

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчика	7
Символы и аббревиатуры	8
Предисловие	12
Глава 1. ВВЕДЕНИЕ	15
1.1. Схемотехника мощных импульсных устройств	15
1.2. Преимущества	19
Глава 2. СТАТИЧЕСКАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ	21
2.1. Введение	21
2.2. Газы	23
2.3. Жидкости	42
2.4. Твердые тела	58
2.5. Статистическая интерпретация измерений электрической прочности	66
Глава 3. НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ	71
3.1. Конденсаторы	71
3.2. Генераторы Маркса	79
3.3. Индуктивные накопители энергии	90
3.4. Умножение мощности и напряжения	91
3.5. Роторные и униполярные генераторы	93
Глава 4. КЛЮЧИ	99
4.1. Замыкающие ключи	99
4.2. Размыкающие ключи	137
Глава 5. ЦЕПИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ	153
5.1. Длинные линии	153
5.2. <i>RLC</i> -цепи	163
5.3. Моделирование цепей с помощью программы LEITER	170
Глава 6. ПЕРЕДАЧА ИМПУЛЬСОВ И ТРАНСФОРМАТОРЫ	175
6.1. Магнитная самоизоляция в вакуумной линии передачи	175

6.2. Импульсные трансформаторы	198
6.3. Высоковольтные источники питания	203
6.4. Трансформаторные линии	209
Глава 7. СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ	211
7.1. Сложение мощностей	211
7.2. Сложение напряжений	212
Глава 8. ПРИМЕРЫ ГЕНЕРАТОРОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ	220
8.1. Генераторы одиночных импульсов	220
8.2. Генераторы повторяющихся импульсов	225
Глава 9. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	229
9.1. Датчики электромагнитного поля	229
9.2. Измерение тока с помощью резисторов	236
9.3. Измерение тока с использованием эффекта Фарадея	238
9.4. Электрооптические способы измерения напряженности электрических полей.	240
9.5. Магнитный анализатор энергии ионов	242
9.6. Монитор напряжения	243
Глава 10. ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	245
10.1. Импульсные электрические поля	245
10.2. Импульсные магнитные поля	257
Глава 11. ИСТОЧНИКИ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	276
11.1. Генераторы мощных электронных пучков	276
11.2. Ионные пучки большой мощности	291
Глава 12. ИМПУЛЬСНЫЕ РАЗРЯДЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ЖИДКОСТЯХ	300
12.1. Экстракорпоральная ударная литотрипсия	300
12.2. Разрушение твердых диэлектриков с помощью электрических импульсов	302
12.3. Применение в промышленности	313
Список литературы	327
Предметный указатель	343
О программе LEITER	347

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

В своей книге автор — известный германский ученый-физик Хансиоахим Блум — представил обширнейший обзор по методам и средствам генерации сверхмощных импульсов электрической энергии. Отдельная часть книги описывает их практическое применение в различных областях, таких как медицина, промышленность и т. д. Выражаю надежду, что эта книга найдет своих читателей, которые оценят грандиозность описанного оборудования и найдут полезное и для своей работы.

Благодарю за помощь в научном редактировании перевода С. С. Гапонова, канд. физ.-мат. наук М. И. Калинина и канд. техн. наук В. К. Попова.

А. Н. Рабодзей, канд. техн. наук

СИМВОЛЫ И АББРЕВИАТУРЫ

Символы

\vec{A}	векторный потенциал; векторный элемент площади
A	площадь
\vec{B}	магнитная индукция
C	емкость; постоянная Эйлера (0.577)
c	скорость света
c_v	удельная теплоемкость
\vec{D}	смещение
d	расстояние
\vec{E}	напряженность электрического поля
e	заряд электрона
\vec{F}	сила
$F(E,t)$	вероятность отказа за время t при напряженности поля E
$F(W)$	Ферми—Дирака функция энергии W
G	проводимость; модуль сдвига
$G(p)$	передаточная функция
G_n, G_p	скорости генерации электронов и дырок
g	геометрический коэффициент
\vec{H}, H	напряженность магнитного поля
H	функция Гамильтона
$H(t)$	функция Хевисайда
h	постоянная Планка; толщина
I	ток
I_0	общий ток в вакуумной линии передачи
I_α	ток Альфвена
I_{cr}	критический ток
I_w	ток стенок

