

К. т. н. В. В. КРАВЧИНА, Н. Н. НАГОРНАЯ

Украина, Запорожская государственная инженерная академия,
Запорожский национальный технический университет
E-mail: Kravchina@list.ru

Дата поступления в редакцию
13.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ
(ОНАС, г. Одесса)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВЫХ ЛАВИННЫХ ДИОДОВ

Показана эффективность защиты от перенапряжений с помощью электрических схем с применением лавинных диодов, использующих для гашения импульсов перенапряжения лавинный пробой.

Промышленность Украины выпускает ряд лавинных диодов (в таблеточном исполнении, а также в штыревых корпусах с жесткими и гибкими выводами), рассчитанных на токи в прямом направлении I_{FAM} от 10 до 5000 А, с мощностью, выделяемой в лавине, от 2,5 до 16 кВт (способных пропускать достаточно большие обратные токи, составляющие 1...10% от допустимого прямого тока в течение до 100 мкс [1]) при повторяющихся импульсных обратных напряжениях U_{RRM} в диапазоне от 800 до 3800 В и выше. Также выпускаются быстровосстанавливающиеся лавинные диоды ДЧЛ233, ДЧЛ253, особенности конструкции которых рассматриваются в [2, 3].

Лавинные диоды широко используются в выпрямительных агрегатах для металлургической, химической промышленности, железнодорожного транспорта и в других электротехнических изделиях, в которых наблюдается или может возникнуть напряжение выше допустимого. Преимущество лавинных диодов перед силовыми выпрямительными диодами состоит в том, что они, имея меньшую мощность, не разрушаются при значительных превышениях напряжения, а после снятия перенапряжения восстанавливают свои параметры. Использование таких диодов позволяет увеличить надежность электрических схем, так как защитные возможности лавинного пробоя преобладают по мощности по сравнению с обычным силовым диодом.

Исследование и моделирование работы электрических схем защиты силовых приборов с применением лавинных диодов важны и необходимы для разработчиков как агрегатного оборудования, так и силовых полупроводниковых приборов. Поэтому целью настоящей работы являлось проведение моделирования силовых схем с защитными лавинными диодами, а также исследование особенностей ВАХ и коммутационных характеристик лавинных диодов. Задача состояла в исследовании электрических схем защиты ключей с применением лавинных диодов, в создании и исследовании моделей лавинных диодов и проведении моделирования работы схем защиты с помощью системы MATLAB.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к p^+n -переходу лавинного диода, напряженность электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) увеличивается, достигая значений, при которых наблюдается заметная ударная ионизация [4—6]. При этом электроны и дырки образуют вторичные электронно-дырочные пары, которые умножаются в ОПЗ. Количественной характеристикой этого процесса является коэффициент умножения носителей. В электрических полях, напряженность которых превышает 10^5 — 10^6 В/см, носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристалла и рождения новых электронно-дырочных пар, вследствие чего наступает лавинный пробой. В лавинных диодах на первоначальной стадии лавинного пробоя образуются области малых размеров с локальными пробоями (микроплазменные пробои) и меньшим напряжением пробоя по сравнению с однородными областями $p-n$ -перехода.

При появлении микроплазменного пробоя вольт-амперная характеристика (ВАХ) выпрямительного элемента описывается следующей зависимостью [3]:

$$U(I) = U_{\text{проб}}(I_0)(1 + \beta_T \Delta T) + \int_{I_0}^I \frac{dU}{dI} dI, \quad (1)$$

где $U_{\text{проб}}$ — напряжение «загиба» на кривой ВАХ (напряжение, при котором появляются первые микроплазменные пробои);
 I_0 — ток, соответствующий напряжению $U_{\text{проб}}$;
 ΔT — перегрев $p-n$ -перехода за счет протекания обратного тока I , $\Delta T = T_2 - T_1$;
 β_T — температурный коэффициент пробивного напряжения.

Величина $dU/dI = R_{dR}$ представляет собой дифференциальное (динамическое) сопротивление $p-n$ -структуры в области лавинного пробоя и определяется сопротивлением и количеством областей микроплазменного пробоя. Зависимость динамического сопротивления лавинных диодов от обратного тока описывается формулой $IR_{dR} = A$. Величина A характеризует степень однородности лавинного пробоя и для $p-n$ -переходов с $U_{\text{проб}} = 400$ — 1000 В составляет 4—10 В. Величина R_{dR} при больших обратных токах стремится к некоторому насыщению.

Изотермическая ВАХ $p-n$ -перехода в области микроплазменного пробоя описывается зависимостью

$$I = I_0 e^{\frac{U(I) - U_{\text{проб}}(I_0)}{A}}. \quad (2)$$

При дальнейшем увеличении обратного напряжения объем областей с микроплазменными образованиями значительно увеличивается, и ВАХ лавинного диода становится линейной [4—6]:

$$I(U_n) = \frac{U_n - U_m}{R_d}, \quad (3)$$

где U_n — напряжение включенного состояния лавины;
 U_m — экстраполированное напряжение микроплазменного пробоя.

Дифференциальное сопротивление R_d определяется наклоном ВАХ на линейном участке, U_m определяется продлением линейного участка ВАХ до пересечения с уровнем обратного тока p - n -перехода, протекающего вне области образования микроплазменных каналов.

