

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.45.51

Схемотехническое решение парирования тиристорного эффекта в бортовых изделиях космических аппаратов

Н. Н. Петух, аспирант, petukh_nn@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения надежности электрорадиоизделий, используемых при производстве космических аппаратов (КА), подверженных воздействию ионизирующего излучения космического пространства в течение заданного срока активного существования. Предлагается схемотехническое решение парирования вероятных отказов аппаратуры КА под воздействием тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства.

Показано, что предлагаемое схемотехническое решение обеспечивает снижение воздействия токов пробоя на полупроводниковые элементы больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС), а также способствует снижению вероятности возникновения тиристорного эффекта, поддерживаемого (без защиты) источником питания.

Ключевые слова: ионизирующее излучение космического пространства, космическая радиация, одиночные радиационные эффекты, космический аппарат, срок активного существования, тяжелые заряженные частицы, надежность

Circuit Solutions of Parrying of the Thyristor Effect in Onboard Spacecraft Products

N. N. Petukh, *postgraduate student*, petukh_nn@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article studies the problem of ensuring the reliability of electric devices used at producing spacecraft exposed to ionizing radiation in space environment during the active service life of spacecraft. It is proposed the scheme for parrying of the possible rejection in spacecraft equipment under the influence of heavy charged particles and high-energy cosmic protons.

The article shows that a circuit solution provides the decrease in the effect of breakdown currents on semiconductor elements of large integrated circuits (LSIs) and very large scale integration (VLSI), as well as reduces the probability of a thyristor effect supported (without protection) by a power source.

Keywords: ionizing radiation of space environment, space radiation, single radiation effects, spacecraft, active service life, heavy charged particles, reliability

Введение

Воздействие ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП) на космический аппарат (КА), в том числе галактических космических лучей (ГКЛ), солнечных космических лучей (СКЛ) и электронно-протонного излучения естественно-радиационного пояса Земли (ЕРПЗ), ставит задачу по разработке способов снижения деградации электрических параметров электронной компонентной базы (ЭКБ) и по возможности парированию воздействующих факторов ИИ КП на наиболее уязвимые узлы бортовой аппаратуры (БА). В данной работе предложена схема защиты составных частей бортовой радиоэлектронной аппаратуры от последствий ионизирующего облучения, воздействующего высокоэнергетическими протонами и одиночными тяжелыми заряженными частицами (ТЗЧ) на КМОП-структуру.

В процессе поиска решения задачи повышения надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры и предотвращения возникновения тиристорного эффекта был рассмотрен ряд способов защиты от ионизирующего излучения радиоэлектронных цифровых изделий аэрокосмического базирования [1–3]. В результате были выявлены следующие недостатки известных способов:

- низкая скорость срабатывания электронных схем от момента фиксации тиристорного эффекта до момента снятия питания с защищаемого устройства;
- невозможность задания точного порога срабатывания и ширины диапазона изменения тока срабатывания защиты;
- невозможность задания времени отключения нагрузки из-за наличия в схеме опережающей защиты — задающего генератора, из-за чего уменьшается скорость срабатывания устройства.

Также недостатком является необходимость эффективного экранирования элементов устройства.

В статье [4] предложено решение парирования тиристорного эффекта на опережение, но не рассматривается время, за которое происходит нарастание тока, что весьма критично для полезной нагрузки. Из материалов статьи можно сделать

вывод, что отключение питания полезной нагрузки происходит только после наступления нежелательного тиристорного эффекта, следовательно, требуется существенное время для снятия питания с нагрузки.

Исходя из анализа существующих методов защиты от тиристорного эффекта была разработана электронная схема защиты интегральных схем (ИС) от ионизирующего излучения, полностью выполненная на отечественной ЭКБ.

Схема защиты от последствий воздействия ТЗЧ

Возникновение паразитного тиристора в микросхемах на базе КМОП-структур обусловлено тиристорным (эффект-тиристорным — latch-up) защелкиванием под воздействием прохождения быстрых тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), формирующих в структуре микросхемы ионизированные (токопроводящие) каналы. Определенные внешние факторы, в частности воздействие ТЗЧ, могут приводить к образованию и фиксации этого тиристора в открытом состоянии под действием питающего напряжения, что вызывает быстрое нарастание тока потребления с последующим тепловым разрушением микросхемы.