i	мнимая единица $\sqrt{-1}$
$i(p)$	ток, преобразованный по Фурье или Лапласу
$i(t)$	малосигнальный ток
J	интеграл плотности тока
j	плотность тока
K	постоянная Керра
k	постоянная Больцмана; подвижность
k_{\pm}	постоянные
L	индуктивность
L_d	диффузионная длина
ℓ	длина
M	макроскопическая масса
m	масса частицы
m_0	масса частицы в состоянии покоя
N	общее число частиц
n	число атомов в единице объема
\bar{P}	канонический момент
P_{al}	энергия в согласованной нагрузке
P_{ab}	вероятность перехода из состояния a в состояние b
p	давление газа
Q	тепловая энергия; удельная плотность энергии; заряд электронов на единицу длины вакуумной линии передачи
q	плотность поверхностного заряда
R	сопротивление
R_n, R_p	скорости рекомбинации электронов и дырок соответственно
r	радиус
\vec{S}	вектор Пойнтинга
s	длина канала; путь
T	период; температура; время задержки; коэффициент передачи
t	время
U	напряжение
v	скорость
$u(p)$	напряжение, преобразованное по Лапласу
$u(t)$	малосигнальное напряжение
$\langle v \rangle$	средняя скорость ансамбля частиц
V	объем; постоянная Верде
W_+, W_-	уровни энергии
W_{+kin}	кинетическая энергия
w_{kin}	плотность кинетической энергии

x	пространственная координата
Y	модуль Юнга
Z	импеданс
$Z(W)$	число разрешенных состояний на единичную энергию в интервале W
α	коэффициент ионизации
α_n, α_p	коэффициенты ионизации для электронов и дырок в полупроводнике
β	v/c , скорость частиц по отношению к скорости света; коэффициент увеличения поля
Γ	гамма-функция
γ	w/c , релятивистский фактор
δ	коэффициент рекомбинации
δ_Φ	глубина проникновения магнитного поля
$\text{tg } \delta$	тангенс угла
ε	относительная диэлектрическая проницаемость
ε_0	диэлектрическая проницаемость вакуума
ζ	поверхностная энергия
η	КПД; коэффициент присоединения электронов
Θ	момент инерции
Λ_{ab}	энергия реконфигурации
λ	среднее расстояние между столкновениями; теплопроводность
μ	относительная магнитная проницаемость; подвижность
μ_0	магнитная проницаемость вакуума
μ_n, μ_p	подвижности электронов и дырок в полупроводниках
ν	частота
ν_{ei}	частота столкновений электронов и ионов
$\xi(S)$	относительная ожидаемая интенсивность отказов под воздействием S
Π	функция Пашена
ρ	коэффициент отражения
Σ	макроскопическое поперечное сечение
Σ_y	предел текучести
σ	микроскопическое поперечное сечение; проводимость; дисперсия
σ_a	стандартное отклонение
τ	постоянная времени; время между столкновениями
Φ	магнитный поток
ϕ	потенциал; работа выхода
χ	эффективное отношение удельных теплоемкостей
$\psi(S)$	вероятность того, что один образец выдержит воздействие S
ω	угловая частота; коэффициент вторичной эмиссии электронов

Аббревиатуры

ADP	(Ammonium Dihydrogen Phosphate) — дигидрофосфат аммония
DIN	(Deutsche Industrienorm) — Германский промышленный стандарт
FRANKA	(Fragmentierungsanlage Karlsruhe) — установка для размельчения (г. Карлсруэ)
FWHM	(Full Width at Half Maximum) — длительность импульса (длительность по уровню половины от его максимальной амплитуды)
GESA	(Gepulste Elektronenstrahlenanlage) — генератор импульсных пучков электронов
GTO	(Gate turn-off thyristor) — запираемый тиристор
HELIA	(High-Energy Linear Induction Accelerator) — линейный ускоритель высокой энергии для легких ионов (г. Карлсруэ)
IGBT	(Insulated-Gate Bipolar Transistor) — биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)
KALIF	(Karlsruhe Light-Ion Facility) — линейный ускоритель для легких ионов (г. Карлсруэ)
KDP	(Kalium Dideuterium Phosphate) — дидейтерийфосфат калия
KEA	(Karlsruher Elektroporations Anlage) — установка для обработки растительных клеток импульсами электрического поля (г. Карлсруэ)
PBFA	(Particle Beam Fusin Accelerator) — ускоритель частиц для ядерного синтеза
RHEPP	(Repetitive High-Energy Pulsed Power) — повторяющиеся импульсы высокой мощности
SOS	(Semiconductor Opening Switch) — полупроводниковый размыкающий ключ
TE	(Transverse Electric) — поперечная электрическая волна
TM	(Transverse Magnetic) — поперечная магнитная волна