Проведение эксперимента

В работе проводилось исследование различных серийных диодных структур производства ООО «Элемент-Преобразователь» (Украина, г. Запорожье), которые формировались на пластинах кремния n -типа с удельным сопротивлением 40—60 Ом·см. С одной стороны пластин Si формировался p^+ - p -слой области анода за счет диффузии бора с алюминием на глубину 60—110 мкм, а с другой стороны пластин формировался n^+ -слой Si катодной области за счет диффузии фосфора на глубину 40—70 мкм. Одновременная диффузия акцепторной и донорной примесей происходила при температуре 1250°C в присутствии легированных оксидных пленок. Омические контакты анода и катода получали путем формирования пленок алюминия.

Проводился контроль основных параметров сформированных диодных структур:

- времени жизни неосновных носителей заряда τ_p ;
- времени обратного восстановления $t_{rr} = t_s + t_f$ где t_s — время запаздывания обратного напряжения, t_f — время спада обратного тока;
- тока I_{rr} и заряда $Q_{rr} = Q_s + Q_f$ обратного восстановления, где Q_s — заряд запаздывания, Q_f — остаточный заряд;
- амплитудного значения обратного тока I_{RRM} ;
- установившегося импульсного прямого напряжения U_{FM} ;
- импульсного переходного прямого напряжения U_{FR} ;
- времени релаксации импульса t_{FR} (рис. 1).

Кроме перечисленных параметров контролировались также коммутационные характеристики диодных структур, такие как время и величина изменения тока и напряжения при включении прямого U_{FM} или обратного U_R напряжения.

В таблице приведены полученные экспериментально численные значения коммутационных параметров исследуемых лавинных диодов типа ДЧЛ271, имеющих разную ширину базы W_n и время жизни τ_p неравновесных носителей заряда в базе.

Приведенные значения тока I_{rr} , времени t_{rr} и заряда Q_{rr} получены при скорости изменения анодного тока $dI/dt = 100$ А/мкс.

На рис. 2 для тех же образцов лавинных диодов приведены импульсы прямого переходного напряжения при пропускании прямого тока $I_{FAV} = 160$ А и скорости $dI/dt = 200$ А/мкс и временные зависимости переходного тока в процессе обратного восстановления образцов силового диода. На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что амплитудное значение обратного тока I_{RRM} и время релаксации импульса t_{FR} зависят от ширины базы W_n и времени жизни τ_p неравновесных носителей заряда в базе.

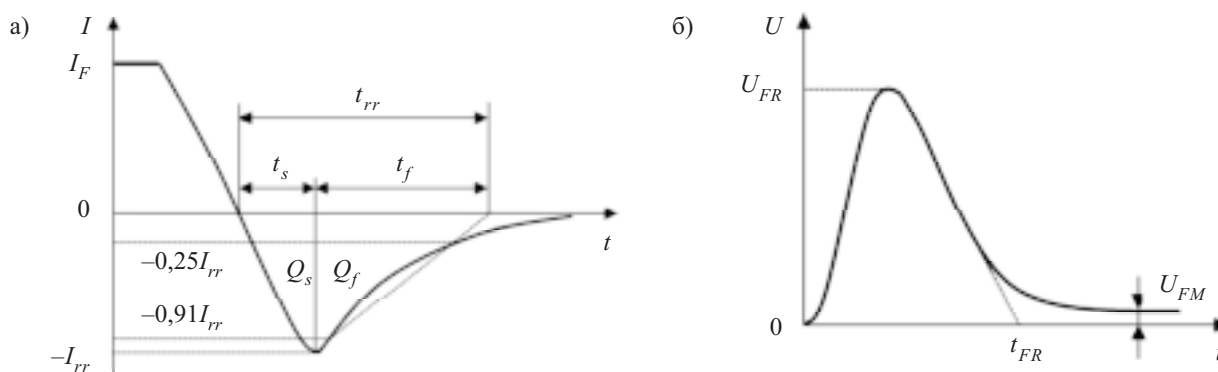


Рис. 1. Изменение тока диода во времени при смене смещения на нем с прямого на обратное (а) и импульс прямого переходного напряжения диода (б)

Коммутационные параметры пяти лавинных диодов

№ образца	W_n , мкм	τ_p , мкс	U_{RRM} , В	I_{FAV} , А	U_{FR} , В	U_{FM} , В	t_{FR} , мкс	I_{rr} , А	Q_{rr} , мкКл	t_{rr} , мкс
1	170	9,0	1800	500	46	1,43	2,4	99	225	4,0
2	170	4,2	1800	500	42	1,48	2,1	66	98	2,5
3	170	3,9	1800	500	36	1,49	1,9	61	80	2,2
4	145	3,4	1400	500	26	1,40	1,7	53	51	1,5
5	170	30	1800	500	58	1,15	2,8	240	1020	12