Отказу радиоэлектронного цифрового устройства предшествует лавинообразное нарастание тока через подвергшийся ТЗЧ-воздействию элемент. Причем существенное увеличение тока происходит в первые 10 мс непосредственно после контакта с заряженной частицей. Если в этот момент устройство обесточить, лавинообразный процесс может быть подавлен. Чаще всего после кратковременного отключения питания элемент оказывается работоспособным и потенциальный катастрофический отказ превращается в одиночный сбой. В целях недопущения длительного перерыва в работе полезной нагрузки длительность прерывания подачи питания должна быть соизмеримой с возможной длительностью нарастания лавинообразного процесса и временем (τ) жизни носителей (зарядов) — временем, характеризующим экспоненциальный спад неравновесной концентрации носителей в результате их рекомбинации.

Предлагаемая схема радиационной защиты предназначена для предохранения электронной аппаратуры космических аппаратов от тиристорного эффекта, вызываемого ТЗЧ и протонами.

Блок-схема принятия решения (п/р) об отключении питания представлена на рис. 1.

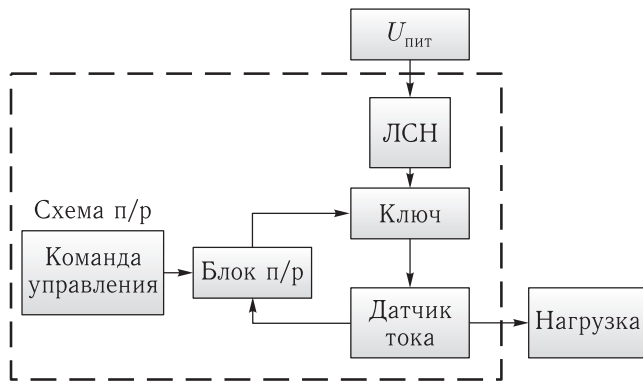


Рис. 1. Блок-схема принятия решения

Нарастание тока через датчик тока вызывает срабатывание схемы принятия решения и отключение питания нагрузки от линейного стабилизатора напряжения (ЛСН). В результате ток в нагрузке падает до нуля. Через определенное время на устройстве защиты формируется команда на подключение питания к нагрузке. Это вызывает срабатывание схемы принятия решения, и на вход ЛСН поступает напряжение питания ($U_{пит}$). ЛСН обеспечивает плавный аperiodический характер увеличения тока в нагрузке. В случае если ток потребления снова превысит установленный порог, то процесс отключения питания повторяется. Так происходит до тех пор, пока не пропадет тиристорный эффект и ток нагрузки не будет превышать порогового значения.

Схема защиты электронных цифровых устройств ($R_{ц}$) представлена на рис. 2 [5].

За основу схемы защиты при ее реализации взята микросхема 1114СК1У [6]. Интегральная микросхема 1114СК1У в металлокерамическом корпусе предназначена для построения различных низкочастотных узлов автоматики и контроля, в том числе усилительных, генераторных и пороговых схем. Она содержит четыре идентичных операционных усилителя (ОУ) с мощным двухтактным выходным каскадом.

Эпюры переходных процессов, описывающие работу защитного устройства, полученные в резуль-

тате компьютерного моделирования, представлены на рис. 3, 5 и 6.

В случае воздействия ТЗЧ, инициирующей лавинообразную ионизацию и способствующей увеличению количества свободных зарядов, будет наблюдаться нарастание тока, приводящее к увеличению падения напряжения на контрольном малоомном резисторе $R1$, который подключен к датчику тока $A1$ (построенному на операционном усилителе (ОУ)). Реакцией операционного усилителя $A1$ будет выдача напряжения $U_{дет}$ на инвертирующий вход дифференциального усилителя $A2$ (построенного на операционном усилителе $D2-2$). На дифференциальном усилителе $A2$, по порогу срабатывания относительно опорной точки $U_{оп}$ (который задается резисторами $R13$ и $R14$), происходит принятие решения о превышении тока потребления, вследствие чего его выходное напряжение насыщения скачком переходит от $-U_{нас}$ к $+U_{нас}$, то есть он срабатывает как компаратор.

