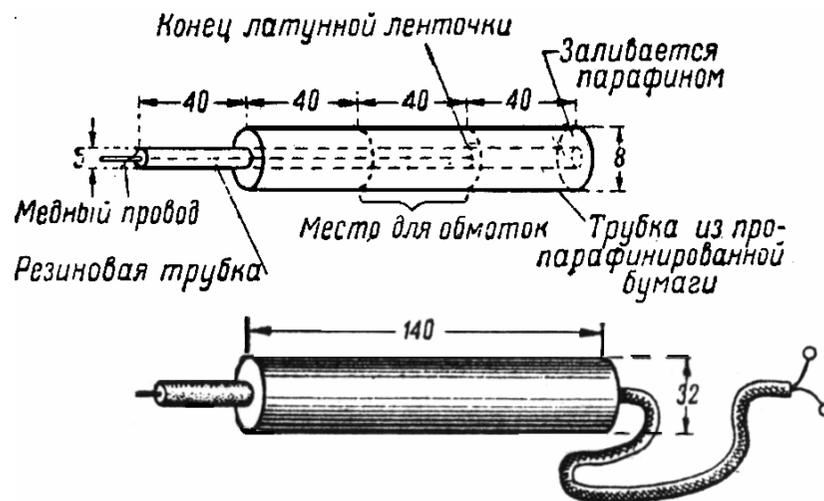


Рис. 48. Внешний вид высоковольтного высокочастотного трансформатора

Бумажную трубку необходимо пропитать в расплавленном парафине. Последний должен пропитать весь слой бумаги и заполнить промежутки. После того, как парафин окончательно остынет, можно приступить к намотке трансформатора. Вначале наматывается вторичная обмотка. Для этого берется провод ПШД или ПЭШО диаметром 0,1-0,12  $mm$ . Конец провода припаивается к концу латунной ленточки и затем аккуратно производится намотка витков к витку. Каждый ряд вторичной обмотки должен иметь длину 40  $mm$ , при этом на нем укладывается 130...160 витков. Все ряды обмотки располагаются точно посередине бу-

мажной трубки так, как показано на рис. 48. На каждый ряд вторичной обмотки с помощью теплого паяльника или обычной кисточки необходимо нанести слой расплавленного парафина.

После того как парафин остынет, следует проверить равномерность нанесенного слоя. При обнаружении неровных мест и сгустков нужно подогреть парафин, давая ему стечь. Кроме пропитки парафином, каждый намотанный ряд провода тщательно изолируется от последующего двумя-тремя полными оборотами хорошо парафинированной бумаги, сложенной в три-четыре слоя и имеющей ширину 120 мм. Провод от предыдущего ряда аккуратно закатывается вместе с изолирующей бумагой так, чтобы выход его на поверхность последующего ряда приходился точно против конца предыдущего. Всего необходимо намотать не менее 12 рядов. Таким образом, во второй обмотке будет всего 1500...1900 витков. Если желательно получить напряжение больше, чем 30 кВ, можно намотать дополнительно еще 4-6 рядов. Последний ряд обмотки изолируется бумагой. Конец вторичной обмотки закрепляется нитками и после намотки первичной обмотки припаивается к ее началу.

Первичная обмотка состоит из 7-8 витков провода ПЭ 0,75-0,8, намотанных с большим шагом так, что они равномерно располагаются на протяжении 30 мм посередине вторичной обмотки. Начало и конец первичной обмотки крепятся с помощью ниток. Затем к ним припаиваются концы мягкого многожильного шнура с резиновой изоляцией. Длина шнура должна быть не менее 1 м. Выводы шнура, припаянные к первичной обмотке, привязываются в нескольких местах к бумажному каркасу.

Затем надо склеить из прессшпана толщиной 1...1,5 мм трубку-чехол для трансформатора или подобрать под-

ходящего диаметра фарфоровую трубку. Внутренний диаметр этой трубки должен быть на 4...5 мм больше, чем наружный диаметр намотанного трансформатора, а ее длина – 140 мм. К одному концу такой трубки надо приклеить донышко с отверстием для выводного шнура.

После изготовления трубки она пропитывается парафином или покрывается несколько раз шеллачным лаком. Затем весь трансформатор погружается на несколько минут в расплавленный парафин. Еще в горячем состоянии на трансформатор надевается заготовленный чехол, через отверстие в его донышке предварительно пропускается шнур. Все свободное пространство в трубке полностью заполняется расплавленным парафином.

При изготовлении трансформаторов по описаниям [33, 34] могут быть использованы современные диэлектрические материалы.

Так, например, высокочастотные трансформаторы [35, 36] на выходное напряжение порядка 10 кВ выполнены по подобию трансформатора [34] на диэлектрической трубке с внешним диаметром 8 и длиной 150 мм, внутри расположен медный электрод диаметром 1,5 мм. Первичная обмотка (содержит 3...4 тысячи витков провода ПЭЛШО 0,12, намотанных виток к витку в 10...13 слоев (длина намотки 70 мм), пропитанных клеем БФ-2 с межслойной изоляцией из политетрафторэтилена. Вторичная обмотка содержит 20 витков провода ПЭВ 0,75, пропущенного через кембрик из поливинилхлорида.

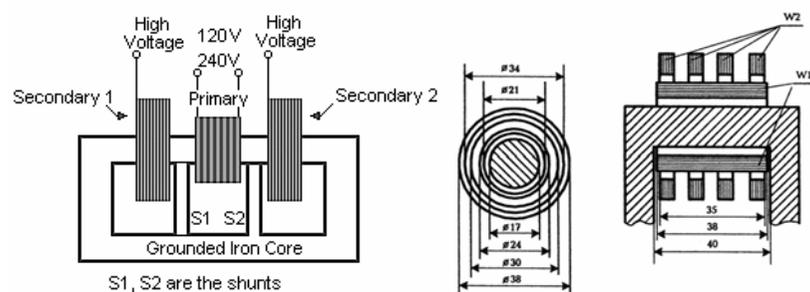
Далее рассмотрим конструкции высоковольтных трансформаторов с магнитным сердечником.

Для формирования затухающих импульсов высоковольтного напряжения амплитудой до 3...20 кВ в работе [37] использован трансформатор на ферритовом сердечни-

ке *M400HH-3-8x100 мм*. Первичная обмотка трансформатора содержит 20 витков провода *МГШВ 0,75 мм* с шагом намотки 5...6 мм. Вторичная обмотка содержит 2400 витков рядовой намотки провода *ПЭВ-2 0,04 мм*. Первичная обмотка намотана поверх вторичной через политетрафторэтиленовую прокладку 2x0,05 мм.

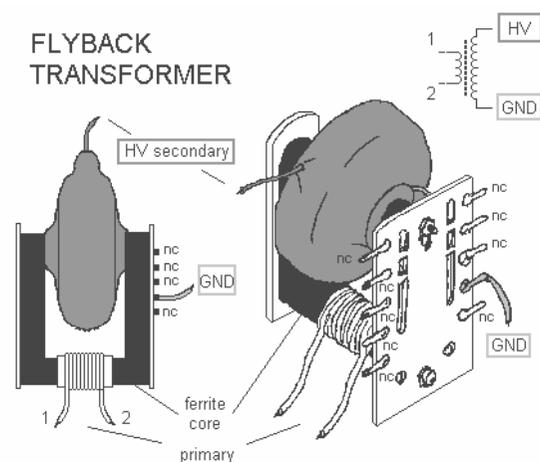
Подобный трансформатор [38] также выполнен на ферритовом сердечнике *400HH* диаметром 10 мм и длиной 100 мм. Первичная обмотка содержит 50 витков провода *ПЭВ-2 0,8 мм*. Вторичная обмотка имеет 8000 витков провода *ПЭВ-2 0,09 мм*. Конструкция залита парафином и заключена в экран из медной фольги.

Для повышения надежности работы высоковольтных трансформаторов их обмотки иногда делают секционированными (рис. 49) [39, 40].

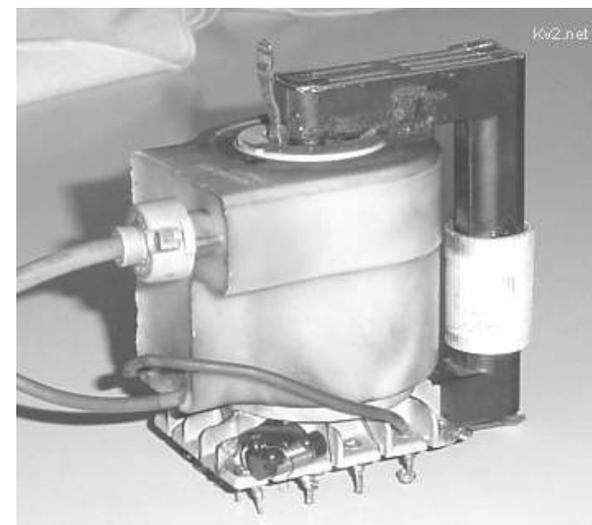


**Рис. 49. Конструкции высоковольтных высокочастотных трансформаторов с секционированными вторичными обмотками**

Подобные трансформаторы исключительно трудоемки в изготовлении. В этой связи большой интерес представляет использование в составе генераторов модифицированных готовых изделий – трансформаторов строчной развертки, катушек зажигания автотранспорта, рис. 50, 51.



**Рис. 50. Внешний вид высоковольтного трансформатора с ферритовым магнитопроводом [41]**



**Рис. 51. Фотография высоковольтного высокочастотного трансформатора [42]**

Генератор высоковольтных импульсов с использованием трансформатора (рис. 50) вырабатывает напряжение до 20 кВ на частоте 5 кГц и приблизительно 5...10 кВ при работе на частоте 50...70 кГц. [41]. Трансформатор генератора выполнен на основе типового выходного трансформатора строчной развертки телевизионного приемника.

Первичная (низковольтная) обмотка этого трансформатора удалена, а вместо нее на сердечник трансформатора через диэлектрическую прокладку намотано 40 витков провода диаметром 1,024 мм.

Преобразователь напряжения на основе телевизионного строчного трансформатора (рис. 51) [42] может работать на частотах 20...40 кГц. Как и в предыдущем случае первичная обмотка трансформатора переработана.

В качестве трансформатора высокочастотных генераторов [43, 44] для получения фотографий по методу "Кирлиан" использован выходной телевизионный трансформатор строчной развертки ТВС-110ЛА4, с магнитопровода которого удалена низковольтная обмотка, а взамен намотано около 20 витков медного провода ПЭВ 0,75. Оптимальное количество витков подбирают по достижению максимального выходного напряжения.

Для обеспечения надежной изоляции между высоковольтными и низковольтными цепями на магнитопровод (см., например, рис. 50, 51) предварительно наматывают несколько слоев пленки из политетрафторэтилена, а сам провод низковольтной обмотки пропускают через кембрик. Витки обмотки для исключения их перемещения фиксируют нитями из поликапроамида.

Высокочастотный трансформатор на базе телевизионных строчных трансформаторов можно использовать и без переделки. Так, в высоковольтном генераторе, работающем

на частоте порядка 48 кГц и обеспечивающем выходное напряжение до 6...8 кВ был использован выходной трансформатор строчной развертки ТВС-90ПЦ10 [45].

Для достижения максимального выходного напряжения 8 кВ выходной каскад устройства получал питание от источника напряжением 25 В [45].

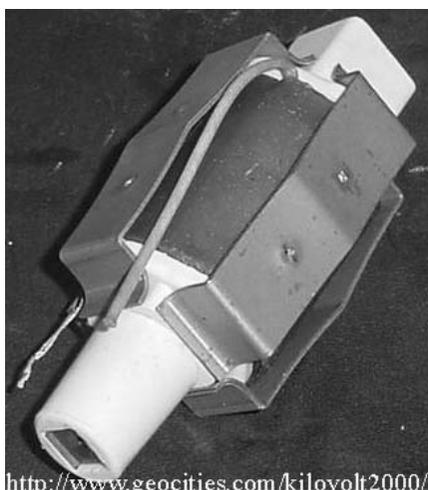
Кроме телевизионных трансформаторов в преобразователях напряжения могут применяться и выходные трансформаторы каскадов строчной развертки мониторов ПЭВМ. Такие трансформаторы в отличие от телевизионных способны работать на более высоких частотах. Для сравнения: расчетная рабочая частота телевизионных трансформаторов строчной развертки – 15,625 кГц, современных мониторов для ПЭВМ – до 100 кГц.

В ряде генераторов высоковольтного напряжения использовались также индукционные катушки зажигания для автомобилотранспорта [46, 47].

Такие катушки имеют, как правило, сердечник, рассчитанный на работу в области довольно низких частот – порядка 1 кГц. В этой связи для целей кирлиановской фотографии подобные конструкции малопригодны.

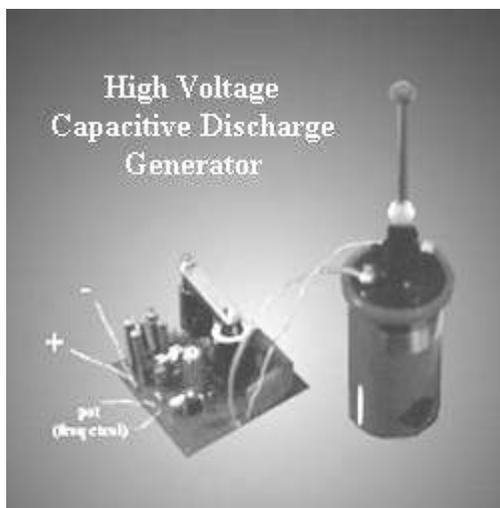
Преимуществом индукционных катушек зажигания является то, что они способны работать при низком напряжении питания преобразователя (6; 12 или 24 В). Кроме того, эти изделия приспособлены для работы в суровых климатических условиях и имеют в этой связи высокую надежность.

Внешний вид индукционной катушки зажигания, используемой в генераторе высокого напряжения, показан на рис. 52 [46]. Практическая конструкция такого генератора показана на рис. 53 [47].



<http://www.seocities.com/kilovolt2000/>

**Рис. 52. Высоковольтный трансформатор на основе индукционной катушки**



**Рис. 53. Генератор высокого напряжения на основе автотранспортной катушки зажигания**

### 3.2. Электрические разрядники, коммутационные элементы и их полупроводниковые аналоги

Вторыми по значимости в технике получения высоких напряжений после трансформаторов являются коммутационные устройства. К таковым можно отнести в исторической хронологии электрические разрядники, механические коммутаторы, вакуумные лампы, газонаполненные многоэлектродные приборы, двух- или трехэлектродные полупроводниковые приборы (динисторы, тиристоры, биполярные и полевые транзисторы), специализированные микросхемы.

В ионных разрядниках используют свойства *дугового разряда*, *искрового разряда* и, реже, *тлеющего разряда*. Наиболее широко применяется дуговой разряд, характеризующийся низким падением напряжения в разрядном промежутке и большими токами. В низковольтных разрядниках (до 500 В) при приложении напряжения выше напряжения пробоя или равного ему возникает сначала тлеющий разряд, который быстро переходит при дальнейшем повышении напряжения в дуговой. В высоковольтных разрядниках сначала возникает искровой разряд, который также переходит в дуговой при условии достаточно мощного источника тока или большой разряжающейся емкости [48-50].

Разрядники – двухэлектродные, реже трехэлектродные приборы, выполняются в стеклянном или в металлокерамическом оформлении. В ионных разрядниках обычно используют активированные электроды: оксидированный или торированный вольфрам, никель, покрытый калием или барием, сплавы вольфрама, никеля и окиси бария (ВНБ-3) или молибдена и вольфрама. Применяют также

чистые металлы: вольфрам, нержавеющую сталь, молибден, алюминий. В качестве наполнителя в ионных разрядниках служат чистые инертные газы или их смеси, водород, воздух, кислород в смеси с водяными парами или углекислым газом [48-50].

Важнейшие параметры ионных разрядников: напряжение пробоя ( $75 \dots 20000 \text{ В}$ ); допустимый ток разряда (от сотых долей до  $1000 \text{ А}$ ) или энергия разряда; сопротивление изоляции; допустимое время разряда или длительность импульса; допустимое число пробоев (до  $10^7$ ) или время работы. Параметры, определяющие общую работоспособность прибора: время запаздывания зажигания и время установления электрической прочности прибора [48-50].

Напряжение пробоя газовых разрядников  $U_{\text{разр.}}$  зависит от множества факторов, в частности, температуры окружающей среды и температуры электродов, от химического состава поверхности электродов и его изменения в процессе работы, изменения давления воздуха и его состава, освещенности, наличия естественного фона радиоактивных излучений и т. д. В первом приближении отмеченными выше факторами можно пренебречь.

На рис. 54 показан внешний вид разрядника с регулируемым зазором [51]. Каркас разрядника склеен из пластинок полиметилметакрилата. Зазор между электродами можно плавно регулировать, ввинчивая электроды по винтовой резьбе стоек электродов. Такой разрядник имеет S-образную вольтамперную характеристику.

На рис. 55 приведена фотография электрического разрядника устаревшей ныне модели *P-350*, *P-460*. Это типичный представитель семейства газовых разрядников, выпускавшихся 20...50 лет назад. Разрядник выполнен в виде стеклянной трубки с двумя ножевыми контактами. Основ-

ные характеристики разрядника *P-350* [1]: разрядное напряжение –  $350 \pm 40 \text{ В}$ ; пропускная способность по постоянному току –  $3/2 \text{ А/сек}$ ;  $I_{\text{имп.}} - 1,4 \dots 1,5 \text{ кА}$ .

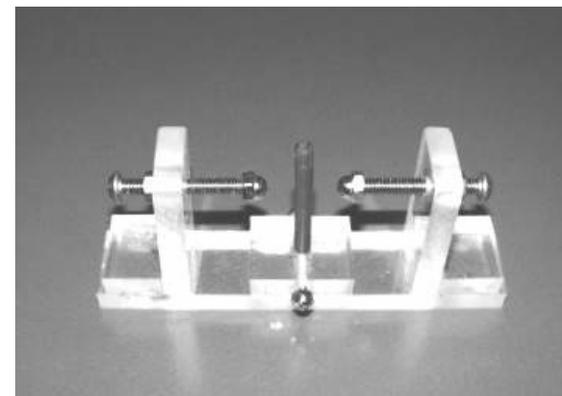


Рис. 54. Электрический разрядник с регулируемым зазором микрометрическим винтом

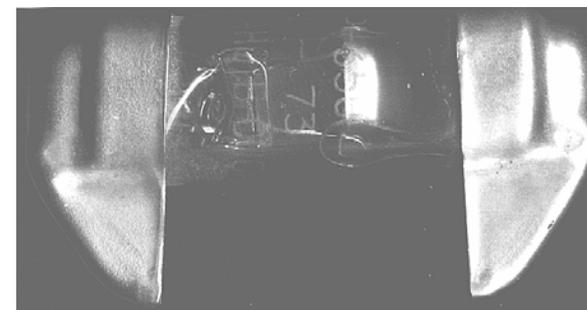
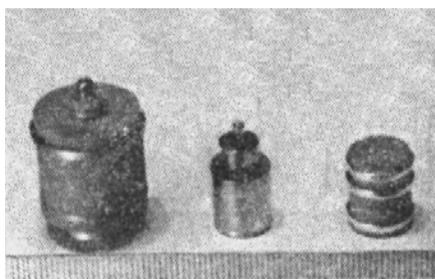


Рис. 55. Электрический разрядник *P-350*, *P-460*

Из числа широко распространенных ранее моделей газовых разрядников можно перечислить следующие: *РБ-5*; *РБ-90*; *РБ-280*; *P-35*; *РВ-500*; *УР-500*; *P-4*; *P-7...10*; *P-37*; *P2M*; *P64*; *ИР-xx*, где *xx* – 0,2; 7,0; 10; 15; 20 (*xx* – разрядное напряжение, *кВ*).

К числу менее распространенных относятся электрические разрядники с управляемой характеристикой. Это трехэлектродные разрядники с дополнительным электродом; разрядники с ультрафиолетовым или радиационным иницированием разряда и т. д.

Современные модели вакуумных и газонаполненных разрядников отечественного производства представлены на рис. 56. Эти виды разрядников, предназначенных для коммутации импульсных электрических цепей и защиты устройств от перенапряжений, разрабатывает и поставляет Всесоюзный научно-исследовательский институт автоматики (ВНИИА) [52].



**Рис. 56. Электрические разрядники производства ВНИИА**

Разрядники выпускаются в металlostеклянном или металлокерамическом исполнении. По данным разработчиков эти изделия имеют высокую механическую прочность, работоспособны в широком диапазоне температур, миниатюрны, надежны, долговечны.

Основные характеристики разрядников, производимых ВНИИА, приведены в таблице 2. Рабочее напряжение этих разрядников – от сотен вольт до десятков киловольт. Коммутируемые токи – до сотен килоампер. Ресурс работы – до  $10^7$  включений.

**Таблица 2**

**Основные характеристики электрических разрядников производства ВНИИА**

Основные характеристики	Миниатюрные вакуумные управляемые разрядники	Управляемые вакуумные разрядники (частотные)	Газонаполненные разрядники	
			неуправляемые	управляемые
Номинальное рабочее напряжение, кВ	0,1-10	0,1-20	0,4-100	8-12
Максим. емкость рабоч. промежутка, пФ	2-15	5-10	3-5	3-5
Время коммутации, нс	10-100	10	1	0,3
Максимальная энергия управления, мДж	0,005-0,1	0,3-1	–	0,01

Из числа зарубежных разрядников наибольшую известность в России приобрели изделия фирмы *Epcos* [53].

Газонаполненные разрядники напряжения фирмы *Epcos* обычно применяют для защиты телефонных линий, цепей аппаратуры, линий связи и радиоэлектронного оборудования от перенапряжений, возникающих в результате грозных разрядов и электромагнитных импульсов.

При достижении заданного напряжения в разряднике возникает дуговой разряд, и сопротивление его резко снижается с величины, превышающей  $1 \text{ ГОм}$  до значения менее  $0,1 \text{ Ом}$ . После окончания воздействия перенапряжения высокое электрическое сопротивление разрядника восстанавливается.

Разрядники фирмы *Epcos* [53] имеют маркировку *Mxx-Суу*, где *xx* – код конструкционного исполнения элемента (50 – без выводов; 51 – с выводами); *уу* – значение напряжения пробоя статического, *В*. Амплитуда тока через разрядники этого типа в импульсе длительностью  $8/20 \text{ мкс}$ , а также для синусоидального тока частотой  $50 \text{ Гц}$ , может

достигать 2,5 кА. Межэлектродная емкость разрядников около 1 пФ. Диаметр – 5 мм; высота – 5 мм.

Ряд значений  $u_{00}$  для разрядников серии M50-Сууу (M51-Сууу) составляет: 90; 230; 350; 600 В. Напряжение горения дуги для разрядников этого типа составляет 10...25 В.

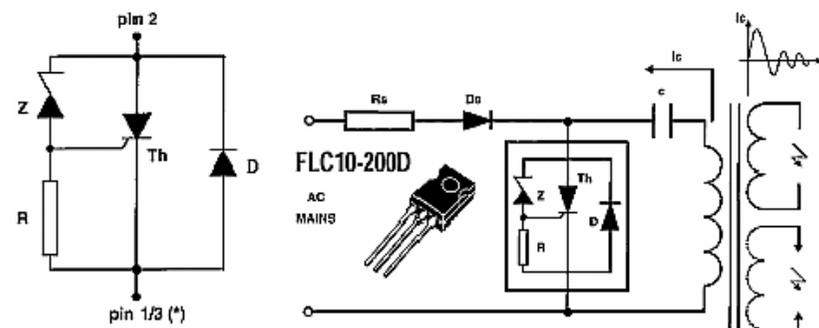
Для разрядников других серий фирмы *Epcos* диапазон рабочих напряжений (пробоя) находится в пределах 70...4500 В, импульсный ток отвода – до 40 кА (импульс 8/20 мкс) и 20 А при действии тока до 1 с.

Помимо самих разрядников в последние годы все шире применяют их полупроводниковые имитаторы или аналоги. Такие изделия поставляют на рынок в виде законченных функциональных узлов.

Специализированная микросхема *FLC10-200D* фирмы *STMicroelectronics*, представляет собой полупроводниковый аналог искрового разрядника. Микросхему используют в генераторах импульсов высоковольтного напряжения. Типовая схема ее включения представлена на рис. 57.

Микросхема представляет собой аналог электрического разрядника и содержит тиристор *Th*, между анодом и управляющим электродом которого подключен зенеровский диод *Z* (стабилитрон). При превышении напряжения на электродах аналога разрядника напряжения пробоя зенеровского диода происходит переключение тиристора в проводящее состояние.

Максимальный ток аналога разрядника в импульсе – 240 А; длительность импульса тока  $t_p=10$  мс. Обратносмещенный диод *D*, подключенный параллельно электродам тиристора, защищает его от импульсов отрицательной полярности при работе на индуктивную нагрузку.



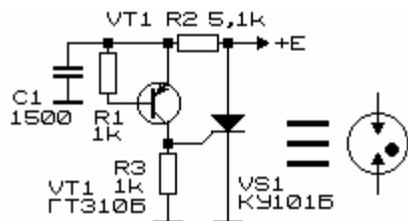
**Рис. 57. Высоковольтный преобразователь напряжения на основе специализированной микросхемы – имитатора электрического разрядника**

Эквивалентная схема низковольтного газового разрядника, рассчитанного на напряжение 20 В [54], приведена на рис. 58.

Пороговый элемент аналога выполнен на основе германиевого транзистора *VT1 ГТ310Б*, работающего в режиме лавинного пробоя. При превышении напряжения пробоя коллекторного перехода этого транзистора, включенного инверсно, конденсатор *C1* разряжается на управляющий электрод тиристора *KY101Б*. Тиристор переводится в проводящее состояние. Это состояние сохраняется до тех пор, пока напряжение на аноде тиристора не снизится до нуля, либо ток через тиристор не снизится ниже тока удержания.

В некоторых пределах напряжение пробоя устройства можно варьировать подбором активного элемента: даже для транзисторов одной партии напряжение пробоя коллекторного перехода может значительно отличаться. Еще в большей степени изложенное касается полупроводниковых приборов другого типа, полупроводниковых приборов разных производителей.

Кратно увеличить напряжение пробоя аналога разрядника можно путем последовательного включения нескольких транзисторов, работающих в режиме лавинного пробоя. Наряду с лавинными транзисторами такая цепочка может содержать стабилитроны или диносторы.



**Рис. 58. Электрическая модель низковольтного газового разрядника**

Максимальный ток через аналог разрядника [54] невелик (до 1 А – для импульса длительностью не свыше 10 мкс и 75 мА – для постоянного тока)

Опираясь на данные источников научной и патентной информации, а также результаты собственных исследований реальных и виртуальных электронных устройств (*Electronics Workbench 5.12, Multisim 6.25*), нами была предложена структура, позволяющая моделировать поведение приборов с вольтамперной характеристикой N-типа (рис. 59).

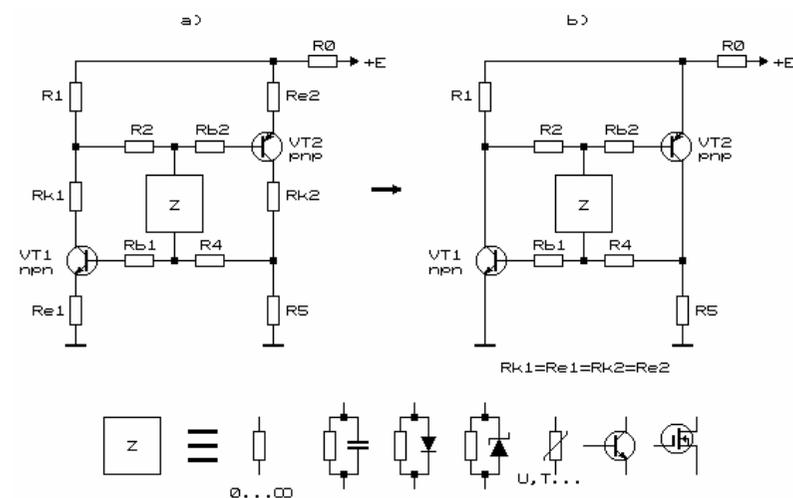
При варьировании номиналов резисторов, входящих в состав схемы (рис. 59) возможен синтез практически всех разновидностей N-образных вольтамперных кривых, управление углами наклонов их участков, точек перегибов.

В качестве Z-элемента схемы (рис. 59) может быть использованы управляемые и неуправляемые структуры (резисторы, RC- и LC- цепи, диодно-резистивные цепи, стаби-

литроны, стабилитроны, термисторы, варисторы, позисторы, биполярные и полевые транзисторы и другие элементы).

Отметим, что такие же элементы могут быть включены в разрыв эмиттерных цепей транзисторов VT1 и VT2.

Введение в состав схемы индуктивных или емкостных компонентов позволяет управлять свойствами полупроводниковой структуры при работе в области повышенных частот. Использование и учет этих элементов позволяет приблизить свойства имитатора к реальным свойствам имитируемого им объекта.



**Рис. 59. Электрическая модель низковольтного газового разрядника**

Отметим, что модель (рис. 59a) трансформируется в модель (рис. 59b) при условии  $Rk1=Re1=Rk2=Re2=0$ . В свою очередь, при последующих упрощениях эта модель преобразуется в модель, представленную на рис. 60a. При таком упрощении  $Rb1=Rb2=0$ ;  $Z=R3$ .

Модель (рис. 60а) считается наиболее пригодной для создания и исследования  $p-n-p-n$  – полупроводниковых структур-негатронов [55].

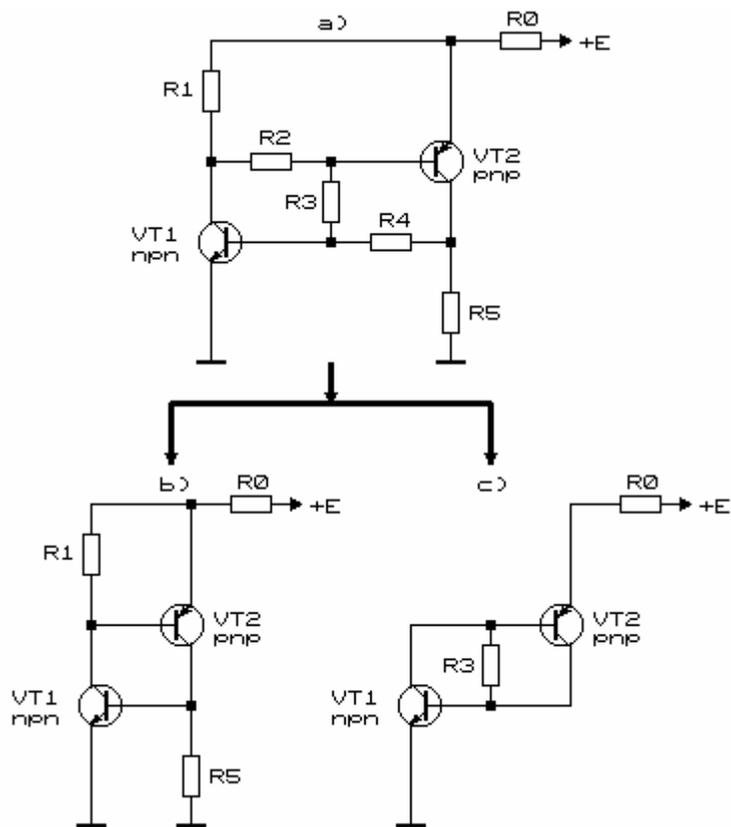


Рис. 60. Электрическая модель низковольтного газового разрядника

Эта структура (рис. 60а) при  $R2=R4=0$  и  $R3=\infty$  преобразуется в схему, обычно используемую для замены полупроводниковых приборов с отрицательным динамическим сопротивлением на вольтамперной характеристике – ла-

винных транзисторов, диноисторов и т. д. [55, 56]. При  $R2=R4=0$  и  $R1=R5=\infty$  схема (рис. 60а) переходит в структуру вида (рис. 60с), именуемую схемой *Стэдлера* [57]. Резистор  $R0$  на рис. 59, 60 является нагрузочным. Он ограничивает предельный ток через полупроводниковые приборы.

На рис. 61 показан типовой внешний вид вольтамперной характеристики, полученной при исследовании аналога газового разрядника (рис. 59).