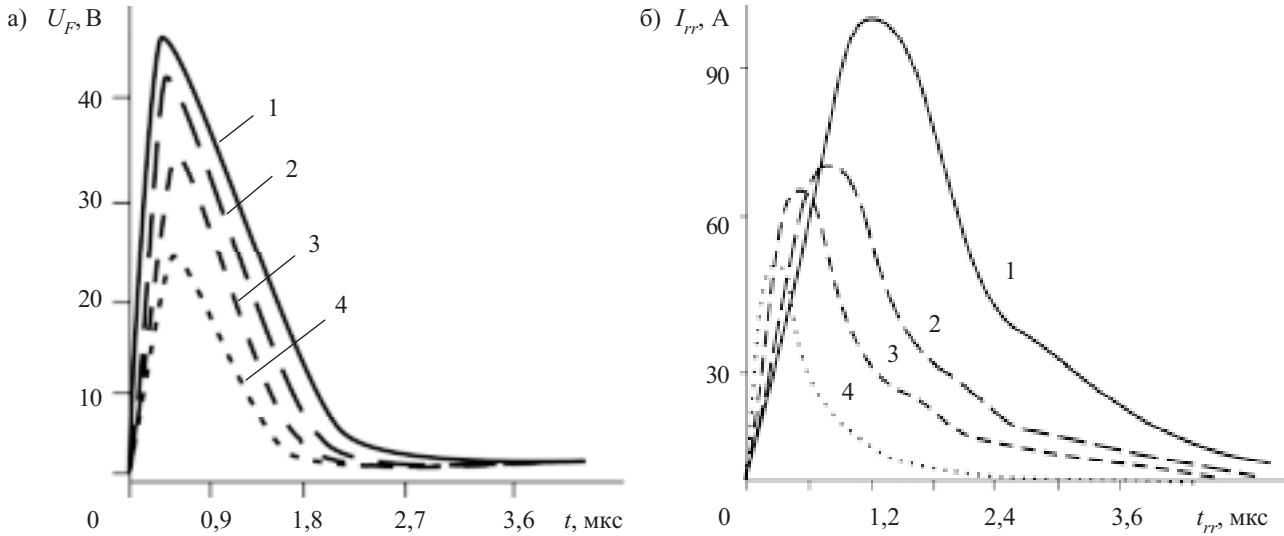


Рис. 2. Импульсы прямого переходного напряжения при установлении прямого тока $I_{FAV}=160$ А (а) и временные зависимости переходного тока в процессе обратного восстановления силовых диодов ДЧЛ271 (б) (Нумерация диодов соответствует нумерации образцов таблицы)

литуда импульсов, соответствующая импульсному переходному прямому напряжению U_{FR} , и время релаксации импульсов t_{FR} (время включения t_{Fon} в прямом направлении), значения тока I_{rr} и времени t_{rr} обратного восстановления зависят от ширины базы, а также от времени жизни неравновесных носителей заряда τ_p и величины накапливаемого в базе заряда при высоком уровне инжекции.

Учитывая данные таблицы, накапливаемый в базе нестационарный заряд дырок можно определить по формуле

$$Q = I_{FAV} \tau_p k(W_n),$$

где τ_p — время жизни неравновесных носителей заряда (дырок) в области базы;

$k(W_n)$ — коэффициент, зависящий от ширины базы W_n и диффузионной длины дырок L_p в области базы.

Сопротивление базы в начальный момент включения в сотни раз больше, чем при установившемся режиме с высоким уровнем инжекции при напряжении U_{FM} и токе I_{FAV} . Динамическое сопротивление R_{dF} на прямом участке ВАХ составляет 0,3—0,7 Ом. Для обратного напряжения, соответствующего началу образования микроплазменных пробоев, динамическое сопротивление R_{dR} составляет величину порядка десятков ом.

С учетом формулы (3), напряжение в ВАХ в зависимости от величины прямого и обратного тока (тока лавины) определяется по формуле

$$U_{F(n)} = U_{T0(m)} + R_{dF(R)} I_{F(R)},$$

Сопротивление R_{dF} определяется как

$$R_{dF} = \frac{U_{FM} - U_{T0}}{4,71 I_{F(AV)}},$$

где U_{T0} — пороговое напряжение диода;

U_{FM} — прямое напряжение диода при заданном импульсном токе $4,71 I_{F(AV)}$;

$I_{F(AV)}$ — максимально допустимый средний прямой ток диода.

При построении электрических схем защиты от пиковых перенапряжений целесообразно использовать серийные высокочастотные лавинные диоды, имеющие соответствующее обратное напряжение пробоя, т. е. для которых пиковые перенапряжения соответствуют области напряжений лавинного пробоя U_{BR} . В случае использования диодов для электрических схем сварочных аппаратов следует применять диоды с уменьшенной шириной базы (подобно образцу 4), т. к. для подобных применений желательно иметь как можно меньшее значение параметра U_{FR} .

Известны схемы защиты с помощью сапрессоров типа Transil, для которых максимальные значения напряжения достигают величины 700 В. В настоящей работе моделируются схемы с напряжениями до 4000 В и выше при значительных обратных токах.

Защитная RCD-цепь в силовых схемах

Снаббер (демпфирующая цепь), показанный на рис. 3, позволяет, во-первых, ограничить скорость нарастания напряжения на силовом приборе (в схеме

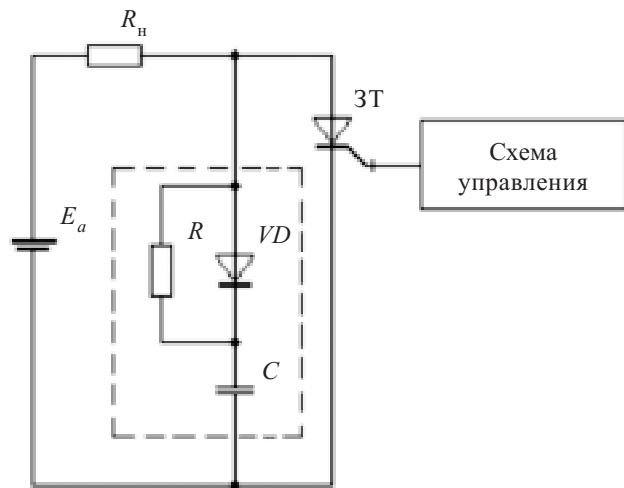


Рис. 3. Запираемый тиристор со снаббером

это — запираемый тиристор) в процессе спада его анодного тока при выключении, а во-вторых, ускорить процесс спада анодного тока, что важно при наличии индуктивной нагрузки в схеме. В результате, процессы спада тока и нарастания напряжения разнесены во времени, что приводит к уменьшению выделяемой динамической мощности силового прибора.