Уровень порога срабатывания дифференциального усилителя $A2$ ($U_{порог}$) определяется по следующей формуле [7]:

$$U_{порог} = \frac{R19}{R12} \cdot \left[\left[\frac{1}{\frac{R13}{R14} + 1} \cdot \left(\frac{R12}{R19} + 1 \right) \right] \cdot U_{оп} - U_{дет} \right].$$

В результате смены знака на выходе $A2$ с «-» на «+» через дифференциальную цепь RC , построенную на конденсаторе $C2$ и резисторе $R21$, формируется запускающий импульс $U_{зап}$, вызывающий срабатывание одновибратора $A3$ ($U_{вых}$), построенного на операционном усилителе $D2-3$, где диод $V3$ обеспечивает прохождение импульса только со знаком «+», тем самым защищая одновибратор $A3$ от повторного срабатывания в процессе перезарядки конденсатора $C2$.

В исходном состоянии (до подачи запускающего импульса $U_{зап}$ на $D2-3$) операционный усилитель $D2-3$ находится в состоянии насыщения с уровнем выходного напряжения $-U_{нас}$, как представлено на рис. 4. Начальное напряжение на конденсаторе $C1$ определяется как [8]

$$\gamma \cdot U_{нас}, \quad \text{где } \gamma = \frac{R20}{R16 + R20}.$$

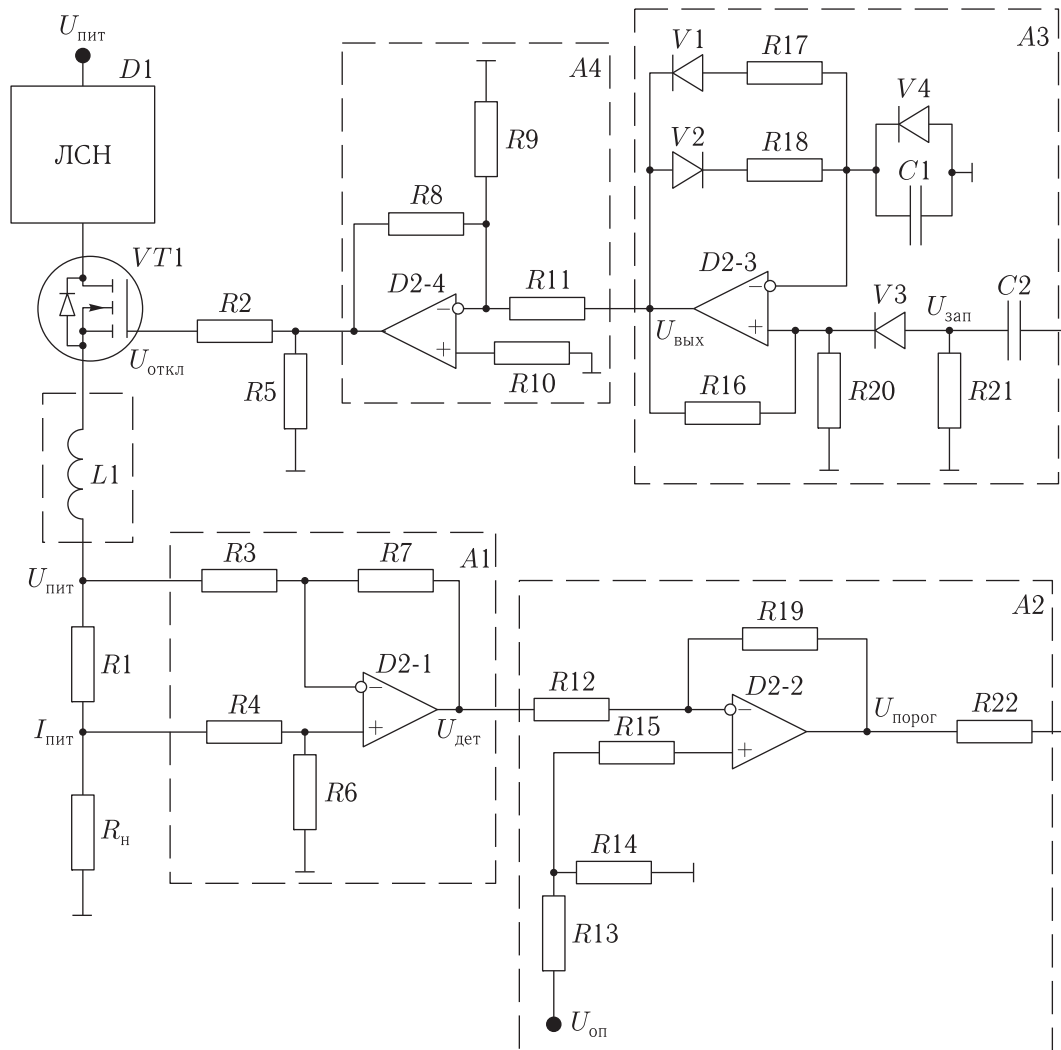


Рис. 2. Принципиальная схема защиты