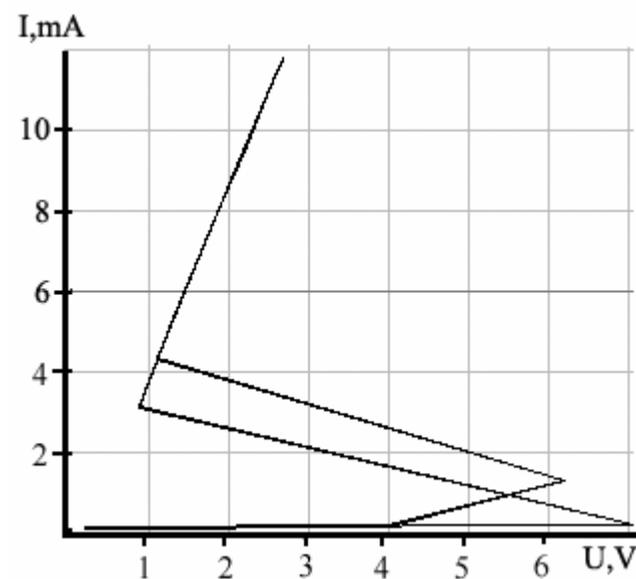


Рис. 61. Вольтамперные характеристики аналога низковольтного газового разрядника

На рисунке отчетливо просматривается прямая и обратная ветвь вольтамперной характеристики. При выполнении определенных условий таким образом может быть получена вольтамперная характеристика, в достаточной степени отображающая свойства реального газоразрядного

прибора (нестабильность вольтамперной характеристики во времени, температурная зависимость пробоя газового промежутка и т. д.).

На рис. 62 показаны вольтамперные характеристики сверхнизковольтного аналога полупроводникового прибора (схема Стэдлера) при варьировании номинала резистивного элемента цепи.

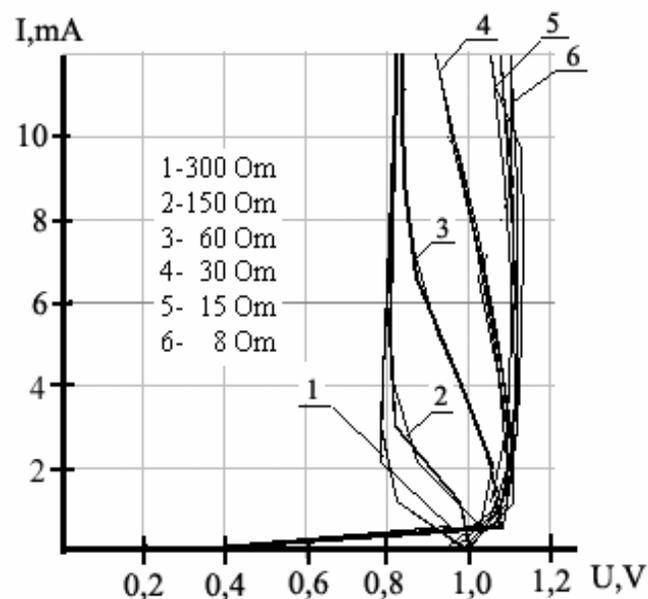


Рис. 62. Вольтамперные характеристики схемы Стэдлера (рис. 60а) при варьировании величины сопротивления  $R_3$ . *Electronics Workbench 5.12*

На рис. 63 приведены эквивалентные схемы низковольтных лавинного транзистора, динистора [58], тиристора, которые могут быть использованы в составе полупроводниковых аналогов газоразрядных коммутаторов, см., например, рис. 57, 58, или использоваться в этих целях са-

мостоятельно. Если в аналоге динистора (рис. 63) задать  $R_1=R_3=100 \text{ Ом}$  и варьировать номиналом резистора  $R_2$ , можно получить прибор с управляемым напряжением переключения в диапазоне от 1 до 25 В [59, 60]. Если удалить этот резистор, то при условии  $R_1=R_3=5,1 \text{ кОм}$  напряжение переключения составит 9 В, а при  $R_1=R_3=3 \text{ кОм}$  – 12 В.

Управляемый аналог газового разрядника или динистора [61] может быть создан на основе тиристора (рис. 64). При указанных на схеме номиналах и изменении сопротивления резистора  $R_1$  в пределах от 1 до 6 кОм, напряжение переключения динистора в проводящее состояние изменяется с 15 до 27 В.

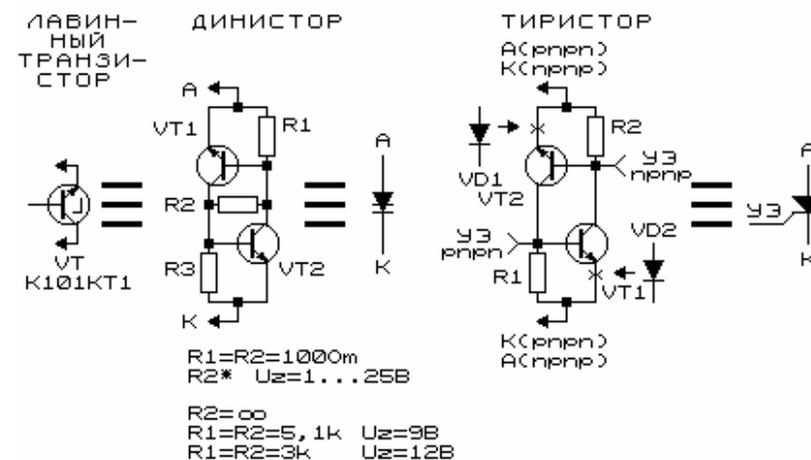
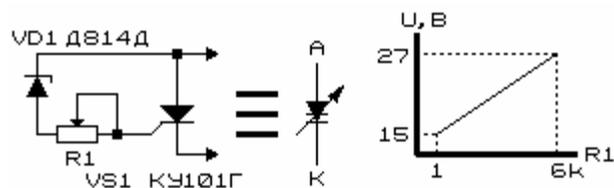


Рис. 63. Электрические эквиваленты низковольтных газовых разрядников (аналоги лавинного транзистора, динистора, тиристора)

Механические коммутаторы обмоток высокочастотных трансформаторов, выполненные в виде прерывателей с электромагнитным управлением [33, 34] или контактов, закрепленных на валу электродвигателя, ныне являются

анахронизмом. Впрочем, подобные коммутаторы легко могут быть реализованы с использованием элементной базы последних лет, например, магнитоуправляемых контактов.

В современных высоковольтных преобразователях напряжения в качестве коммутационных устройств широко используют полупроводниковые приборы, представленные на рис. 65. Свойства и вольтамперные характеристики многослойных полупроводниковых структур – динисторов и тиристоров подробно рассмотрены выше.



**Рис. 64. Регулируемый аналог газового разрядника (управляемого динистора)**

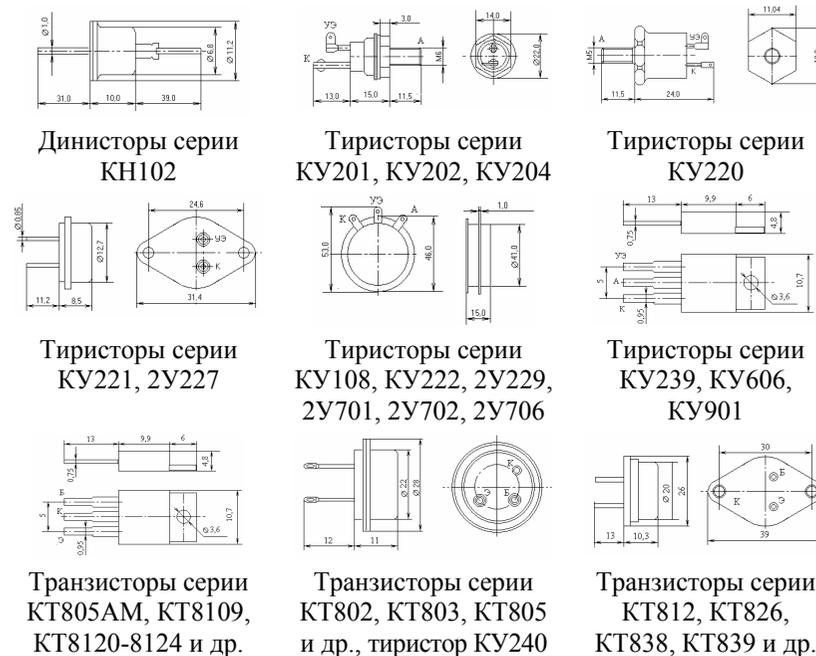
Биполярные и полевые транзисторы в отличие от динисторов и тиристоров способны работать в качестве плавно управляемых внешним маломощным сигналом сопротивлений.

В зависимости от наличия, полярности и величины потенциалов на электродах транзисторов подразделяют несколько режимов их работы: *насыщения* – оба перехода транзистора открыты, напряжения на них минимальны, ток через переходы максимален; *отсечки* – оба перехода транзистора закрыты, напряжения на них максимальны, ток через переходы минимален; *активный* – промежуточный между режимом насыщения и отсечки; *инверсный* – характеризующийся подачей на электроды транзистора обратной (инверсной) полярности.

Режимы насыщения и отсечки используют для переключающе-коммутирующих схем, имеющих только два

состояния: включено (сопротивление элемента близко к нулю) и выключено (сопротивление элемента стремится к бесконечности). Режим активный – широко применяют для усиления сигналов, например, в выходных каскадах преобразователей напряжения – линейных усилителях.

Ключевой режим работы транзисторов часто используют в одноктактных и двухтактных генераторах-преобразователях с внешним возбуждением, см. главу 2.



**Рис. 65. Внешний вид полупроводниковых коммутирующих приборов (КУxxx ≈ 2Уxxx). Цоколевка приборов может не совпадать**

Технические характеристики представленных на рис. 65 полупроводниковых приборов легко найти в справочной литературе, см. также [1].

### 3.3. Пассивные элементы высоковольтных преобразователей

К пассивным элементам электрических цепей традиционно относят резисторы и конденсаторы. В связи со специфическими условиями работы высоковольтных высокочастотных установок нелишним будет рассмотреть основные характеристики пассивных элементов, используемых в этих установках.

Логарифмические ряды номиналов резисторов и конденсаторов, выпускаемых промышленностью, определяют из выражений:  $X = 10^{\frac{n-1}{N}}$ , где  $X$  – номинал,  $n$  – порядковый номер определяемого номинала ( $n \leq N$ ),  $N = 6, 12$  или  $24$  для рядов E6, E12 или E24, соответственно:

E6 E12 E24 **1.0** 1.1 1.2 1.3 **1.5** 1.6 1.8 2.0 **2.2** 2.4 2.7 3.0  
**3.3** 3.6 3.9 4.3 **4.7** 5.1 5.6 6.2 **6.8** 7.5 8.2 9.1

Допустимые отклонения от номиналов составляют  $\pm 20\%$ ;  $\pm 10\%$  и  $\pm 5\%$ , соответственно.

#### Резисторы

Непроволочные резисторы в зависимости от материала токопроводящего слоя подразделяют на углеродистые, боруглеродистые, металлизированные, металлоокисные, металлодиэлектрические, лакопленочные, керметные, полупроводниковые и т. д.

Резисторы характеризуют номинальным сопротивлением и допуском (см. выше), номинальной мощностью и предельным напряжением. Менее значимыми параметрами резисторов является собственная межэлектродная емкость, индуктивность выводов, температурная область рабочих

температур, температурный коэффициент сопротивления и уровень собственных шумов.

В обычных условиях при температуре  $20^\circ\text{C}$  рабочее напряжение на выводах резистора не должно превышать значения  $U \leq \sqrt{P_n R_n}$ , где  $P_n$  – номинальная (паспортная) мощность резистора,  $R_n$  – номинальное сопротивление. Однако при работе на повышенных напряжениях в ряде случаев может происходить повреждение резистора. Это может быть вызвано повышенной влажностью окружающей среды, наличием загрязнений на корпусе резистора. Для резисторов, проводящий слой которых выполнен в виде спиральной нарезки по токопроводящему слою, может наблюдаться межвитковая пробой и последующее выгорание токопроводящего слоя.

Характеристики некоторых типов распространенных резисторов приведены в таблице 3 [62].

При работе резисторов на повышенных частотах в зависимости от конструктивных особенностей их выполнения реальное сопротивление снижается за счет поверхностного эффекта.

Эквивалентная схема замещения высокоомного резистора может быть представлена параллельно включенными резистором и конденсаторами – распределенной емкостью токопроводящего слоя, емкости между выводами резистора. Для низкоомного резистора эквивалентную схему замещения можно представить в виде последовательно включенных резистора и индуктивности.

Величина полного сопротивления резисторов заметно зависит от частоты. Так, например, для устаревших ныне углеродистых резисторов типа *BC*, *УЛМ* активное сопротивление на частоте  $10 \text{ МГц}$  снижается на  $10\%$ , на частоте  $50 \text{ МГц}$  – почти на  $50\%$ . У малогабаритных металлопле-

Таблица 3

Основные параметры резисторов. Значения напряжений гарантированы при давлении не ниже 700 мм. рт. ст.

Тип резистора	Rном., Вт	Rном.		Umax, В	
		min, Ом	max, МОм	U ~/=	Uимп.
BC-0,125	0,125	10	1,0	100	400
BC-0,25	0,25	27	5,1	350	750
BC-0,5	0,5	27	10	500	1000
BC-1	1	47	10	700	1500
BC-2	2	47	10	1000	2000
ИВС-2	2	10	2,2	–	12000
BC-5	5	47	10	1500	5000
ИВС-5	5	22*10 <sup>4</sup>	2,0	–	15000
BC-10	10	75	10	3000	10000
ВСЕ-0,25	0,25	27	0,24	150	750
ВСЕ-0,5	0,5	27	0,1	200	1000
УЛМ-0,12	0,12	27	1,0	100	400
УЛИ-0,1	0,1	1	0,5	200	400
УЛИ-0,25	0,25	1	1,0	350	500
УЛИ-0,5	0,5	1	1,0	500	750
УЛИ-1	1	1	1,0	700	1000
МЛТ-0,125	0,125	51	2,2	200	350
МЛТ-0,25	0,25	51	3,0	250	450
МЛТ-0,5	0,5	51	5,1	350	750
МЛТ-1	1	51	10	500	1000
МЛТ-2	2	51	10	700	1200
МТ-0,125	0,125	100	1,1	200	400
МТ-0,25	0,25	100	2,0	200	400
МТ-0,5	0,5	100	5,1	350	750
МТ-1	1	100	10	500	1000
МТ-2	2	100	10	700	1200
МУН-0,5	0,5	>24	–	250	450
МУН-1	1	>24	–	350	750
МУН-2	2	>24	–	750	1000

МГП-0,5	0,5	10*10 <sup>3</sup>	5,1	400	–
МОН-0,5	0,5	1	100	7	60
МОН-1	1	1	100	10	80
МОН-2	2	1	100	15	100
С2-6-0,125	0,125	100	1,0	200	400
С2-6-0,25	0,25	100	2,0	200	400
С2-6-0,5	0,5	100	5,1	350	750
С2-6-1	1	100	1,0	500	1000
С2-6-2	2	100	1,0	700	12000
С4-1-0,25	0,25	10	0,51	300	700
С4-1-0,5	0,5	10	0,51	400	900
С4-1-1	1	10	1,0	500	1200
С4-1-2	2	10	1,0	750	1700
ТВО-0,125	0,125	3	0,1	100	400
ТВО-0,25	0,25	3	0,51	300	700
ТВО-0,5	0,5	10	1,0	400	900
ТВО-1	1	10	1,0	500	1200
ТВО-2	2	10	1,0	750	1700
ТВО-5	5	27	1,0	1500	5000
ТВО-10	10	27	1,0	3000	10000
ТВО-20	20	27	0,1	1400	9000
ТВО-60	60	27	0,1	2450	25000
КОИ-0,25	0,25	100	10	250	2000
КОИ-0,5	0,5	10	100	350	3000
КИМ-0,05	0,05	10	5,6	100	–
КИМ-0,125	0,125	2,7	1000	200	–
КИМ-Е	0,125	–	1000	200	–
КВМ	–	–	10*10 <sup>4</sup>	100	–
КЛМ	–	–	10*10 <sup>5</sup>	300	–
КЭВ-1	1	–	5100	10000	–
КЭВ-2	2	–	1200	20000	–
КЭВ-5	5	–	18000	35000	–
КЭВ-10	10	–	12000	25000	–
КЭВ-20	20	–	20000	40000	–
КЭВ-40	40	–	47000	60000	–

ночных резисторов типа *МЛТ* эта зависимость выражена более ярко. Еще более выражен частотный эффект изменения сопротивления для объемных резисторов (рис. 66)[63].

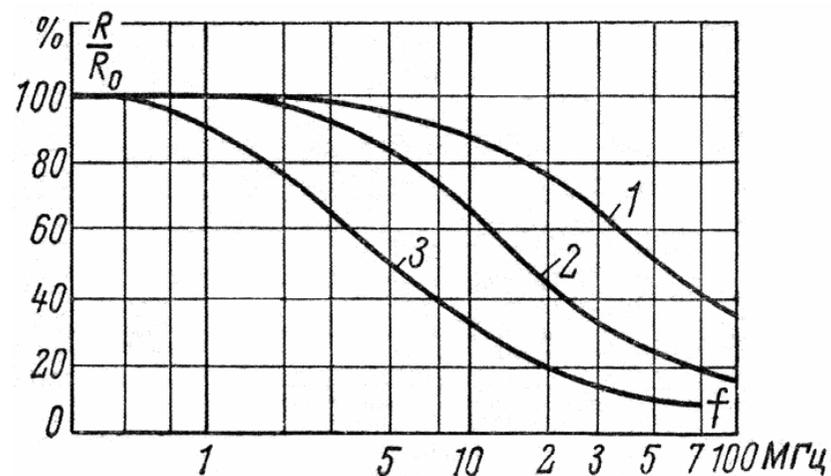


Рис. 66. Частотная зависимость полного сопротивления непроволочных резисторов: 1 – тип *ВС*; 2 – тип *МЛТ*; 3 – объемные резисторы

Паразитную емкость резистора  $R$  можно снизить в  $n$  - раз, соединив последовательно  $n$  - резисторов сопротивлением  $R/n$ . В этом случае возрастает паразитная индуктивность сборки резисторов, снизить которую можно укорочением выводов резисторов. Одновременно при подобном включении резисторов достигается большая равномерность распределения напряжения на резисторах. Также повышается надежность сборки при действии импульсов тока, поскольку термические перегрузки, наиболее выраженные в средней части резистора и вблизи токовыводов, равномерно распределятся на все  $n$  - резисторов.

### Конденсаторы

Электрические конденсаторы обычно классифицируют по виду диэлектрика, разделяющего его обкладки (воздушные, керамические, стеклоэмалевые, бумажные и т. д.).

В зависимости от области применения различают конденсаторы общего и специального назначения. К числу последних относят высоковольтные постоянного напряжения, высоковольтные импульсные, импульсные, помеходавляющие, дозиметрические и др. конденсаторы.

Основными характеристиками конденсаторов является величина их емкости, рабочее напряжение, сопротивление утечки, температурный коэффициент емкости, реактивная мощность, стабильность параметров (их изменение в процессе хранения или эксплуатации).

Шкала емкостей конденсаторов за редкими исключениями определяется рядами  $E6$ ,  $E12$ ,  $E24$  (см. выше).

Ряд номинальных напряжений (в  $kB$ ) конденсаторов в пределах от 0,2 до 10  $kB$ : 0,2; 0,25; 0,315; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0.

Электрическая прочность конденсаторов характеризуется номинальным рабочим напряжением, при котором конденсатор способен безотказно работать в течение всего гарантированного срока эксплуатации при оговоренных условиях (температура, влажность, давление атмосферы).

Обычно в паспортных данных на конденсаторы указывают только предельное значение напряжения постоянного тока. Переменное (действующее) значение напряжения должно по меньшей мере в 1,5...2 раза быть меньше указанного постоянного напряжения [62]. При работе конденсатора в цепях переменного или пульсирующего токов максимальное суммарное напряжение на обкладках кон-

денсатора заведомо не должно превышать предельных значений по постоянному напряжению.

При невыполнении указанных требований может произойти обратимый или необратимый пробой диэлектрического промежутка конденсатора. Для полярных электролитических конденсаторов не допускается работа при напряжении противоположной полярности. Обычно это приводит к взрыву конденсатора, либо к выбиванию защитной пробки в его корпусе.

Конденсаторы, рассчитанные на работу при напряжении в десятки  $kB$ , характеризуют также величиной разрядного напряжения по поверхности. Высоковольтные импульсные конденсаторы должны допускать быстрый разряд, т. е. иметь минимальную собственную индуктивность.

При работе конденсаторов в экстремальных условиях (повышенная температура, превышение напряжений) снижается их надежность, сокращается срок службы.

Для конденсаторов, работающих на высоких напряжениях при повышенной частоте, актуальной является величина реактивной мощности. Неучет этого фактора может привести к перегреву конденсатора и его разрушению.

Предельно допустимая амплитуда переменного напряжения  $U_m$  на конденсаторе, при котором реактивная мощность будет равна  $P_p$ , определяется как [62, 64]:

$$U_m = 565 \sqrt{\frac{P_p}{fC}}.$$

В этом выражении  $U_m$  – в  $B$ ,  $P_p$  – в реактивных вольтамперах ( $ВАР$ ),  $f$  – в  $МГц$ ,  $C$  – в  $nФ$ .

Для повышения нагрузочной способности конденсаторов при наличии больших напряжений высокой частоты обычно используют диэлектрические материалы с малыми

потерями, а саму конструкцию и выводы конденсаторов рассчитывают на прохождение больших импульсных токов [64].

Качество диэлектрического материала конденсатора характеризует величина сопротивления утечки. Малым сопротивлением утечки обладают современные полимерные материалы. Напряжение на таких конденсаторах может сохраняться длительное время (несколько дней) после отключения источника питания. Для принудительной разрядки конденсаторов после отключения питания, если это возможно и необходимо, используют резисторы, включенные параллельно конденсатору. Величина такого резистора определяется из выражения  $RC=1\dots3$ , где  $R$  – сопротивление резистора в  $МОм$ ,  $C$  – емкость конденсатора в  $мкФ$ .

В практической реализации конструкций высоковольтных преобразователей следует учитывать, что конденсаторы обладают свойством абсорбции: его разряд даже при кратковременном коротком замыкании обкладок и последующем удалении короткозамыкающей перемычки восстанавливается до некоторого значения. Это явление получило наименование *диэлектрической абсорбции*. Оно обусловлено замедленными процессами поляризации в диэлектрике, инерционностью процессов перераспределения зарядов на обкладках конденсатора, конечностью скорости их перемещения.

Проявляется абсорбция обычно у конденсаторов с многослойным неоднородным диэлектриком [62].

Пояснить явление диэлектрической абсорбции можно при помощи эквивалентной схемы конденсатора, представленной на рис. 67. Реальный конденсатор  $C$  можно представить бесконечной  $RC$ - цепочкой. При подаче напряжения на эту цепочку происходит последовательный заряд

конденсаторов цепочки. В этой связи понятно, почему конденсатор заряжается не мгновенно.

При коротком замыкании выводов заряженного конденсатора  $C$  происходит обратный процесс – разрядка цепочки конденсаторов. Если замыкающую перемычку удалить, через некоторое время напряжение на конденсаторах выровняется. В итоге на обкладках конденсатора появится некоторое напряжение.

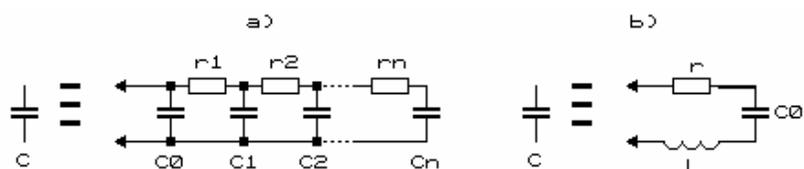


Рис. 67. Эквивалентная схема конденсатора, поясняющая: а) диэлектрическую абсорбцию; б) собственную индуктивность конденсатора

Напряжение, появляющееся на обкладках конденсатора после его кратковременной разрядки, существенно зависит от длительности времени зарядки конденсатора, времени, в течение которого он был замкнут, и времени, прошедшего после этого.

Примерный график зависимости напряжения на конденсаторе от времени при измерении коэффициента абсорбции приведен на рис. 68 [64].

Количественное значение абсорбции принято характеризовать *коэффициентом абсорбции* ( $K_a$ ). Коэффициент этот определяется отношением восстановившегося через 3 минуты напряжения к первоначальному.

Численные значения коэффициента абсорбции для некоторых типов конденсаторов приведены в табл. 4 [63, 64].

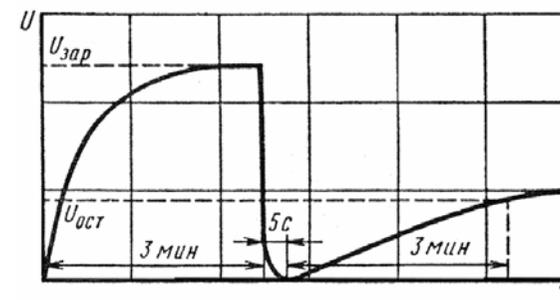


Рис. 68. Зависимость напряжения на обкладках конденсатора от времени при измерении коэффициента абсорбции

Таблица 4

Значения коэффициентов абсорбции конденсаторов

Группа конденсаторов	$K_a$ , %
С воздушным диэлектриком	–
Стекланные	–
Стеклоэмалевые, стеклокерамические	–
Полистирольные	0,03-0,1
Фторопластовые металлизированные	0,03-0,15
Полиэтилентерефталатные	0,2-0,8
Комбинированные	0,1-1,0
Лакоплёночные	0,7-1,3
Бумажные	0,6-2,0
Слюдяные	1,5-5,0
Металлобумажные	2,0-5,0
Оксидные	1,0-5,5
Электролитические	5,0-6,0
Керамические	5-15
Сегнетокерамические	>15

Коэффициент абсорбции конденсаторов повышается с ростом температуры окружающей среды.

Любой конденсатор помимо емкости обладает ещё и заметной собственной индуктивностью (рис. 67). Эта индуктивность складывается из внутренней неварьируемой индуктивности и индуктивности выводов конденсатора и присоединенных к ним проводов. Для малогабаритных конденсаторов малой емкости собственная их индуктивность практически полностью определяется габаритной, внешней индуктивностью. Величина этой индуктивности достаточно точно может быть определена аналитически.

Наличие собственной индуктивности конденсатора увеличивает его эквивалентную емкость, приводит к заметной зависимости емкости от частоты и вызывает появление собственного резонанса у конденсатора [63].

Количественные данные, характеризующие собственную индуктивность конденсаторов разных типов и значения максимально возможных частот, до которых могут быть использованы эти конденсаторы, приведены в таблице 5 [63]. Отметим, что реальные значения минимальных рабочих частот конденсаторов лежат несколько ниже табличных значений. Фактические значения этих частот зависят от емкости конкретного конденсатора, длины его выводов с учетом монтажа.

В зависимости от внешних условий эксплуатации свойства конденсаторов могут заметно изменяться. Так, при изменении температуры значительно изменяется емкость конденсатора, что обусловлено температурной зависимостью диэлектрической проницаемости материалов.

При наличии конденсата (влаги) у конденсаторов снижается сопротивление изоляции, снижается пробивное напряжение, увеличивается тангенс угла потерь.

Таблица 5

**Собственная индуктивность конденсаторов и предельные частоты их использования**

Тип конденсатора	$L, нГ$	$F_{max}, МГц$
Слюдяной малого размера ( <i>КСО-1-КСО-7</i> ).....	4-6	150-250
Слюдяной среднего размера ( <i>КСО-11-КСО-13</i> ) .....	15-25	75-100
Слюдяной большого размера (блокировочный <i>КБ</i> ) .....	50-100	1-1,5
Керамический дисковый малого размера ( <i>КД-1</i> ) .....	1-2,5	2000-3000
Керамический дисковый среднего размера ( <i>КД-2, КДУ</i> ) .....	2-4	200-500
Керамический трубчатый малого размера ( <i>КТ-1</i> ) .....	3-10	150-200
Керамический трубчатый среднего размера ( <i>КТ-3</i> ) .....	20-30	50-70
Бумажный или пленочный малого размера в цилиндрическом корпусе с паяными торцами ( <i>КБГ-И &lt;4700 нФ</i> ), <i>МБМ, ПМ, ПСО</i> .....	6-11	50-80
Бумажный среднего размера в цилиндрическом корпусе с непаяными торцами ( <i>КБГ-М, КБ</i> ) .....	30-60	До 5-8
Бумажный большой емкости .....	50-100	1-1,5
Переменной емкости среднего размера с воздушным диэлектриком .....	10-60	50-100
Переменной емкости малого размера ...	6-20	300-350

Справочные данные по конденсаторам (их технические характеристики, особенности эксплуатации) подробно изложены в специализированной литературе, см., например, [62-64].

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЯЧЕЙКИ И ЭЛЕКТРОДЫ

Одной из важнейших составляющих любой экспериментальной установки являются измерительные ячейки и электроды. Зачастую этим устройствам не уделяется должного внимания, в связи с чем попытки воспроизвести опыты другими экспериментаторами иногда не удаются. В ряде случаев, в силу незнания опыта предшественников при попытке повторения успешного опыта может быть получен совершенно неожиданный результат. В свою очередь, такой результат может быть неверно истолкован последователями и впоследствии распространен.

Электроды, используемые для фотосъемки в газовом разряде, можно подразделить по *количественному* признаку на одноэлектродные (моноэлектродные), двух- или мультиэлектродные; по *конфигурационному* признаку – на плоские и рельефно-объемные; по *кинематическому* признаку – неподвижные и перемещаемые в процессе съемки с заданной скоростью; по *фазовому* – твердотельные (металл или полупроводник), жидкие, в виде стеклянной ампулы с газовым наполнением; по *химической* активности – на пассивные (инертные, индифферентные) и химически активные; по *оптическим* свойствам – непрозрачные и оптически прозрачные в определенной области спектра и т. д.

Конструкции измерительных ячеек, других элементов экспериментальных установок обычно являются предметом «*нау хау*», их описания публикуются редко. В этой связи в данной главе решено было дать развернутые сведения о конкретных конструкциях измерительных ячеек, их вариантах и разновидностях.

### 4.1. Требования, предъявляемые к ячейкам, электродам и материалам

Измерительная ячейка содержит некоторую совокупность элементов, каждый из которых играет определенную роль для достижения конечного результата – получения газоразрядного изображения объекта исследования.

Как правило, в обобщенном виде конструкция регистрирующей ячейки содержит два электрода, к одному из которых через высоковольтный токоввод подводится высоковольтное высокочастотное напряжение, второй электрод – заземлен или подключен напрямую к выходу высокочастотного генератора.

Одноэлектродные конструкции электродов предназначены для съемки объектов в газовом разряде при так называемом монополярном, точнее сказать псевдомонополярном, подключении. При таком подключении через объект исследования и регистрирующий материал протекает емкостной ток.

Электрод (электроды), вне зависимости от их фазового состояния и химического состава, как правило, не должны вносить искажений в результат эксперимента. Их конфигурация должна отвечать начальному равномерному распределению электрического поля в межэлектродном пространстве при отсутствии объекта съемки.

Наиболее часто в качестве материала электродов используют медь, реже – обычную или нержавеющую сталь, например, марки *1Х18Н9Т*. Основное требование к электродам – химическая индифферентность, чистота и однородность поверхности, отсутствие пор. В большей мере эти требования не могут быть удовлетворены.

Перемещаемые электроды предназначаются, преимущественно, для съемки протяженных объектов, объектов, имеющих сложную конфигурацию. Использование таких электродов позволяет использовать менее мощные, и, следовательно, более безопасные и транспортабельные генераторы высокого напряжения. Основное требование к перемещаемым электродам – соблюдение постоянной скорости протяжки электрода и выдержка неизменного межэлектродного зазора.

В промежутке между электродами располагается по меньшей мере одна тонкая диэлектрическая прокладка, назначение которой сводится к выравниванию напряженности электрического поля внутри ячейки в отсутствие образца, ограничению предельного тока разряда, повышению разрешающей способности фотосъемки.

Обычно роль этой прокладки совершенно не учитывают. В результате могут быть получены довольно парадоксальные результаты, например, так называемый «фантомный эффект». Суть этого эффекта заключается в том, что при последовательной во времени фотосъемке в газовом разряде, например, листа растения, части которого отчленяют, на фотоснимках получают изображения контура отчлененных элементов листа.

Дело в том, что по мере работы диэлектрическая прокладка изменяет свои свойства: в ней появляются многочисленные неравномерно распределенные микроканалы пробоя, может происходить сорбция-десорбция газов и иных компонентов неконтролируемого состава, образующихся в процессе работы газоразрядной ячейки.

В ряде случаев в качестве диэлектрической прокладки может быть использован материал, имеющий мелкосетчатую, мелкаячеистую структуру, например, ткань из поли-

капроамида, полиамидного волокна или ультрамелкокачественные ядерные фильтры.

Следующий обязательный элемент измерительной ячейки – регистрирующий материал. В качестве такового чаще всего используют цветные и черно-белые фотопленки, фотобумаги, реже рентгеночувствительные материалы [1]. Для выделения требуемых участков спектра могут быть использованы тонкопленочные абсорбционные фильтры, размещаемые перед светочувствительным слоем (эмульсией).