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга о мощных импульсных устройствах обобщает курс лекций, который я читал в течение десяти лет в техническом университете города Карлсруэ (Германия). Первоначально планировавшийся только для германских студентов курс стал в 1998 г. частью курсов, предлагаемых иностранным студентам со всего мира Международным департаментом университета. Цель настоящей книги — дать студентам начальные знания в этой области, с тем чтобы они имели необходимую основу для изучения более сложной литературы. Кроме того, она должна помочь инженерам и ученым из других областей ближе познакомиться с основными идеями и методами, используемыми в сфере мощных импульсных устройств, и достичь понимания их возможностей для решения различных проблем. Главная особенность мощных импульсных устройств — очень высокое отношение их импульсной мощности к ее среднему значению. При этом начинают проявляться пороговые и нелинейные эффекты. Другой набор достоинств является следствием короткой длительности импульсов, что позволяет использовать их для временного разрешения (например, в радарах и импульсной рентгенографии), а также избежать нежелательных явлений (например, электрического пробоя или потерь на нагрев). Методы и техника создания и применения мощных импульсов оказали благотворное действие в таких областях науки, как электротехника, экспериментальная физика, биотехнология, технология пищевых продуктов и материаловедение.

В 1995 г., когда я начал читать этот курс, я обнаружил отсутствие учебников, в которых бы давалось введение в эту область. Хотя ряд неопубликованных материалов, основанных на работах Дж. С. Мартина (J. C. Martin) из Олдермастона (Aldermaston), написанных в 1960 — 1970 гг., по интенсивным наносекундным источникам рентгеновских лучей, и был в широком пользовании во многих лабораториях, занимавшихся мощными импульсными устройствами, он не является адекватной заменой учебнику. Эта ситуация не изменилась и в 1996 г., когда Т. Мартин (T. Martin), А. Гунтер (A. Guenther) и М. Кристиансен (M. Kristiansen) опубликовали труды Дж. С. Мартина в книге, озаглавленной «Дж. С. Мартин, Об Импульсной Энергии» (J. C. Martin, On Pulsed Power). Однако множество эмпирических формул, полученных Дж. С. Мартином, остаются еще

очень полезными для конструирования мощных импульсных устройств и воспроизведены в данной книге, обычно с сохранением первоначальных единиц измерений.

Даже идеальный учебник никогда не бывает законченным. Постоянно появляются новые и захватывающие разработки, и для получения последней информации я рекомендую читателям обращаться к материалам Международных конференций по мощным импульсам, проводимых каждые два года Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE International Pulsed Power Conference), к запискам Симпозиумов по мощным модуляторам (Power Modulator Symposia) и трудам Международных конференций по пучкам частиц высокой мощности (International Conference on High-Power Particle Beam).

В течение многих лет большинство новых разработок в области мощных импульсов появлялось в США, и Международные конференции по мощным импульсам, с 1976 г. проводимые исключительно в США, подтверждают это положение. Я сделал первые шаги в этой области в 1980 г., в Корнеллском университете, штат Нью-Йорк, где в это время велись исследования по формированию импульсных ионных пучков. После падения железного занавеса стало известно, что большие успехи были достигнуты в области мощных импульсов и в Советском Союзе. Хотя многие задачи и были чисто военными, для гражданского применения также был сделан ряд инноваций, ставших основой для нескольких научно-исследовательских программ в Японии, Европе и США. В последнее время новая научная дисциплина — *биоэлектрика*, чьим объектом исследований является взаимодействие сильных импульсных электрических полей с биологическими клетками, — быстро развивается в США (Университет Олд Доминион, Норфолк, штат Вирджиния), Японии (Университет Кумамото, о. Кюсю), Германии (Научно-исследовательский центр в г. Карлсруэ) и других странах. Будет справедливо сказать, что содержание глав этой книги в основном отражает мои собственные интересы и результаты работ моей исследовательской группы в Институте мощных импульсов и микроволновой техники при Научно-исследовательском центре в г. Карлсруэ.

Хотя большая часть этой книги создавалась по вечерам и в выходные дни, мое шестимесячное пребывание в качестве приглашенного профессора в Университете Кумамото в 2003 г. ускорило эту работу. Таким образом, я очень признателен г-ну Акияме (Н. Akiyama) за это приглашение. Исследования в области импульсов большой мощности не были бы возможны без инициативы Г. Кесслера (G. Kessler) в 1979 г. по запуску программы по использованию пучков легких ионов для получения энергии из термоядерного синтеза в Институте физики нейтронов и технологии реакторов (г. Карлсруэ). После его отставки в 1999 г. эту программу в Карлсруэ решено было остановить. Как это часто случается в научных исследованиях, кризис открыл возможности для реализации новых подходов, и я благодарен М. Тамму (M. Thumm) за его постоянную поддержку наших начинаний по промышленному применению мощных импульсов во вновь образованном Институте мощных импульсов и микроволновой техники. В книге описывается программа для расчета линий передач LEITER, написанная моим бывшим коллегой Д. Рушем (D. Rusch), и я ему благодарен за разрешение на использование