Следует отметить, что операционный усилитель $D2-3$ находится в устойчивом состоянии только при $U_{\text{вых}} = -U_{\text{нас}}$. С подачей короткого по длительности импульса $U_{\text{зап}}$ положительной полярности операционный усилитель $D2-3$ переключается с уровня $-U_{\text{нас}}$ на уровень $+U_{\text{нас}}$. Диод $V4$, включенный в состав одновибратора $A3$, сокращает время восстановления начального напряжения на конденсаторе $C1$ перед подачей очередного запускающего импульса. Диоды $V1$ и $V2$ обеспечивают прохождение волны с необходимой фазой, вследствие чего повышается надежность срабатывания одновибратора $A3$.

Время отключения транзистора $VT1$ задается длительностью генерируемого импульса $t_{\text{и}}$ [8], рав-

ного времени заряда конденсатора $C1$ (U_{c1}) до значения $+\gamma U_{\text{нас}}$ ($R17 = R18$); $t_{\text{и}}$ находится из следующей формулы [8]:

$$t_{\text{и}} = R17 \cdot C1 \cdot \ln \left[\frac{1}{(1 - \gamma)} \right].$$

Время восстановления ($t_{\text{в}}$) режима ожидания одновибратора вычисляется по формуле [8]:

$$t_{\text{в}} = R15 \cdot C4 \cdot \ln[1 + \gamma].$$

Одновибратор формирует импульс $U_{\text{вых}}$ и выдает его на инвертирующий операционный усилитель $D2-4$, в результате транзистор $VT1$ закрывается на время $t_{\text{и}}$. Вследствие этого напряжение питания нагрузки $R_{\text{н}}$ отключается и ток в нагрузке