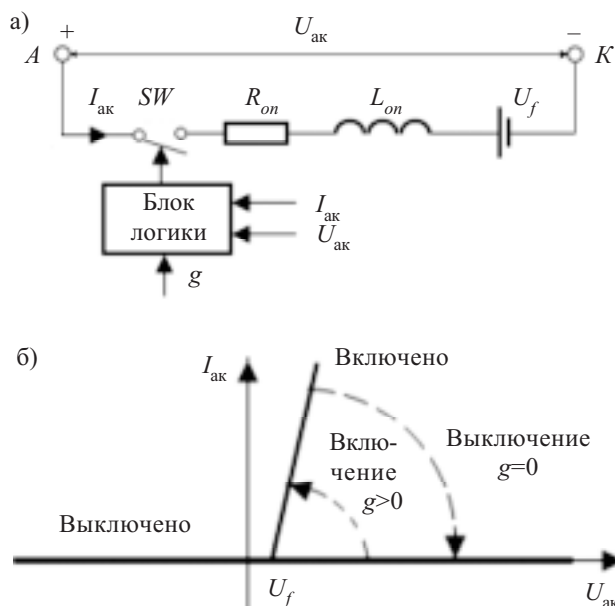
Кроме того, использование снаббера приводит к ослаблению всплеска напряжения, возникающего в силовой цепи из-за резкого прерывания большого тока. Перенапряжение на силовом ключе в виде всплесков большой амплитуды, зависящей от значения индуктивности в цепи, может привести даже к разрушению структуры прибора.

При включении силового прибора ограничение скорости нарастания анодного тока прибора осуществляется дросселем, функции которого могут выполнять паразитные индуктивности монтажа, если допустимая скорость нарастания анодного тока прибора достаточно высока (несколько сотен ампер в микросекунду, как в запираемых тиристорах). Скорость уменьшения прямого напряжения определяется снабберной цепью.

Время восстановления запирающих свойств диода VD в обратном направлении должно быть как можно меньшим с целью исключения возможности разряда конденсатора C через этот диод при включении защищаемого прибора. Кроме того, для предотвращения возникновения низковольтной динамической лавины в диоде VD он должен иметь малый ток обратного восстановления и мягкую способность восстановления.

Подготовка к моделированию силовых устройств с лавинным диодом

Моделирование работы электронных силовых устройств проводилось в системе MATLAB+Simulink с применением пакета SimPowerSystems, содержащего в своих библиотеках блоки моделей электротехнических устройств.



Такой подход позволил проводить динамический анализ электронных систем, представленных на уровне структурных и функциональных блоков с минимальным набором исходных параметров. Применяемое имитационное моделирование существенно упрощает задачу разработчиков силовых устройств на первоначальных этапах проектирования.

Перед проведением анализа необходимо выполнить компоновку электронной системы (схемы). Компоновка предусматривает выбор блоков из библиотек используемых пакетов, их размещение в окне модели и соединение между собой, в результате чего формируется mdl-файл.

При исследованиях компоновка моделей электронных устройств проводилась с учетом того, что модельные блоки из пакетов Simulink (S-блоки) и SimPowerSystems (SPS-блоки) функционируют принципиально различными способами. В S-блоках передача сигналов однонаправленная — от входов к выходам, а в SPS-блоках, моделирующих прохождение энергетических потоков, передача информации двунаправленная, причем направление передачи зависит от направления тока. В связи с этим S-блоки и SPS-блоки невозможно соединять непосредственно. Для соединения любого SPS-блока с S-блоком в моделях устройств используются промежуточные блоки — измерители тока и напряжения. Сигнал же от S-блока к SPS-блоку передается через управляемые источники тока и напряжения.

После компоновки проводилось описание моделируемых систем. В рассматриваемых моделях электронных устройств использовался набор необходимых блоков как без задаваемых параметров, так и с задаваемыми параметрами.

Из библиотеки пакета SimPowerSystems были выбраны следующие блоки [7]:

— Connector-блоки (соединительные блоки) типа T-Connector и L-Connector, не имеющие заданных входных параметров;

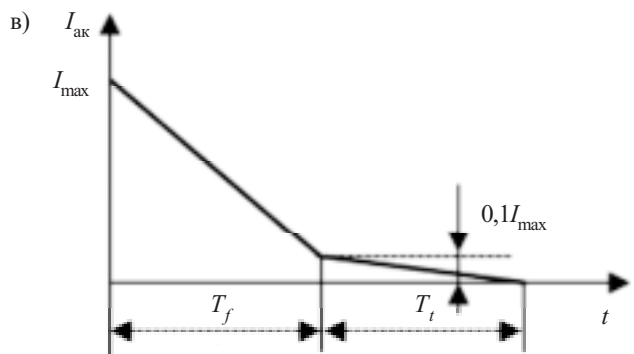


Рис. 4. Модель запираемого тиристора, построенная в программе SimPowerSystems: а — эквивалентная схема; б — статические ВАХ; в — переходная характеристика в режиме выключения

— Measurement-блоки (измерительные блоки) типа измеритель тока (Current Measurement) и измеритель напряжения (Voltage Measurement), формирующие мгновенные значения тока и напряжения в формате выходных Simulink-сигналов;

— DC Voltage Source (источник постоянного напряжения), входным параметром которого является амплитуда сигнала (Amplitude);

— Controlled Voltage Source (управляемый идеальный источник напряжения), вырабатывающий напряжение по Simulink-сигналу управления. При инициализации задаются начальные амплитуда, фаза и частота сигнала, а также тип источника переменного (AC) или постоянного (DC) напряжения;

— Series RLC Branch (последовательная RLC-цепь). Определенным сочетанием значений параметров блока задается одна из конфигураций цепи — RLC, R, L, C, RL, RC, LC или Open circuit (разрыв). Для удаления из цепи резистора или для исключения индуктивности их величина задается равной нулю. Для исключения из цепи емкости ее значение приравнивается к бесконечности (inf). Исключенный элемент на пиктограмме не изображается.