этой программы¹⁾. Мне хотелось бы также поблагодарить коллег: В. Ана (W. An), К. Баумунга (K. Baumung), В. Фрея (W. Frey), Х. Гизе (H. Giese), П. Хоппе (P. Hoppe), Г. Мюллера (G. Müller), М. Сака (M. Sack), С. Шлутхайса (C. Schultheiß) и А. Вайзенбургера (A. Weisenburger), чей профессиональный опыт был использован в этой книге.

Я благодарен моей жене Урсуле за терпение; она, конечно, много страдала, пока я работал над книгой, ведь это мешало нам проводить совместные уикэнды. Теперь все позади.

Х. Блум

¹⁾ Программу для расчета линий передач LEITER скачать с сайта издательства «Додэка-XXI» по адресу <http://www.dodeca.su/files/leiter.rar>. — *Примеч. изд.*

1.1. Схемотехника мощных импульсных устройств

Импульсные устройства — это схемы, в которых запасенная электрическая энергия выделяется на нагрузке в форме коротких одиночных импульсов или в форме последовательности коротких импульсов с управляемой частотой повторения. Цель этой книги — описать физические и технические основы производства и применения высоковольтных импульсов с очень большой мощностью и энергией. Такие импульсы требуются для ряда нагрузок, либо способных работать только в импульсном режиме, либо обеспечивающих улучшение характеристик при работе в импульсных режимах.

Мы будем говорить об электрических импульсах с мощностями порядка гигаватта (10^9 Вт) при энергии в импульсе порядка килоджоуля и более. В настоящее время для одиночных импульсов наивысшие достигнутые энергия и мощность имеют порядок 100 МДж и несколько сот тераватт соответственно. При этом напряжение составляет от 10 кВ до 50 МВ, а ток — от 1 кА до 10 МА.

В дополнение к мощности и энергии импульсы характеризуются формой, т. е. временем нарастания и спада, а также длительностью плоской вершины и ее неравномерностью. Типовые значения полной длительности импульсов, которые мы будем рассматривать, находятся в диапазоне от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Основные временные параметры импульсов показаны на **Рис. 1.1**.

Время нарастания определяется как время, за которое напряжение нарастает от 10 до 90% амплитуды. Аналогично определяется и время спада. И время нарастания, и время спада импульсов зависят от импеданса нагрузки, который в большинстве случаев меняется во времени. Для длительности импульса нет однозначного определения. Иногда под длительностью импульса понимается его длительность по уровню половины от его максимальной амплитуды (FWHM). Однако для некоторых приложений лучше определять длительность по уровню 90% от максимальной амплитуды. Плоскостность (неравномерность) вершины импульса является важным требованием при управлении некоторыми нагрузками, например элементами Поккельса.

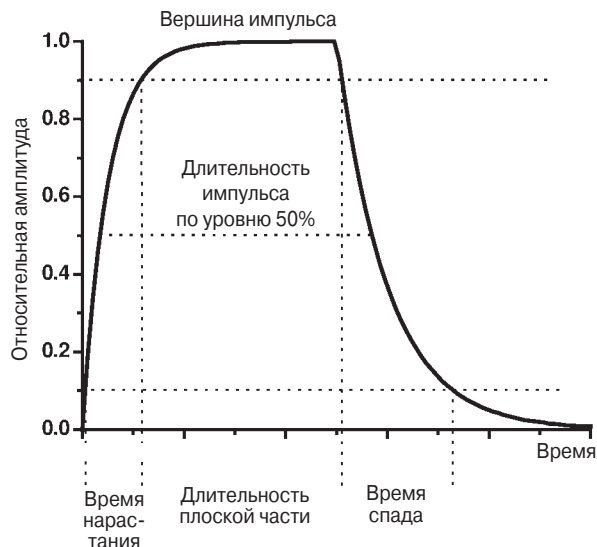


Рис. 1.1. Основные параметры формы импульсов.

Генераторы, используемые для создания мощных электрических импульсов, всегда основаны на сравнительно медленном накоплении энергии в каком-либо «резервуаре» и быстром ее выделении при включении того или иного ключа. В этом процессе всегда имеет место многократное увеличение мощности. Для достижения требуемого коэффициента умножения мощности этот процесс может быть повторен несколько раз.