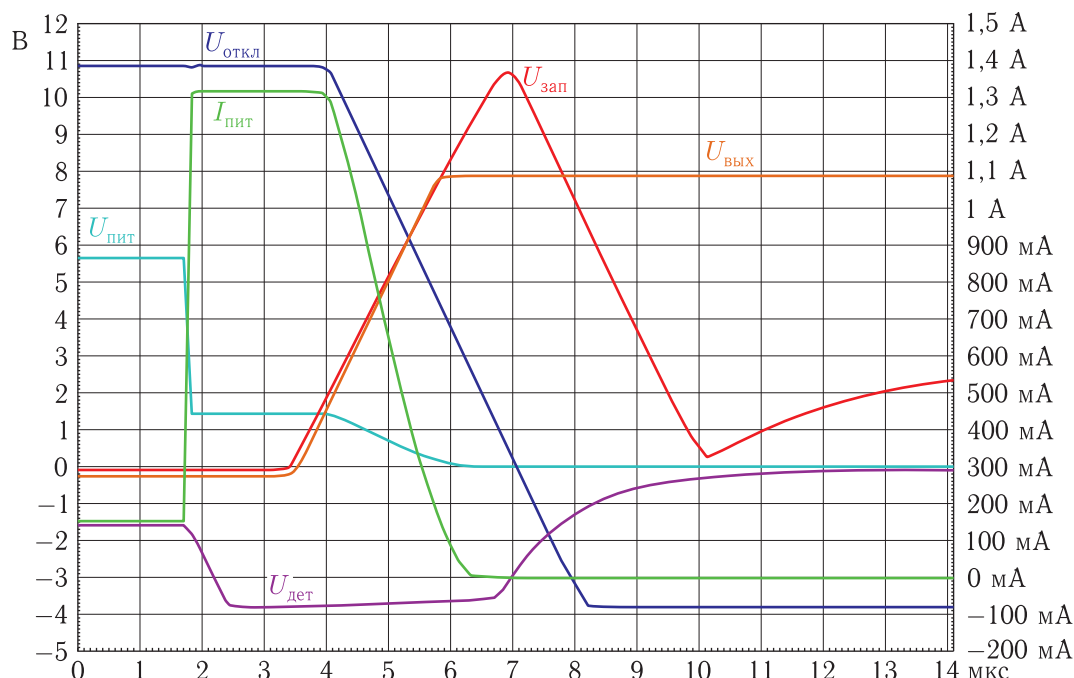


Рис. 3. Эпюры переходных процессов защитного устройства

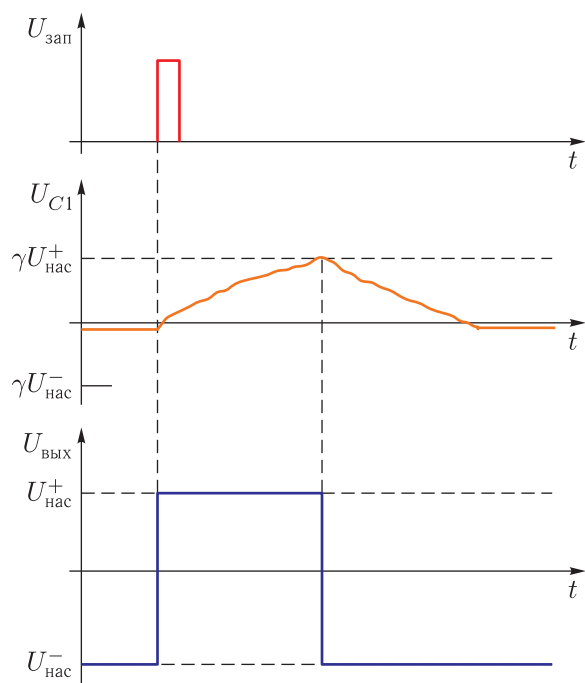


Рис. 4. Типовые эпюры, описывающие переходные процессы в одновибраторе

спадает до нуля, предотвращая возможный выход из строя активного элемента. Через время, соответствующее t_n , питание нагрузки R_n возобновляется

и, если ток не превышает максимально допустимого значения, работа нагрузки R_n восстанавливается, а если ток превышает максимально допустимое значение, то нагрузка R_n снова отключается на длительность равную t_n , и так будет продолжаться вплоть до затухания процесса развития тиристорного эффекта.

Необходимость данного защитного устройства объясняет рис. 5, на котором можно определить, что время нарастания (скачка) тока питания $I_{пит}$ до максимально допустимого значения, выдаваемого источником питания, составляет около 148 нс, а время снятия тока с нагрузки, согласно рис. 3, составляет около 4,4 мкс, что без дополнительных схемных решений не позволяет предотвратить процесс развития тиристорного эффекта, несмотря на автоматическое принятие решения снятия питания с защищаемого устройства.

Парирование возникновения тиристорного эффекта можно обеспечить увеличением времени нарастания тока и ограничением максимальной величины скачка тока, что достижимо введением индуктивности $L1$ в цепь питания схемы защиты электронных цифровых устройств (рис. 2). Введение индуктивности (в предлагаемой схеме защиты)