Чувствительность фоторегистрирующих материалов обычно лежит в пределах 1...1000 ед. *ГОСТ*. Более чувствительные материалы применяют при необходимости предельно снизить экспозицию, порой до одного-двух импульсов электрического тока, подводимого к ячейке. Менее чувствительные материалы используют для получения фотографического изображения максимально высокого качества – с высокой разрешающей способностью [65, 66].

Помимо общеизвестных и доступных фотографических материалов для газоразрядной фотографии иногда используют электронографические и радиографические пластинки, электростатическую бумагу, бессеребряные фотоматериалы (диазопленки, везикулярные материалы и др.) [3, 67].

Большим неудобством использования материалов, чувствительных к действию света, является необходимость производить измерения в затемненном помещении. Отметим, что иногда регистрирующий материал, его подложка, одновременно выполняет роль одноразовой диэлектрической прокладки.

При решении некоторых специальных задач вместо традиционных фоторегистрирующих материалов приме-

няют материалы, изменяющие свою окраску при действии электрического разряда или сопровождающего его процессов. В качестве таких материалов известно использование пленок ацетатцеллюлозы, полиметилметакрилата, сортового стекла, канифоли, льняного масла и др. [23, 68-70].

Иногда вместо регистрирующего материала применяют люминесцирующие вещества. Применение таких веществ позволяет перенести свечение из одной области спектра в другую или преобразовать один вид энергии в другой, более приемлемый по мнению экспериментатора для решения конкретной задачи.

Некоторые измерительные ячейки предназначены для проведения исследований при пониженном давлении воздуха, либо в атмосфере контролируемого газового состава. Для таких ячеек основным требованием является использование негорючих конструкционных материалов, а также специфические требования к размещению токопроводящих элементов внутри ячейки.

Несколько слов следует посвятить самим ячейкам для экспонирования. Эти ячейки должны полностью отвечать требованиям техники безопасности (см. также *Приложение*). Необходимо предусмотреть использование диэлектрических плит-столов, защитных диэлектрических экранов, выполненных из листовых и иных диэлектрических материалов большой толщины.

Итак, резюмируя изложенное, выделим основные требования, предъявляемые к измерительным ячейкам, электродам и материалам: исходная равномерность распределения электрического поля, химическая индифферентность материалов, безопасность и удобность эксплуатации.

В конечном итоге должна быть обеспечена безопасность выполнения работ, воспроизводимость результатов эксперимента.

#### 4.2. Конструкции ячеек и электродов, используемых в газоразрядной фотографии

Рассмотрим далее на основе обзора источников научно-технической и патентной информации конкретные примеры конструктивного воплощения ячеек, электродов и их разновидностей.

Большое число вариантов электродов и обкладок (рис. 69, 70), применяемых для фотографирования в поле токов высокой частоты было разработано одним из создателей газоразрядной фотографии *С.Д. Кирлианом* [33]. В серии его ранних изобретений, относящихся к 1957-1960 г.г. (заявленных в 1950-1952 г.г.) большое и обоснованное внимание уделялось технике экспонирования фотографических материалов, конструкциям измерительных ячеек.

В многочисленных изобретениях *С.Д. Кирлиана*, неполный перечень которых приведен в работе [1], рассмотрены конструкции и приспособления для газоразрядной фотографии. В наиболее систематизированном виде эти конструкции обобщены в работе [33].

Одно из наиболее простых приспособлений для съемки – фотоклеши (рис. 69а) – плоские металлические обкладки, укрепленные на подвижной крестовине из диэлектрика, с внутренней стороны покрытые слоем диэлектрика с пазами для фотопленок [33].

Для съемки плоских предметов, например, листа растения, его кладут на фотопленку нижней обкладки, в которой на переднем крае сделан прорез для черенка. Рукоятки крестовины сжимают, причем вторая обкладка с фотопленкой легко прикрывает лист.

При фотографировании растения на корню можно подключать обе обкладки фотоклещей – или к одному (ак-

тивному) полюсу генератора или к двум разноименным. В связи с затухающим характером высокочастотных колебаний и преобладанием амплитуды полуволны одной полярности над другой получаются снимки объектов, имеющие существенные различия. В первом варианте в фотографировании участвует все растение, начиная с корней, во втором – только один лист, причем электрическая корона вокруг него не образуется, как это бывает при однополюсной съемке.

Для фотосъемки плоских предметов значительной площади может быть использован вращающийся ролик (рис. 69б) с набором обкладок (рис. 69в). Использование роликового электрода позволяет равномерно распределить экспозицию по площади фоточувствительного материала. Рабочая часть обкладок по конфигурации должна быть диаметрально противоположна форме фотографируемого участка. Такие обкладки не требуют установки разрядного промежутка между предметом и фотопленкой.

При фотосъемке высокочастотный генератор включают после начала перемещения ролика и отключают – после его остановки. Для автоматизации включения-отключения генератора можно предусмотреть концевые выключатели или оптоэлектронные реле.

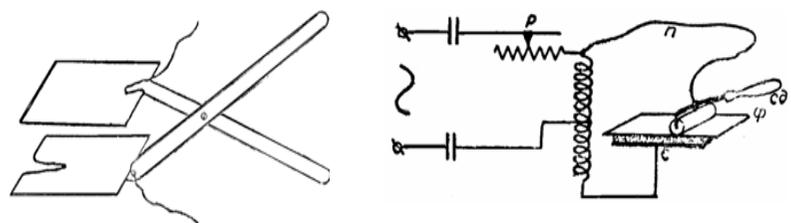
На рис. 69г показан механизированный вариант выполнения роликовой обкладки. В пазы прибора под прозрачный экран вставляют фотопленку, взаиморасположение которой с роликом на всем протяжении одинаково, и фотографирование происходит по строго заданному направлению. Скорость ролика и его нажим на фотопленку можно плавно регулировать. В действие ролик приводится пружинным механизмом. Прибор накладывают на предмет, ролик запускают нажимом кнопки.

Дисковую обкладку (рис. 69д) используют для съемки с отдельных участков тела человека или растения. Эластичная обкладка (рис. 69е) применяется для съемки цилиндрических предметов. Гибкая металлическая витая пружина (спираль) укреплена на двух рукоятках из диэлектрика. Фотографируемый предмет, покрытый фотопленкой, обхватывают по окружности такой обкладкой и с помощью рукояток, зажатых в руке, передвигают вдоль фотопленки. Если экспонируемый участок идет на конус, то пружина благодаря своей упругости плотно облегает через фотопленку такой участок, и снимок на всем протяжении получается равномерным.

Для съемки развертки небольшого цилиндрического предмета, например, пули, ее туго охватывают по окружности фотопленкой, которая с помощью механизма протягивается и вращает его. Вторая металлическая обкладка в виде плоского пера прижимается через фотопленку к цилиндрическому предмету (рис. 69ж). Цилиндрический предмет и металлическое перо превращаются в конденсаторные обкладки – одна во вращающуюся, другая – в неподвижную, поставленную на ребро.

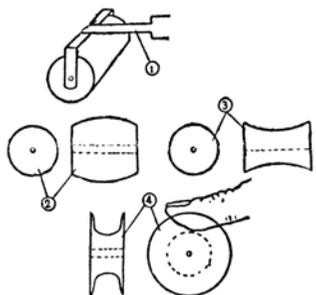
Фотографирование участка кожи *С.Д* и *В.Х. Кирлианы* производили с использованием разрядно-оптической обкладки (рис. 69з). Обкладка содержит кольцо из диэлектрика с выточенным в нем кольцевым углублением.

Обкладку с таким кольцом-граверсой прикладывают к коже, затем через штуцер из углубления резиновой грушей выкачивают воздух. Кожа засасывается в углубление. Участок кожи в центре кольца растягивается и становится идеально ровным для визуального наблюдения; обкладка держится плотно. Для создания разрежения может быть использован форвакуумный насос.

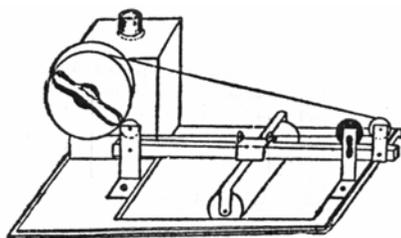


а) фотоклеши

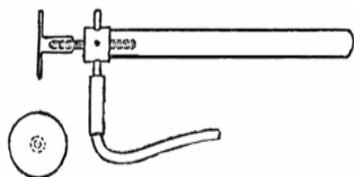
б) вращающийся ролик



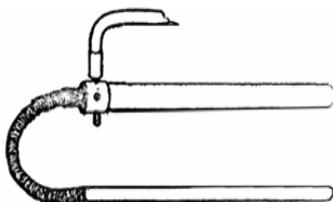
в) набор роликовых обкладок



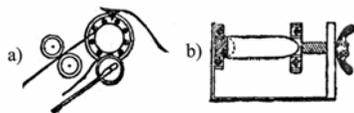
г) вариант роликовой обкладки



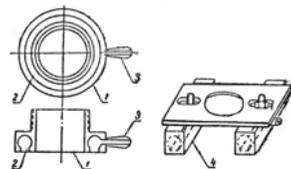
д) дисковая обкладка



е) эластичная обкладка



ж) многокадровая обкладка

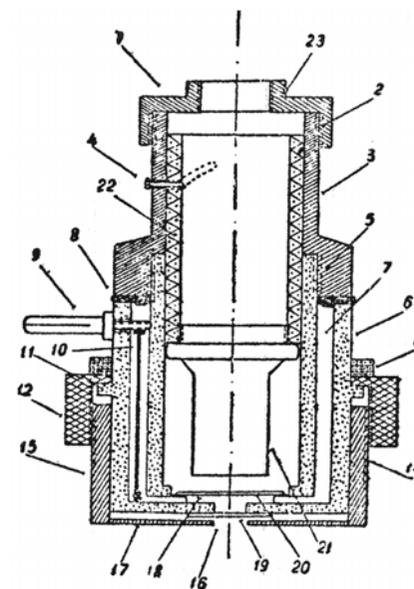


з) разрядно-оптическая обкладка

**Рис. 69. Варианты электродов и обкладок, разработанных С.Д. Кирлианом [33]**

Для визуального наблюдения свечения микрообъектов супругами С.Д и В.Х. Кирлиан [33] была создана специальная разрядно-оптическая обкладка (рис. 70).

В конструкцию этой обкладки вмонтирована оптика, увеличивающая наблюдаемые картины разрядных процессов. Обкладка является самостоятельным прибором, а также приставкой к оптическому микроскопу. Ее размер зависит от диаметра объектива.



**Рис. 70. Разрядно-оптическая обкладка для микроскопического наблюдения и фотосъемки микрообъектов**

Позиционные обозначения на рис. 70 следующие: 1 – переходная гайка; 2 – резьба; 3 – верхняя половина обкладки; 4 – палец (болт) для фокусировки; 5 – резьба; 6 – нижняя половина; 7 – два отверстия диаметром 4 мм, рас-

положенные друг против друга; 8 – резиновая прокладка; 9 – контакт; 10 – металлическая проволока, предохраняющая цепь от разрыва при испарении воды; 11 – прилив в виде кольца; 12 – свободно вращающаяся прижимная гайка; 13 – кольца; 14 – резьба; 15 – траверза; 16 – отверстие диаметром 5 мм; 17 – дно траверзы; 18 – стекло толщиной 0,6...1 мм; 19 – стекло толщиной 0,13-0,14 мм; 20 – камера, заливаемая через отверстие – 7 водой; 21 – 8...12-кратный объектив; 22 – втулка, несущая объектив; 23 – резьба (по резьбе тубуса микроскопа).

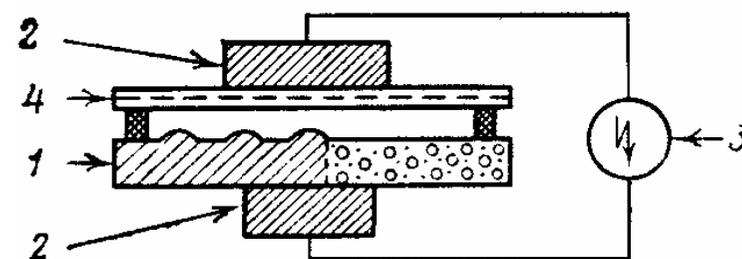
Рассмотрим далее наиболее простые, ставшие со дней первых экспериментов *С.Д. Кириана* классическими, варианты выполнения измерительных ячеек, предназначенных для решения наиболее простых задач газоразрядной фотографии.

Устройство для лавинной газоразрядной визуализации высокочастотных электрических разрядов [4, 71] показано на рис. 71. Напряжение от высокочастотного высоковольтного генератора – 3 подводят к плоским параллельно расположенным электродам – 2. На один из электродов (нижний по схеме) помещают объект исследования – 1, для получения калиброванного зазора между электродами используют полую диэлектрическую прокладку – кольцо. Между верхним электродом и кольцевой диэлектрической прокладкой помещают фоточувствительный материал – 4, эмульсионной стороной обращенный к объекту исследования. Подложка этого материала одновременно выполняет роль одноразовой диэлектрической прокладки равной толщины, разделяющей электроды.

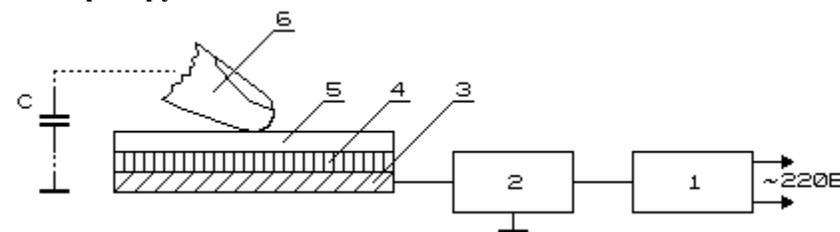
Это – классический двухэлектродный способ подключения. Одноэлектродный (псевдомонопольный) вариант подключения генератора к измерительной ячейке показан

на рис. 72 [36, 44]. Такой способ подключения обычно используют для съемки биологических и абиологических объектов в поле токов высокой частоты.

Напряжение высокого напряжения, снимаемое с генератора высоковольтных импульсов (формирователя импульсов – 1 и высокочастотного трансформатора) подается на электрод ячейки – 3, обычно располагаемый для удобства пользования внизу конструкции.



**Рис. 71. Классический двухэлектродный способ подключения ячейки к высокочастотному генератору**



**Рис. 72. Классический одноэлектродный псевдомонопольный способ подключения ячейки к высокочастотному генератору**

Этот электрод покрыт тонким слоем диэлектрического материала – 4, поверх которого размещен эмульсией вверх фоторегистрирующий материал – 5. Объект съемки –

6 прижимают к фотослою, после чего производят экспонирование.

В качестве электрода использована металлическая пластина или, если предполагается документальная регистрация свечения на видео- или фотокамеру, прозрачный токопроводящий электрод на основе слоя  $SnO_2$ , нанесенного на стеклянную основу.

Диэлектрическая прокладка выполнена из прозрачного материала – полиэтилентерефталат, политетрафторэтилен, полиэтилен и т. п. Толщина материала определяется экспериментально (порядка десятков микрон при подводимом напряжении до 10...15 кВ). В качестве фоторегистрирующего материала используют стандартные негативные или позитивные черно-белые или цветные фотобумаги, пластинки, пленки.

Видоизменением классической схемы однополярного подключения следует считать конструкцию измерительной ячейки (рис. 73), использованную К.Г. Коротковым и др. [72, 73] для регистрации газоразрядного свечения биологических объектов.

Верхний слой диэлектрического материала (пластины) – 1 (рис. 73) содержит микроканалы – 2 и отделен от металлического электрода – 5 прозрачной пластинкой – 4; металлический электрод имеет в центре отверстие, к которому подведен световод – 7.

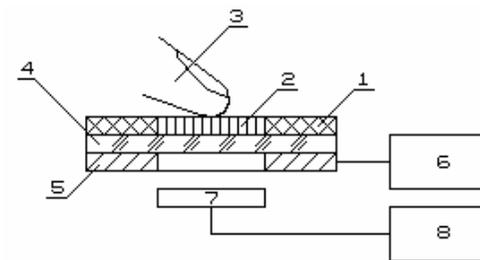
К металлическому электроду – 5 подведен один из полюсов высокочастотного высоковольтного генератора – 6, второй его полюс через «земляной» провод за счет емкостной связи соединен с объектом исследования – 3, образуя замкнутую цепь.

При включении источника высокого напряжения и при приложении к поверхности диэлектрической пластинки объекта исследования – 3, например, пальца, возникает

электрический разряд. Свечение разряда через световод – 7 поступает на регистрирующее устройство – 8.

Отметим, что в конструкциях, показанных на рис. 72, 73 (однополярное подключение), требование обеспечения равномерности распределения напряженности электрического поля не может быть выполнено.

Для съемки биологических объектов с монополярным подключением С.Д. Кирлиан [33] использовал специальную обкладку – электрод, изменяющую свою конфигурацию при приложении к ней объекта съемки. Эта обкладка была наполнена токопроводящей жидкостью и в этой связи принимала форму фотографируемого объекта.



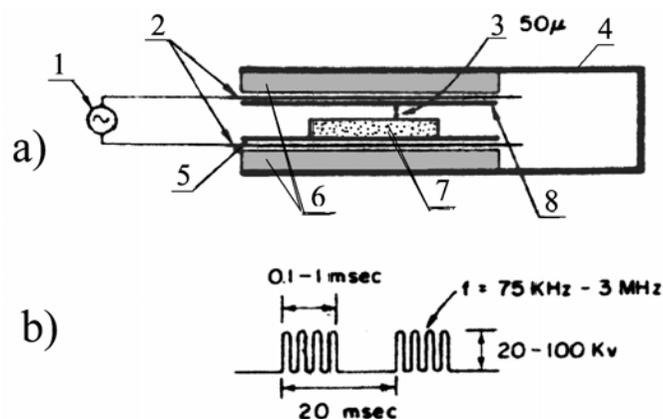
**Рис. 73. Схема устройства для регистрации газоразрядного свечения**

В первых экспериментах в качестве электрода с изменяемой (адаптируемой к объекту) конфигурацией С.Д. Кирлиан [33] использовал смоченную с тыльной стороны фотопленку. Увлажненный ее участок становится водяной обкладкой. Для обработки фотопленки использовался пропитанный содовым раствором ватный тампон.

По краям в целях обеспечения межэлектродной электрической изоляции фотопленка оставлялась сухой. Таким образом получалась идеально облегающая объект исследования обкладка, не вуалирующая фотопленку, и четкие снимки.

Вариант размещения объекта исследования в измерительной ячейке показан на рис. 74а [74].

Электроды расположены плоскопараллельно и прижимаются к объекту исследования через губчатую прокладку при помощи специальной клипсы-зажима.



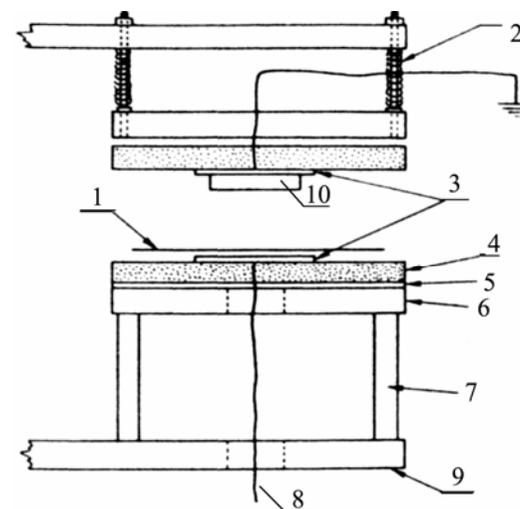
**Рис. 74.** Вариант размещения материалов в измерительной ячейке для газоразрядной фотографии – (а); форма генерируемых импульсов – (б)

Позиционные обозначения на рис. 74а: 1 – генератор высокочастотных импульсов; 2 – электроды; 3 – межэлектродный воздушный зазор 50 мкм; 4 – механическая клипса-зажим; 5 – диэлектрическая пленка (экспонируемый фотографический материал); 6 – губчатый диэлектрический материал; 7 – объект съемки; 8 – фотопленка (эмульсионной стороной к объекту съемки).

Генератор – источник импульсов высокого напряжения вырабатывает пакеты импульсов, показанные на рис. 74б. Амплитуда импульсов достигает 20...100 кВ. Серии импульсов следуют с периодом 20 мс. Длительность пакета импульсов регулируема и составляет 0,1...1 мс. Частота

высокочастотного заполнения импульсов составляет 75 кГц...3 МГц.

Внешний вид измерительной ячейки (двухэлектродное подключение) [74] приведен на рис. 75. В целях обеспечения техники безопасности заземлен верхний электрод, а в самой конструкции ячейки использованы толстостенные диэлектрические материалы. Интересным нюансом ячеек (рис. 74 и рис 75) является использование губчатых диэлектрических материалов – прокладок, а также возможность плавного регулирования горизонтального и взаимопараллельного положения электродов.

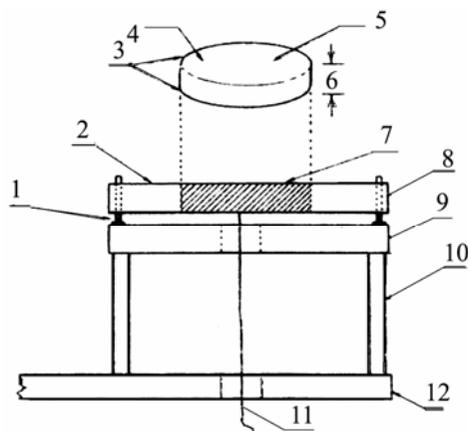


**Рис. 75.** Конфигурация измерительной ячейки

Позиционные обозначения на рис. 75: 1 – эмульсионная сторона пленки; 2 – регуляторы уровня верхней плиты; 3 – медные электроды площадью 6,5 см<sup>2</sup>; 4 – губка; 5 – слой пластика; 6 – диэлектрическая плита; 7 – стеклянные изоляторы; 8 – высокочастотный кабель высокого напряжения; 9 – плита основания; 10 – объект съемки.

Для получения фотографических газоразрядных изображений биологических объектов при монополярном подключении *D.G. Boyers* и *W.A. Tiller* [74] использовали конструкцию, изображенную на рис. 76.

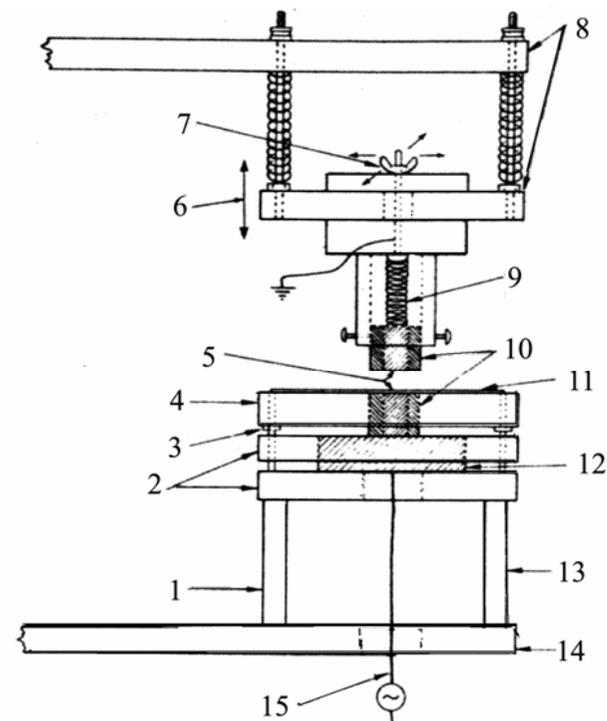
Это одна из самых простых конструкций. Острые кромки отверстий скруглены. Для того, чтобы обеспечить равномерность распределения напряженности электрического поля использован медный электрод, по форме приближающийся к форме объекта исследования.



**Рис. 76. Конфигурация измерительной ячейки одноэлектродного экспонирования для фотосъемки пальцев рук**

Позиционные обозначения на рис. 76: 1 – винты регулировки уровня плиты; 2 – столик для фотопленки; 3 – скругление углов; 4 – отверстие диаметром 76 мм (его внешний вид вынесен за пределы ячейки); 5 – сглаженный плоский медный электрод; 6 – зазор 13 мм; 7 – медный электрод; 8 – прозрачный пластик; 9 – диэлектрическая плита; 10 – стеклянные изоляторы; 11 – высокочастотный кабель высокого напряжения; 12 – плита основания.

Наиболее сложная конструкция, предназначенная для фотосъемки свечения поверхности плоских изделий показана на рис. 77 [74]. Как и в предыдущих конструкциях здесь предусмотрены многочисленные регулировки величины межэлектродного зазора, горизонтальности установки рабочего столика и электродов.



**Рис. 77. Внешний вид измерительной ячейки для фотосъемки в поле токов высокой частоты**

Позиционные обозначения на рис. 77: 1 – стеклянные изоляторы; 2 – волокнистый пластик; 3 – винты регулировки уровня плиты; 4 – столик для фотопленки; 5 – поверхность электродов; 6 – регулировка высоты и уровня плиты;

7 – центровка; 8 – диэлектрическая плита; 9 – заземленная металлическая пружина; 10 – пластиковые направляющие; 11 – верхняя (эмульсионная) сторона фотопленки; 12 – медный электрод; 13 – стеклянные изоляторы; 14 – плита основания; 15 – высокочастотный кабель высокого напряжения.

Для исследования фазовых переходов металл-полупроводник в приповерхностных слоях твердотельных материалов В.Я. Величко и К.Г. Коротков [75] использовали измерительную ячейку, показанную на рис. 78.

Исследуемый образец – пластинка ситалла – 1 с нанесенной на нее пленкой двуокиси ванадия толщиной 80 нм – 2, претерпевающей фазовый переход при изменении температуры, приклеивается к массивной металлической пластине – 3, в которую был вмонтирован подогреватель – 4. Температура измерялась с использованием хромель-алюмелевой термопары – 5. Калиброванная прокладка – 6 обеспечивала величину межэлектродного зазора порядка 300 мкм между поверхностью образца и кварцевой пластиной – 7, на наружную поверхность которой было нанесено прозрачное токопроводящее покрытие – 8.

При подаче между этим покрытием и металлической пластиной высоковольтного синусоидального напряжения частотой 400 Гц и амплитудой 1,2...2,1 кВ в межэлектродном зазоре возникал газовый разряд лавинного типа [75], свечение которого регистрировалось фотоэлектронным умножителем – 9.

Для исследования спектральных характеристик газоразрядного свечения микробиологических структур в работе [4, 76] была использована измерительная ячейка с резко выраженной радиальной неоднородностью распределения напряженности электрического поля. На рис. 79 изображе-

на схема экспериментального устройства [4, 76], состоящего из заземленной пластины, покрытой слоем диэлектрика, на котором размещалась капля или кювета с образцом. На фиксированном расстоянии 0,5...1 мм от поверхности жидкости располагался конец молибденового стержня, на который подавался положительный относительно пластины потенциал в виде серии униполярных импульсов напряжения амплитудой 5...10 кВ длительностью 10 мкс с частотой следования от одиночных импульсов до 100 Гц.

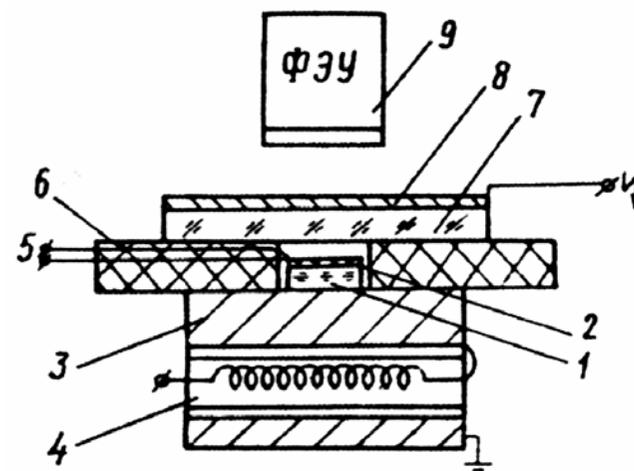
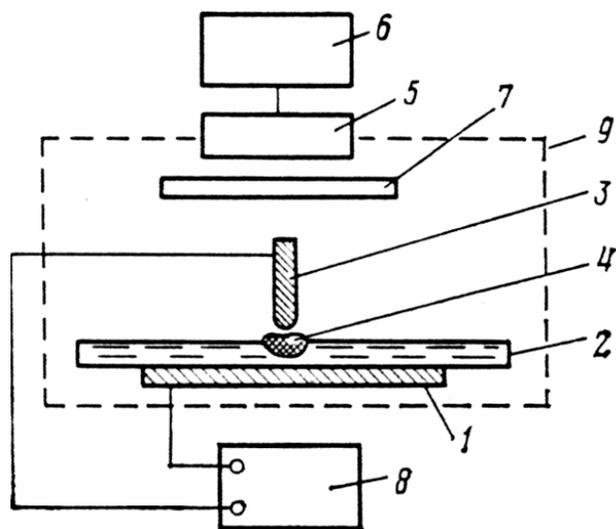


Рис. 78. Измерительная ячейка для исследования фазовых переходов в полупроводниковых материалах

В течение длительности каждого импульса по поверхности жидкости развивался газовый разряд, свечение которого регистрировалось спектральным прибором. В качестве последнего использовали ФЭУ-38 с набором светофильтров, монохроматор СД производства НИФИ ЛГУ, спектрограф ИСП-30 [76]. В экспериментах был использо-

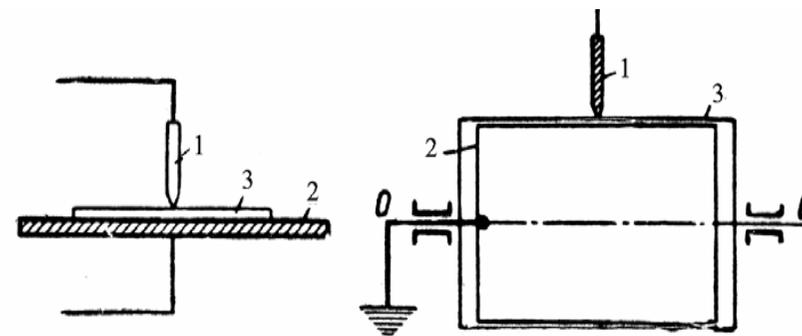
ван набор стандартных светофильтров, охватывающих спектральный диапазон 310...470 нм, а также область 600...620 нм. Полученные результаты усреднялись затем по данным 5 опытов.



**Рис. 79.** Схема экспериментального устройства для исследования спектральных характеристик газоразрядного свечения микробиологических культур

Позиционные обозначения на рис. 79: 1 – плоский металлический электрод; 2 – диэлектрическая пластина; 3 – стержневой электрод; 4 – исследуемая жидкость (капля суспензии, содержащая изучаемую микробиологическую культуру); 5 – приемник излучения (фотоэлектронный умножитель); 6 – регистрирующий прибор; 7 – оптические элементы (светофильтры); 8 – источник униполярных импульсов высокого напряжения; 9 – светонепроницаемая камера [4, 76].

Отметим, что схема экспериментального устройства со стержневым электродом, показанного на рис. 79, впотьм приближается к схеме клидонографа (волнозаписывателя) – устройства, изобретенного в 1924 г. Петерсом для контроля амплитуды высоковольтного напряжения (рис. 80) [26, 27].



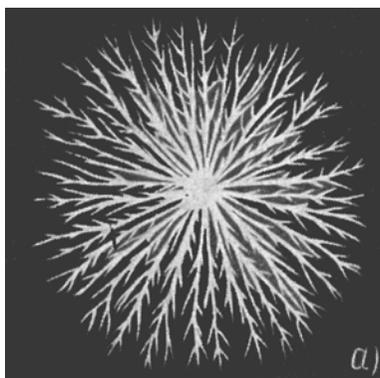
**Рис. 80.** Схема клидонографа – устройства для индикации амплитуды высоковольтного напряжения

Клидонограф состоит из электродов: стержневого – 1, плоского – 3, а также диэлектрического слоя – 2, на который нанесена фоточувствительная эмульсия.

На находящемся в неравномерном электрическом поле фоточувствительном материале, обращенном эмульсией к стержневому электроду, после подачи на электроды высокого напряжения образуется латентное (скрытое) изображение. Это изображение затем проявляют и фиксируют при помощи традиционных процедур фотографической обработки. В результате на фотоматериале образуются изображения разрядных фигур, вид и размеры которых зависят от полярности и амплитуды приложенного напряжения, крутизны фронтов импульсов высокого напряжения [26, 27].

Такие фигуры получили название фигур *Лихтенберга*, названные так в честь немецкого физика *Г.К. Лихтенберга*, впервые наблюдавшего эти картины в 1777 г. на запыленной эбонитовой пластине [26, 27, 77-79].

Принято называть «положительной» ту фигуру которая получается при положительной полярности острия, и «отрицательной» – при отрицательной полярности острия. Фотоснимки «положительных» и «отрицательных» фигур *Лихтенберга* приведены на рис. 81 [27].