Модель запираемого тиристора (GTO) (рис. 4, а) состоит из последовательно включенных резистора R_{on} , индуктивности L_{on} , источника постоянного на-

пряжения U_f , ключа SW. Сигнал управления g подается через управляющий электрод на блок логики. При $g > 0$ и $U_{ак} - U_f > 0$ прибор находится во включенном состоянии, через него протекает ток $I_{ак}$ (рис. 4, б). Для выключения тиристора необходимо, чтобы сигнал g стал нулевым ($g = 0$).

Процессы переключения (рис. 4, в) моделируются с помощью следующих параметров: T_f — время спада анодного тока до уровня 0,1 от значения тока на момент выключения; T_t — время затягивания, в течение которого ток анода уменьшается от уровня 0,1 до нуля.

В модели запираемого тиристора предусмотрена демпфирующая RC-цепь с параметрами R_s , C_s . При необходимости она удаляется, если задать $R_s = inf$, $C_s = inf$.

В случае отсутствия управляющего электрода модель представляет собой модель силового диода.

Моделирование работы силовых схем с защитными цепями

Перед началом моделирования задавались параметры моделирования в меню Simulation/ Simulation Parameters/ Solvers.

При анализе переходных процессов электронных схем решаются системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), которые являются мо-

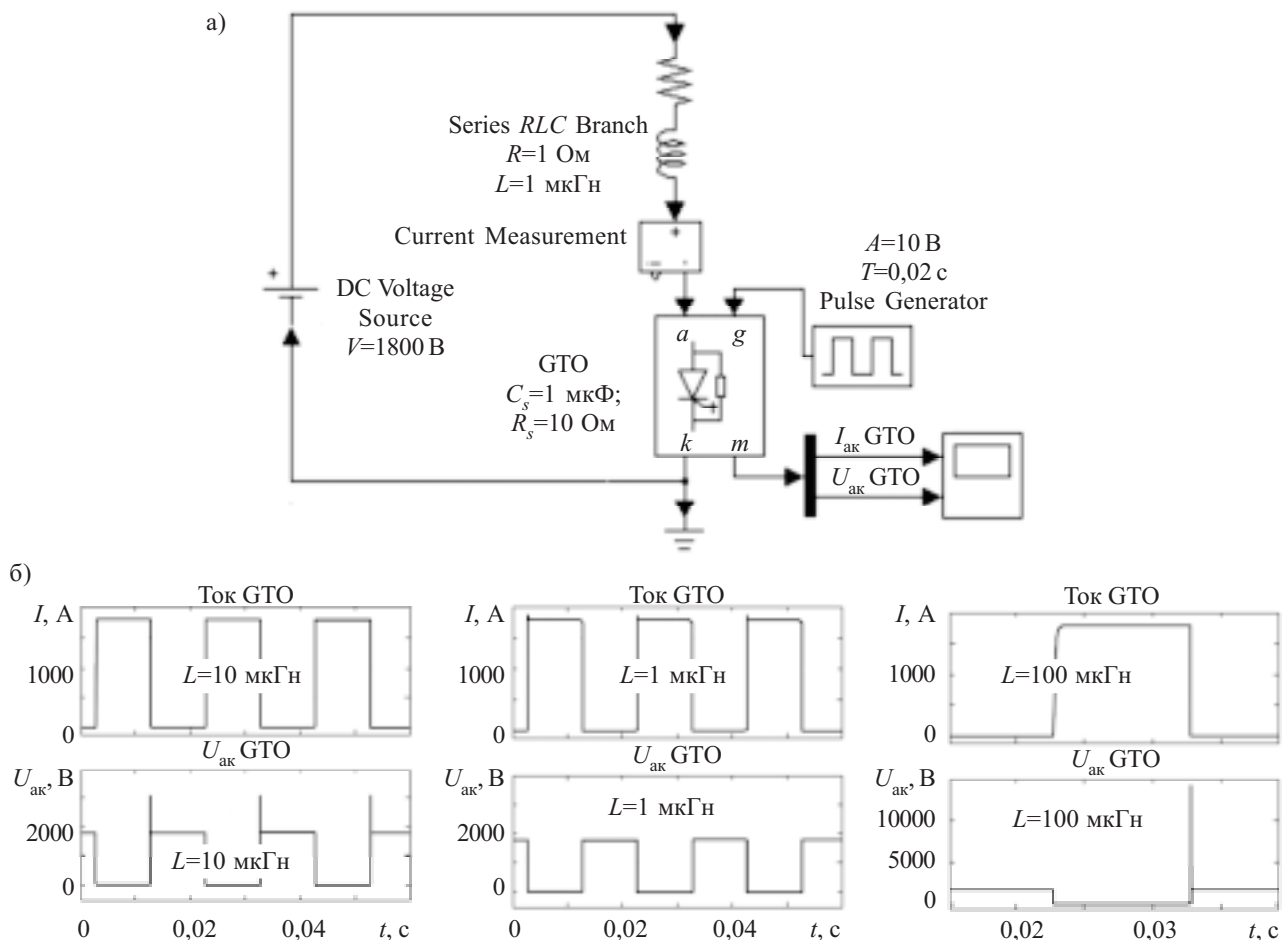


Рис. 5. Схема преобразователя напряжения без защитных цепей (а) и временные диаграммы тока запираемого тиристора и падения напряжения на нем (б)

