

12. Oscar Castillo and Patricia Melin, "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN: 978-3-540-76283-6.

13. Mohammed S. EL-Moghany, Sun and Maximum Power Point Tracking in Solar Array

Systems Using Fuzzy Controllers via FPGA, Master Thesis, Islamic University-Gaza, 2011.

14. S. Selvaperumal, C. Christofer Asir Rajan, and S. Muralidharan "Stability and Performance Investigation of a Fuzzy-Controlled LCL Resonant Converter in an RTOS Environment" IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 28, No. 4, pp. 1820–1821, AP. 2013.

УДК 621.314.26: 539.16.04

ГРНТИ 45.37.31: 58.35.06

Chermalykh A.V.

*candidate of engineering sciences,
associate professor*

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Muhenov D.D.

*postgraduate at the department of automation control
of electrotechnical systems*

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

IONIZING RADIATION INFLUENCE ON THE FREQUENCY CONVERTER OUTPUT VOLTAGE

Чермалых Александр Валентинович

к.т.н., доц.

*Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского*

Мугенов Даниил Джалильевич

*аспирант кафедры автоматизации управления
электротехническими комплексами
Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского*

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Summary. The influence of radiation on the operation of a bridge crane of a nuclear waste storage facility is considered. It was found that the most sensitive to ionizing radiation are semiconductor devices in the electric drive system. We studied the change in the parameters of each of the power semiconductor device of the frequency converter with a direct current link from the absorbed dose of ionizing radiation. To do this, an analysis of the literature on theoretical and experimental studies has done. The equations of electrical equilibrium based on the frequency converter power channel diagram are written taking into account radiation sensitive parameters. A mathematical model of the dependence of the electrical energy semiconductor converter output voltage parameters on the absorbed dose of ionizing radiation is obtained to quantify the radiation effects. Plots of the dependence of the radiation-sensitive parameters of semiconductor devices on the absorbed dose are built. The concept of radiation dynamic resistance is introduced to evaluate the behavior of an insulated gate bipolar transistor collector-emitter channel. Elements which radiation-caused changes affects the most critically on operation of the system were discovered. The dependence of the output voltage of the frequency converter on the absorbed dose of ionizing radiation is obtained.

Аннотация. Рассмотрено влияние радиационного излучения на работу мостового крана хранилища ядерных отходов. Обнаружено, что наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются полупроводниковые приборы в составе системы электропривода. Изучено изменение параметров каждого из силовых полупроводниковых приборов преобразователя частоты со звеном постоянного тока от поглощённой дозы ионизирующего излучения. Для этого проведен анализ литературных источников по теоретическим и экспериментальным исследованиям. На основании схемы силового канала преобразователя частоты записаны уравнения электрического равновесия с учётом чувствительных к радиации параметров. Для количественной оценки влияния радиации получена математическая модель зависимости параметров выходного напряжения полупроводникового преобразователя электрической энергии от поглощённой дозы ионизирующего излучения. Построены графики зависимостей радиационно-чувствительных параметров полупроводниковых приборов от поглощённой дозы. Введено понятие радиационного динамического сопротивления для оценки поведения канала коллектор-эмиттер биполярного транзистора с изолированным затвором. Определены элементы, радиационное изменение

параметров которых наиболее критично сказывается на работе системы. Получена зависимость выходного напряжения преобразователя частоты от величины поглощённой дозы ионизирующего излучения.

Key words: radiation, ionizing radiation, electric drive, frequency converter, diode, transistor, optocoupler.

Ключевые слова: радиация, ионизирующее излучение, электропривод, преобразователь частоты, диод, транзистор, оптрон.

Постановка проблемы. Для захоронения ядерных отходов в Чернобыльской зоне отчуждения сооружены промышленные комплексы для приёма, переработки и захоронения радиоактивных отходов (РАО). К их числу относятся завод по переработке жидких отходов и промышленный комплекс по обращению с твердыми радиоактивными отходами. Продуктами этих учреждений являются 200 литровые бочки с отвердевшими в цементной матрице жидкими РАО и залитые цементом бетонные контейнеры с твердыми РАО. Вес таких контейнеров может достигать нескольких десятков тонн и для их складирования необходимо использовать подъемно-транспортное оборудование. На объектах специально оборудованных приповерхностных хранилищ твердых радиоактивных отходов используются мостовые краны. Механизмы мостового крана приводятся в движение средствами электрических приводов по схеме преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока - асинхронный короткозамкнутый двигатель. Поскольку кран находится в агрессивной среде радиационного излучения, вызванного общей активностью РАО и повышенным радиационным фоном местности, уместно оценить степень влияния радиации на его рабочие характеристики. Влияние радиации на мостовой кран рассмотрим на примере электропривода подъема, в связи с тем, что приводы передвижения моста и тележки реализованы по такой же схеме.