**Рис. 81. Фигуры *Лихтенберга*: вверху – при положительном потенциале на стержневом электроде; внизу – при отрицательном**

При использовании переменного напряжения эти фигуры накладываются друг на друга, формируя тем самым некоторую промежуточную картину. Фигуры *Лихтенберга* образуются также при кратковременных (до 10 нс) импульсах напряжения [26].

При получении газоразрядных фотографий качество изображений в существенной мере зависит от того, ток какой формы используется для фотосъемки: симметричный (синусоидальный) незатухающий, симметричный затухающий, асимметричный быстро затухающий с ярко выраженным преобладанием той или иной полярности напряжения, импульсный и т. д.

Отмеченную особенность фотосъемки при использовании резко затухающих высоковольтных колебаний удачно использовал в своих экспериментах зав. *НИЛ* биофизики и газоразрядной фотографии *НПО «Инфорай ко., ЛТД» А.П. Бойченко* [80]. Он показал возможность газоразрядной съемки биологических объектов по двухпроводной схеме (рис. 82). Здесь 1 – провода, подключенные к высоковольтному импульсному генератору; 2 – металлические электроды; 3 – фотоматериал, обращенный эмульсионной стороной к фотографируемой конечности или участку тела.

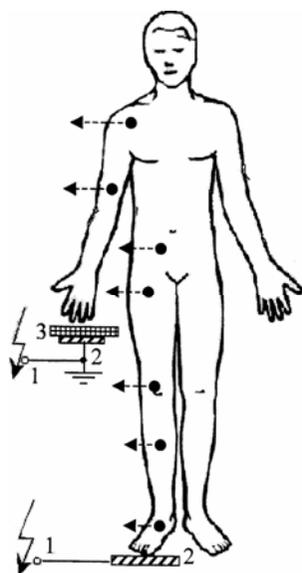
Возможность непосредственного контакта последнего с металлическим электродом и исключение субъективных ощущений при газоразрядной фотосъемке достигается путем подачи на электроды одиночного видеоимпульса микросекундной длительности.

В момент экспонирования возможно отведение от конкретных участков тела человека (например, точек акупунктуры) биопотенциалов, как показано пунктирными стрелками на рис. 82. Исследования показали, что данная методика допускает произвольное взаиморасположение металлических электродов на теле человека, кроме, пока еще не исследованных областей сердца, головы и шеи [80].

Отметим, что при использовании этой разновидности съемки биологических объектов (подключение тела человека в последовательную измерительную цепь) особенно

неукоснительно должны соблюдаться правила техники безопасности.

Один из вариантов включения биологического объекта в разрядную цепь показан на рис. 83 [81]. Фоточувствительный материал, помещенный в тонкий непрозрачный пакет, располагают на неподвижном электроде. Использование дополнительной диэлектрической прокладки, разделяющей электроды, не обязательно, т. к. ее роль выполняет непрозрачный пакет.

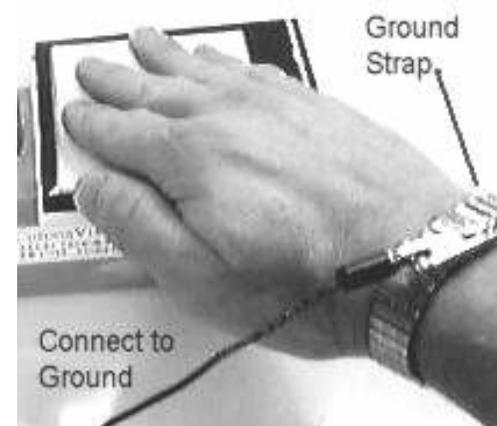


**Рис. 82.** Расположение электродов для одновременной съемки свечения двух участков тела в последовательной разрядной цепи

Объект съемки (ладонь, пальцы) прикладывают к пакету с фотоматериалом (в оригинале [81] используют контейнер с пленкой *Polaroid SX-70* или *Time Zero* и экспонируют в темноте). На руке испытуемого закреплен металли-

ческий браслет, к которому при помощи зажима присоединяют провод заземления. Напряжение на объект исследования подает ассистент.

Преимущество данного метода съемки заключается в том, что съемку можно производить при обычном внешнем освещении. Однако рекомендовать данный метод съемки напрямую к применению не стоит, поскольку таким образом грубо нарушаются правила техники безопасности.



**Рис. 83.** Вариант схемы получения изображения свечения биологических объектов в поле токов высокой частоты. Непрозрачный электрод, с расположенным поверх него фоточувствительным материалом

Съемку подобным образом можно производить только в том случае, если имеется надежная защита от протекания повышенных токов через разрядную цепь. Как безопасный вариант съемки можно рассматривать ее вариант, когда используется емкостная связь испытуемого с генератором высоковольтных импульсов (одноконтактное присоедине-

ние) и строго соблюдаются правила техники безопасности (см. Приложение). Это полностью исключит протекание повышенных токов через тело человека в случае повреждения изоляции или иной аварийной ситуации.

Для отображения на фотоматериале микрорельефа контролируемой поверхности посредством электроразрядных явлений, сопровождающихся свечением, используют устройства с роликовым электродом [3, 33, 82-84].

Преимущества таких электродов по сравнению с плоскими заключаются в том, что применение плоских электродов при контроле изделий с большой поверхностью вызывает ряд трудностей, связанных с обеспечением оптимального зазора при большой скорости контроля и снижением контрастности изображений из-за большой фоновой подсветки от краев плоских электродов [3].

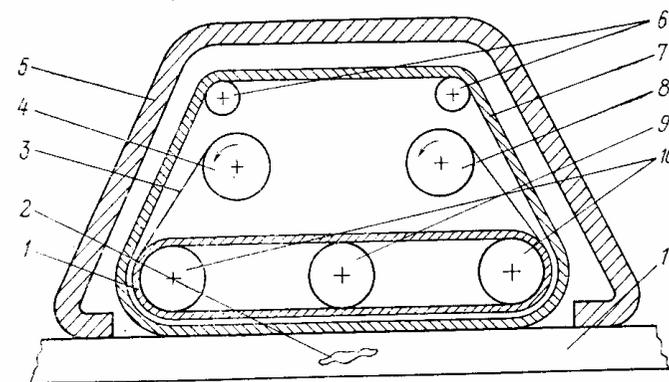
Общий вид одного из таких устройств с роликовым электродом показан на рис. 84 [3]. Это устройство позволяет проводить непрерывное экспонирование и состоит из: светонепроницаемой камеры со смонтированными в ней приемной и передающей катушками с фотопленкой, направляющих роликов натяжения-прижатия и роликового электрода, расположенного у экспозиционного окна.

Устройство предназначено для регистрации рельефа поверхности электропроводящих изделий и несплошностей в диэлектрических покрытиях на проводящей основе.

На роликовый электрод подают высокое напряжение, объект контроля заземляют. Фотопленка с помощью роликов натяжения-прижатия фиксируется на поверхности объекта и по ней прокатывается роликовый электрод. Между ним и поверхностью контролируемого изделия в ограниченных воздушных областях возникает электрический разряд, распределение интенсивности свечения которого со-

ответствует геометрии зазора (с учетом микрорельефа поверхности объекта) [3].

Это свечение фиксируется на фотоматериале. Таким образом, получается электроразрядное изображение микрорельефа объекта, по которому можно судить, например, о наличии поверхностных трещин как под слоем диэлектрика, так и без него.



**Рис. 84. Устройство для газоразрядной фотосъемки объектов с роликовым электродом**

Позиционные обозначения на рис. 84: 1, 7 – эластичный оптически непрозрачный и прозрачный диэлектрики; 2 – дефект диэлектрического покрытия; 3 – фотопленка, 4, 8 – передающая и приемная катушки с фотопленкой; 5 – светонепроницаемая камера; 6, 10 – направляющие ролики натяжения-прижатия; 9 – роликовый электрод; 11 – объект.

Для снижения фоновой подсветки, возникающей при получении электроразрядных изображений микрорельефа плохо обработанных поверхностей, целесообразно помещать фотопленку между двумя тонкими слоями диэлектри-

ка: оптически прозрачным со стороны объекта и непрозрачным со стороны роликового электрода [3].

Тонкий эластичный оптически прозрачный диэлектрик, прижимаясь к плохо обработанной поверхности объекта контроля, позволяет значительно уменьшить воздушный зазор у микронеоднородности, обусловленной качеством обработки поверхности, оставляя в то же время практически неизменным воздушный объем у трещины. Это позволяет различать дефекты, обусловленные трещиной или шероховатостью поверхности изделия.

Наложение на фотопленку со стороны роликового электрода оптически непрозрачной диэлектрической пленки позволяет в значительной степени избавиться от подсветки за счет электроразрядных процессов, происходящих у роликового электрода с обратной стороны фотопленки. Такой прием позволяет повысить контраст изображений дефектов поверхности токопроводящих изделий за счет снижения фоновой подсветки [3, 69].

Описанное устройство целесообразно применять при фиксации трещин с достаточно большой шириной раскрытия ( $>0,1$  мм). При контроле трещин с малой шириной раскрытия ( $<0,1$  мм) интенсивность электроразрядных процессов в зоне дефекта мала, поэтому для увеличения выявляемости дефектов целесообразно оставить небольшой (порядка  $0,05$  мм) воздушный зазор и одновременно свести к минимуму помехи (фоновое свечение) от электрода (например, если используется роликовый электрод, то неоднородность поля и, следовательно, фоновое свечение будут существенны). Таким образом, требуется уменьшить фоновое свечение электроразрядных процессов, обусловленных существенной неоднородностью электрического поля роликового электрода [3].

#### **4.3. Применение прозрачных токопроводящих электродов в технике получения газоразрядных изображений**

Использование прозрачных токопроводящих электродов в технике газоразрядной фотографии открывает большие перспективы в плане развития метода. В частности, становится возможным перейти от традиционных схем регистрации оптической информации на фоточувствительные материалы. Поскольку свечение газового разряда можно непосредственно наблюдать со стороны прозрачного электрода, становится возможным регистрация этого свечения на фото-, кино-, или видеокамеру, использование оптических волокон и световодов для передачи данных.

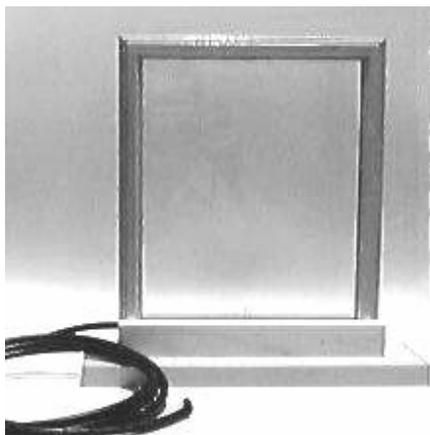
Прозрачные токопроводящие покрытия и применение их в качестве электродов уже рассматривалось выше (см., например, рис. 72, 78, 84), однако эти электроды использовали в устройствах для газоразрядной фотосъемки преимущественно в качестве вспомогательных приспособлений, расширяющих функциональные возможности устройства.

Стоит учитывать лишь одно: токопроводящее покрытие, выполненное на основе тонкой окисной пленки металла, а заодно и сам материал прозрачной подложки (плавленый поликристаллический кварц, оптическое стекло) являются своеобразными светофильтрами, поглощающими оптическое излучение в определенном интервале длин волн.

На рис. 85 показан вид ячейки для экспонирования биологических объектов в поле токов высокой частоты [85]. Ячейка выполнена в виде установленной на подставке диэлектрической рамки, в которой закреплен прозрачный

токопроводящий электрод размером 203x254 мм. К электроду подводится гибкий высоковольтный кабель.

Ячейка предназначена для визуального наблюдения в затемненном помещении свечения поверхности пальцев рук, поднесенных к прозрачному электроду. Это свечение одновременно можно дистанционно регистрировать на фото- или киноплёнку или снимать на видеокамеру.



**Рис. 85. Внешний вид прозрачного токопроводящего экрана-электрода для наблюдения свечения биологических объектов в поле токов высокой частоты**

Необходимо отметить, что этот вид ячейки, ее прозрачный электрод, достаточно быстро загрязняется потожировыми выделениями биологических тканей. Эти выделения могут влиять на характер и картину газового разряда. Поэтому после каждого измерения прозрачный электрод отключают, протирают спиртосодержащей жидкостью, не оставляющей следов после высыхания. Затем электрод сушат, после чего он готов к последующему использованию.

Отметим, что подобные электроды, имеющие значительно большую площадь, были использованы в экспериментах по получению изображения свечения тела человека в полный рост. При получении изображения объекта большой площади необходима более высокая выходная мощность высоковольтного генератора, и, значит, более высокие требования к соблюдению правил техники безопасности.

Снизить выходную мощность высоковольтного генератора, величину разрядных токов при экспонировании объектов большой площади возможно за счет разнесения процесса съемки отдельных участков объекта во времени. Для этого может быть использована перемещаемая обкладка-электрод, см. выше.

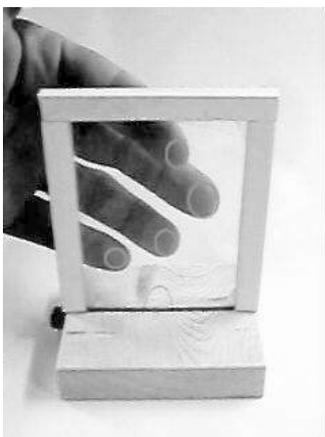
Прозрачный электрод может быть подключен к источнику высокого напряжения без использования высоковольтного кабеля (рис. 86) [31]. Длинный кабель имеет собственную индуктивность и емкость. Его наличие может существенно исказить форму генерируемых колебаний, разрегулировать трансформатор, выведя его из состояния резонанса и снизив тем самым выходное напряжение. Кроме того, при использовании длинного кабеля возможны его повреждения, появление токов утечки.

При непосредственном подключении электрода к высоковольтному трансформатору необходимо в обязательном порядке принять меры по ограничению тока короткого замыкания, включив в последовательную цепь нагрузки высоковольтный токоограничивающий резистор или его аналог, например, газоразрядный источник света.

Пример практического использования токопроводящего прозрачного электрода на основе диоксида олова показан на рис. 87 [85].



**Рис. 86.** Прозрачный токопроводящий электрод, закрепленный на выходном зажиме высокочастотного малогабаритного трансформатора *Тесла*



**Рис. 87.** Фотоснимок свечения в поле токов высокой частоты подушечек пальцев рук, контактирующих с прозрачным электродом

### ***Методика изготовления прозрачных электродов***

Общепринятая методика получения токопроводящих прозрачных пленок на стеклянных (кварцевых) подложках предусматривает процесс осаждения окисных слоев из органических растворов [86]. Метод достаточно трудоемок и может быть воспроизведен лишь в лабораторных условиях.

На основании метода, изложенного в [87], нами отработан более простой способ получения химически инертных, визуальнo прозрачных, износостойчивых контактов на основе  $SnO_2$ .

На стеклянную (стекло марки *C23*) или кварцевую подложку методом термического испарения при давлении  $10^{-4}$  мм рт. ст. наносится слой олова заданной толщины. Затем образец помещают на термостатированную поверхность из алюминия и прогревают в окислительной атмосфере (на воздухе) до температуры  $550...600^{\circ}C$  в течение  $20...30$  мин. До прогрева пленка имела металлический зеркальный блеск и была непрозрачной (масса навески  $10$  мг, расстояние лодочка (испаритель) – подложка в установке *УВР-2* составляла  $16$  см).

После отжига пленка была визуальнo прозрачна в видимой области спектра. Сопротивление участка пленки, содержащего  $SnO_2$ , при измерении на цифровом омметре *Щ-34* было порядка  $\sim 10^5$  Ом при наложении электродов прибора на расстоянии  $1$  см друг от друга.

Электроды по химическим свойствам не отличались от подложки: не вступали во взаимодействие с атмосферой, не растворялись в кислой или щелочной среде. Аналогично могут быть получены прозрачные токопроводящие покрытия на основе  $CdO$  [87],  $In_2O_3$  и ряда других материалов.

#### 4.4. Конструкции разрядно-оптических и других преобразователей

Рассмотренные ранее конструкции обычно включали визуальное наблюдение газового разряда, либо его регистрацию на фотографический или иной материал. Однако в ряде случаев требуются особые условия наблюдения, например, требуется преобразовать излучение одного спектрального состава в изображение другого спектрального состава, либо преобразовать один вид энергии в другой. Для этих целей обычно используют люминофоры (сдвиг спектра ниже по частоте), а также антистоксовские люминофоры (сдвиг спектра по частоте вверх), электролюминофоры и т. д. Эффективность использования антистоксовских люминофоров крайне низка.

В процессе создания газоразрядного интраскопа, предназначенного для использования в промышленной практике для неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов *С.Ф. Романий*, [88] разработал специальные разрядно-оптические преобразователи, внешний вид одного из которых приведен на рис. 88.

В преобразователе использован электролюминофор, который светится при подаче на электроды преобразователя напряжения. В качестве электролюминофоров обычно используют сульфиды металлов, например, сульфид цинка. Спектральная область свечения электролюминофора определяется видом активирующей добавки.

Использование разрядно-оптического преобразователя позволяет осуществлять визуализацию несплошностей слоя диэлектрика непосредственно в процессе контроля качества изделия. Оптическая информация из разрядного промежутка по световоду (типа *ГОЖВ-А*) диаметром 10 мм

и длиной 1 м подается на фотокатод фотоэлектронного умножителя, установленного в корпусе дефектоскопа [2].

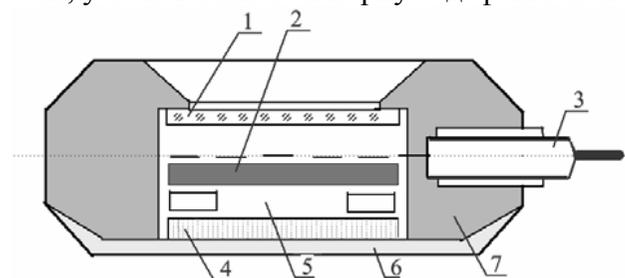


Рис. 88. Схема разрядно-оптического преобразователя накладного типа

Позиционные обозначения на рис. 88: 1 – прозрачный электрод; 2 – электролюминофор *ЭЛ-510*; 3 – высоковольтный ввод; 4 – металловолоконный протектор; 5 – разрядный промежуток; 6 – защитное покрытие; 7 – корпус преобразователя.

Для неразрушающего контроля формы и состояния поверхности электропроводящих изделий, обнаружения объемных дефектов диэлектриков и несплошностей в магнитно-жидкостном звукопроводе при ультразвуковой дефектоскопии *В.В Кожариновым и др.* [3] был использован метод электроразрядной визуализации. В работах [3, 89-91] показана принципиальная возможность контроля состояния поверхности металлических изделий (в том числе покрытых оптически непрозрачным диэлектриком [89]) описанным выше методом.

Кроме традиционных приспособлений для фотосъемки объектов в поле токов высокой частоты [3, 92] были созданы модификации старых и варианты новых устройств, позволяющих получать увеличенные [93-96] электроразрядные изображения; без общего затемнения [82];

изображения микрорельефа поверхности объектов сложной формы [83].

Визуальное наблюдение картины свечения микрорельефа поверхности кроме использования прозрачных электродов (кювет с электролитом, токопроводящих стекол), электродов с электролюминесцентным покрытием и т. п., возможно за счет применения специальной конструкции [3, 97]. Устройство [3, 97] имеет корпус из оптически непрозрачной пластины с микроканалами, заполненными инертным газом при пониженном давлении и размещенными нормально к поверхности пластины. Для герметизации микроканалов корпус покрыт оптически прозрачной диэлектрической пленкой. На этой пленке со стороны, обратной по отношению к контролируемой поверхности, имеется прозрачное токопроводящее покрытие.

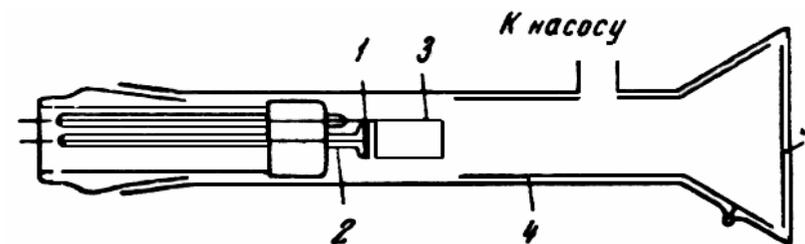
Для получения изображения микрорельефа устройство помещают на поверхность контролируемого изделия и подключают прозрачное токопроводящее покрытие и контролируемое изделие к источнику напряжения. При попадании микроканалов на участок с поверхностным дефектом возникает свечение инертного газа в соответствующих микроканалах. Благодаря малости объемов микроканалов и низкому давлению в них возможно значительное снижение напряжения, необходимого для зажигания разряда в микроканалах. За счет изолированности микроканалов исключается распространение свечения газа на соседние участки, повышается разрешающую способность [3, 97].

Описанные ранее способы получения изображений объектов в электрическом разряде можно представить как процесс получения изображения одного из электродов, по-

верхность которого время от времени изменяют, помещая поверх этого электрода исследуемый образец.

Отметим, что в 1876 г. *Гольдштейн* получал подобным образом изображение монеты, используя ее в качестве катода [98]. Эти эксперименты проводились при пониженном давлении газовой среды в специально сконструированной разрядной трубке. Рельеф катода (монеты) был виден в свете флюоресценции катодных лучей на противоположной катоду стенке разрядной трубки. Подобные опыты в 1938 году производил немецкий физик *Маль* [98].

Проф. *МГУ Г.В. Спивак и сопр.* [98-100] в 1948-1951 г.г. разработали конструкцию газоразрядного микроскопа (рис. 89), позволяющего получать на экране увеличенное изображение катода.



**Рис. 89. Конструкция трубки для получения изображения катода при наличии газового разряда**

Позиционные обозначения на рис. 89: 1 – объект исследования (катод); 2 – стеклянная защита; 3 – цилиндрический анод; 4 – аквадаг; 5 – экран.

Катодом (рис. 89) служил плоский диск диаметром 17 мм, анодом – молибденовый цилиндр длиной 50 мм и диаметром 27 мм. Анод был расположен на расстоянии 1...10 мм от катода [98].

Для получения изображений [98] применялась панцирная магнитная линза, диаметр отверстия которой был равен 60 мм, число витков – 3620, ширина щели – 24 мм. Подставка для линзы перемещалась на оптической скамье. Небольшой диаметр трубки и возможность свободно поворачивать линзу позволяли при больших увеличениях помещать на экране разные части изображения. Для фотографирования применялся телеобъектив светосилой (1:2), что позволяло устанавливать фотоаппарат на близком (~20 см) расстоянии от экрана электроразрядного микроскопа. Изображение на пленке было примерно в 3 раза меньше изображения на экране. Если не включать магнитную линзу, катод отображался электрическим полем в виде кружка с ярким пятном в центре.

Изображения холодных катодов получались при напряжениях порядка 12...16 кВ, обычно при давлениях порядка сотых долей мм рт. ст. Были также получены изображения катода в газовом разряде при использовании источников импульсного напряжения 10...12 кВ. Существенной при импульсном режиме подачи напряжения оказалась форма импульса: чем круче его фронт, тем качественнее изображение. Было установлено, что время жизни газосфокусированного луча зависит от давления в трубке и составляет 1...2 мкс. Было показано, что в импульсном разряде можно получать изображения в более широком интервале давлений (примерно в несколько раз), чем в стационарном режиме [98].

В 1959-60 г.г. С.Д. Кирлиан [101] для получения увеличенного изображения объекта и передачи изображений через перегородку между объектом и фотографическим материалом предложил установить диафрагму, помещая ее в вакуумную трубку с отверстием, прикрытым пластинкой

из кристаллического материала. В качестве второй обкладки предлагалось использовать светящийся под действием электронов экран, одновременно заменяющий фотоматериал.

В целях упрощения передачи изображения при получении увеличенных изображений объектов С.Д. Кирлиан использовал обкладки с различной величиной действующих участков, помещенные в вакуумную трубку при давлении  $3 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Одна из обкладок, имеющая меньший действующий участок, выполнялась поворотной и была снабжена гнездами для размещения наблюдаемых объектов [93].

В устройстве для газоразрядной визуализации объекта при пониженном давлении (рис. 90) увеличенное изображение объекта – 1, помещенного внутрь герметичного баллона – 2, формируется на токопроводящем люминесцентном экране – 3 [4]. Получение четких изображений было возможно лишь в случае, если на объект – 1 подавался отрицательный относительно экрана – 3 потенциал.

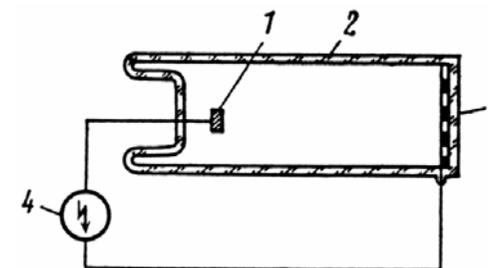


Рис. 90. Устройство для наблюдения газоразряда в вакуумированной камере

Позиционные обозначения на рис. 90: 1 – объект исследования; 2 – герметичная ампула из стекла – баллон; 3 – люминесцентное покрытие – экран; 4 – источник импульсов высокого напряжения.

## Глава 5.

### СХЕМОТЕХНИКА ГЕНЕРАТОРОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ФОТОГРАФИИ

Прежде чем перейти к систематическому изложению вопроса, остановимся и рассмотрим принципы работы и электрические схемы первых аппаратов для газоразрядной фотографии.

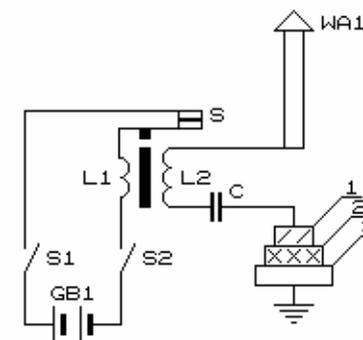
Первые успешные опыты по фотографической регистрации электрических разрядов, получению газоразрядных фотографий, были осуществлены белорусским ученым *Я.О. Наркевичем-Йодко* в 1891 г. [1, 102].

Для фотографирования в газовом разряде различных предметов, а также биологических объектов *Я.О. Наркевич-Йодко* использовал аппарат, показанный на рис. 91 [102]. Металлический стержень *WA1* выполнял роль одного из электродов, имеющих емкостную связь с поверхностью земли. Пробирка с токопроводящей жидкостью – *C* служила высоковольтным конденсатором малой емкости (порядка десятков  $nФ$ ). Поверх диэлектрической прокладки – 3 размещалась светочувствительная пластинка – 2. В эту последовательно замкнутую цепь как ее варьируемый элемент и предмет исследования включался сам объект съемки – 1.

Катушка *Румкорфа L1* (рис. 91) при замыкании электрических ключей *S1* и *S2* возбуждалась от гальванического элемента *GB1* [102]. При прохождении тока через катушку индуктивности, полотно нормально замкнутого контактного элемента *S* притягивалось к сердечнику катушки. Электрическая цепь размыкалась, ток в катушке индуктив-

ности периодически прерывался. Соответственно, во вторичной обмотке *L2* наводились импульсы высокочастотного напряжения.

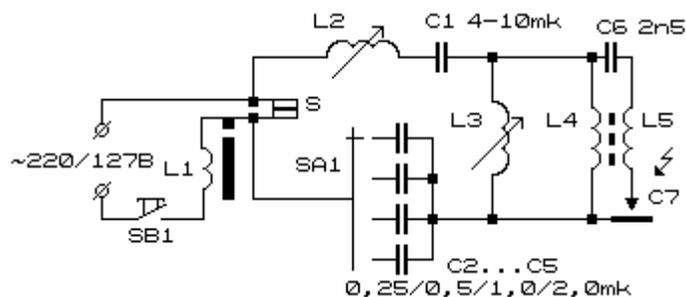
Один из полюсов вторичной обмотки *L2* был подключен к металлическому стержню *WA1*, установленному на высокой башне и устремленному в атмосферу. Второй полюс катушки индуктивности соединялся с металлической пластинкой, погруженной в пробирку с подкисленной водой. Взяв в руку пробирку, исследователь другой рукой на несколько секунд прикасался к светочувствительной пластинке, расположенной на заземленном основании. Сам исследователь был электрически изолирован от земли.



**Рис. 91.** Электрическая схема аппарата *Я.О. Наркевича-Йодко* (1891 г.) для получения газоразрядных фотографий

В результате электрического разряда между телом человека или токопроводящим предметом и заземленной пластинкой с расположенной поверх светочувствительной пластинкой, в последней формировалось скрытое изображение. При последующем проявлении на пластинке отчетливо становились видны изображения предметов или пальцев рук исследователя.

Генератор высокой частоты *С.Д. Кирлиана*, впервые примененный им в 1939 г. и затем усовершенствованный в 1949 г. для фотосъемки свечения частей тела человека, листов растений или различных предметов, унаследовал от использованного им аппарата *Д'Арсонваля* (см. главу 2) основные черты. Этот аппарат в современном начертании (рис. 92) состоял из катушки индуктивности, прерывателя, колебательного контура, измерительной ячейки и педали для ножного включения [33].



**Рис. 92.** Электрическая схема аппарата *С.Д. Кирлиан*, (1949 г.)

Устройство работало следующим образом. При нажатии на кнопку *SB1* (педаль) сетевое напряжение промышленной частоты  $220 В$   $50 Гц$  подавалось на обмотку прерывателя тока *L1*. В результате периодического втягивания сердечника прерывателя, сопряженные с ним электрические контакты *S* периодически размыкались и замыкались.

В момент размыкания электрической цепи сетевое напряжение оказывалось приложенным к последовательно соединенной цепочке, состоящей из дросселя *L2*, конденсатора *C1*, первичной обмотки высоковольтного резонансного трансформатора *L4* с подключенным к ней дросселем *L3*, и одного из конденсаторов *C2-C5*.

Поскольку для токов низкой частоты конденсаторы *C1* и *C2-C5* были соединены последовательно через незначительное омическое сопротивление обмоток *L4* и *L3*, эти конденсаторы заряжались в момент действия одного из полупериодов сетевого напряжения. При последующем замыкании контактной группы *S1* эти конденсаторы разряжались на первичную (низковольтную) обмотку высокочастотного повышающего трансформатора *L4*.

Количество запасенной конденсаторами энергии определялось емкостью подключенного к схеме переключателем *SA1* конденсатора *C2-C5* и изменялось в пропорции: 1: 2: 4: 8 (0,25; 0,5; 1,0; 2,0  $мкФ$ ). Емкость конденсатора *C1* могла быть в пределах 4...10  $мкФ$ . В качестве конденсаторов, по-видимому, были использованы бумажные конденсаторы, рассчитанные на напряжение 600...1000 В. Дроссели *L2* и *L3* позволяли в некоторых пределах регулировать частоту и амплитуду генерируемых импульсов, а также скорость их затухания.

Индуктивные регуляторы (дроссели) [33] содержали по 100 витков медного провода *ПБО* диаметром 1,5 мм. Провод был намотан на гибкую диэлектрическую планку толщиной 1,5...2, шириной 15 и длиной 160...180 мм. В одном из регуляторов (*L2*) планка оставалась не намотанной до конца на 15...20 мм, чтобы можно было его выключать. Планка с обмоткой сворачивалась в кольцо, концы его закреплялись. В центре устанавливали ось ползущего контакта. Обмотка пропитывалась лаком для закрепления ниточной оплетки. На ребре полоски для обеспечения контакта между ползунком и обмоткой наждачной бумагой снималась изоляция.

Выходная (высоковольтная) обмотка резонансного трансформатора *L5* подключалась через разделительный

для токов низкой частоты конденсатор небольшой емкости  $C6$  (2500  $n\Phi$ , 2500  $B$ ) к одному из концов первичной обмотки. Второй ее вывод соединялся обкладкой измерительного конденсатора (электродом измерительной ячейки) –  $C7$ . Второй электрод ячейки (обкладки) был соединен, соответственно, с вторым выводом первичной обмотки трансформатора.

Конструкцию прерывателя мы не рассматриваем в связи с тем, что такого рода прерыватели морально устарели. По своей сути такой прерыватель напоминает крупногабаритное реле с обмоткой, рассчитанной на сетевое питание. Контакты прерывателя работают в весьма неблагоприятных условиях эксплуатации и очень быстро обгорают. Это заметно отражается на качестве работы устройства.

Конструкция высокочастотного трансформатора была подробно описана ранее в главе 3.

Генератор (рис. 92) был способен работать с частотой приблизительно в 75...200  $k\Gamma$ ; вырабатываемые генератором колебания – импульсные, резко затухающие [33]. Энергия импульса на выходе устройства должна быть подобрана регулировкой элементов аппарата таким образом, чтобы не оказать повреждающее или травматическое действие на объект исследования. Длительность импульсов обычно была в пределах 50...100  $\mu c$ . Амплитуда высокочастотного напряжения обычно не превышала 50...100  $kB$ .