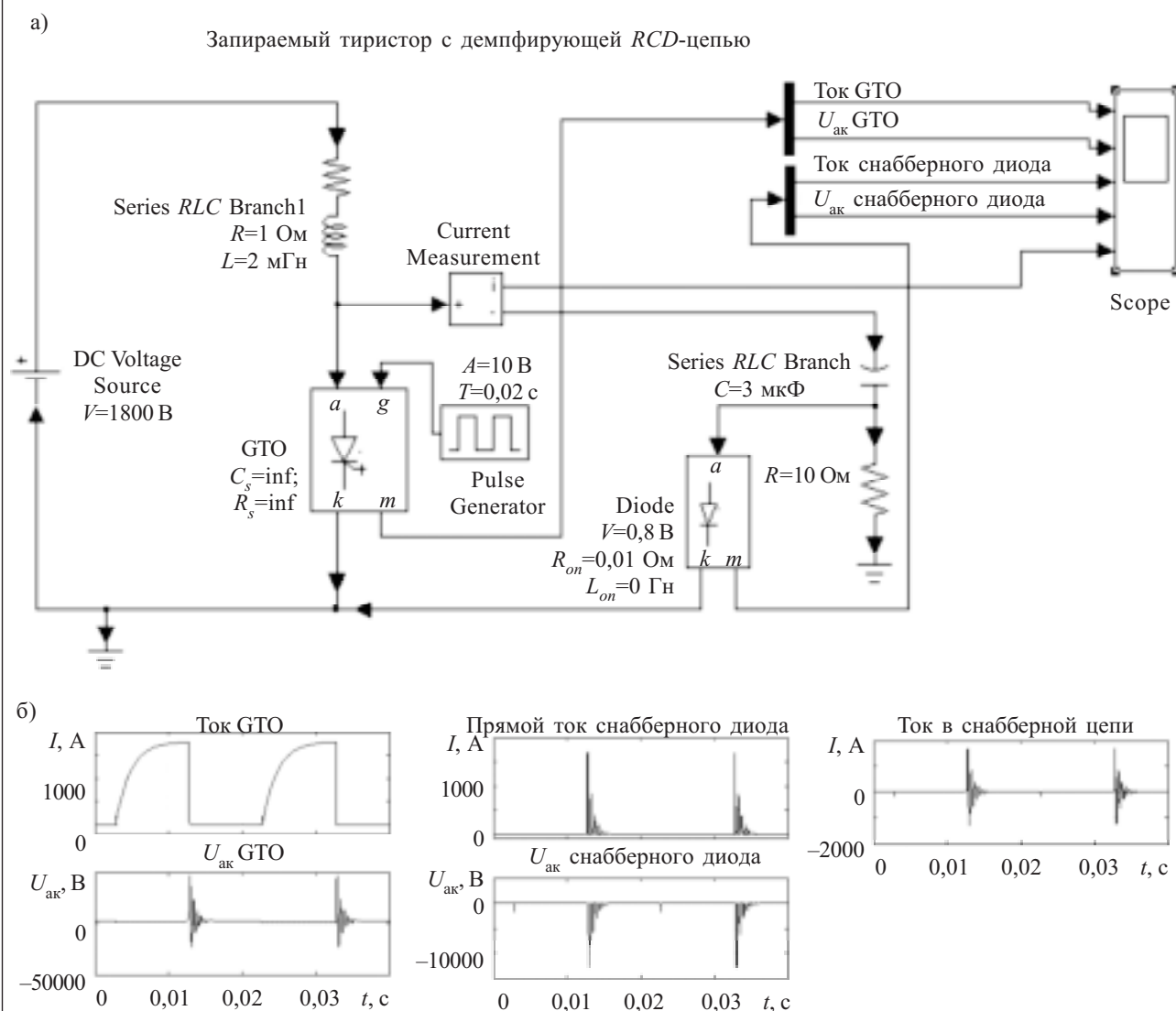


Рис. 6. Схема преобразователя напряжения с защитной RCD -цепочкой (а) и ее временные диаграммы (б)

делями анализируемых схем. Различные методы решения систем ОДУ в системе MATLAB реализуются с помощью встроенных функций (солверов).

В работе при анализе всех схем шаг интегрирования выбирался переменным с помощью параметра Solver options, задавалось конечное время моделирования, выбиралась функция солвера ode23tb, в основе работы которой лежит неявный метод Рунге–Кутты с первым шагом по методу трапеций и вторым шагом по методу «дифференцирования назад» 2-го порядка. Все остальные параметры устанавливались по умолчанию.

Моделирование работы силовых схем с защитными цепями на основе лавинных диодов рассматривалось на примере импульсного преобразователя с запираемым тиристором.

Поскольку статическая ВАХ модели диода, используемая в пакете SimPowerSystems, является линеаризованной (представленной совокупностью двух асимптот), а обратный ток диода в модели является нулевым, для отображения процессов в об-

ласти микроплазменного пробоя предлагается использовать параллельное соединение двух встречно-включенных диодов, один из которых моделирует прямую ветвь ВАХ лавинного диода, а другой — обратную.