В дополнение к умножению мощности эти схемы также используются для формирования собственно импульса, т. е. создания требуемых времени нарастания и длительности. Для оптимизации передачи энергии в нагрузку, может оказаться необходимым применение трансформации импедансов. На Рис. 1.2 приведена структурная схема генератора мощных импульсов.

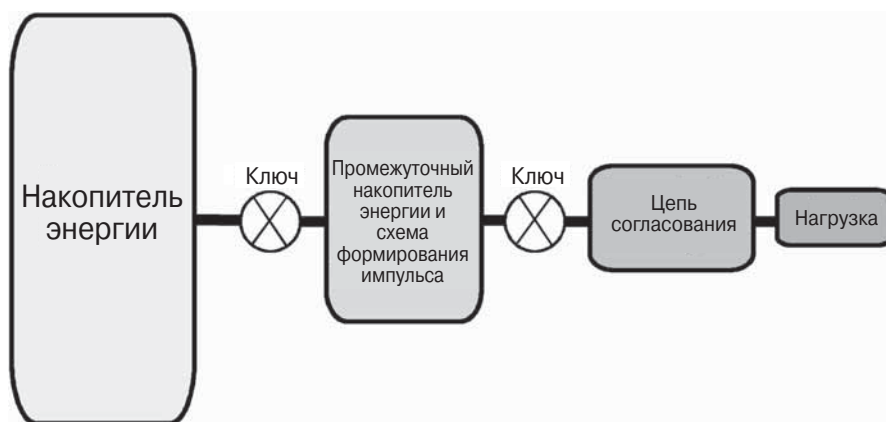


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема генератора мощных импульсов.

Энергия может быть накоплена в химической, механической или электрической формах. В некоторых приборах химические взрывчатые вещества используются для сжатия предварительно созданного магнитного поля и тем самым увеличения энергии, которая может быть из него получена. Химические накопители энергии мы обсудим в гл. 10 этой книги.

Механическая энергия может быть накоплена и сохранена в форме кинетической энергии вращения ротора. В этом случае энергия равна $W_{\text{KIN}} = (1/2) \Theta \omega^2$, где Θ — момент инерции, а ω — угловая скорость вращения. Для массивного цилиндра $\Theta = (1/2)Mr^2$, где M и r — масса и радиус цилиндра соответственно. Таким образом, плотность запасаемой во вращающемся роторе энергии равна $w_{\text{KIN}} = (1/4)r^2\omega^2$. Предел плотности энергии ограничен в этом случае механической прочностью материала, использованного в конструкции ротора. Взаимосвязь между пределом текучести Σ и максимальной скоростью вращения ω_{MAX} описывается формулой $\Sigma = \rho\omega_{\text{MAX}}^2 r^2/2$. Для цилиндра из нержавеющей стали радиусом 1 м получается $\omega_{\text{MAX}} = 400/\text{с}$. При этом достигается плотность запасаемой энергии $w_{\text{KIN}} = 4 \times 10^4 \text{ Дж/кг} = 3.1 \times 10^8 \text{ Дж/м}^3$, что намного больше, чем у накопителей электрической энергии. Проблемой для механических накопителей является высвобождение этой энергии за достаточно короткое время. Таким образом, в общем случае, чтобы получить от механического накопителя энергии требуемый уровень мощности в импульсе, требуется еще несколько каскадов электрического преобразования энергии.

Электрическая энергия может быть накоплена либо с помощью конденсатора в форме электрического поля, либо с помощью индуктивности в форме магнитного поля. В первом случае мы имеем $w_E = \varepsilon\varepsilon_0 E^2/2$, что, при использовании пропитанной маслом бумаги в качестве изолятора с $\varepsilon = 6$ и электрической прочностью $E = 0.78 \times 10^8 \text{ В/м}$, обеспечивает максимальную плотность запасаемой энергии $w_E = 161 \text{ кДж/м}^3$. С учетом ограничений, накладываемых, например, необходимостью корпусирования конденсатора, реально достижимая плотность энергии в этом случае оказывается вдвое меньше, т. е. 80 кДж/м^3 .

Для накопленной в магнитном поле энергии — $w_B = B^2/2\mu_0$. Факторами, ограничивающими плотность запасаемой энергии, в этом случае являются расплавление поверхности проводников либо механические силы, воздействующие на элементы конструкции катушки индуктивности. Нагрев поверхности проводников происходит под воздействием вихревых токов, возбуждаемых магнитным полем. Для проводящего полупространства температура поверхности в общем виде определяется уравнением [Knoepfel, 1970]

$$c_v \rho T(0, t) = \frac{1}{2\mu_0} B^2(0, t) \vartheta(t), \quad (1.1)$$

где c_v и ρ — удельная теплоемкость и плотность материала проводника,

$T(0, t)$ — температура поверхности,

$B(0, t)$ — магнитная индукция на поверхности проводника,

$\vartheta(t)$ — коэффициент, зависящий от формы импульсов поля.