Подходя к рассмотрению аппаратов *Я.О. Наркевича-Йодко* (рис. 91) и *С.Д. Кирлиан* (рис. 92) с позиций нынешних дней, можно сказать, что первый из них представляет собой типичный преобразователь высокого напряжения с индуктивным накоплением энергии, а второй, соответственно, является преобразователем напряжения с емкостным накоплением энергии в классическом их воплощении.

## 5.1. Генераторы высокой частоты с использованием трансформатора *Тесла*

Одним из самых первых и наиболее простых генераторов высокого высокочастотного напряжения является искровой передатчик *К.Ф. Брауна* (1900 г.), рис. 93 [103].

При включении питания ток через прерыватель *Вагнера*  $S$  протекает через обмотку катушки индуктивности  $L1$ . При этом сердечник с закрепленной на нем контактной группой втягивается в катушку, цепь ее питания прерывается, после чего процесс периодически повторяется. Напряжение, снимаемое с катушки индуктивности  $L1$ , оказывается приложенным к электрическому разряднику  $FV1$  и параллельно ему подключенным конденсатору  $C1$  и низковольтной обмотке резонансного трансформатора  $T1$ .

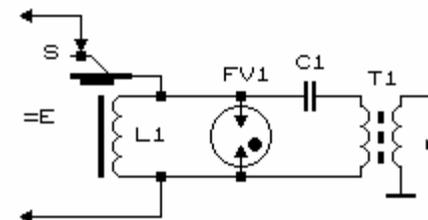


Рис. 93. Электрическая схема высокочастотного аппарата *К.Ф. Брауна* (1900 г.)

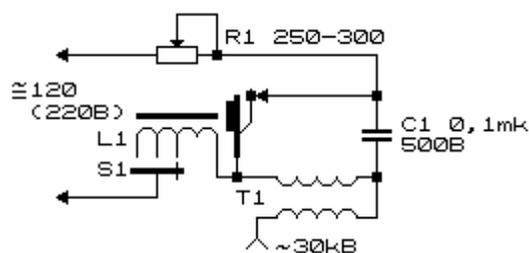
В начальный момент времени происходит заряд конденсатора  $C1$  до напряжения пробоя разрядника. В результате пробоя газового промежутка запасенная в конденсаторе энергия передается в первичную обмотку трансформатора. На выходе устройства генерируется последовательность затухающих во времени импульсов.

При возбуждении колебаний в системе двух связанных контуров энергия, поступающая из возбуждающего

контура в другой, целиком зависела от связи между ними [103]. При слабой связи возникающие во втором контуре колебания затухают слабо, но имеют меньшую начальную амплитуду, чем колебания в возбуждающем контуре. При увеличении связи амплитуда колебаний на выходе возрастает, но возникают биения двух близких частот. Обычно степень связи контуров составляла 20...30%.

В целом принцип работы генератора *Брауна* приближается к принципу действия аппаратов *Д'Арсонваля*, рассмотренных в главе 2 (см. рис. 19).

Следующее в серии генераторов с молоточковым прерывателем *Вагнера* устройство показано на рис. 94. Принцип его действия заметно отличается от описанного выше. В схеме использован релаксационный прерыватель тока – релейный коммутатор времязарядной цепи [34, 104]. В начальный момент времени ток от источника питания протекает через резистор *R1* и обмотку прерывателя-реле *L1*.



**Рис. 94. Схема высоковольтного преобразователя с молоточковым прерывателем *Вагнера***

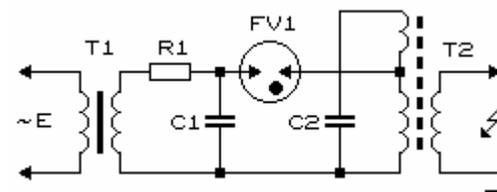
Подвижный сердечник реле и закрепленная на нем контактная группа втягиваются, контакты размыкаются. В результате конденсатор *C1* заряжается малым током через последовательно соединенную цепочку *R1*, первичную (низковольтную) обмотку трансформатора и обмотку реле

*L1*. Тем временем сердечник реле возвращается в исходную позицию, подключая обмотку реле к источнику питания, одновременно замыкая конденсатор *C1* на первичную обмотку трансформатора.

В результате во вторичной обмотке трансформатора наводится быстро затухающие во времени высокочастотные колебания высокого напряжения. Частота колебаний определяется резонансными свойствами трансформатора, его конструкция приведена на рис. 48.

Настройка преобразователя (рис. 94) заключается в регулировке прерывателя тока и настройке контура в резонанс подбором емкости конденсатора.

Электрические колебания в первичной обмотке резонансных преобразователей с использованием трансформатора *Тесла* обычно затухают достаточно быстро. Для снижения затухания иногда используют неполное включение контура в разрядную цепь (рис. 95) [105].



**Рис. 95. Схема высоковольтного генератора с малым затуханием в первичной цепи**

Добротность колебательного контура при таком включении возрастает. Стабильность частоты генерируемых колебаний улучшается.

Резонансная частота первичного контура определяется емкостью конденсатора, монтажной емкостью, межвитковой емкостью, а также полной индуктивностью обмотки первичного контура.

В качестве разрядников иногда используют «тарелочные» разрядники *Макса Вина* [106], состоящие из набора металлических дисков, разделенных регулируемыми воздушными зазорами. Такие разрядники могут работать на повышенной частоте, поскольку разряд в них гаснет быстрее.

Генератор высоковольтных импульсов с использованием резонансного трансформатора, выполненный по классической схеме на газовом разряднике *РБ-3*, показан на рис. 96 [37].

Конденсатор *C2* заряжается пульсирующим напряжением через диод *VD1* и резистор *R1* до напряжения пробоя газового разрядника. В результате пробоя газового промежутка разрядника конденсатор разряжается на первичную обмотку трансформатора, после чего процесс повторяется. В итоге на выходе трансформатора *T1* формируются затухающие импульсы высоковольтного напряжения амплитудой до 3...20 кВ.

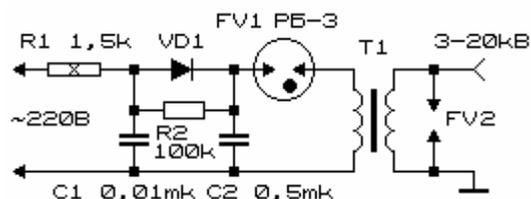


Рис. 96. Генератор импульсов высокого напряжения с использованием газового разрядника

Для защиты выходной обмотки трансформатора от перенапряжения параллельно ей подключен разрядник *FV2*, выполненный в виде электродов с регулируемым воздушным зазором.

Конструкция трансформатора *T1* высоковольтного генератора импульсов (рис. 96), выполненного на незамк-

нутом ферритовом сердечнике, подробно описана на стр. 96-97. Вторичная обмотка этого трансформатора должна быть надежно изолирована от первичной.

Вариант выполнения генератора высоковольтных импульсов с использованием резонансного трансформатора показан на рис. 97 [105]. Этот генератор развязан от питающей сети. Сетевое напряжение поступает на промежуточный (повышающий) трансформатор *T1*. Снимаемое со вторичной обмотки сетевого трансформатора напряжение поступает на выпрямитель, работающий по схеме удвоения напряжения.

В результате работы такого выпрямителя на верхней по схеме обкладке конденсатора *C2* относительно нулевого провода появляется положительное напряжение, равное  $\sqrt{2}U_{II}$ , где  $U_{II}$  – напряжение, снимаемое со вторичной обмотки силового трансформатора.

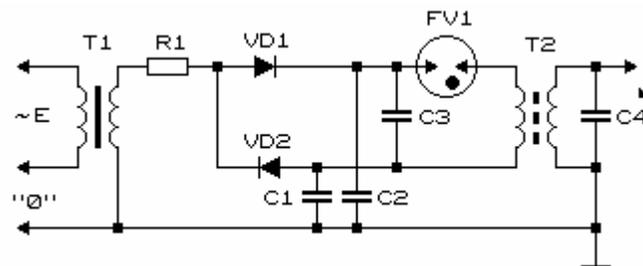


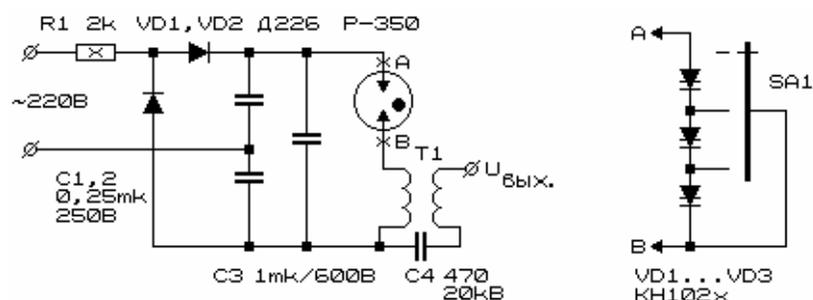
Рис. 97. Генератор высоковольтных импульсов с двойным преобразованием и удвоением напряжения в первичной цепи

На конденсаторе *C1* формируется соответствующее напряжение противоположного знака. В результате напряжение на обкладках конденсатора *C3* будет равно  $2\sqrt{2}U_{II}$ .

Скорость заряда конденсаторов  $C1$  и  $C2$  ( $C1=C2$ ) определяется величиной сопротивления  $R1$ .

Когда напряжение на обкладках конденсатора  $C3$  сравняется с напряжением пробоя газового разрядника  $FV1$ , произойдет пробой его газового промежутка, конденсатор  $C3$  и, соответственно, конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разрядятся, во вторичной обмотке высокочастотного трансформатора возникнут периодические затухающие колебания. После разряда конденсаторов и отключения разрядника процесс заряда и последующего разряда конденсаторов на первичную обмотку трансформатора  $T2$  повторится снова.

Генератор, используемый для получения фотографий в газовом разряде (рис. 98) [35, 36] состоит из удвоителя напряжения, релаксационного генератора импульсов и повышающего резонансного трансформатора.



**Рис. 98. Генератор импульсов высокого напряжения с использованием газового разрядника или заменяющих его динисторов**

Удвоитель напряжения выполнен на диодах  $VD1$ ,  $VD2$  и конденсаторах  $C1$ ,  $C2$ ; конденсаторы  $C1-C3$  и резистор  $R1$  образуют зарядную цепочку. Параллельно конденсаторам  $C1-C3$  подключен газовый разрядник на  $350 В$  и после-

довательно включенная ему первичная обмотка повышающего трансформатора  $T1$ .

Как только уровень постоянного напряжения на конденсаторах  $C1-C3$  превысит значение напряжения пробоя газового столба разрядника, конденсаторы разряжаются через обмотку повышающего трансформатора; генерируется высоковольтный импульс. Элементы схемы подобраны так, что частота формирования импульсов близка к  $1 Гц$ . Конденсатор  $C4$  предназначен для предотвращения попадания сетевого напряжения на выходной зажим прибора.

Выходное напряжение устройства достигает  $15 кВ$  и целиком определяется свойствами используемого трансформатора. Конструкция высоковольтного трансформатора описана в главе 3. В качестве такого трансформатора можно также использовать модифицированный выходной трансформатор строчной развертки телевизора; трансформаторы электронных зажигалок, ламп-вспышек, катушек зажигания и др.

Газовый разрядник  $P-350$  может быть заменен переключаемой цепочкой динисторов  $KH102$  (рис. 98), что позволяет ступенчато изменять выходное напряжение [107]. Для равномерного распределения напряжения на динисторах рекомендуется подключить к каждому из них резистор сопротивлением  $300...500 кОм$ .

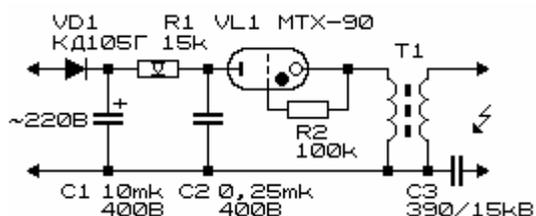
Вариант высоковольтного генератора с использованием в качестве порогово-коммутирующего элемента газонаполненного прибора – тиратрона показан на рис. 99 [108].

Сетевое напряжение выпрямляется диодом  $VD1$ . Выпрямленное напряжение фильтруется конденсатором  $C1$  и подается на зарядную цепочку  $RIC2$ . Как только напряжение на конденсаторе  $C2$  достигает напряжения зажигания аналога газового разрядника – тиратрона  $V11$ , он вспыхи-

вает. Конденсатор  $C2$  разряжается через первичную обмотку трансформатора  $T1$ , тиратрон гаснет, конденсатор вновь начинает заряжаться и т. д.

В качестве трансформатора  $T1$  использована автомобильная катушка зажигания [108].

Вместо тиратрона  $VL1$   $MTX-90$  можно включить один или несколько динисторов серии  $KH102$  – подбирая общее напряжение их включения, можно регулировать амплитуду высокого напряжения.



**Рис. 99. Генератор импульсов высокого напряжения с использованием тиратрона**

Конструкция высоковольтного преобразователя с использованием тиратронного коммутатора описана в работе [109]. Отметим, что для коммутации разрядного конденсатора могут быть использованы и другие виды газонаполненных приборов [25-28].

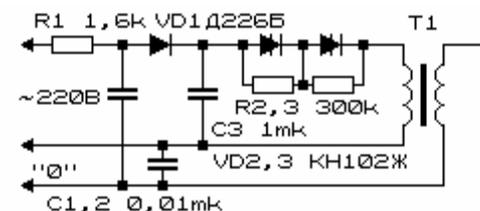
Более перспективным в плане создания современных генераторов высокого напряжения видится применение полупроводниковых переключающих приборов. Их достоинства отчетливо выражены: это высокая повторяемость параметров, меньшая стоимость и габариты, высокая надежность. Столь же явственно просматриваются недостатки, потенциально устранимые в недалеком будущем: более

низкие рабочие напряжения, меньший коммутируемый ток, относительно низкое быстродействие.

Ниже будут рассмотрены генераторы высоковольтных импульсов с использованием полупроводниковых коммутирующих приборов (динисторов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов).

Вполне равноценным аналогом газовых разрядников являются динисторы.

На рис. 100 показана электрическая схема генератора, выполненного на динисторах [38]. По своей структуре генератор полностью подобен описанным ранее генераторам (рис. 96, 99). Основное отличие заключается в замене газового разрядника цепочкой последовательно включенных динисторов – аналогов газового разрядника.



**Рис. 100. Генератор высоковольтных импульсов на динисторах**

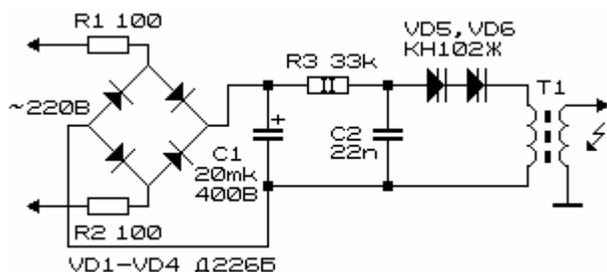
Следует отметить, что *к.п.д.* такого аналога и коммутируемые токи заметно ниже, чем у прототипа, однако динисторы более доступны и более долговечны. Конструкция трансформатора описана в главе 3.

Несколько усложненный вариант выполнения генератора высоковольтных импульсов представлен на рис. 101 [110]. Сетевое напряжение подается на мостовой выпрямитель на диодах  $VD1-VD4$ . Выпрямленное напряжение фильтруется конденсатором  $C1$ . В итоге на этом конденсаторе присутствует постоянное напряжение около 300 В,

которое используется для питания релаксационного генератора, составленного из элементов  $R3$ ,  $C2$ ,  $VD5$ ,  $VD6$ .

Нагрузкой генератора является первичная обмотка трансформатора  $T1$ . Со вторичной обмотки снимаются импульсы амплитудой примерно  $5\text{ кВ}$  и частотой следования до  $800\text{ Гц}$ .

Цепочка диносторов должна быть рассчитана на напряжение включения порядка  $200\text{ В}$ . Для ее формирования можно использовать диносторы серии  $KH102$  либо  $D228$  [110]. При этом следует учитывать, что напряжение включения диносторов типа  $KH102A$ ,  $D228A$  составляет  $20\text{ В}$ ;  $KH102Б$ ,  $D228Б$  –  $28\text{ В}$ ;  $KH102В$ ,  $D228В$  –  $40\text{ В}$ ;  $KH102Г$ ,  $D228Г$  –  $56\text{ В}$ ;  $KH102Д$ ,  $D228Д$  –  $80\text{ В}$ ;  $KH102Е$  –  $75\text{ В}$ ;  $KH102Ж$ ,  $D228Ж$  –  $120\text{ В}$ ;  $KH102И$ ,  $D228И$  –  $150\text{ В}$ .



**Рис. 101. Генератор высоковольтных импульсов на диносторах с мостовым выпрямителем**

В качестве трансформатора  $T1$  может быть использован модифицированный строчный трансформатор от черно-белого телевизора [110, 111]. Его высоковольтную обмотку оставляют, остальные удаляют и вместо них наматывают низковольтную (первичную) обмотку –  $24$  витка провода  $ПЭВ$  диаметром  $0,5...0,8\text{ мм}$ .

При выборе числа витков первичной обмотки следует учитывать количество витков вторичной обмотки. Харак-

теристики некоторых видов телевизионных трансформаторов строчной развертки приведены в таблице 6 [111].

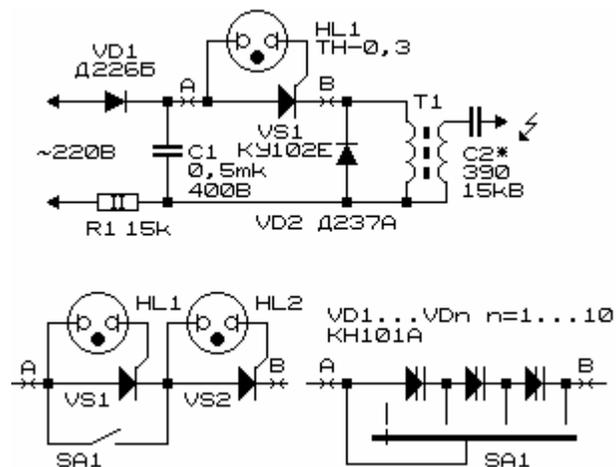
**Таблица 6**  
**Параметры высоковольтных обмоток унифицированных трансформаторов строчной развертки**

Тип трансформатора	Число витков	Провод	R обмотки, Ом
ТВС-А, ТВС-Б	720	ПЭЛШО 0,1	152
ТВС-70П1	2700	ПЭВ-2 0,05	1400
ТВС-70П2	1800	ПЭВ-2 0,05	800
ТВС-70П2	536	ПЭВ-2 0,12	170
ТВС-70АМ	720	ПЭЛШО 0,1	250
ТВС-90П4	1900	ПЭВШО 0,08	600
ТВС-110, ТВС-110М	940	ПЭЛШО 0,1	240
ТВС-110А	1000	ПЭВ-2 0,1	250
ТВС-110Л1	1300	ПЭМ-2 0,09	430
ТВС-110Л2	900	ПЭВ-2 0,08	310
ТВС-110Л3	940	ПЭЛШО 0,1	240
ТВС-110ЛА	1200	ПЭВ-2 0,1	380
ТВС-110АМ	900	ПЭВ-2 0,08	280
ТВС-110Л4	1290	ПЭМ-2 0,1	410
ТВС-110Л5	365	ПЭМ-2 0,35	6
ТВС-110П2	1650	ПЭМ-2 0,12	500
ТВС-90ЛЦ2 (ЛЦ2-1)	1900	ПЭВ-2 0,08	800
ТВС-90ЛЦ4	1904	ПЭМ-2 0,08	800
ТВС-90ЛЦ5	370	ПЭВ-2 0,35	13
ТВС-90ПЦ4	730	ПЭМ-2 0,15	28
ТВС-90ПЦ11	900	ПЭВ-2 0,14	–
ТВС-90ПЦ12	715	ПЭМ-2 0,5	27
ТВС-110ПЦ15	1080	ПЭВ-2 0,14	112
ТВС-110ПЦ16, ПЦ18	1050	ПЭВ-2 0,14	102



напряжение достигает 9 кВ. Неоновая лампа одновременно является сигнализатором включения блока в сеть.

Высоковольтный трансформатор наматывают на отрезке стержня диаметром 8 и длиной 60 мм из феррита М400НН. Вначале наматывают первичную обмотку – 30 витков провода ПЭЛШО 0,38, а затем вторичную – 5500 витков ПЭЛШО 0,05 или большего диаметра. Между обмотками и через каждые 800...1000 витков вторичной обмотки прокладывают слой изоляции из поливинилхлоридной изоляционной ленты.



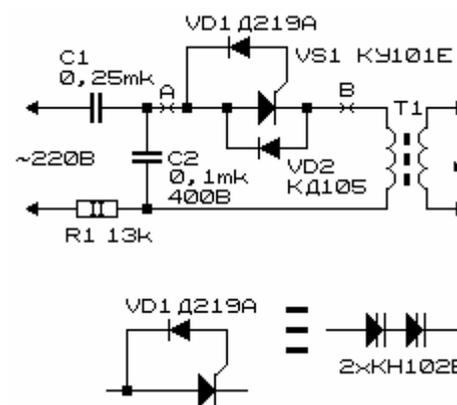
**Рис. 104. Электрическая схема преобразователя напряжения с пороговым элементом на неоновой лампе или заменяющих ее динисторах**

В преобразователе возможно введение дискретной многоступенчатой регулировки выходного напряжения коммутацией включенных в последовательной цепи неоновых ламп либо динисторов (рис. 104). В первом варианте обеспечиваются две ступени регулирования, во втором – до

десяти и более (при использовании динисторов KH102A с напряжением включения 20 В).

Простой преобразователь напряжения, позволяющий получить на выходе импульсы амплитудой до 10 кВ, изображен на рис. 105 [112].

Переключение управляющего элемента устройства происходит с частотой 50 Гц (на одной полуволне сетевого напряжения). В качестве порогового элемента использован диод VD1 Д219А (Д220, Д223), работающий при обратном смещении в режиме лавинного пробоя.



**Рис. 105. Электрическая схема преобразователя напряжения с пороговым элементом на лавинном диоде**

При превышении напряжения на полупроводниковом переходе диода напряжения лавинного пробоя происходит переключение диода в проводящее состояние. Напряжение с заряженного конденсатора C2 подается на управляющий электрод тиристора VS1. После включения тиристора конденсатор C2 разряжается на обмотку трансформатора T1.

Трансформатор  $T1$  не имеет сердечника. Он выполнен на катушке диаметром 8 мм из полиметилметакрилата или политетрахлорэтилена и содержит три разнесенных секции шириной по 9 мм. Повышающая обмотка содержит 3х1000 витков, намотанных проводом ПЭТФ, ПЭВ-2 0,12 мм. После намотки секций они пропитываются парафином. Поверх слоя парафина накладывается 2-3 слоя изоляции, после чего наматывают первичную обмотку – 3х10 витков провода ПЭВ-2 0,45 мм.

В качестве тиристора  $VS1$  может быть использован тиристор, рассчитанный на напряжение свыше 150 В. Лавинный диод можно заменить цепочкой диодисторов (рис. 104, 105).

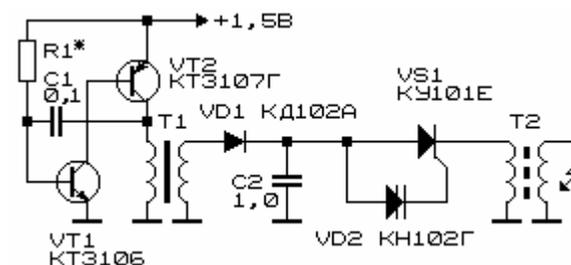
Схема маломощного переносного источника импульсов высокого напряжения с автономным питанием от одного гальванического элемента (рис. 106) состоит из двух генераторов [113]. Первый построен на двух маломощных транзисторах, второй – на тиристоре и диносторе.

Каскад на транзисторах разной проводимости преобразует низковольтное постоянное напряжение в высоковольтное импульсное. Времязадающей цепочкой в этом генераторе служат элементы  $C1$ ,  $R1$ . При включении питания открывается транзистор  $VT1$ , и перепад напряжения на его коллекторе открывает транзистор  $VT2$ . Конденсатор  $C1$ , заряжаясь через резистор  $R1$ , уменьшает базовый ток транзистора  $VT2$  настолько, что транзистор  $VT1$  выходит из насыщения, а это приводит к закрыванию и  $VT2$ . Транзисторы будут закрыты до тех пор, пока конденсатор  $C1$  не разрядится через первичную обмотку трансформатора  $T1$ .

Повышенное импульсное напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора  $T1$ , выпрямляется диодом  $VD1$  и поступает на конденсатор  $C2$  второго гене-

ратора с тиристором  $VS1$  и диностором  $VS2$ . В каждый положительный полупериод накопительный конденсатор  $C2$  заряжается до амплитудного значения напряжения, равного напряжению переключения диностора  $VS2$ , т. е. до 56 В (номинальное импульсное отпирающее напряжение для диностора типа  $KH102Г$ ).

Переход диностора в открытое состояние воздействует на цепь управления диностора  $VS1$ , который в свою очередь тоже открывается. Конденсатор  $C2$  разряжается через тиристор и первичную обмотку трансформатора  $T2$ , после чего диностор и тиристор вновь закрываются и начинается очередной заряд конденсатора – цикл переключений повторяется.



**Рис. 106. Преобразователь напряжения с низковольтным питанием и тиристорно-диносторным ключевым элементом**

Со вторичной обмотки трансформатора  $T2$  снимаются импульсы с амплитудой в несколько киловольт. Частота искровых разрядов равна примерно 20 Гц, но она намного меньше частоты импульсов, снимаемых со вторичной обмотки трансформатора  $T1$ . Происходит это потому, что конденсатор  $C2$  заряжается до напряжения переключения диностора не за один, а за несколько положительных полупериодов. Величина емкости этого конденсатора определя-

ет мощность и длительность выходных разрядных импульсов. Безопасное для диода и управляющего электрода тристора среднее значение разрядного тока выбрано из расчета емкости этого конденсатора и величины импульсного напряжения, питающего каскад. Для этого емкость конденсатора  $C2$  должна быть порядка  $1 \text{ мкФ}$ .

Трансформаторы  $T1$  и  $T2$  самодельные. Первый выполнен на кольцевом ферритовом магнитопроводе типоразмера  $10 \times 6 \times 5$ . Он имеет 540 витков провода ПЭВ-2  $0,1$  с заземленным отводом после 20-го витка. Начало его обмотки присоединяется к транзистору  $VT2$ , конец – к диоду  $VD1$ . Второй трансформатор выполнен на катушке с ферритовым или пермалловым сердечником диаметром  $10 \text{ мм}$ , длиной  $30 \text{ мм}$ .

Катушка с внешним диаметром  $30 \text{ мм}$  и шириной  $10 \text{ мм}$  наматывают проводом ПЭВ-2  $0,1 \text{ мм}$  до полного заполнения каркаса. Перед окончанием обмотки делается заземленный отвод, и последний ряд провода из  $30 \dots 40$  витков наматывается виток к витку поверх изолирующего слоя лакоткани.

Трансформатор  $T2$  по ходу обмотки необходимо пропитывать изолирующим лаком или клеем БФ-2, затем тщательно просушить.

Вместо  $VT1$  и  $VT2$  можно применить любые мало-мощные транзисторы, способные работать в импульсном режиме. Тиристор  $KU101E$  можно заменить на  $KU101Г$ . Источник питания – гальванические элементы с напряжением не более  $1,5 \text{ В}$ , например,  $312$ ,  $314$ ,  $316$ ,  $326$ ,  $336$ ,  $343$ ,  $373$ , или дисковые никель-кадмиевые аккумуляторы типа  $D-0,26Д$ ,  $D-0,55С$  и т. п.

Тиристорный генератор высоковольтных импульсов с сетевым питанием показан на рис. 107 [114].

Во время положительного полупериода сетевого напряжения конденсатор  $C1$  заряжается через резистор  $R1$ , диод  $VD1$  и первичную обмотку трансформатора  $T1$ . Тиристор  $VS1$  при этом закрыт, поскольку отсутствует ток через его управляющий электрод (падение напряжения на диоде  $VD2$  в прямом направлении мало по сравнению с напряжением, необходимым для открывания тиристора).

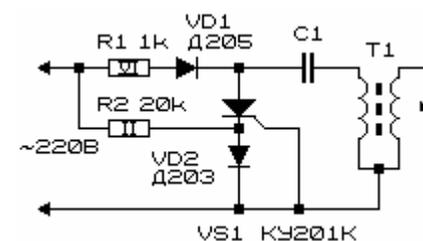


Рис. 107. Электрическая схема преобразователя напряжения с емкостным накопителем энергии и коммутатором на тиристоре

При отрицательном полупериоде диоды  $VD1$  и  $VD2$  закрываются. На катоде тиристора образуется падение напряжения относительно управляющего электрода (минус – на катоде, плюс – на управляющем электроде), в цепи управляющего электрода появляется ток, и тиристор открывается. В этот момент конденсатор  $C1$  разряжается через первичную обмотку трансформатора. Во вторичной обмотке появляется импульс высокого напряжения. И так – каждый период сетевого напряжения.

На выходе устройства формируются двуполярные импульсы высокого напряжения (поскольку при разрядке конденсатора в цепи первичной обмотки возникают затухающие колебания)

Резистор  $R1$  может быть составлен из трех параллельно соединенных МЛТ-2 сопротивлением по  $3 \text{ кОм}$ .

Диоды  $VD1$  и  $VD2$  – должны быть рассчитаны на ток не менее  $300\text{ мА}$  и обратное напряжение не ниже  $400\text{ В}$  ( $VD1$ ) и  $100\text{ В}$  ( $VD2$ ). Конденсатор  $C1$  – МБМ на напряжение не ниже  $400\text{ В}$ . Тиристор  $VS1$  –  $KU201K$ ,  $KU201L$ ,  $KU202K$ - $KU202H$ . Трансформатор  $T1$  – катушка зажигания БЗБ (на  $6\text{ В}$ ) от мотоцикла или автомобиля.

В устройстве может быть использован телевизионный трансформатор строчной развертки  $TBC-110Л6$ ,  $TBC-110ЛА$ ,  $TBC-110АМ$ .

Достаточно типичный преобразователь напряжения с емкостным накопителем энергии показан на рис. 108 [115].

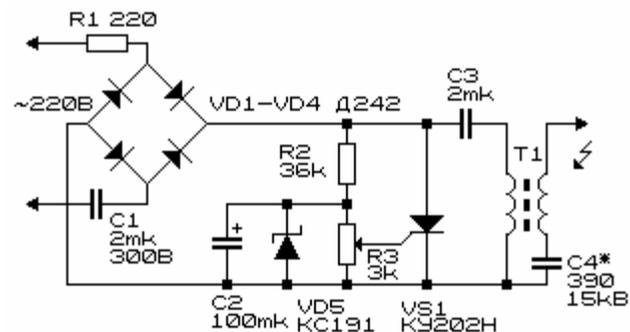


Рис. 108. Тиристорный преобразователь напряжения с емкостным накопителем энергии

Преобразователь содержит гасящий конденсатор  $C1$ , диодный выпрямительный мост  $VD1$ - $VD4$ , тиристорный ключ  $VS1$ , схему управления. В результате заряда накопительного конденсатора  $C2$  повышается напряжение в цепи управления – на конденсаторе  $C2$ . Предельное напряжение на этом конденсаторе ограничено стабилитроном  $VD5$  на уровне  $9\text{ В}$ . Потенциометром  $R3$  устанавливают порог срабатывания тиристора  $VS1$ .

Частота повторения импульсов составляет  $100\text{ Гц}$ . В качестве высоковольтного трансформатора может быть использована автомобильная катушка зажигания. В этом случае выходное напряжение устройства может достигать  $30...35\text{ кВ}$ .

Тиристорный преобразователь напряжения, управляемый импульсами напряжения, снимаемого с релаксационного генератора импульсов, выполненного на динисторе, показан на рис. 109 [116.]. Рабочая частота генератора ( $15...25\text{ Гц}$ ) управляющих импульсов определяется величиной сопротивления  $R2$  и емкостью конденсатора  $C1$ .