В модели одного из диодов параметр V_f — это падение напряжения на прямосмещенном диоде во включенном состоянии при нулевом анодном токе. В модели же встречного диода V_f — это напряжение лавинного пробоя U_{BR} обратносмещенного диода, а параметр R_{on} соответствует дифференциальному сопротивлению диода в режиме микроплазменного пробоя.

Для исследования влияния защитных цепей на работу силовых приборов вначале рассматривалась схема импульсного преобразователя со встроенной в модель тиристора последовательной защитной RC -цепью при варьировании значения индуктивности в нагрузке. Активное сопротивление нагрузки не изменялось и принималось равным 1 Ом.

В схеме на рис. 5, а и во всех далее приведенных схемах для возможности сопоставления результатов

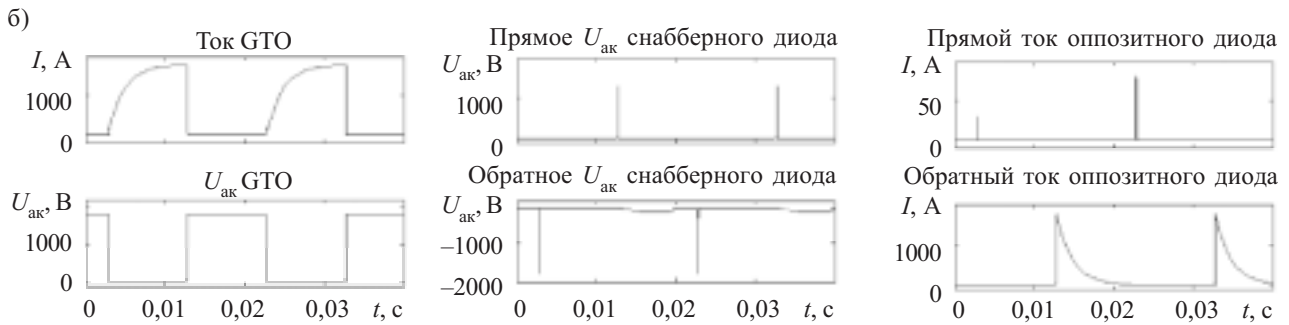
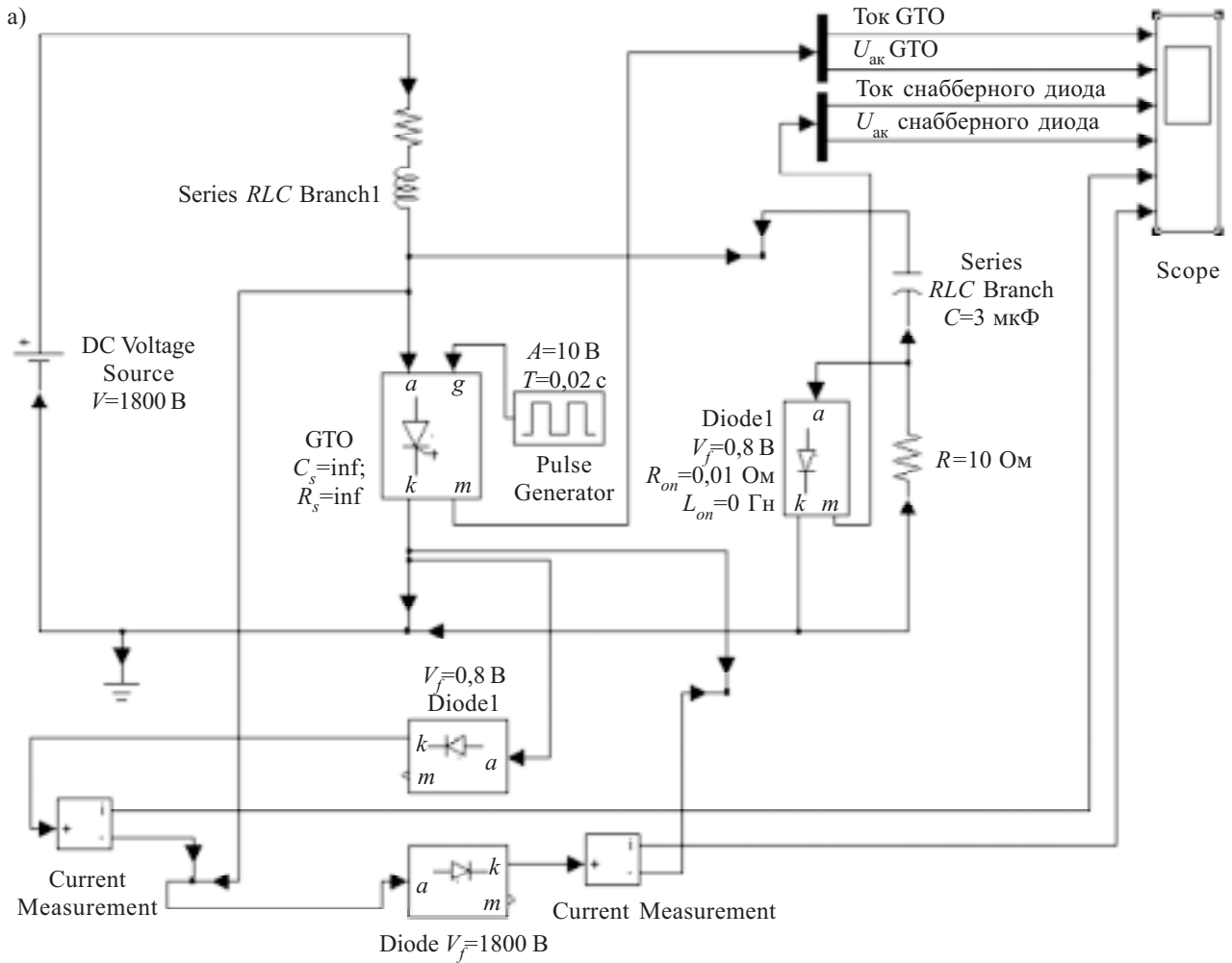


Рис. 7. Импульсный преобразователь напряжения с оппозитным диодом

их анализа использовалась модель запираемого тиристора с одинаковыми параметрами: $R_{on}=0,1$ Ом, $L_{on}=1$ мкГн, $U_f=0,8$ В, $T_f=10$ мкс, $T_i=20$ мкс.