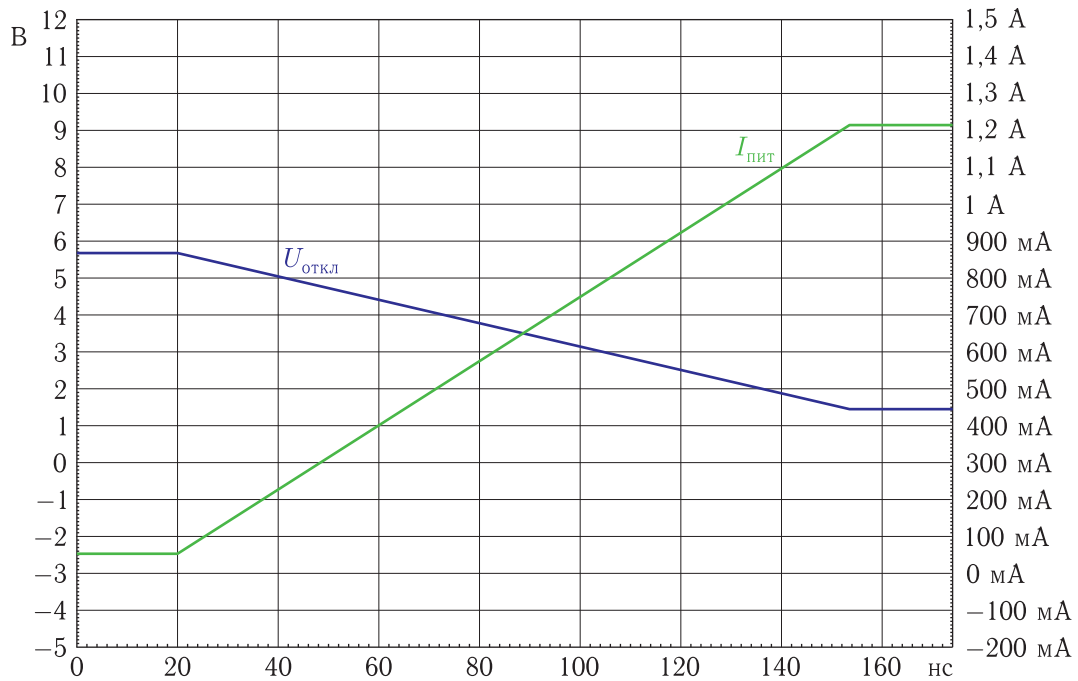


Рис. 5. Эпюры скачка тока и напряжения питания устройства

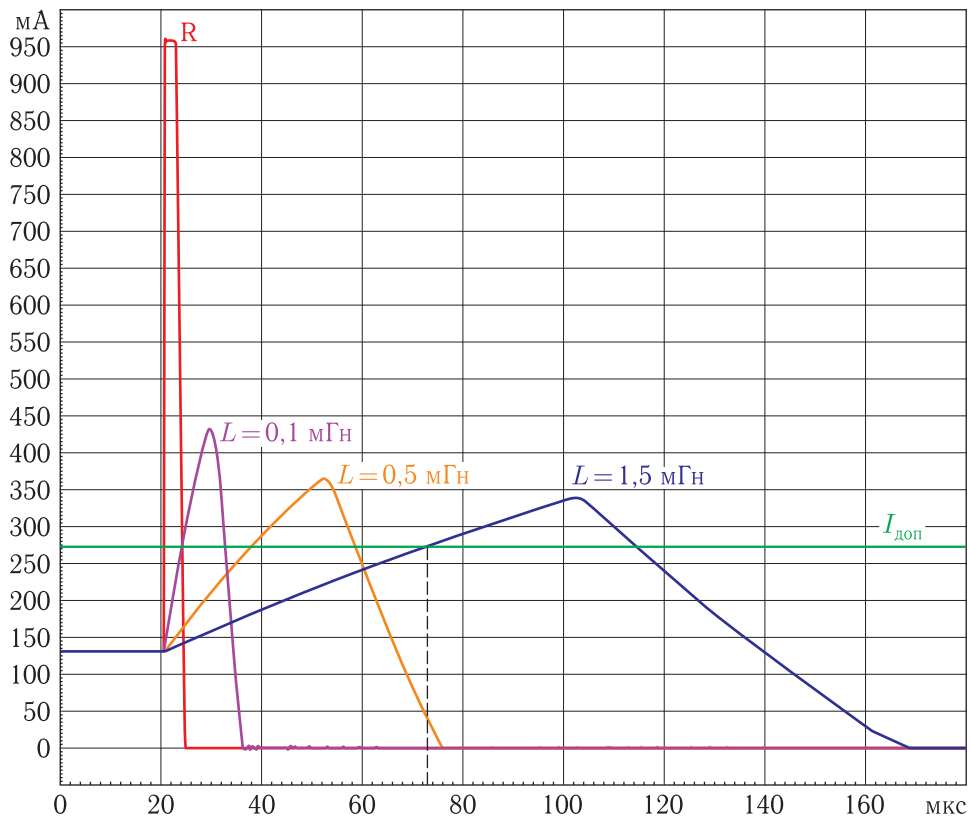


Рис. 6. Эпюры зависимости времени и величины нарастания тока «тиристорного эффекта» от величины индуктивности в цепи питания