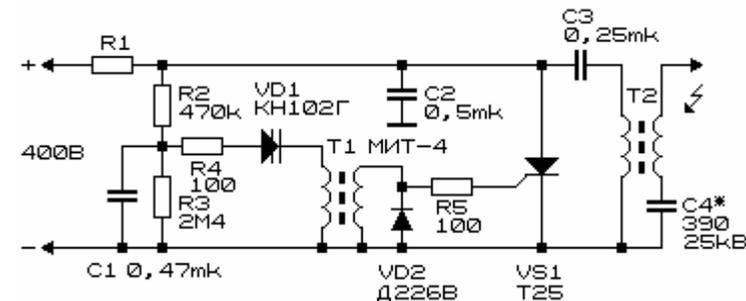
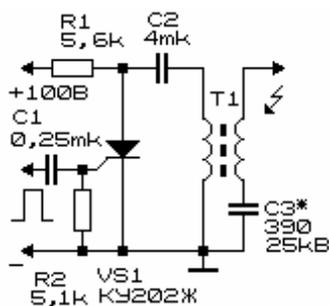


Рис. 109. Электрическая схема тиристорного преобразователя напряжения с внешним импульсным управлением

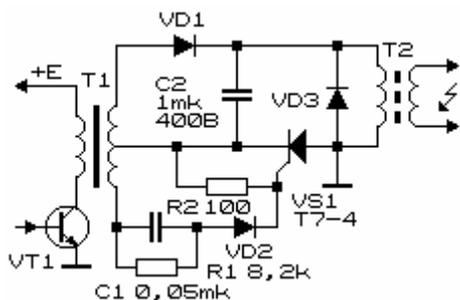
Генератор управляющих импульсов связан с тиристорным ключом через импульсный трансформатор  $T1$  МИТ-4. В качестве выходного трансформатора  $T2$  использован высокочастотный трансформатор от аппарата для дарсонвализации «Искра-2». Напряжение на выходе преобразователя может доходить до  $20...25\text{ кВ}$ .

На рис. 110 показан вариант подачи импульсов управления на тиристор  $VS1$  [117].

Преобразователь напряжения (рис. 111), *Болгария*, содержит два каскада. В первом из них нагрузкой ключевого элемента, выполненного на транзисторе *VT1*, является обмотка трансформатора *T1*. Управляющие импульсы прямоугольной формы периодически включают-выключают ключ на транзисторе *VT1*, подключая-отключая тем самым первичную обмотку трансформатора.



**Рис. 110.** Вариант управления тиристорным коммутатором



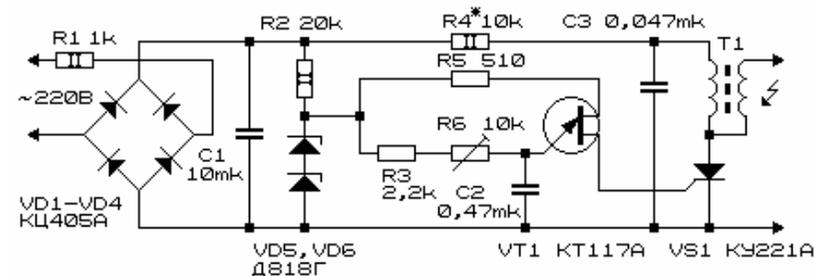
**Рис. 111.** Электрическая схема двухступенчатого преобразователя напряжения

Во вторичной обмотке наводится повышенное пропорционально коэффициенту трансформации напряжение. Это напряжение выпрямляется диодом *VD1* и заряжает

конденсатор *C2*. Этот конденсатор подключен к первичной (низковольтной) обмотке высоковольтного трансформатора *T2* и тиристор *VS1*. Управление работой тиристора осуществляется импульсами напряжения, снимаемыми с дополнительной обмотки трансформатора *T1* через цепочку корректирующих форму импульса элементов.

В результате тиристор периодически включается-отключается. Конденсатор *C2* разряжается на первичную обмотку высокочастотного трансформатора.

Источник высокого напряжения, рис. 112, содержит в качестве управляющего элемента генератор на основе однопереходного транзистора [118].



**Рис. 112.** Преобразователь напряжения с управляющим элементом на однопереходном транзисторе

Сетевое напряжение выпрямляется диодным мостом *VD1-VD4*. Пульсации выпрямленного напряжения сглаживает конденсатор *C1*, ток зарядки конденсатора в момент включения устройства в сеть ограничивает резистор *R1*. Через резистор *R4* заряжается конденсатор *C3*. Одновременно вступает в действие генератор импульсов, выполненный на однопереходном транзисторе *VT1*. Его «спусковой» конденсатор *C2* заряжается через резисторы *R3*, *R6* от

параметрического стабилизатора, выполненного на балластном резисторе  $R2$  и стабилитронах  $VD5$ ,  $VD6$ . Как только напряжение на конденсаторе  $C2$  достигает определенного значения, транзистор  $VT1$  переключается, и на управляющий переход тиристора поступает открывающий импульс.

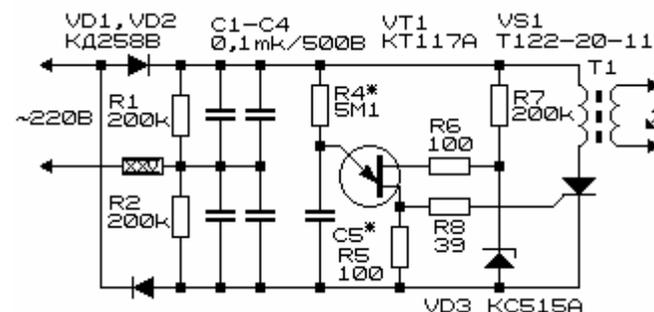
Конденсатор  $C3$  разряжается через тиристор на первичную обмотку трансформатора. На его вторичной обмотке формируется импульс высокого напряжения. Частота следования этих импульсов определяется частотой генератора, которая, в свою очередь, зависит от параметров цепочки  $R3R6C2$ . Подстроечным резистором  $R6$  можно изменять выходное напряжение блока примерно в 1,5 раза. При этом частота генерируемых импульсов регулируется в пределах 250...1000 Гц. Кроме того, выходное напряжение изменяется при подборе резистора  $R4$  (в пределах от 5 до 30 кОм). Пульсации выходного напряжения не превышают 5%, сетевые помехи практически отсутствуют.

Конденсаторы желательно применять бумажные ( $C1$  и  $C3$  – на номинальное напряжение не менее 400 В); на такое же напряжение должен быть рассчитан диодный мост. Вместо указанного на схеме можно использовать тиристор  $T10-50$  или в крайнем случае  $KV202H$ . Стабилитроны  $VD5$ ,  $VD6$  – должны обеспечить суммарное напряжение стабилизации порядка 18 В.

Трансформатор изготовлен на базе строчного  $TBC-110П2$  от черно-белых телевизоров (см. табл. 6). Все первичные обмотки удаляют и наматывают на освободившееся место 70 витков провода  $ПЭЛ$  или  $ПЭВ$  диаметром 0,5...0,8 мм.

Электрическая схема формирователя импульсов высокого напряжения, рис. 113 [119], состоит из диодно-конденсаторного умножителя напряжения (диоды  $VD1$ ,

$VD2$ , конденсаторы  $C1...C4$ ). На выходе этого источника питания получается постоянное напряжение порядка 600 В.



**Рис. 113.** Преобразователь напряжения с удвоителем напряжения сети и генератором запускающих импульсов на однопереходном транзисторе

В качестве порогового элемента устройства использован однопереходный транзистор  $VT1$   $KT117A$ . Напряжение на одной из его баз стабилизировано параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD3$   $KC515A$  (напряжение стабилизации 15 В). Через резистор  $R4$  осуществляется заряд конденсатора  $C5$ . когда напряжение на управляющем электроде однопереходного транзистора превысит напряжение на базе транзистора, происходит его переключение в проводящее состояние, конденсатор  $C5$  разряжается на управляющий электрод тиристора  $VS1$ .

При включении тиристора цепочка конденсаторов  $C1-C4$ , заряженных до напряжения порядка 600...620 В, разряжается на низковольтную обмотку повышающего трансформатора  $T1$ . После этого тиристор отключается, зарядно-разрядные процессы повторяются с частотой, определяемой постоянной  $R4C5$ . Резистор  $R2$  ограничивает ток короткого замыкания при включении тиристора и одновре-

менно является элементом зарядной цепи конденсаторов  $C1-C4$ .

Для управления тиристорным коммутатором может быть использован также генератор импульсов, выполненный на лавинном транзисторе (рис. 114) [43, 44].

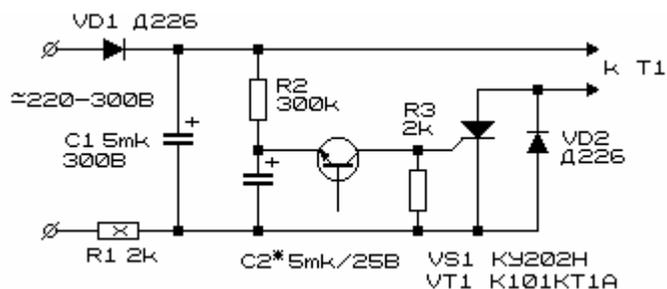


Рис. 114. Фрагмент схемы преобразователя напряжения с использованием запускающего релаксационного генератора импульсов на лавинном транзисторе

В схеме использован лавинный транзистор  $K101KT1$  (либо его заменяющий динистор), а также тиристор  $KY202H$ . Для повышения надежности работы тиристора (рис. 114) параллельно ему подключен защищающий диод  $VD2$ , встречное включение. Более подробно работа релаксационного генератора импульсов на лавинном транзисторе описана ниже.

Устройство, предназначенное для получения «кирlianовских» фотографий, (рис. 115) состоит из блока питания, управляющего (задающего) релаксационного генератора импульсов, тиристорного ключа и высокочастотного трансформатора [43, 44]. В отличие от всех рассмотренных ранее конструкций, в состав устройства входит таймер, позволяющий задавать экспозицию при съемке.

В блок питания устройства входят силовой трансформатор и однополупериодный выпрямитель. Предусмотрена возможность питания устройства от преобразователя напряжения (300 В). Релаксационный генератор импульсов выполнен на биполярном лавинном транзисторе  $VT1$ . Сопротивлением нагрузки генератора являются резистор  $R9$  и управляющий переход тиристора  $VS1$ .  $RC$ - элементами, определяющими характер генерации, являются резисторы  $R4-R7$  и конденсаторы  $C2, C4$ .

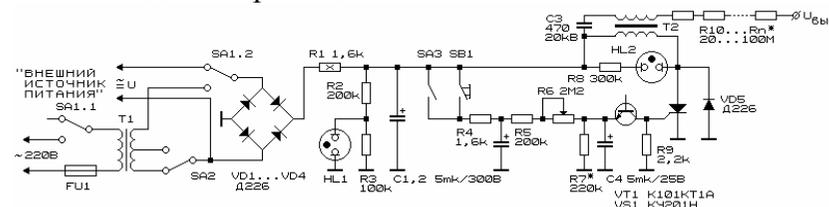


Рис. 115. Схема устройства для получения «кирlianовских» фотоснимков

Нагрузкой тиристорного ключа является обмотка высокочастотного трансформатора  $T2$ . К его повышающей обмотке через цепочку резисторов  $R10...Rn$  подключен рабочий электрод (металлическая пластинка, стеклянная пластинка с прозрачным токопроводящим слоем двуокиси олова или т. п.).

Генератор может работать в режимах непрерывной генерации или разового пуска. В режиме разового пуска при нажатии на кнопку  $SB1$  конденсатор  $C2$  заряжается до напряжения порядка 300 В. Последующий разряд конденсатора  $C2$  происходит через резисторы  $R5-R7$ , одновременно заряжается конденсатор  $C4$ .

Когда напряжение на его обкладках достигает значения напряжения пробоя биполярного лавинного транзистора, происходит пробой транзистора  $VT1$  и разряд конденса-

тора  $C4$  через биполярный лавинный транзистор на сопротивление нагрузки (резистор  $R9$  и управляющий переход тиристора  $VSI$ ). В результате низковольтная обмотка трансформатора  $T2$  оказывается подключенной к конденсатору  $C1$ , происходит разряд конденсатора на указанную обмотку, при этом в повышающей обмотке трансформатора формируются высокочастотные высоковольтные колебания затухающей амплитуды, частота колебаний определяется  $LC$ -значением эквивалентного колебательного контура, а характер затухания – добротностью катушки индуктивности (с учетом шунтирования последней сопротивлением нагрузки).

Поскольку тиристор после разряда конденсатора  $C1$  вновь возвращается в исходное (запертое) состояние, а конденсатор  $C1$  заряжается вновь через резистор  $R1$ , следующий импульс от релаксационного генератора импульсов снова запускает схему генерации высоковольтных импульсов. Генерация происходит до тех пор, пока не разрядится конденсатор  $C2$ . Частота следования импульсов ударного возбуждения по мере разряда конденсатора понижается от единиц  $Гц$  до долей  $Гц$ . Скорость разряда конденсатора (время работы генератора управляющих импульсов) можно изменять, варьируя значением резистора  $R6$ . В режиме «*Непрерывная генерация*» включают тумблер  $SA3$ . В этом случае частота следования управляющих импульсов не изменяется во времени и задается изменением сопротивления потенциометра  $R6$ . Устройство при этом целесообразно включать в сеть через реле времени (например, фотореле).

В качестве трансформатора  $T1$  можно использовать любой силовой трансформатор с соотношением числа витков обмоток 1:1. Конструкция высоковольтного трансфор-

матора, их возможные варианты неоднократно описывались ранее.

Неоновая лампа  $HL1$  предназначена для индикации включения прибора,  $HL2$  – для индикации генерации.

**Техническая характеристика устройства:**

Напряжение на выходе трансформатора: 5...20 кВ.

Частота управляющих импульсов: ед. - доли  $Гц$ .

Режим генерации – непрерывный или разовый пуск.

Время экспозиции при разовом пуске – 5...15 с.

Габаритные размеры – 190х90х55 мм.

Источник питания – сеть 220 В, 50  $Гц$ , либо преобразователь напряжения на 300 В (постоянный ток).

При использовании данного схемного решения появилась возможность задания экспозиции в режиме разового пуска без усложнения схемы, само устройство может быть использовано при работе в полевых условиях.

На рис. 116, 117 показаны принципиальные электрические схемы устройств, специально разработанных для получения изображений в газовом разряде. Авторы этих разработок неизвестны, поэтому генераторы обозначены по территориальному признаку, откуда поступили эти схемы. Номиналы элементов, не обозначенные на схеме, не известны.

«Таллиннско-Краснодарский» генератор (рис. 116) содержит задающий блокинг-генератор управляемой частоты на транзисторе  $МП42$ , времязадающую цепочку  $R4C3$ , тиристорный ключ и высоковольтный повышающий трансформатор.

Генератор отключают тумблером  $SA1$ . Частота повторения управляющих импульсов задается потенциометром  $R1$ ; амплитуда –  $R3$ .

«Вильнюсский» генератор (рис. 117) содержит трансформаторный блок питания, сложную коммутируемую времязадающую  $RC$ - цепочку, тиристорный ключевой элемент, высоковольтный высокочастотный трансформатор, схему управления тиристорным ключом и реле времени (на схеме не показано).

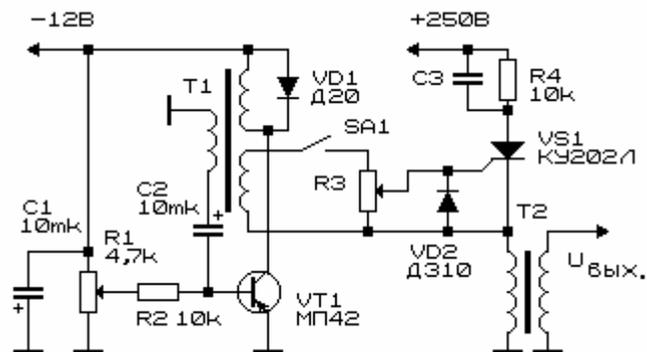


Рис. 116. Генератор для получения «кирлиановских» фотографий на тиристоре

Напряжение порядка 300 В, снимаемое с мостового выпрямителя и фильтра, через резистор  $R2$  заряжает конденсатор(ы)  $C6-C8$ . Низковольтное напряжение порядка 9...15 В, снимаемое со второго мостового выпрямителя и фильтра, поступает на параметрический стабилизатор напряжения, выполненный на стабилитроне  $KC162$ . Стабилизированное напряжение подается через контакты реле (или тумблер) на генератор управляющих импульсов, выполненный на однопереходном транзисторе  $VT1$   $KT117A$ , В. Частота следования импульсов задается потенциометром  $R8$ . Экспозиция задается таймером, выполненным на микросхеме  $KP1006BIII$  при типовом включении. На выходе таймера включено реле  $PЭС-22$ .

Параметры генерируемых выходных сигналов в достаточно широком интервале варьируются переключением ключей  $SA2-SA5$ . В качестве силового трансформатора использован трансформатор  $TA181-127/220-56$ . Выходной высоковольтный трансформатор выполнен на основе телевизионного трансформатора строчной развертки  $TBC-90ЛЦ2$ . В качестве первичной обмотки использовано 20+10 витков провода ПЭЛ диаметром 1,0 мм. На выходе устройства генерируются импульсы напряжением 15...30 кВ частотой 50...150 кГц и частотой модуляции 20...120 Гц.

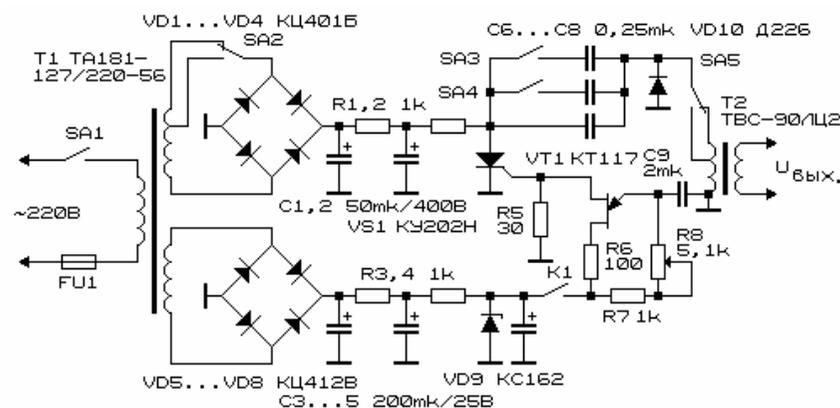


Рис. 117. Генератор высоковольтных импульсов для «кирлиановской» фотографии на тиристоре

Схема преобразователей (рис. 118) подразделяется на блоки: сетевой заградительный фильтр (фильтр помех); электронный регулятор; высоковольтный трансформатор [120].

Схема (рис. 118, верхняя половина) работает следующим образом. Конденсатор  $C3$  заряжается от сетевого напряжения через диодный выпрямитель  $VD1$  и резистор  $R2$  до амплитудного напряжения сети (310 В). Это напряжение

попадает через первичную обмотку трансформатора  $T1$  на анод тиристора  $VS1$ . По другой ветви ( $R1$ ,  $VD2$ ,  $C2$ ) медленно заряжается конденсатор  $C2$ . Когда в процессе зарядки конденсатора  $C2$  достигается пробойное напряжение диода  $VD4$  (в пределах 25...35 В), конденсатор  $C1$  разряжается через управляющий электрод тиристора  $VS1$  и открывает его.

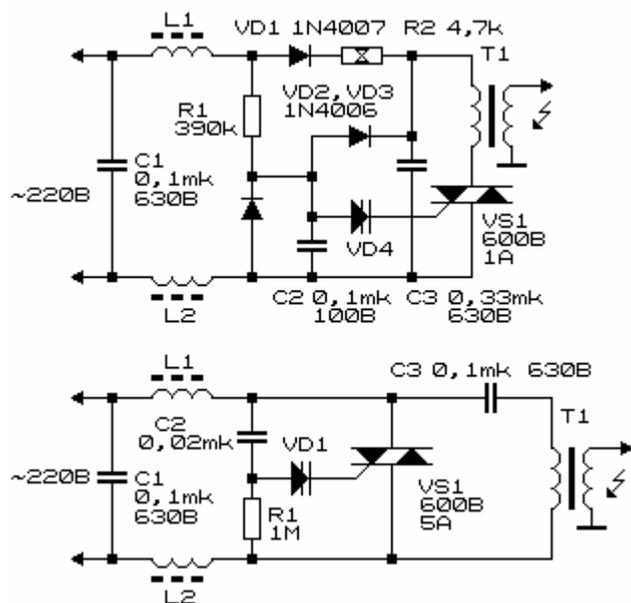


Рис. 118. Электрическая схема преобразователей напряжения с сетевыми фильтрами

Через открытый тиристор и первичную обмотку  $T1$  практически мгновенно разряжается конденсатор  $C2$ . Импульсный изменяющийся ток индуцирует во вторичной обмотке  $T1$  высокое напряжение, величина которого может превысить 10 кВ. После разряда конденсатора тиристор закрывается, и процесс повторяется.

В качестве высоковольтного трансформатора используют телевизионный трансформатор, с которого удаляют первичную обмотку. Для новой первичной обмотки используется обмоточный провод диаметром 0,8 мм. Количество витков – 25.

Для изготовления катушек индуктивности заградительного фильтра  $L1$ ,  $L2$  лучше всего подходят высокочастотные ферритовые сердечники с примерно 20 витками обмоточного провода диаметром 0,6...0,8 мм.

Двухступенчатый преобразователь напряжения, (автор – *Andrés Estaban de la Plaza* [47]), содержит трансформаторный генератор импульсов, выпрямитель, времязарядную  $RC$ - цепочку, ключевой элемент на тиристоре (симисторе), высоковольтный резонансный трансформатор и схему управления работой тиристора (рис. 119).

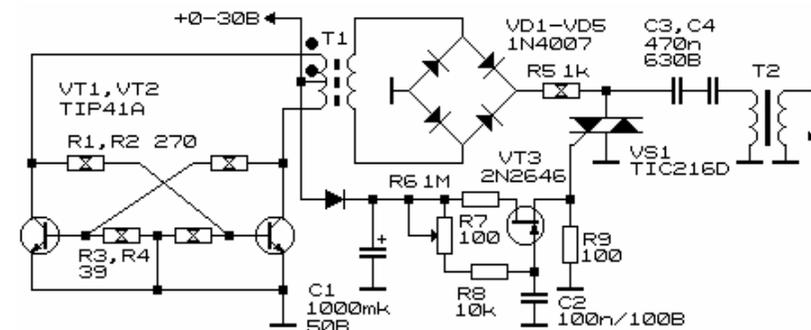


Рис. 119. Электрическая схема двухступенчатого преобразователя напряжения с управляющим элементом на полевом транзисторе

Низковольтный трансформаторный преобразователь напряжения с перекрестными обратными связями, собранный на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , вырабатывает импульсы с частотой повторения 850 Гц. Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  для

облегчения работы при протекании больших токов установлены на теплоотводах – радиаторах, выполненных из меди или алюминия.

Выходное напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора  $T1$  низковольтного преобразователя, выпрямляется диодным мостом  $VD1-VD4$  и через резистор  $R5$  заряжает цепочку последовательно включенных высоковольтных конденсаторов  $C3$  и  $C4$ .

Управление порогом включения тиристора производится регулятором напряжения, в состав которого входит полевой транзистор  $VT3$ .

Далее принцип работы преобразователя существенно не отличается от описанных ранее процессов: происходит периодический заряд/разряд конденсаторов на низковольтную обмотку трансформатора, генерируются затухающие электрические колебания. Выходное напряжение преобразователя при использовании на выходе в качестве повышающего трансформатора катушки зажигания, внешний вид которой приведен на рис. 53, достигает  $40...60$  кВ при резонансной частоте порядка  $5$  кГц.

Трансформатор  $T1$  (*flyback transformer* – выходной трансформатор строчной развертки), содержит  $2 \times 50$  витков провода диаметром стандарта США AWG #18 (1,024 мм), намотанных бифиллярно. Вторичная обмотка содержит 1000 витков AWG #28...#32 (0,321...0,202 мм).

Отметим, что в качестве управляемых ключевых элементов могут быть использованы более высокочастотные коммутирующие элементы на основе современных биполярных и полевых транзисторов. Коэффициент полезного действия преобразователей с выходными ключами на полевых транзисторах намного выше за счет малого (до долей Ом) сопротивления канала транзистора.

## 5.2. Преобразователи напряжения с внешним возбуждением и индуктивными накопителями энергии

Все рассмотренные выше конструкции преобразователей имели в качестве накопителя энергии конденсатор. Не меньший интерес представляют преобразователи, использующие в качестве такового элемента индуктивности. Принцип действия таких преобразователей был подробно изложен в главе 2.

В своем подавляющем большинстве традиционные конструкции подобного рода преобразователей ранних лет содержали механический коммутатор индуктивности. Недостатки такого схемного решения очевидны: это повышенный износ контактных пар, необходимость их периодической чистки и регулировки, высокий уровень помех.

С появлением современных быстродействующих электронных коммутаторов конструкции преобразователей напряжения с коммутируемым индуктивным накопителем энергии заметно упростились и стали конкурентоспособными.

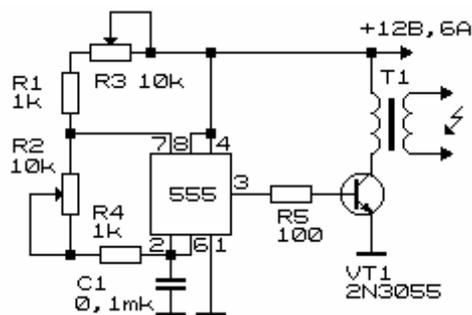
Один из наиболее простых преобразователей с индуктивным накопителем энергии показан на рис. 120 [46].

Генератор прямоугольных импульсов по типовой схеме собран на микросхеме 555 (*KP1006BIII*). Параметры генерируемых импульсов регулируются потенциометрами  $R2$  и  $R3$ . Частоту импульсов управления можно также изменять переключением емкости времязадающего конденсатора  $C1$ . С выхода генератора управляющие импульсы через резистор  $R5$  подаются на базу ключевого (коммутирующего) элемента – мощного транзистора  $VT1$ .

Этот транзистор в соответствии с длительностью и частотой следования управляющих импульсов коммутирует первичную обмотку трансформатора  $T1$ .

В итоге на выходе преобразователя формируются импульсы высоковольтного напряжения.

Внешний вид трансформатора  $T1$  показан на рис. 52.



**Рис. 120.** Электрическая схема высоковольтного преобразователя на основе индуктивного накопителя энергии

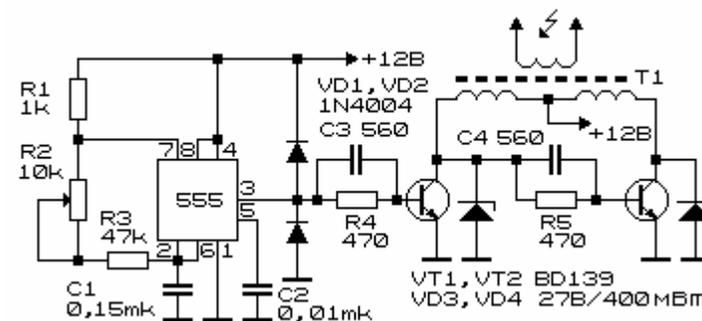
Преобразователь напряжения (рис. 121), *Болгария*, также содержит задающий генератор прямоугольных импульсов, выполненный на микросхеме 555 (*K1006ВИ1*). Частота импульсов плавно регулируется потенциометром  $R2$  в пределах от 85 до 100 Гц. Эти импульсы через  $RC$ -цепочки поступают на ключевые элементы, выполненные на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ . Стабилитроны  $VD3$  и  $VD4$  защищают транзисторы от повреждения при работе на индуктивную нагрузку.

Преобразователь (рис. 121) может быть использован как самостоятельно для получения высокого напряжения (обычно до 1...2 кВ), либо как промежуточная ступень «накачки» других преобразователей.

В качестве ключевых элементов преобразователей с индуктивным накопителем энергии долгие годы использовали мощные биполярные транзисторы. Их недостатки очевидны: довольно высоки остаточные напряжения на открытом ключе, как следствие, потери энергии, перегрев транзисторов.

По мере совершенствования полевых транзисторов, последние начали оттеснять биполярные транзисторы в схемах источников питания, преобразователях напряжения.

Для современных мощных полевых транзисторов сопротивление открытого ключа может достигать десятых...сотых долей Ом, а рабочее напряжение достигать до 1...2 кВ.



**Рис. 121.** Преобразователь напряжения на основе индуктивного накопителя энергии

На рис. 121 приведена электрическая схема преобразователя напряжения, выходной каскад которого выполнен на полевом транзисторе *MOSFET*. В качестве каскада предусилителя перед полевым транзистором и генератором управляющих импульсов использован биполярный транзистор с большим коэффициентом передачи.

Задающий генератор собран на КМОП-микросхеме CD4049 по канонической схеме. Как сами выходные каскады, так и каскады формирования управляющих сигналов, показанные на рис. 119-123 и далее, взаимозаменяемы и могут быть использованы в любом сочетании.

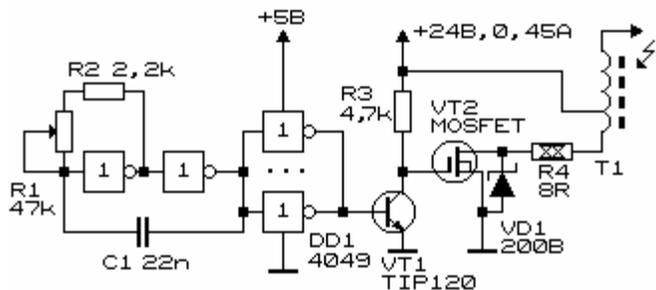


Рис. 122. Электрическая схема высоковольтного преобразователя с ключевым элементом на основе полевого транзистора

Выходной каскад преобразователя конструкции П. Брянцева, выполненный на современной отечественной элементной базе, показан на рис. 123.

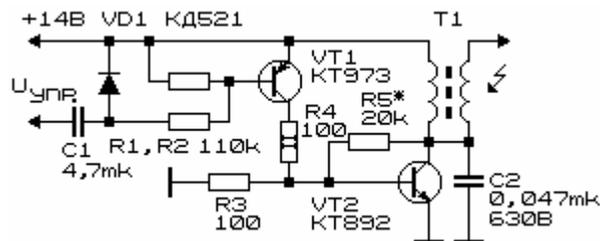


Рис. 123. Входной каскад преобразователя на напряжении П. Брянцева на составном транзисторе

При подаче на вход схемы управляющих импульсов транзисторы VT1 и VT2 кратковременно открываются. В

результате катушка индуктивности кратковременно подключается к источнику питания. Конденсатор C2 сглаживает пик импульса напряжения. Резистивный делитель R3 и R5 ограничивают и стабилизируют максимальное напряжение на коллекторе транзистора VT2. При достижении нужного напряжения VT2 приоткрывается, ограничивая дальнейший рост напряжения.

В качестве трансформатора T1 использована катушка зажигания Б115. Ее основные параметры:  $R_i=1,6 \text{ Ом}$ ,  $I<8 \text{ А}$ ,  $U_i<330 \text{ В}$ . Коэффициент трансформации  $K=68$ . Для катушки Б116 ( $R_i=0,6 \text{ Ом}$ ,  $I_i<20 \text{ А}$ ,  $U_i<160 \text{ В}$ ,  $K=154$ ) оптимальная величина  $R5=11 \text{ кОм}$ .

Следующие две конструкции высоковольтных преобразователей напряжения с использованием индуктивных накопителей энергии (рис. 124, 125) разработал *Andrés Estaban de la Plaza* [41, 121].

Первый из преобразователей [41] содержит задающий генератор прямоугольных импульсов, промежуточный и выходной каскад, высоковольтный трансформатор.

Задающий генератор выполнен на основе триггера Шмитта (КМОП-микросхема 4093). Использование триггера Шмитта вместо общеиспользуемых логических элементов НЕ, см. например, рис. 122, позволяет получить импульсы с более крутыми фронтами, и, следовательно, снизить потери энергии на ключевых элементах.

Для согласования КМОП-элементов с силовым транзистором VT2 использован предусилитель на транзисторе VT1. Выходной трансформатор T1, внешний вид которого приведен на рис. 50, коммутируется силовым биполярным транзистором VT2. Этот транзистор установлен на теплоотводящей пластине.

Частоту импульсов генератора прямоугольных импульсов ступенчато переключают переключателем *SA1*. Соотношение длительность импульса/пауза и частоту следования импульсов плавно регулируют потенциометрами *R1* и *R2*.

Переключателем *SA2* включают/отключают резистор *R6*, включенный последовательно с первичной обмоткой повышающего трансформатора. Тем самым ступенчато регулируют выходную мощность преобразователя.

Рабочая частота генератора в его пяти поддиапазонах регулируется в пределах 0,6...8,5 кГц; 1,5...20 кГц; 5,3...66 кГц; 13...170 кГц; 43...>200 кГц.

Первичная обмотка трансформатора *T1* (рис. 50) имеет 40 витков диаметром 1,024 мм (#18 AWG). Выходное напряжение преобразователя на частотах ниже 5 кГц достигает 20 кВ, в области частот 50...70 кГц выходное напряжение снижается до 5...10 кВ.

Выходная мощность высокочастотного сигнала устройства может достигать до 30 Вт. В этой связи при использовании данной конструкции для газоразрядной фотосъемки необходимо принять особые меры по ограничению выходного тока.

Высоковольтный генератор, рис. 125 [121] имеет более сложную конструкцию.

Его задающий генератор выполнен на операционном усилителе *DA1* (CA3140). Для питания задающего генератора и буферного каскада (микросхема *DD1* – 4049) используется стабилизатор напряжения на 12 В, выполненный на основе интегральной микросхемы *DA2* 7812.