Для меди максимальное значение магнитной индукции находится в пределах 50...100 Тл (в зависимости от формы импульсов). Для определения ограничений, возникающих из-за механических сил, мы используем критерий статического воздействия на защитную оболочку, справедливый для времени нарастания тока (и, следовательно, продолжительности импульса механического давления), большего, чем период собственных колебаний в защитной оболочке [Кноерфел, 1970]:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} < \Sigma_Y \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 + r_1^2}, \quad (1.2)$$

где Σ_Y — предел текучести материала защитной оболочки,

r_0 и r_1 — внешний и внутренний радиусы защитной оболочки соответственно.

Для толстого цилиндра ($r_0 = 2r_1$) из медно-бериллиевого сплава ($\Sigma_Y = 1000$ н/мм²) получается $B < 38$ Тл. В этом случае средняя плотность энергии внутри защитной оболочки (т. е. радиуса r_0) равна $w_B = 39000$ кДж/м³. Отсюда следует, что, даже принимая во внимание необходимость введения в конструкцию магнитных накопителей энергии узлов крепления, изоляции и т. д., плотность накапливаемой энергии в магнитном поле превышает на два порядка максимально возможную плотность энергии в электрическом поле.

На **Рис. 1.3** приведена структурная схема генератора с емкостным накопителем энергии. В этом генераторе используется один или несколько замыкающих ключей, которые остаются разомкнутыми в процессе заряда накопителя и сохранения его заряженного состояния. Когда ключ замыкается, вследствие того что ток разряда намного превосходит ток заряда конденсатора, происходит умножение мощности.

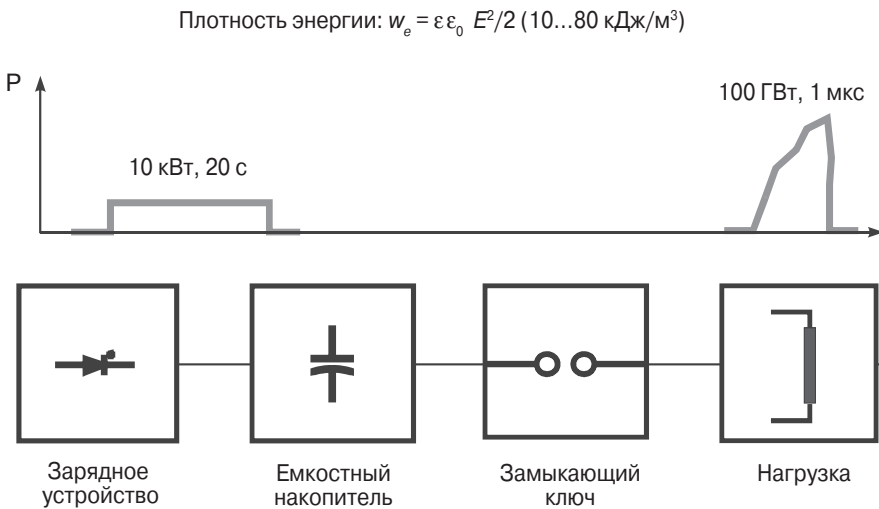


Рис. 1.3. Структурная схема генератора с емкостным накопителем энергии и замыкающим ключом. Приведенные значения мощностей и времени характерны для генераторов мощных одиночных импульсов. До нагрузки доходит около 50% накопленной энергии.

Генератор с индуктивным накопителем энергии (**Рис. 1.4**) требует использования размыкающего ключа, который должен быть замкнут и пропускать большой ток во время накопления энергии. После завершения процесса «зарядки» ключ должен мгновенно разомкнуться и при этом противостоять воздействию импульса высокого напряжения. В генераторе с индуктивным накопителем энергии умножение мощности достигается увеличением напряжения. Для уменьшения потерь в процессе «зарядки» для генератора с индуктивным накопителем энергии требуется источник питания с большим выходным током. Из-за того, что размыкающие ключи с подходящими параметрами намного сложнее сделать, чем замыкающие ключи, в большинстве генераторов импульсов большой мощности применяются емкостные накопители энергии, хотя они и имеют намного меньшую удельную плотность энергии, чем индуктивные.