Анализ последних исследований и публикация. Для изучения влияния ионизирующего излучения (ИИ) на элементы

электропривода проанализированы научные труды в виде монографий и статей, 11 из которых были непосредственно использованы в данном исследовании. В результате проведенных изысканий выделены изделия, наиболее подверженные влиянию ИИ. Ими оказались изделия, изготовленные из полупроводниковых материалов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Исследования, посвященные изучению влияния ИИ на полупроводниковые приборы, охватывают интегральные микросхемы и логические устройства. Рассмотрение силовых устройств питания ограничивается маломощными 30 Вт [1] преобразователями постоянного тока. Такое положение вещей связано с потребностями развивающейся космической отрасли. Поэтому в данном исследовании не будет уделяться внимание слаботочным системам. Исходя из вышесказанного, нерешенной частью проблемы является исследование радиационной стойкости промышленных ПЧ со звеном постоянного тока средней мощности (1.5 ÷ 500 кВт).

Цель данной статьи – получение математической зависимости параметров выходного напряжения преобразователя частоты от величины поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Основной материал. Структурно классический силовой канал полупроводникового преобразователя представляет собой неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор напряжения и драйверы управления (рис. 1).

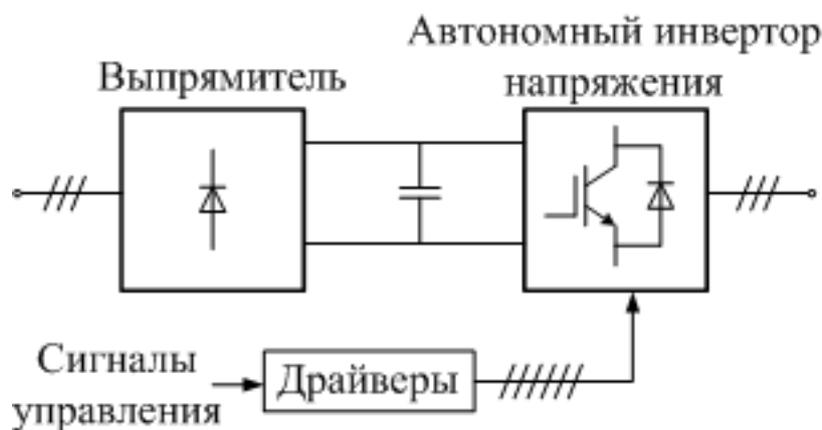


Рис.1. Структура силового канала преобразователя частоты

Выпрямитель реализован по схеме Ларионова, инвертор – трехфазный мостовой. В качестве силового ключа в преобразователях средней мощности используют биполярные транзисторы с

изолированным затвором (БТИЗ). Такие транзисторы можно представить схемой замещения, в которой *n*-канальный полевой транзистор с индуцированным каналом стоком

соединен с базой биполярного *pnp* транзистора, а истоком – с его коллектором (VT2 и VT3 на рис. 2).

Для дальнейшего понимания процессов, протекающих при облучении в электрическом преобразователе, рассмотрим структуру силового канала ПЧ для одного транзистора коллекторной

группы в момент пика фазы А. На основании классической схемы силового полупроводникового канала преобразователя частоты построена детальная схема замещения для одного транзистора коллекторной группы инвертора (рис. 2).

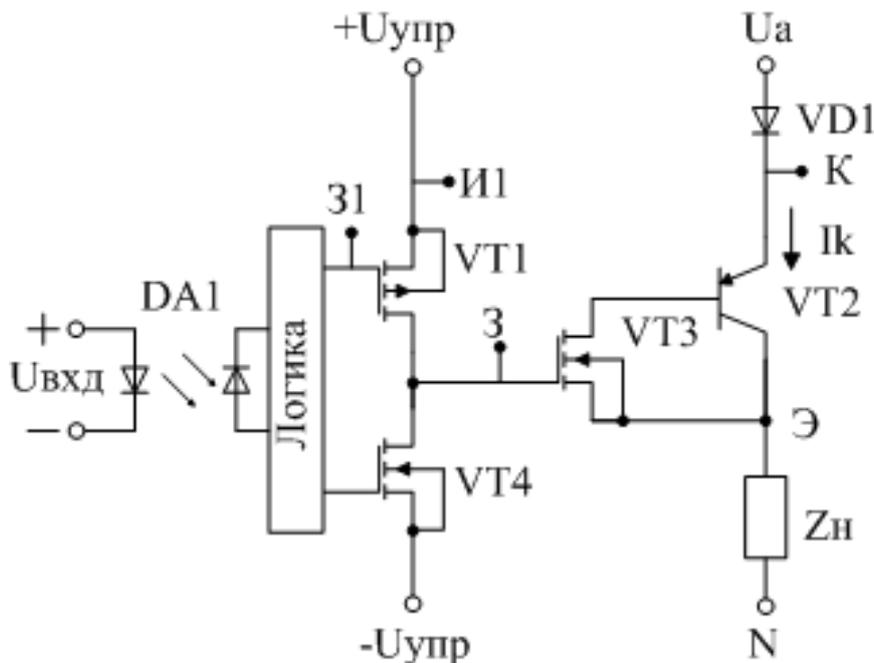


Рис.2. Полупроводниковая структура силового канала преобразователя для одного транзистора.