Предоконечный каскад выполнен на комплементарных транзисторах *VT1* и *VT2*, оконечный – на мощном транзисторе *VT3*.

Соотношение длительность/пауза регулируют потенциометром *R7*; частоту импульсов – потенциометром *R4*.

Частоту генерации можно изменять ступенчато – переключением емкости конденсатора *C1*. Исходная частота генерации близка к 20 кГц.

Первичная обмотка модифицированного трансформатора (рис. 50) содержит 5...10 витков, ее индуктивность – порядка 0,5 мГн. Параллельно этой обмотке в качестве элемента защиты выходного транзистора от перенапряжения включен варистор *R9*.

Следует отметить, что схем преобразователей с индуктивными накопителями энергии, разработано очень много. Более подробно с некоторыми из них можно ознакомиться в специальной литературе, см, например, [40, 122-124].

В качестве последнего примера генераторов этой серии приведем описание стабилизированного преобразователя напряжения, рис. 126 [125].

Импульсный блок питания состоит из выпрямителей сетевого напряжения, задающего генератора, формирователя прямоугольных импульсов регулируемой ширины, двухкаскадного усилителя мощности, выходных выпрямителей и схемы стабилизации выходного напряжения.

Задающий генератор, выполненный на элементах микросхемы *DD1.1*, *DD1.2* (K555ЛА3), вырабатывает прямоугольные импульсы частотой 150 кГц. На элементах *DD1.3*, *DD1.4* собран RS-триггер, на выходе которого частота выходных сигналов составляет 75 кГц. На элементах *DD2.1*, *DD2.2* (K555ЛИИ1) реализован узел управления шириной коммутирующих импульсов. Регулировка ширины импульсов осуществляется через оптронную пару *U1.1*, *U1.2*.

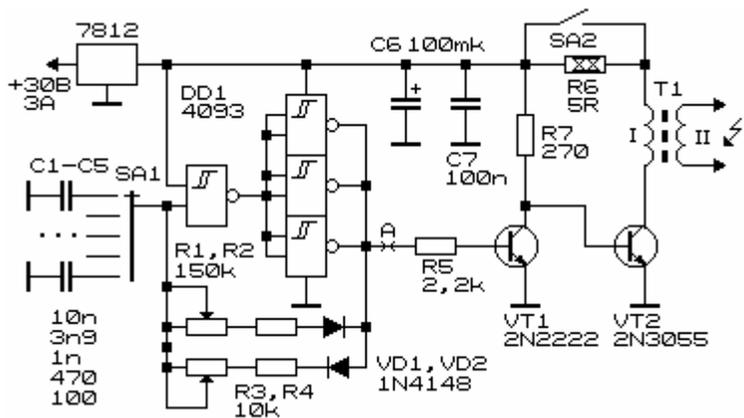


Рис. 124. Электрическая схема преобразователя напряжения с задающим генератором на основе триггера Шмитта

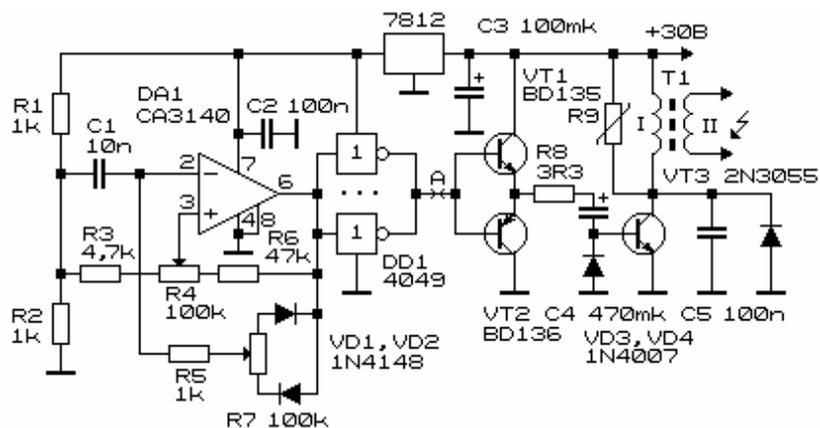


Рис. 125. Электрическая схема преобразователя напряжения с задающим генератором на основе операционного усилителя

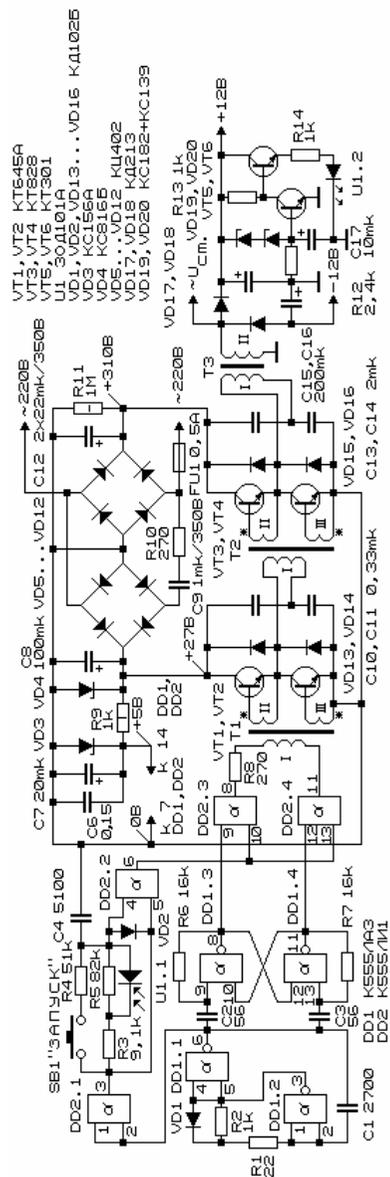


Рис. 126. Электрическая схема импульсного преобразователя напряжения

Трансформаторы *T1*, *T2* выполнены на ферритовых кольцах *K10х6х4,5 3000 НМ*, *T3* – *K28х16х9 3000 НМ*. Первичная обмотка трансформатора *T1* содержит 165 витков провода *ПЭЛШО 0,12*, вторичные – 2х65 витков *ПЭЛ-2 0,45* (намотка в два провода). Первичная обмотка трансформатора *T2* содержит 165 витков провода *ПЭВ-2 0,15* мм, вторичные – 2х40 витков того же провода. Первичная обмотка трансформатора *T3* содержит 31 виток провода *МГШД*, продетого в кембрик и имеющего сечение 0,39 мм<sup>2</sup>, вторичная обмотка имеет 3х6 витков провода *ПЭВ-2 1,27 мм* (параллельное включение). При подключении обмоток трансформаторов необходимо правильно их фазировать. Начала обмоток показаны на рис. звездочками.

Выходной каскад формирователя коммутирующих импульсов собран на элементах *DD2.3*, *DD2.4*. Максимальная мощность на выходе формирователя импульсов достигает  $40 \text{ мВт}$ . Первый каскад усиления мощности выполнен на транзисторах *VT1*, *VT2 KT645A*, второй – на транзисторах *VT3*, *VT4 KT828* или более современных. Выходная мощность каскадов – 2 и  $60...65 \text{ Вт}$ , соответственно.

На транзисторах *VT5*, *VT6*, оптроне *U1.1*, *U1.2* собрана схема стабилизации выходного напряжения. Если напряжение на выходе блока питания ниже нормы ( $12 \text{ В}$ ), стабилитроны *VD19*, *VD20 (KC182+KC139)* закрыты, транзистор *VT5* закрыт, транзистор *VT6* – открыт, через светодиод оптрона *U1.2* протекает ток, ограниченный сопротивлением *R14*; сопротивление фотодиода оптрона *U1.1* минимально. Сигнал, снимаемый с выхода элемента *DD2.1* и подаваемый на входы схемы совпадения *DD2.2* напрямую и через регулируемый элемент задержки (*R3-R5*, *C4*, *VD2*, *U1.1*) в силу малой величины *RC*- постоянной поступает практически одновременно на входы схемы совпадения (элемент *DD2.2*). На выходе этого элемента формируются широкие управляющие импульсы. На первичной обмотке трансформатора *T1* (выходах элементов *DD2.3*, *DD2.4*) формируются двуполярные импульсы регулируемой ширины.

Если по какой-либо причине напряжение на выходе блока питания будет увеличиваться сверх нормы, через стабилитроны *VD19*, *VD20* начинает протекать ток, транзистор *VT5* приоткрывается, *VT6* – закрывается, уменьшается ток через светодиод оптрона *U1.2*, возрастает сопротивление фотодиода оптрона *U1.1*. Ширина управляющих импульсов уменьшается, происходит автоматическое регулирование выходного напряжения (мощности). При коротком замыкании нагрузки светодиод оптрона *U1.2* гаснет, сопротивление фотодиода оптрона *U1.1* – максимально, а ширина управляющих импульсов – минимальна. Кнопка *SB1* предназначена для перезапуска схемы.

При максимальной ширине управляющих импульсов положительные и отрицательные импульсы не перекрываются во времени, поскольку между ними существует временной зазор, обусловленный наличием резистора *R3* в *RC*-формирующей цепи. Тем самым снижается вероятность протекания сквозных токов через выходные относительно низкочастотные транзисторы второго каскада усиления мощности, имеющие достаточно большое время рассасывания избыточных носителей на базовом переходе. Выходные транзисторы установлены на ребристые теплоотводящие радиаторы с площадью теплосъема не менее  $200 \text{ см}^2$ .

Каскады усиления мощности и схема формирования двуполярных импульсов получают питание от выпрямителей, выполненных на диодных мостах *VD5-VD12* и элементах *R9-R11*, *C6-C9*, *C12*, *VD3*, *VD4*.

Блок питания работоспособен в диапазоне изменения сетевого напряжения  $130...250 \text{ В}$ . Максимальная выходная мощность при симметричной нагрузке достигает  $60...65 \text{ Вт}$  (стабилизированное напряжение положительной и отрицательной полярности  $12 \text{ В}$  и стабилизированное напряжение переменного тока частотой  $75 \text{ кГц}$ , снимаемые с вторичной обмотки трансформатора *T3*). Напряжение пульсаций на выходе блока питания не превышает  $0,6 \text{ В}$ . Высоковольтная обмотка трансформатора на рисунке не показана.

При налаживании блока питания сетевое напряжение на него подают через разделительный трансформатор или феррорезонансный стабилизатор с изолированным от сети выходом. Все перепайки в блоке допустимо производить только при полном отключении устройства от сети. Последовательно с выходным каскадом на время налаживания устройства рекомендуется включить лампу накаливания  $60 \text{ Вт}$  на  $220 \text{ В}$ . Эта лампа защитит выходные транзисторы в случае ошибок в монтаже. Оптодод *U1.1*, *U1.2* должен быть рассчитан на напряжение пробоя изоляции не менее  $400 \text{ В}$ . Работа устройства без нагрузки не допускается.

### 5.3. Автогенераторные преобразователи напряжения с индуктивной обратной связью

В генераторах с самовозбуждением (автогенераторах) для возбуждения электрических колебаний обычно используется положительная обратная связь. Существуют также автогенераторы с отрицательным динамическим сопротивлением, однако в качестве высоковольтных преобразователей практически не используются.

Наиболее простой однокаскадный преобразователь напряжения на основе автогенератора показан на рис. 127 [42]. Этот вид генераторов получил название блокинг-генераторов. Фазовый сдвиг  $360^\circ$  для обеспечения условия генерации колебаний в нем определяется наличием транзистора и фазированным включением обмоток.

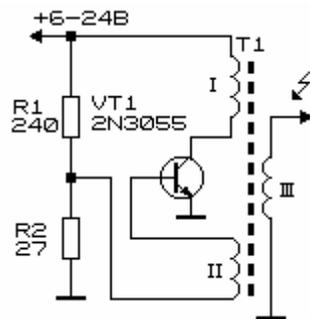


Рис. 127. Высоковольтный преобразователь с трансформаторной обратной связью

Блокинг-генератор позволяет получать короткие импульсы при большой скажности. По форме эти импульсы приближаются к прямоугольным. Емкости колебательных контуров блокинг-генератора, как правило, невелики и обусловлены межвитковыми емкостями, емкостью монта-

жа. Предельная частота генерации блокинг-генератора – сотни  $\kappa\Gamma\text{ц}$ . Недостатком этого вида генераторов является выраженная зависимость частоты генерации от изменения питающего напряжения.

Резистивный делитель в цепи базы транзистора преобразователя (рис. 127) предназначен для создания начального смещения на базе транзистора. В качестве трансформатора  $T1$  использован модифицированный строчный трансформатор (рис. 51). Коллекторная обмотка трансформатора  $T1$  (рис. 127) содержит 13 витков.

При питании преобразователя от автомобильного аккумулятора напряжением 13,5 В на выходе устройства можно получить искру дюймового размера.

Несколько видоизмененный вариант преобразователя с трансформаторной обратной связью представлен на рис. 128 [119].

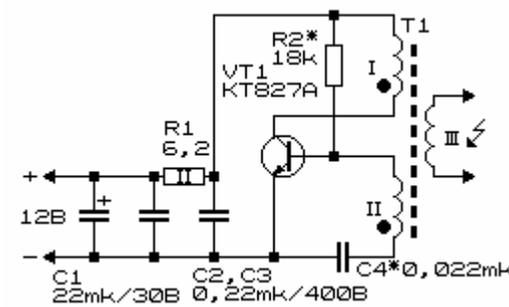


Рис. 128. Основной или промежуточный блок источника высоковольтного напряжения на основе автогенераторного преобразователя

Автогенератор работает на частоте порядка 30  $\kappa\Gamma\text{ц}$ . На выходе преобразователя формируется напряжение ампли-

тудой до 1 кВ (определяется количеством витков повышающей обмотки трансформатора).

Трансформатор *T1* выполнен на диэлектрическом каркасе, вставляемом в броневую сердечник *B26* из феррита *M2000HM1* (*M1500HM1*). Первичная обмотка содержит 6 витков; вторичная обмотка – 20 витков провода *ПЭЛШО* диаметром 0,18 мм (0,12...0,23 мм). Повышающая обмотка для достижения выходного напряжения порядка 700...800 В имеет примерно 1800 витков провода *ПЭЛ* диаметром 0,1 мм. Через каждые 400 ее витков при намотке укладывается диэлектрическая прокладка из конденсаторной бумаги, слои пропитывают конденсаторным или трансформаторным маслом. Места выводов катушки заливают парафином.

Этот преобразователь может быть использован в качестве промежуточного для питания последующих ступеней (например с электрическими разрядниками или тиристорами) формирования высокого напряжения.

Следующий преобразователь напряжения (*США*) также выполнен на одном транзисторе (рис. 129). Для стабилизации напряжения, подаваемого на базу, использован стабилизатор напряжения на основе трех последовательно включенных полупроводниковых диодов *VD1-VD3* (прямое смещение).

Коллекторный переход транзистора *VT1* защищен конденсатором *C2*, кроме того, параллельно коллекторной обмотке трансформатора *T1* подключена цепочка из диода *VD4* и стабилитрона *VD5*.

Генератор вырабатывает импульсы, по форме близкие к прямоугольным. Частота генерации – 10 кГц определяется величиной емкости конденсатора *C3*.

Импульсный преобразователь с самовозбуждением показан на рис. 130 [126]. Это устройство вырабатывает пакеты высокочастотных высоковольтных колебаний.

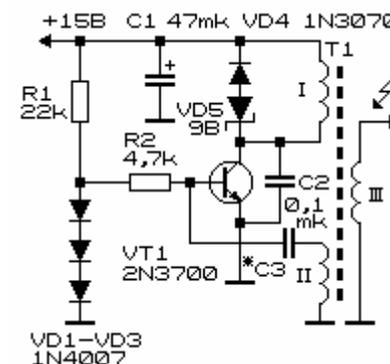


Рис. 129. Высоковольтный преобразователь с трансформаторной обратной связью

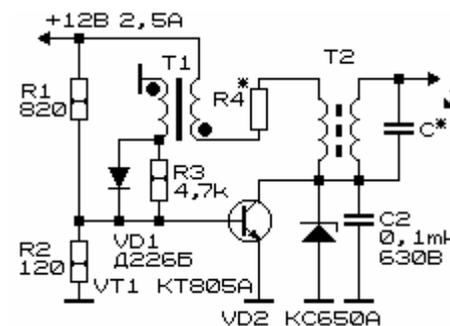


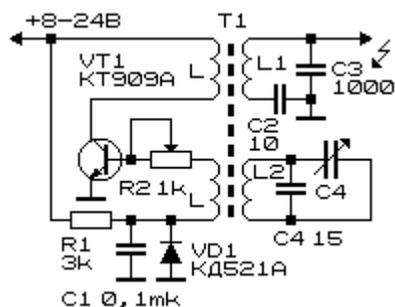
Рис. 130. Электрическая схема импульсного преобразователя напряжения с самовозбуждением

Автогенератор импульсов высокого напряжения собран на транзисторе *VT1*, трансформаторе обратной связи *T1* и катушке зажигания *T2*. Частота генерации – около 150 Гц. Конденсаторы *C\**, *C2* и резистор *R3* определяют режим работы генератора.

Трансформатор  $T1$  выполнен на магнитопроводе Ш14х18. Обмотка  $I$  состоит из 18 витков провода ПЭВ-2 0,86 мм, намотанных в два провода, а  $II$  – из 72 витков провода ПЭЛШО 0,3 мм.

Стабилитрон  $VD2$  укреплен в центре дюралюминиевого пластинчатого радиатора размерами 40х40х4 мм. Этот стабилитрон можно заменить цепочкой стабилитронов с суммарным напряжением стабилизации 150 В. Транзистор  $VT1$  также установлен на радиаторе размерами 50х50х4 мм.

Резонансный преобразователь напряжения с самовозбуждением описан в работе *Е.В. Крылова* [127]. Преобразователь выполнен на высокочастотном мощном транзисторе  $VT1$  *КТ909А* (рис. 131).



**Рис. 131. Резонансный высоковольтный преобразователь с трансформаторной обратной связью**

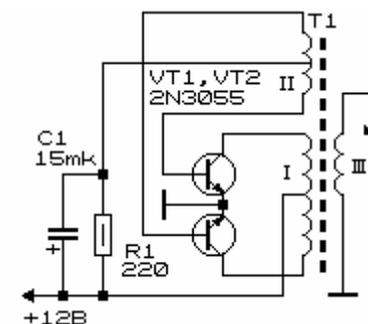
Трансформатор преобразователя выполнен на фторопластовом каркасе диаметром 12 мм с использованием ферритового стержня 150ВЧ размером 10х120 мм. Катушка  $L1$  содержит 50 витков,  $L2$  – 35 витков провода ЛЭШО 7х0,07 мм. Катушки низковольтной половины устройства имеют по одному витку провода в политетрафторэтиленовой изоляции. Они намотаны поверх катушки  $L2$ .

Рабочее напряжение преобразователя – 1,5 кВ (максимальное – 2,5 кВ). Частота преобразования – 2,5 МГц. Потребляемая мощность – 5 Вт. Выходное напряжение устройства изменяется от 50 до 100% при увеличении напряжения питания с 8 до 24 В.

Конденсатором переменной емкости  $C4$  трансформатор настраивают в резонанс. Потенциометром  $R2$  устанавливают рабочую точку транзистора, регулируют уровень положительной обратной связи и форму генерируемых сигналов.

Преобразователь безопасен в работе: при низкоомной нагрузке высокочастотная генерация срывается.

Двухтактный трансформаторный преобразователь напряжения показан на рис. 132



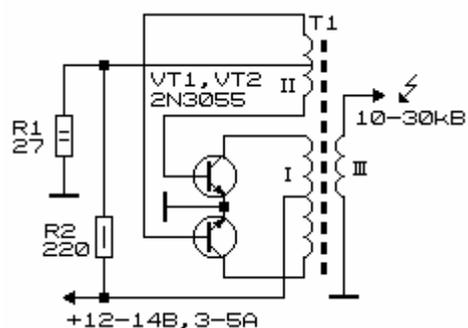
**Рис. 132. Двухтактный высоковольтный преобразователь с трансформаторной обратной связью**

Трансформатор высоковольтного преобразователя (рис. 132) может быть выполнен с использованием ферритового незамкнутого сердечника круглого или прямоугольного сечения, а также на основе телевизионного строчного трансформатора. При использовании ферритового сердечника круглой формы диаметром 8 мм число витков высоковольтной обмотки в зависимости от требу-

мой величины выходного напряжения может достигать 8000 витков диаметром 0,15...0,25 мм. Коллекторные обмотки содержат по 14 витков провода диаметром 0,5...0,8 мм. Обмотки обратной связи (базовые обмотки) содержат по 6 витков того же провода. При подключении обмоток следует соблюдать их фазировку. Выходное напряжение преобразователя – до 8 кВ.

В качестве транзисторов преобразователя могут быть использованы транзисторы отечественного производства типа, например, *КТ818*.

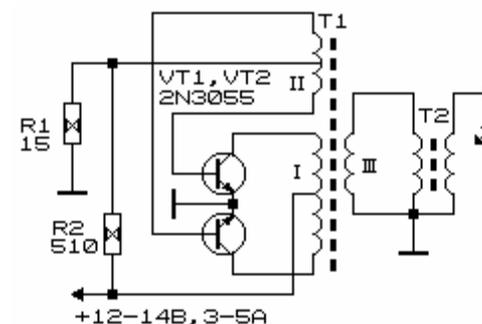
Подобный преобразователь напряжения показан на рис. 133 [128]. Основное различие заключается в цепях подачи смещения на базы транзисторов.



**Рис. 133. Вариант высоковольтного преобразователя с трансформаторной обратной связью**

Число витков первичной (коллекторной) обмотки – 2x5 витков диаметром 1,29 мм; вторичной – 2x2 витков диаметром 0,64 мм. Выходное напряжение преобразователя целиком определяется количеством витков высоковольтной обмотки и может достигать до 10...30 кВ.

Следующий высоковольтный источник импульсного напряжения с двухкаскадным преобразованием показан на рис. 134. Электрическая схема его первого каскада достаточно традиционна и практически не отличается от рассмотренных ранее конструкций.



**Рис. 134. Высоковольтный преобразователь с трансформаторной обратной связью и двойным трансформаторным преобразованием напряжения**

Отличие устройства (рис. 134) заключается в использовании второго каскада повышения напряжения, использовании второго повышающего трансформатора. Это заметно повышает надежность устройства, упрощает конструкцию трансформаторов и обеспечивает эффективную изоляцию между входом и выходом устройства.

Трансформатор *T1* выполнен на сердечнике из трансформаторной стали Ш-образного сечения. Сечение средней наборной части сердечника составляет 16x16 мм. Его коллекторные обмотки имеют 2x60 витков диаметром 1,0 мм.

Катушки обратной связи содержат 2x14 витков провода диаметром 0,7 мм. Повышающая обмотка трансформатора *T1*, намотанная через несколько слоев межслойной

изоляции, имеет 20...130 витков провода диаметром 1,0 мм. В качестве выходного (высоковольтного) трансформатора использована катушка зажигания автомобиля, рассчитанная на питание от 12 или 6 В.

Ниже (рис. 135-138) приведены другие несложные схемы аппаратов для съемки свечения объектов в поле токов высокой частоты (получения фотографий свечения биологических и абиологических объектов, реализации “кирлиановской фотографии” или, говоря точнее, фотографии по методу *Наркевича-Йодко – Кирлиан*).

Генераторы собраны из доступных типовых элементов и способны работать как от автономных (аккумуляторы), так и от сетевых блоков питания с дозировкой продолжительности воздействия [45].

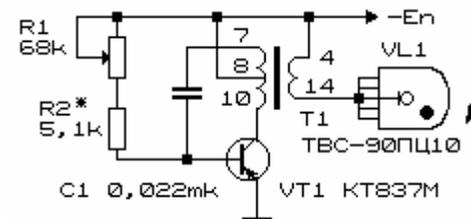
Устройство (рис. 135) выполнено на *p-n-p* транзисторе *VT1 KT837M*, установленном на теплоотводящей пластине из меди или алюминия. Генератор собран по традиционной схеме с индуктивной обратной связью, образуемой частью обмотки трансформатора *T1*. Регулирование выходной мощности (выходного напряжения) осуществляется потенциометром *R1* за счет изменения тока базы транзистора *VT1*.

Питание генератор может получать как от аккумуляторной батареи напряжением 12,6 В (облегченный режим работы) или 24 В, так и от сетевого блока питания.

Возможный вариант реализации сетевого блока питания для генераторов на транзисторах структуры *n-p-n* приведен на рис. 136.

Блок питания обеспечивает работу аппарата при пониженном (15 В) и повышенном (25 В) напряжении (переключатель *SA2*), имеет переключатель-выключатель *SA1* рода питания (от сети или от аккумулятора), коммутатор

включения-выключения модуляции *SA3*, позволяющий питать генератор пульсирующим напряжением с диодного моста (при сетевом питании).



**Рис. 135. Генератор для фотосъемки в поле токов высокой частоты с газонаполненной лампой – электродом**

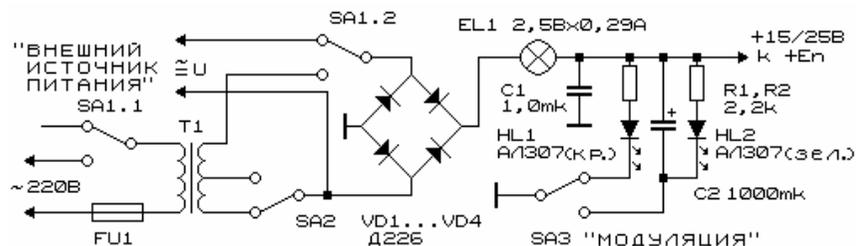
Для индикации выходной (подводимой) мощности предусмотрен элемент индикации – лампа накаливания *EL1* (2,5 Вx0,29 А). В целях упрощения схемы этот элемент может быть исключен. Если необходима количественная оценка потребляемого устройством тока, взамен лампы накаливания следует включить миллиамперметр на ток до 300 мА.

Питание генератора, выполненного на транзисторе структуры *p-n-p* (рис. 135) может осуществляться от блока питания (рис. 136) со сменой полярности включения полупроводниковых элементов и электролитического конденсатора.

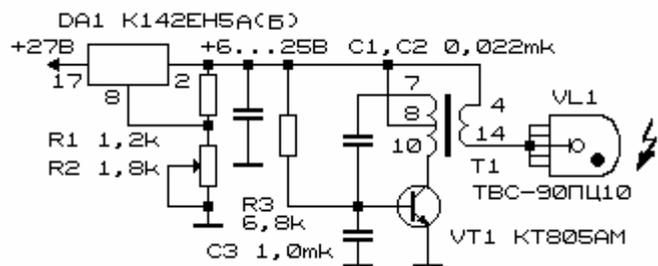
Вариант генератора на транзисторе *n-p-n* структуры (*KT805AM*) приведен на рис. 137. Питание устройства осуществляется от регулируемого стабилизатора напряжения 6...25 В, выполненного на микросхеме *DA1 K142EH5A(Б)*. Режим модуляции в схеме не предусмотрен.

Наиболее совершенным является генератор, изображенный на рис. 138. Генератор имеет таймер, позволяю-

щий дозировать время процедуры от нескольких *секунд* до нескольких *минут*, допускает эксплуатацию как в непрерывном режиме, так и в режиме импульсных посылок высоковольтных импульсов регулируемой длительности, предусматривает возможность наложения дополнительной модуляции пульсирующим током частотой 100 Гц.



**Рис. 136. Источник питания генераторов высоковольтных импульсов**

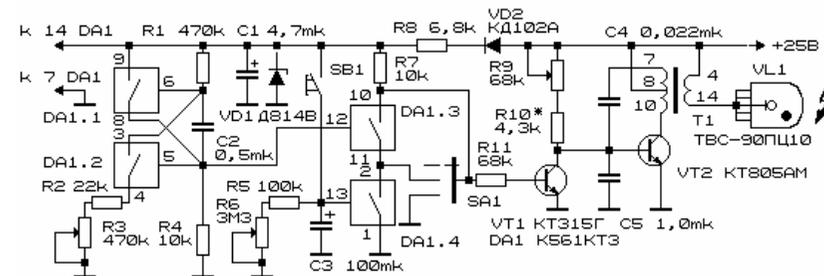


**Рис. 137. Генератор высоковольтных импульсов с плавно регулируемым выходным напряжением**

При необходимости внешний модулирующий сигнал низкой частоты может быть подан на базу управляющего транзистора *VT1*.

Модулятор и таймер устройства выполнен на микросхеме *DA1 K561KT3* (КМОП-коммутатор). На элементах микросхемы *DA1.1* и *DA1.2* собран мультивибратор с регу-

лируемым периодом/частотой следования импульсов (потенциометр *R2*); на элементе *DA1.4* выполнен таймер (запуск кнопкой *SB1*, задание экспозиции – потенциометр *R6*). Транзисторный коммутатор *VT1*, управляемый элементами *DA1.3* и *DA1.4* и переключателем *SA1*, подключен к переходу эмиттер-база транзистора *VT2*, на котором собран генератор высоковольтных импульсов.



**Рис. 138. Модулируемый источник высоковольтного высокочастотного (48 кГц) напряжения с таймером**

Во всех схемах (рис. 135, 137 138) использован без переделки выходной трансформатор строчной развертки *TBC-90ПЦ10*. Рабочая частота генераторов порядка 48 кГц, выходное напряжение до 6...8 кВ. Мощные транзисторы и микросхему стабилизатора напряжения необходимо установить на теплоотводящие пластины.

Потребляемый генераторами ток не превышает 300 мА. В качестве электродов могут быть использованы газонаполненные индикаторные и иные лампы *VL1* (однополярное подключение), например, *ИИ12Б* с неоновым наполнением. Высокочастотный ток при этом модулируется шумовой компонентой газового разряда. Одновременно лампа *V1* является токоограничивающим резистором.

## 5.4. Другие виды генераторов высокого напряжения

Для получения киловольтных наносекундных импульсов В.С. Белкиным и Г.И. Шульженко [129, 130] была разработана схема формирователя на дрейфовых диодах и насыщающейся индуктивности с одноктактным преобразователем низковольтного питания, синхронизированным с формирователем, а также показана возможность совмещения функций ключа формирователя и преобразователя.

Функциональная схема формирователя с синхронизированным преобразователем показана на рис. 139; вариант схемы формирователя с отдельными ключевыми элементами приведен на рис. 140, а временные диаграммы, характеризующие работу отдельных узлов схемы формирователя – на рис. 141.

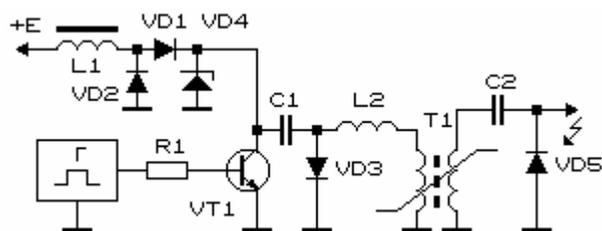


Рис. 139. Функциональная схема формирователя высоковольтных импульсов с преобразователем питания с совмещенным ключом для преобразователя и формирователя

Задающий генератор прямоугольных импульсов (рис. 139) вырабатывает импульсы, отпирающие транзисторный ключ VT1 на время  $t_n$  и запирающее на время  $t_z$  (рис. 141). Сумма этих времен определяет период повторения импульсов. За время  $t_n$  через дроссель L1 протекает ток  $I_n$ . После

запираания транзистора ток  $I_n$  через диод VD1 заряжает накопительную емкость формирователя C1 до напряжения  $U_n$ , диод VD1 закрывается и отсекает конденсатор C1 от источника питания.

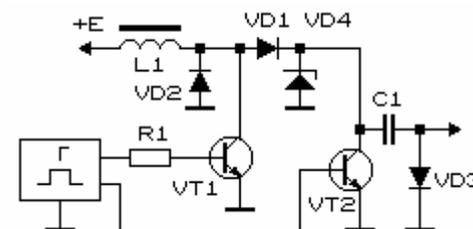


Рис. 140. Фрагмент функциональной схемы формирователя высоковольтных импульсов с преобразователем питания с отдельными ключами

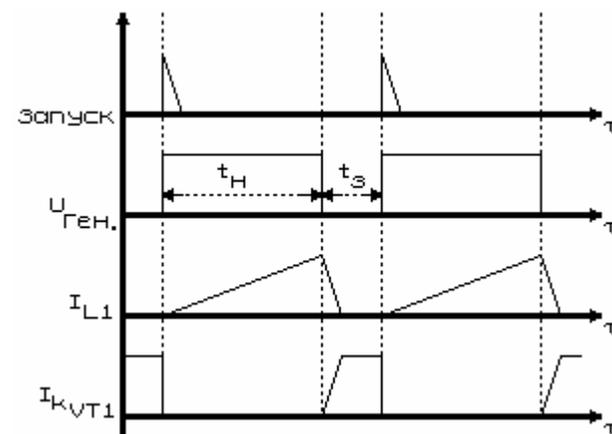


Рис. 141. Временная диаграмма работы преобразователя

В таблице 7 приведены данные по возможному использованию полупроводниковых приборов и индуктивных элементов в формирователе высоковольтных импуль-

сов. Амплитуда формируемых импульсов приведена для низкоомной нагрузки порядка  $50 \text{ Ом}$ .