увеличит время нарастания $t_{\text{пит}}$ (скачка) тока в защищаемой нагрузке (R_n) со 148 нс до 81,5 мкс (см. рис. 6), что позволит инициированному (тяжелой заряженной частицей) заряду в полупроводнике рекомбинировать (*тиристорный эффект будет купирован*), следовательно, ток вернется в рабочий режим без снятия питания с нагрузки. Если же ток будет продолжать нарастать выше уровня защиты, то произойдет срабатывание схемы защиты и снятие питания с нагрузки R_n и соответственно предотвращение катастрофического отказа с сохранением работоспособности полезной нагрузки. Скорость срабатывания схемы защиты, как уже было сказано, составляет 4,4 мкс.

Исходя из рис. 6 можно определить, что время нарастания тока в результате использования индуктивности $L1 = 1,5$ мГн составит порядка 82 мкс, а допустимое время снятия питания ($I_{\text{пит}}$) с защищаемого устройства с учетом не превышения максимально допустимого уровня тока потребления ($I_{\text{доп}}$) и скорости срабатывания схемы защиты (4,4 мкс) составляет порядка 52,2 мкс.

Защищаемыми микросхемами могут быть:

- микропроцессоры, микроконтроллеры;
- микросхемы оперативной памяти;
- микросхемы постоянной памяти;
- микросхемы АЦП, ЦАП.

Вывод

Таким образом, рассмотренный вариант защиты радиоэлектронного цифрового устройства от тиристорного эффекта обладает высокой помехоустойчивостью и повышенной надежностью работы радиоэлектронной аппаратуры при воздействии ТЗЧ. Это достигается за счет наличия индуктивности (снижающей скорость нарастания токов в цепи) и своевременного парирования тиристорного эффекта путем отключения нагрузки от источника питания при превышении допустимого то-

ка потребления, что позволяет предотвратить катастрофический отказ полезной нагрузки и резкие скачки тока в нагрузке.

Предлагаемый вариант защиты устройства от тиристорного эффекта обеспечивает широкий диапазон настройки устройства и требует минимальных затрат.

Список литературы

1. Патент RU2405247C1. Российская Федерация. Устройство защиты цифровых микросхем / А. В. Чирков, В. В. Колмаков; патентообладатель ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева». № 2009109340/08. Заявл. 13.03.2009; опубл. 27.11.2010.
2. Патент RU2322757C1. Российская Федерация. Устройство защиты интегральных микросхем от воздействия радиации / И. Г. Фильцер; патентообладатель ФГУП «НИИ ТП» № 2006135561/09. Заявл. 10.10.2006; опубл. 20.04.2008.
3. Патент RU2510893C2. Российская Федерация. Устройство для защиты интегральных микросхем от тиристорного эффекта / И. Г. Фильцер; патентообладатель ФГУП «НИИ ТП» опубликован 27.11.2013. № 2012120813/08. Заявл. 22.05.2012; опубл. 10.04.2014.
4. Федоров Р. А. Микросхема управления модулем радиационной защиты // Нано- и микросистемная техника, 2014, № 6. С. 46–47.
5. Патент RU2661282C1. Российская Федерация. Устройство защиты полупроводниковых микросборок от тиристорного эффекта / Н. Н. Петух; правообладатель АО «Российские космические системы». № 2017129770. Заявл. 23.08.2017; опубл. 13.07.2018.
6. АЕЯР.431000.379-02 ТУ Микросхема 1114СК1У.
7. R. Dean Straw. The ARRL Handbook For Radio Communications. 2006. P. 5.35.
8. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника: Учеб. для вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 122.