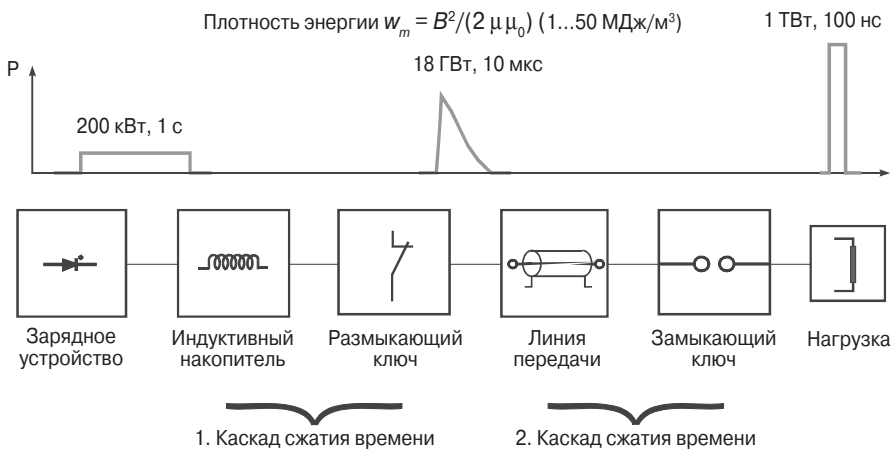


Рис. 1.4. Структурная схема генератора с индуктивным накопителем энергии и размыкающим ключом. Только первый каскад сжатия времени имеет индуктивный накопитель. Второй каскад имеет емкостный накопитель и замыкающий ключ. Как и ранее, потери составляют около 50%.

1.2. Преимущества

Так в чем же уникальные преимущества импульсов большой мощности? Основной их характеристикой является большое отношение импульсной мощности к ее среднему значению. При этом могут быть использованы явления, обладающие некими порогами возникновения, а также нелинейные эффекты. Например, импульс сильного электрического поля может вскрыть мембраны биологических клеток или привести к взрывному возникновению автоэмиссии электронов из металлических поверхностей. Кроме того, большое отношение импульсной мощности к ее среднему значению способствует подавлению зачастую нежелательных тепловых процессов и позволяет избежать возникновения таких явлений, как электрический пробой. Использование коротких импульсов обеспечивает высокое разрешение, например, в радиолокации или рентгеновской радиографии.

Начиная со Второй мировой войны, развитие импульсной техники в основном следовало требованиям военной техники как в части оружия, использующего импульсы большой мощности, так и в части инструментов для моделирования и диагностики. Значительные усилия были приложены к разработке таких систем, как электромагнитные пушки и лучевое оружие. Несмотря на эти усилия, за исключением импульсных радиолокаторов, ни одно из военных применений техники высокой мощности не получило развития. Однако для военных научных и исследовательских программ было разработано много систем, использовавших импульсы большой мощности. К ним, например, относятся установки для изучения воздействия ядерного оружия, для определения свойств материалов под воздействием высоких ударных нагрузок и генерации мощных импульсов жесткого рентгеновского излучения для получения изображений быстропротекающих процессов.

Недавний прогресс в разработке надежных и доступных компонентов для построения систем генерации импульсов большой мощности (таких, как высоковольтные конденсаторы с большим сроком службы и новые типы высоковольтных полупроводниковых ключей) возбудили новую волну интереса к использованию импульсов большой мощности для коммерческих и промышленных целей. В отличие от военных применений в этом случае на первый план выступают экономические соображения.

Основные области применения импульсов большой мощности (1 ГВт...100 ТВт, 1 кДж...100 МДж, 10 кВ...50 МВ) это:

- создание импульсных электрических и магнитных полей;
- источники интенсивных излучений (электронов, ионов, рентгеновских лучей, сверхвысокочастотных радиоволн);
- создание электрических разрядов (плазмы).

(Области применения будут детально рассмотрены в гл. 10...12.) Мощные импульсы успешно применяются, например, в медицине для дефибрилляции и литотрипсии, в пищевой промышленности для стерилизации продуктов рентгеновским излучением. Принцип действия дефибрилляторов и литотрипсеров основан на воздействии электрического поля и импульсов давления, создаваемых электрическими разрядами.

Очевидно, что использование импульсов большой мощности может принести успех только в тех областях применения, где они оказываются эффективнее существующих приемов, или для выполнения задач, которые иначе не разрешимы.

Книгу можно условно разделить на две части. В первой части (гл. 2...9) представлены физические и электрические основы техники получения мощных импульсов. Во второй части (гл. 10...12) описаны некоторые из наиболее перспективных, находящихся на стадии становления областей применения этой техники.

СТАТИЧЕСКАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1. Введение

Газы, жидкости и твердые диэлектрические вещества используются как изоляторы в таких устройствах, как конденсаторы, высоковольтные линии передачи энергии и трансформаторы, а также в качестве рабочей среды в ключах. Предельные характеристики этих устройств определяются электрической прочностью используемого диэлектрика и его диэлектрической проницаемостью.

Электрическая прочность изолятора может быть качественно определена как максимальная напряженность электрического поля, которую данный материал может выдержать в течение определенного времени. А вот при количественном рассмотрении приходится сталкиваться с большим числом разнообразных явлений. Факторы, которые влияют на электрическую прочность, могут быть выражены в виде интегрального воздействия напряженности поля и времени, связанного с вероятностью отказа (пробоя) следующим выражением:

$$\ln[1-F(E, t)] = -\alpha \int_0^t E^b t^a dt.$$

Здесь $F(E, t)$ представляет собой вероятность пробоя за время t под воздействием напряженности поля E , которое, в свою очередь, может быть функцией t ; a , b и α являются постоянными, которые должны быть определены экспериментально. Другими факторами, влияющими на электрическую прочность, являются геометрия образца, давление, температура и материал, из которого изготовлены электроды.

Пробой диэлектриков представляет собой явление, подчиняющееся законам статистики. Невозможно предсказать с определенностью время наступления пробоя, можно лишь рассчитать вероятность пробоя при заданной напряженности поля, определяемой напряжением и геометрией электродов. На микроскопическом уровне для пробоя требуется наличие заряженных частиц, которые получают достаточно энергии от приложенного электрического поля, чтобы ионизировать вещество и породить новые заряженные частицы. В большинстве случаев в про-

цессах пробоя доминируют электроны ввиду их намного большей подвижности по сравнению с ионами.

Для того чтобы электроны получили достаточную энергию из поля между столкновениями, их средний свободный пробег в данном веществе должен быть довольно большим. Если пренебречь тем, что в разных веществах энергии ионизации отличаются, и допустить, что средний свободный пробег зависит исключительно от плотности данного вещества, электрическая прочность должна быть одинаковой для веществ с равной плотностью. На **Рис. 2.1** показан график зависимости электрической прочности различных веществ от их плотности. Из этого графика следует, что электрическая прочность слабо зависит от состояния вещества и сильно — от его плотности.

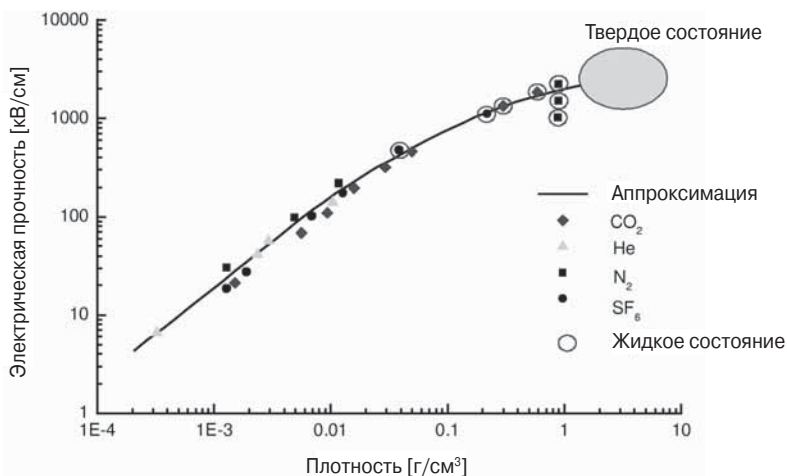


Рис. 2.1. Статическая электрическая прочность различных газов и жидкостей в зависимости от плотности [Cooke, 1998].

Если газы и жидкости самовосстанавливаются после пробоя, т. е. их электрическая прочность возвращается к исходному значению¹⁾, то твердые диэлектрики разрушаются необратимо. С другой стороны, твердые диэлектрики всегда необходимы, если требуется противостоять механическим силам. Жидкие диэлектрики предпочтительны при необходимости обеспечения отвода большого количества тепла.

Несмотря на ряд общих черт в явлении электрического пробоя в разных средах, существует и много различий, особенно в возникновении и развитии разряда. Таким образом, приходится рассматривать газы, жидкости и твердые тела раздельно. В следующих разделах мы рассмотрим электрическую прочность этих материалов феноменологически, с выделением практических аспектов и формул, полезных при конструировании импульсных устройств большой мощности.

¹⁾ Если не происходит химических реакций. — *Примеч. пер.*