Таблица 7

**Конструктивные данные формирователей высоковольтных импульсов**

Длительность импульса, нс	Амплитуда генерируемого импульса, В		
	300	500	1000
4...6	КД204, КД226 (КТ858, КТ862)	КД212	
7...10		ДЛ112-25 (КТ847)	ДЛ122-40 (КП953)
11...15		КД213 (КТ847)	ДЛ132-80 (КП953)

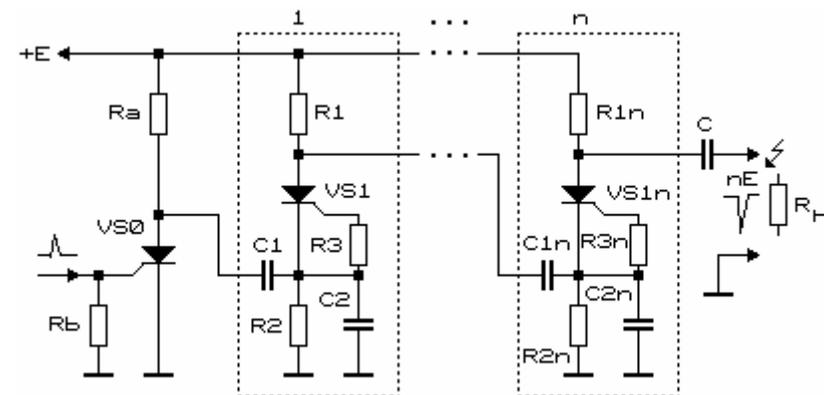
Формирователи двуполярных импульсов на основе серийных диодов имеют амплитуду каждой полуволны  $0,2...1 \text{ кВ}$  для согласованной нагрузки  $50...75 \text{ Ом}$  при полной длительности импульса  $4...30 \text{ нс}$  и частоте повторения до  $20 \text{ кГц}$ .

Достаточно распространенный вид преобразователей, реализующий принцип умножения напряжения на переключаемых конденсаторах, показан на рис. 142.

Это устройство содержит ряд одинаковых каскадов на тиристорах или иных элементах с S-образной вольтамперной характеристикой. Межкаскадные связи выполнены конденсаторами равной емкости  $C1...C1n$ . Напряжение питания схемы –  $E$  ниже напряжения пробоя тиристоров.

В исходном состоянии после включения напряжения питания все тиристоры заперты, конденсаторы  $C1...C1n$  заряжены до напряжения питания устройства.

При подаче на вход преобразователя импульса управления происходит цепная реакция переключения тиристоров из непроводящего состояния в проводящее. Все конденсаторы  $C1...C1n$  оказываются соединенными последовательно. Напряжения на них суммируются, на выходе формируется короткий импульс напряжения, амплитудой приближающийся к значению  $nE$ .



**Рис. 142. Электрическая схема преобразователя с умножением напряжения на коммутируемых тиристорами конденсаторах**

Типовые значения длительности импульсов, генерируемых тиристорными формирователями импульсов, зависят от RC- параметров формирователя, вида нагрузки, марки тиристоров и составляют: длительность импульса  $100...200 \text{ нс}$ , длительность фронта –  $5...20 \text{ нс}$ . В ранних конструкциях преобразователей подобного рода широко использовали искровые разрядники.

Преобразователь напряжения с использованием пьезоэлектрического трансформатора показан на рис. 143 [131].

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Техника безопасности при выполнении работ по газоразрядной фотографии

Экспериментальные работы, связанные с получением электроразрядных фотографий, сопряжены с использованием источников высокого высокочастотного напряжения, а также токсичных и аллергенных химических реактивов для обработки фотографических материалов. В этой связи особое внимание при выполнении подобных работ следует обращать на технику безопасности.

Для работы экспериментальную технику размещают в сухом проветриваемом затемненном помещении (типа фотолаборатории). В помещении не должно находиться заземленных предметов (батареи отопления, водопроводных труб, посторонних приборов и оборудования), с которыми возможен контакт человека даже без непосредственного соприкосновения. Для подсветки следует использовать фотофонарь красного цвета, желательно закрытый листом органического стекла.

Для обработки фотоматериалов готовят растворы и ванночки для проявителя, фиксажа, промывки отпечатков по рецептурам, традиционно приводимым в фотографической справочной литературе.

Генератор высокого напряжения располагают таким образом, чтобы полностью исключить возможность одновременного касания высоковольтного электрода и заземленных предметов. При экспонировании испытуемый не должен приближаться телом, руками или ногами к заземленным предметам и металлическим конструкциям, проводам.

Для обеспечения максимального тока короткого замыкания не выше 1 мА между выходом генератора и ра-

Преобразователь получает питание от сети переменного тока через гасящий конденсатор  $C1$ , выпрямитель на диодном мосте  $VD1-VD4$ , параметрический стабилизатор напряжения на стабилитроне  $VD5$ , фильтр –  $C2$ . Генератор импульсов устройства выполнен на двух логических элементах  $HE$  ( $TTL$  или  $KМОП$ ). Этот генератор нагружен на пьезоэлектрический трансформатор  $T1$ . Выходное напряжение преобразователя определяется типом используемого трансформатора и может достигать единиц-десятков кВ.

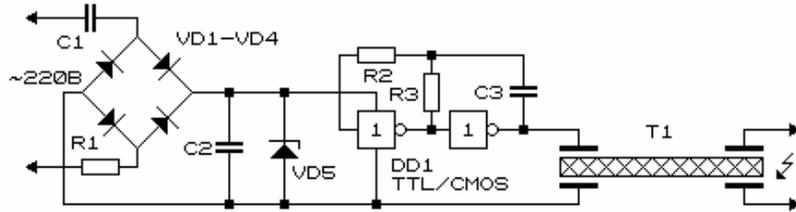


Рис. 143. Электрическая схема преобразователя напряжения с использованием пьезоэлектрического трансформатора

Варианты конструкций пьезоэлектрических и пьезо-керамических трансформаторов можно найти в работах сотрудников Киевского политехнического института, а также в описаниях изобретений, см, например, авт. свид. СССР №№ 320839; 370689; 402105; 405154; 440734; 475048; 618811 и др.

бочим электродом обязательно должен быть включен ограничивающий ток резистор (цепочка последовательно соединенных высоковольтных резисторов), либо газонаполненный прибор, либо то и другое вместе.

Провод, соединяющий высоковольтный генератор и рабочий электрод соединяют по плавной линии отрезком провода в высоковольтной изоляции минимальной длины.

Не допускается попадание влаги и пыли (особенно токопроводящей) внутрь устройства. Также не разрешается эксплуатация прибора в условиях повышенной влажности, при наличии токопроводящего пола, запыленности воздуха. В помещении для проведения экспериментов не разрешается курить, принимать пищу. При проведении работ в лаборатории должно находиться не менее двух человек.

При установке приборов и оборудования, хранившегося в не отапливаемых складских помещениях при пониженной температуре, в отапливаемое помещение для исключения ухудшения диэлектрических свойств изоляции вследствие конденсации атмосферной влаги на конструктивные элементы, включение устройства возможно только после 3-4-часового прогрева при комнатной температуре.

Перед началом работы следует произвести внешний осмотр установки, убедиться в отсутствии механических или иных повреждений, следов гари и других визуально различимых неполадок. При появлении в процессе эксплуатации установки запаха гари, озона, окислов азота, установку следует отключить. Разбирать установку категорически воспрещается.

Генератор высоковольтных импульсов, размещенный в диэлектрическом корпусе, желательно питать от сети через разделительный трансформатор.

Конструкция трансформатора должна предусматривать пространственное разделение обмоток, т. е., либо раз-

мещение их на двух каркасах, либо на общем каркасе с перегородкой. Перегородка должна быть не вставленная, а монолитная, т. е. каркас с перегородкой должен быть литой либо прессованный. Возможно также применение общего каркаса без перегородки, но при этом должны быть приняты меры, исключающие возможность западания витков вторичной обмотки к виткам сетевой обмотки (межслойная изоляция с загибами по краям), и трансформатор должен быть подвергнут вакуумной пропитке, желательно, эпоксидными компаундами. Этот трансформатор должен иметь защиту от короткого замыкания. Защита может быть обеспечена либо с помощью предохранителя, либо за счет большого внутреннего сопротивления трансформатора. Не допускается применение суррогатных предохранителей.

Для защиты от импульсных перенапряжений со стороны сети установку следует подключать через современные сетевые фильтры, содержащие элементы защиты от перенапряжения (газонаполненные разрядники напряжения, например, фирмы *Epcos*) и самовосстанавливающиеся полупроводниковые предохранители типа *Polyswitch*.

Работы с химическими реактивами и растворами необходимо выполнять в хорошо проветриваемом помещении. Во избежание непосредственного соприкосновения рук с растворами при обработке фотоматериалов необходимо пользоваться пинцетами, зажимами и т. п., работать в резиновых перчатках, напальчниках. Перед и во время проявления (после каждого увлажнения проявителем) следует промывать пальцы 0,2%-ным раствором соляной кислоты, или 1%-ным раствором уксусной кислоты, или в растворе для прекращения проявления – кислотом останавливающим растворе. Перед работой рекомендуется смазать руки защитным кремом, после работы – тщательно вымыть руки мылом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов М.А., Протасевич Е.Т. Электроразрядная фотография. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1999. – 244 с.
2. Кожаринов В.В., Зацепин Н.Н., Домород Н.Е. Электроразрядный метод визуализации. – Минск: Навука и тэхніка, 1986. – 134 с. РЖФ 1986. – Реф. 6Г394К.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
4. Баньковский Н.Г., Коротков К.Г., Петров Н.Н. Физические процессы формирования изображений при газоразрядной визуализации («эффekte Кирлиан») // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31. – № 4. – С. 625-643. РЖФ 1986. – Реф. 8Л787.
5. Phénomènes disruptifs dans les gaz en chanep uniforme. Courdes de Pashen pour l'azote, l'air et l'hexafluorure de soufre / T.W. Dakin, G. Luxa, G. Opperman e. a. // Electra. – 1974. – № 32. – P. 61-62. Цитируется по кн.: Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
6. Зотов В.М., Зотов Н.М. Основные причины возникновения разряда в малых газовых промежутках // Журн. техн. физики. – 1980. – Т. 50, вып. 4. – С. 716-719.
7. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. – М.: Мир, 1968. – 208.
8. Чернышов В.А., Пантюхов С.Т., Позднякова С.А. и др. Усиление автоэлектронной эмиссии с холодного катода во влажной среде. – В кн.: Электрофизические свойства диэлектриков. – Смоленск, 1975. – С. 35-38.
9. Протасевич Е.Т. Холодная неравновесная плазма газового разряда // Теплофизика высоких температур. – 1989. – Т. 27, вып. 6. – С. 1206-1218.
10. Protasevich E.T. Cold non-equilibrium plasma. Generation, Properties, Application. – Cambridge: Cambridge Intern. Science Publishing, 1999. – 280 p.
11. Русанов В.Д., Фридман А.А., Шолин Г.В. Физика химически активной плазмы с неравновесным колебательным возбуждением молекул // Успехи физических наук. – 1981. – Т. 134, вып. 2. – С. 185-235.
12. Шишковский В.И., Мидуков В.З., Протасевич Е.Т. Физические основы высокочастотного нагрева. – Томск: Изд-во «STT», 2001. – 74 с.
13. Протасевич Е.Т. Обработка спектра СВЧ-разряда // Сиб. физ.-техн. журн. – 1991. – Вып. 3. – С. 94-98.
14. Протасевич Е.Т. Простейшая спектроскопия холодной неравновесной плазмы // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6. – № 8. – С. 950-961.
15. Михалевский В.Д., Прокофьева В.В. Исследование температуры металлической дуги по молекулярному спектру гидроксидов // ЖЭТФ. – 1950. – Т. 20. – № 2. – С. 584-593.
16. Касабов Г.А., Елисеев В.В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1973. – 160 с.
17. Кролл Н., Трайвелтинс А. Основы физики плазмы. – М.: Мир, 1975. – 525 с.
18. Дмитриев А.Н., Похолков Ю.П., Протасевич Е.Т., Скавинский В.П. Плазмообразование в энергоактивных зонах. – Новосибирск: ИГиГ, 1992. – 212 с.
19. Григорьев В.П., Протасевич Е.Т., Поташев А.Г. и др. Исследование физико-химических процессов при ионизации влажного воздуха // Сиб. физ.-техн. журн. – 1991. – Вып. 3. – С. 161-169.
20. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. – М.: Атомиздат, 1974. – 212 с.

21. *McDaniel E.W.* Collision Phenomena in ionized Gases. – *J. Wiley and Sons.* – *New York*, 1964. – 412 p.
22. *Мак-Ивен М., Филлипс Л.* Химия атмосферы. – М.: Мир, 1978. – 376 с.
23. *Opalinski J.* Kirlian-type images and the transport of thin-film materials in high-voltage corona discharges // *J. Appl. Phys.* – 1979. – Vol. 50. – № 1. – P. 498-504.
24. *Григорьев В.П., Протасевич Е.Т.* Использование электромагнитного излучения и плазмы для решения экологических проблем. – *Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та*, 1998. – 204 с.
25. *Bouwers Dr.A.* Elektrische Höchstspannungen. – *Berlin: Verlag von Julius Springer*, 1939. – 334 s.
26. *Воробьев А.А.* Техника высоких напряжений. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1945. – 520 с.
27. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения / *А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Н.И. Воробьев, А.Ф. Калганов и др.* – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 584 с.
28. *Киселев Ю.В., Черепанов В.П.* Искровые разрядники. – М.: Советское радио, 1976. – 72 с.
29. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. – 464 с.
30. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985. – 488 с.
31. [www.cebunet.com/kirlian/coil.htm](http://www.cebunet.com/kirlian/coil.htm)
32. [www.geocities.com/kilovolt2000/tesla.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/tesla.html)
33. *Кирлиан В.Х., Кирлиан С.Д.* В мире чудесных разрядов. – М.: Знание, 1964. – 40 с.
34. *Самойликов К.* Искровой течеискатель // *Радио.* – 1952. – № 1. – С. 45-47.
35. Информационный листок / *Томск. межотрасл. террит. центр НТИ и пропаганды. Томск*, 1987. – 122-87: Искровой течеискатель / *Сост. М.А. Шустов.* – [4] с.
36. Информационный листок / *Томск. межотрасл. террит. центр НТИ и пропаганды. Томск*, 1987. – 74-87: Устройство для съемки объектов в поле токов высокой частоты / *Сост. М.А. Шустов.* – [4] с.
37. *Станкевич А., Михайленко В., Назаренко Н.* ВЧ – искровой дефектоскоп // *Радио.* – 1973. – № 1. – С. 25.
38. *Силиньш Ю.А.* Искровой течеискатель // *Приборы и техника эксперимента.* – 1975. – № 5. – С. 242-243.
39. [www.geocities.com/kilovolt2000/xfmrnst.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/xfmrnst.html)
40. *Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А.* Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: «Три Л», 2000. – 400 с.
41. [www.geocities.com/lemagicien\\_2000/hvpage/hvfbpage/hvfb.html](http://www.geocities.com/lemagicien_2000/hvpage/hvfbpage/hvfb.html)
42. [www.geocities.com/kilovolt2000/sch1t.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/sch1t.html)
43. Информационный листок / *Томск. межотрасл. террит. центр НТИ и пропаганды. Томск*, 1990. – 245-90: Высокочастотный генератор для получения фотографий по методу «Кирлиан» / *Сост. М.А. Шустов.* – [4] с.
44. *Шустов М.А.* Генератор для получения «кирлиановских» фотографий // *Радиолобитель.* – 1991. – № 9. – С. 14.
45. *Шустов М.А.* Аппараты для ультратоновой терапии // *Радиолобитель.* – 1998. – № 7. – С. 23-24.
46. [www.geocities.com/kilovolt2000/schign.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/schign.html)
47. [www.geocities.com/lemagicien\\_2000/hvpage/hvcdpage/hvcd.html](http://www.geocities.com/lemagicien_2000/hvpage/hvcdpage/hvcd.html)
48. Автоматизация производства и промышленная электроника. В 4-х т. Гл. ред. *А.И. Берг, В.А. Трапезников.* – Т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1962. – 524 с.

49. *Капцов Н.А.* Электрические явления в газах и вакууме. 2 изд., – М.-Л., 1950.
50. *Власов В.Ф.* Электронные и ионные приборы. – М., 1960.
51. [www.geocities.com/kilovolt2000/statigap.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/statigap.html)
52. Разрядники вакуумные и газонаполненные // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 6. – С. 286.
53. Каталог. Сектор электронных компонентов. Россия-2000. – М.: Додэка, 2000. – 912 с.
54. *Пономаренко А.Г., Сурков А.С.* Аналоговые модели искровых разрядников // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 4. – С. 127.
55. *Серьезнов А.Н., Арефьев А.А., Степанова Л. Н.* Транзисторные эквиваленты приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением и интегральные схемы на их основе // В сб.: Полупроводниковая электроника в технике связи. – М.: Радио и связь, 1988. – Вып. 27. – С. 4-18.
56. *Шустов М.А.* Практическая радиоэлектроника. – М.: Altex, 2001.
57. *Стэдлер Х.* Использование транзистора для получения аналога стабилитрона с нулевым динамическим сопротивлением // Электроника. – 1969. – № 7. – С. 30-31.
58. Патент 3384844 США. Negative impedance device // *A. Larned.*
59. *Крылов В.* Аналоги динистора в устройствах автоматики // Радио. – 1973. – № 11. – С. 40-41.
60. *Льюров В., Садовщиков В.* Кольцевые счетчики на транзисторных аналогах динистора // Радио. – 1976. – № 12. – С. 29.
61. *Марьяш М.* Регулируемый аналог динистора // Радио. – 1986. – № 3. – С. 41-42.
62. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. *Р.Г. Варламова.* – М.: Советское радио, 1972. – 856 с.
63. *Волгов В.А.* Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
64. Справочник по электрическим конденсаторам / *М.П. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.:* Под общей ред. *И.И. Четверткова и В.Ф. Смирнова.* – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.
65. *Шустов М.А.* Исследование основных свойств фото- и терморегистрирующих сред на основе галогенидов тяжёлых металлов. Автореф. дисс. ... канд. хим. наук // *КемГУ.* – Кемерово, 1985. – 22 с.
66. *Джеймс Т.* Теория фотографического процесса / Под ред. проф. *А.Л. Картужанского.* – Л.: Химия, 1980. – 672 с.
67. *Барташевич Р.А., Жиженко Г.А., Кожаринов В.В.* Тонкопленочные регистрирующие покрытия для электро-разрядного метода визуализации // Дефектоскопия. – 1993. – № 7. – С. 76-78.
68. А. с. 1228003 СССР. Способ исследования поверхности полупроводниковых и диэлектрических материалов / *В.А. Ермолаев, С.В. Руднев* // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 16.
69. А. с. 1096602 СССР. МКИ G03G 17/00. Устройство для высокочастотного фотографирования электрических неоднородностей объектов с гладкой поверхностью / *А.В. Дубина, Н.Е. Домород, В.В. Кожаринов* // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 21. – С. 145.
70. А. с. 1324005 СССР. МКИ G03B 41/00. Устройство для фотографирования в электромагнитных полях высокого напряжения / *Н.Е. Домород* // Открытия. Изобретения. – 1987. – № 26.

71. *Коротков К.Г., Хмыров С.В.* Фотографирование поверхности твердого тела посредством газового разряда при атмосферном давлении // Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. – 1982. – Т. 27, вып. 2. – С. 131-134.
72. А. с. 1664286 СССР. МКИ А61В 5/16. Устройство для регистрации газоразрядного свечения биологических объектов / *К.Г. Коротков, Н.Д. Кожевников* // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 27.
73. *Коротков К.Г., Савельев С.К.* Энергоинформационные характеристики кирлиановских фотографий // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1993. – Т. 36. – № 6. – С. 37-42.
74. *Boyers D.G., Tiller W.A.* Corona discharge Photography // Journal of Applied Physics. – 1973. – Vol. 44. – № 7. – P. 3102-3112.
75. *Величко В.Я., Коротков К.Г.* Обнаружение фазовых переходов металл-полупроводник методом газоразрядной визуализации // Диагностика приповерхностного слоя и управление его свойствами (Актуальные вопросы физической электроники). – Сб. научн. трудов Ленинградского политехн. ин-та. – 1983. – № 397. – С. 61-63. *РЖФ* 1984. – Реф. 9Н59.
76. *Гудакова Г.З., Галынкин В.А., Коротков К.Г.* Исследование спектральных характеристик газоразрядного свечения микробиологических культур // Журнал прикл. спектроскопии. – 1988. – Т. 49. – № 3. – С. 412-417.
77. *Крыжановский Л.Н.* Фигуры *Лихтенберга*, или ксерография в... XVIII в. // Электричество. – 1993. – № 3. – С. 75-77.
78. *Крыжановский Л.Н.* Электростатическая индукция и электрофор в опытах XVIII в. // Электричество. – 1982. – № 4. – С. 60-62.
79. *Ермолаев В.А., Похолков Ю.П., Шустов М.А., Исмаилова О.Л., Азикова Г.И., Руднев С.В.* Радиография и радиографические ячейки. – Томск: Изд. РИО «Пресс-Интеграл» ЦПК ЖК, 1997. – 224 с.
80. *Бойченко А.П.* О режиме газоразрядного фотографирования тела человека по двухпроводной схеме // Экология и здоровье человека. Экологическое образование. Математические модели и информационные технологии: 6-я Международная конференция: Тезисы докл., – 7-12 сентября 2001. – Краснодар: Кубанский ГУ, 2001.
81. [www.cebunet.com/kirlian/mkcameras.htm](http://www.cebunet.com/kirlian/mkcameras.htm)
82. А. с. 581450 СССР. МКИ G03В 41/00. Устройство для фотографирования объектов / *А.Д. Кравцов, Е.Н. Перепелкин, А.К. Петровский* // Открытия. Изобретения. – 1977. – № 43. – С. 118-119.
83. А. с. 108088 СССР. НКИ 57b, 12<sub>01</sub>. Конденсаторная обкладка для осуществления способа по А. с. 106401 / *С.Д. Кирлиан* // Открытия. Изобретения. – 1957. – № 8. – С. 101-102.
84. *Кожаринов В.В., Зацетин Н.Н., Домород Н.Е.* Применение роликовых электродов в неразрушающем контроле изделий электроразрядным методом визуализации // Изв. АН БССР. Сер. физ. - техн. наук. – 1985. – № 3. – С. 92-96.
85. [www.cebunet.com/kirlian/viewer.htm](http://www.cebunet.com/kirlian/viewer.htm)
86. *Шредер Х.* Осаждение окисных слоев из органических растворов // В кн.: Физика тонких пленок. Современное состояние и технические применения. – Под ред. *Г. Хасса и Р.Э. Туна*. – М.: Мир, 1972. – С. 84-139.
87. *Петров Ю.П., Манаевский М.А.* Прозрачные электропроводные покрытия из высокодисперсных окислов металлов // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 1. – С. 226-228.

88. Романий С.Ф., Коваленко Л.Г. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов на основе метода Кирлиан // *Кирлиановские чтения «Кирлиан-2000»*. – Краснодар, НПО «Инфорай ко., ЛТД», 1998. – С. 125-131.
89. А. с. 106401 СССР. НКИ 57b, 12<sub>a</sub>. Способ получения фотографических снимков различного рода объектов / С.Д. Кирлиан // *Открытия. Изобретения*. – 1957. – № 6. – С. 115.
90. Dakin H.S. High-Voltage Photography. – San-Francisco, 1975. – 79 p.
91. Кожаринов В.В. Электроразрядный метод визуализации и диагностики газоразрядных процессов высокого давления // *Изв. АН БССР. Сер. физ. - техн. наук*. – 1990. – № 4. – С. 91-95.
92. А. с. 108092 СССР. НКИ 57b, 12<sub>01</sub>. Способ получения фотографических снимков различного рода объектов по А. с. 106401 / С.Д. Кирлиан // *Открытия. Изобретения*. – 1957. – № 8. – С. 102.
93. А. с. 125850 СССР. НКИ 21g, 37<sub>01</sub>. Устройство для получения увеличенных изображений / С.Д. Кирлиан, В.Х. Кирлиан // *Открытия. Изобретения*. – 1960. – № 3. – С. 20.
94. А. с. 787979 СССР. МКИ G01N 27/84, G01R 33/12. Устройство для визуализации магнитного рельефа на поверхности объекта по А. с. 634185 / В.В. Кожаринов, Е.Н. Перепелкин, А.Г. Довгялло // *Открытия. Изобретения*. – 1980. – № 46. – С. 211.
95. А. с. 783682 СССР. Устройство для визуализации магнитного рельефа на поверхности объекта / Е.Н. Перепелкин, В.В. Кожаринов // *Открытия. Изобретения*. – 1980. – № 44.
96. А. с. 662900 СССР. МКИ G03B 41/00. Устройство для получения увеличенного изображения объектов // В.Г. Адаменко, В.Х. Кирлиан, С.Д. Кирлиан // *Открытия. Изобретения*. – 1979. – № 18. – С. 195.
97. А. с. 1003005 СССР. Устройство для визуализации электрических неоднородностей плоских объектов электрическим полем / В.В. Кожаринов, Н.Е. Домород // *Открытия. Изобретения*. – 1983. – № 9. – С. 200.
98. Сивак Г.В., Лукацкая Р.А. Электронная микроскопия малого увеличения при наличии газа атмосферного и пониженного давления // *Изв. АН СССР. Сер. физика*. – 1951. – Т. 15. – № 4. – С. 434-443.
99. Сивак Г.В., Лукацкая Р.А. Электронно-оптические эффекты при атмосферном давлении // *Вестн. Моск. ун-та*. – 1948. – № 4. – С. 37-46.
100. Сивак Г.В., Столярова Е.Л. Электронно-оптические эффекты при развитии плазмы // *Журн. техн. физики*. – 1948. – Т. 18. – № 3. – С. 279-288.
101. А. с. 118135 СССР. НКИ 57b, 12<sub>03</sub>. Способ получения фотографических снимков различного рода объектов по А. с. 106401 / С.Д. Кирлиан // *Открытия. Изобретения*. – 1959. – № 4. – С. 55-56.
102. Грибковский В.П., Гапоненко О.А., Киселев В.Н. Яков Оттонович Наркевич-Йодко // *Весті АН БССР. Сер. фіз-мат. навук*. – 1985. – № 5. – С. 117-123.
103. Родионов В.М. История радиопередающих устройств. – М.: Наука, 1969. – 212 с.
104. Александров Н.Г., Прохоров В.А., Чмутов К.В. Современные электронные приборы и схемы в физико-

- химическом исследовании. – Изд. 2-е. – М.: Химия, 1971. – 496 с.
105. *Фрюнгель Ф.* Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 488 с.
106. *Wien M.* Über die Intensität der beiden Schwindungen eines gekoppelten Senders // *Phys. Z.* – 1906. – Bd. 7.
107. *Шустов М.А.* Электронные ловители радиоактивной пыли // *Радиолобитель.* – 1993. – № 8. – С. 16-17; 1994. – № 9. – С. 16-17.
108. *Иванов Б.С.* Блок питания для «*Люстры Чижевского*» // *Радио.* – 1997. – № 5. – С. 35.
109. *Бамбуров Ю.Г., Казарезов И.В., Кокин Е.Н.* Тиратронный коммутатор для высокочастотного трансформатора *Тесла* с повышенной частотой следования импульсов // *Приборы и техника эксперимента.* – 1984. – № 3. – С. 104.
110. *Утин В.* Варианты блока питания «*Люстры Чижевского*» // *Радио.* – 1997. – № 10. – С. 42-43.
111. *Кузинец Л.М., Соколов В.С.* Узлы и блоки телевизоров: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
112. *Вилков В.* // *Радиолобитель.* – 1993. – № 3. – С. 26.
113. *Калентьев Ю.* // *Радиолобитель.* – 1991. – № 2. – С. 15-16.
114. *Иванов Б.С.* «*Люстра Чижевского*» – своими руками // *Радио.* – 1997. – № 1. – С. 36.
115. *Роговская Е.* // *Радиолобитель.* – 1993. – № 3. – С. 20.
116. *Габеев Л.Т., Соловьев А.Н.* Тиристорный искровой те-чеискатель // *Приборы и техника эксперимента.* – 1983. – № 3. – С. 234.
117. *Приборы и техника эксперимента.* – 1977. – № 5. – С. 175.
118. *Глухенький Г.* Еще один блок питания «*Люстры Чижевского*» // *Радио.* – 1998. – № 11. – С. 44.
119. *Шелестов И.П.* Радиолобителям полезные схемы. – М.: «Солон», 1998. – Кн. 1 – 186 с.; Кн. 2. – 216 с.
120. *Nagy mate C.* // *Radiotechnica (Венгрия).* – 1996. – № 8.
121. [www.geocities.com/lemagicien\\_2000/hvpage/hvagpage/hvag.html](http://www.geocities.com/lemagicien_2000/hvpage/hvagpage/hvag.html)
122. *Криштафович И.А.* Транзисторные схемы высоковольтного электропитания. – Препринт. – Киев, 1988. – 55 с. – (Институт электродинамики АН УССР, № 584).
123. *Моин В.С.* Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
124. *Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н.* Высокочастотные транзисторные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
125. *Шустов М.А.* Импульсный блок питания // *Радиоаматор-Электрик.* – 2000. – № 4. – С. 6-8.
126. *Назаров Д.* // *Радио.* – 1977. – № 9. – С. 28.
127. *Крылов Е.В.* Генератор импульсов высокого напряжения // *Приборы и техника эксперимента.* – 1991. – № 4. – С. 114-115.
128. [www.geocities.com/kilovolt2000/sch2t.html](http://www.geocities.com/kilovolt2000/sch2t.html)
129. *Белкин В.С., Шульженко Г.И.* Генератор высоковольтных двуполярных импульсов // *Приборы и техника эксперимента.* – 1994. – № 4. – С. 64-67.
130. *Белкин В.С., Шульженко Г.И.* Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов с низковольтным питанием // *Приборы и техника эксперимента.* – 1994. – № 4. – С. 68-70.
131. Патент 658960 *Швейцария.* МКИ Н02М 7/04. Бес-трансформаторная схема источника питания. Оpubл. 15.12.1986.

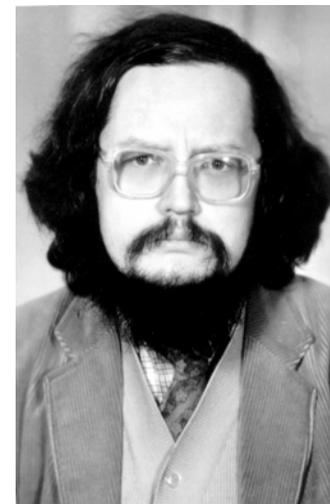
Михаил Анатольевич Шустов  
Евгений Трофимович Протасевич

## Теория и практика газоразрядной фотографии

Компьютерный набор и верстка  
М.А. Шустова



Подписано к печати 06.06.2001 г.  
Формат 60x84/16. Бумага Госзнак № 1.  
Плоская печать. Усл.печ. л. 14,54. Уч.-изд.л. 13,08.  
Тираж 100 экз. Заказ №212. Цена свободная.  
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.07.94 г.  
Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.



**Шустов Михаил Анатольевич**

Родился в 1952 году. В 1975 году окончил физико-технический факультет *Томского* политехнического института. Защитил кандидатскую диссертацию по фотохимии галогенидов тяжелых металлов. С 1993 г. – член-корреспондент Международной Академии энергоинформационных наук. В настоящее время – докторант *Томского* политехнического университета.

Область научных интересов: среды и способы регистрации информации, *ПЭВМ*-методы ее обработки, нетрадиционные вопросы естествознания и новые технологии, радиоэлектроника. Автор свыше 350 статей и тезисов докладов, 3 монографий, 16 изобретений, 18 п. л. газетных публикаций.



**Протасевич Евгений Трофимович**

Создатель нового научного направления в физике низкотемпературной плазмы, которое может быть сформулировано как физика плазмохимических процессов газового разряда во влажном воздухе, приводящих к формированию долгоживущих плазменных образований.

Теоретически предсказал и экспериментально обнаружил три новых эффекта в физике газового разряда: эффект замедления скорости рекомбинации плазмы за счет ее охлаждения во влажном воздухе (1982 и 1985 г.г.), эффект ослабления (снятия) токовой нейтрализации сильноточного электронного пучка при его распространении по трассе, содержащей пары воды (1985 и 1988 г.г.) и эффект выделения атомарного водорода и гидроксила ОН в местах, подвергнутых радиоактивному загрязнению (1993 и 1996 г.г.).