Результаты моделирования (рис. 5, б) наглядно демонстрируют, что при повышении значения индуктивности амплитуда кратковременных всплесков на силовом приборе, которые могут вывести его из строя, увеличивается (амплитуды всплесков напряжения на тиристоре по отношению к установившемуся значению $U_{ак}=1800$ В равны 0; 100; 1250 В при $L=10^{-6}$; 10^{-5} ; 10^{-4} Гн, соответственно). Следовательно, в схеме должны присутствовать защитные цепи.

Известно, что *RCD*-цепочка снижает скорость нарастания прямого напряжения при выключении тиристора и исключает возможный пробой при восстановлении прямой запирающей способности тиристора. Причем ее роль увеличивается при увеличении прямого рабочего напряжения тиристора, т. к. увеличивается мощность, выделяющаяся при выключении тиристора. Схема преобразователя напряжения с *RCD*-цепочкой и результаты моделирования показаны на рис. 6. Напряжение источника постоянного напряжения составляет 1800 В, сопротивление нагрузочного резистора $R=1$ Ом, значение индуктивности $L=2$ мГн. Анализ представленных временных диаграмм позво-

ляет сделать вывод о неэффективности RCD-цепочки при наличии в схеме достаточно большой индуктивности, вызывающей колебательный процесс перезарядки снабберной емкости (при выключении тиристора на нем возникают затухающие колебания с максимальным размахом 7000 В в течение 4 мс, при этом прямой ток снабберного диода также колеблется с максимальной амплитудой 1700 А в течение того же времени, а максимальное напряжение на нем достигает 12500 В).

Электрические перенапряжения, образующиеся в результате колебательных процессов при коммутации силовых приборов, можно устранить несколькими способами. Один способ предусматривает параллельное подключение обратного диода к индуктивной нагрузке. При втором способе оппозитный (антипараллельный) лавинный диод устанавливается параллельно силовому прибору.

Схема с оппозитным лавинным диодом и результаты ее моделирования показаны на рис. 7. Сопротивление и индуктивность нагрузки — такие же, как на схеме на рис. 6. Временная диаграмма $U_{ак}(t)$ в этом случае указывает на отсутствие всплесков напряжения.

Максимальное прямое падение напряжения на снабберном диоде составляет 1300 В при длительности импульса 25 мкс; максимальное обратное напряжение на нем равно минус 1800 В при длительности импульса приблизительно 10 мкс. При расчете практических схем полученные значения параметров моделирования могут существенно изменяться.

Таким образом, в работе приведены измеренные параметры диодов, используемые при моделирова-

нии электрических схем защиты, рассчитанных на напряжения до 4000 В и выше. Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что обратные напряжения как на снабберном, так и на оппозитном диоде могут иметь достаточно высокие амплитудные значения. Показана эффективность защиты от перенапряжений, возникающих при коммутации в течение переходных процессов, с помощью электрических схем с применением лавинных диодов, которые гасят импульсы перенапряжения путем инициирования лавинного разряда.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы.— М.: Энергоиздат, 1981.
2. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Гомольский Д. М. Формирование силовых лавинных диодов // Складні системи і процеси.— КПУ.— 2009.— № 1.— С. 27—34.
3. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Гомольский Д. М., Солодовник А. И. Особенности формирования быстровосстанавливающихся диодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 3.— С. 36—40.
4. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках.— Л.: Энергия, 1980.
5. Намаюнас А. М., Пожела Ю. К., Томашевичус А. В. О вольт-амперной характеристике кремниевого $p-n$ -перехода в области микроплазменного пробоя // ФТП.— 1987.— Т. 27, вып. 4.— С. 760—761.
6. Сережкин Ю. Н., Шестеркина А. А. Умножение носителей заряда в кремниевых $p-n$ -переходах // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 9.— С. 1109—1113.
7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink.— М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Букреев И. Н., Горячев В. И., Мансуров Б. М. Микроэлектронные схемы цифровых устройств.— М.: Техносфера, 2009.— 712 с.

В учебном пособии рассматриваются основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств и математические основы их моделирования с использованием средств автоматизации.

Излагаются основы практического применения программ системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0 (OrCAD) для построения и моделирования принципиальных схем пассивных РЭУ в режиме анализа временных и частотных характеристик, а также для моделирования активных аналоговых и цифровых устройств. К книге прилагается компакт-диск с демо-версией системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0, моделями фильтров, резистивного и резонансного усилителей, делителя частоты, преобразователя кода, а также с необходимыми для их исследований источниками цифровых и аналоговых сигналов.

Предназначена для студентов, занимающихся изучением и проектированием РЭУ, а также может быть полезна аспирантам, преподавателям и научным работникам, применяющим средства автоматизированного проектирования РЭУ.