На рис. 2 обозначены: VD1 – выпрямительный диод; VT1 – *p*-канальный металл-диэлектрик-полупроводниковый (МДП) транзистор драйвера; VT2 – биполярный *pnp* транзистор в составе БТИЗ; VT3 – *n*-канальный МДП в составе БТИЗ; VT4 – *n*-канальный МДП драйвера; DA1 – оптрон; $U_{вхд}$ – сигнал управления драйвера; $+U_{упр}$ и $-U_{упр}$ – напряжение, коммутируемое на затвор БТИЗ; U_a – напряжение фазы А; I_k – ток коллектора; Z_n – полное сопротивление нагрузки; 31, И1 – затвор и исток транзистора VT1; 3, К, Э – затвор, коллектор и эмиттер БТИЗ; N – нейтраль.

Драйверы для управления ключами, например TLP5751, состоят из оптрона DA1 для гальванической развязки, блока “Логика” для

формирования таблицы истинности и транзисторов для непосредственной коммутации затвора БТИЗ. Выходная цепь драйвера выполнена по комплементарной схеме: *p*-канальный МДП транзистор коммутирует положительное напряжение на затвор БТИЗ, *n*-канальный – отрицательное. Такой подход позволяет управлять обоими транзисторами единым сигналом.

Рассмотрим влияние ИИ на полупроводниковые элементы схемы.

1. Диод VD1. Согласно [2, с. 12] вследствие облучения на диоде повышается величина прямого падения напряжения, равная сумме падений напряжений на *p-n* переходе и в базе диода:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{прям}}(\Phi) &= \Delta U_{pn}(\Phi) + \Delta U_{\text{базы}}(\Phi) = \\ &= \frac{I \cdot w_b}{q \mu_n N_b(0) S_{pn}} [\exp(-K_N \Phi) - 1] - \\ &- \frac{kT}{q} \left\{ K_N \Phi + \frac{1}{2} \ln[1 + K_\tau \tau_p(0) \Phi] \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где I – прямой ток через диод; w_b – толщина базы (*n* области) диода; q – заряд электрона; μ_n – дрейфовая подвижность электронов; $N_b(0)$ – концентрация легирующей примеси в базе диода до облучения; S_{pn} – площадь *p-n* перехода; K_N – коэффициент радиационного изменения концентрации основных носителей заряда; Φ – интегральный поток облучения; k – постоянная

Больцмана; T – абсолютная температура; K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда; $\tau_p(0)$ – время жизни неосновных носителей заряда в базе до облучения.

2. Полевые МДП транзисторы VT1, VT3, VT4. Теоретические [2, с. 32; 3; 4] исследования показывают, что радиационно зависимыми

параметрами МДП транзисторов являются: пороговое напряжение (напряжение отсечки), крутизна стокзатворных характеристик и вольтфарадные характеристики. Исходя из того, что быстродействие ключей колеблется в пределах от наносекунд до десятых долей микросекунд, а по причине облучения барьерное и диффузионные ёмкости уменьшаются, что не приводит к

уменьшению быстродействия, изменением вольтфарадных характеристик можно пренебречь. Снижение крутизны стокзатворных характеристик несущественно и, в дальнейшем, этот параметр не рассматривается. Для количественной оценки изменения порогового напряжения воспользуемся формулой из [3]:

$$\Delta U_{\text{порог}}(D) = -3.4 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ox}^2 \cdot F(E, \xi) \cdot F_t \cdot D + 2.4 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ox}^2 \cdot D^{2/3}, \quad (2)$$

где t_{ox} – толщина подзатворного окисла (диэлектрика); $F(E, \xi)$ – выход дырок как функция от электрического поля E и энергии облучающих частиц ξ ; F_t – технологический коэффициент; D – поглощенная доза ионизирующего излучения.

Исходя из теоретических [2] и экспериментальных [4] исследований выявлено, что у p -канальных транзисторов напряжение

отсечки увеличивается по модулю на величину (2), а у n -канальных – уменьшается.

3. Биполярный транзистор VT2. Исходя из исследования [6] у биполярного транзистора, работающего в ключевом режиме, ввиду облучения увеличивается коллекторное сопротивление, что приводит к увеличению падения напряжения насыщения и выделению мощности на кристалле.

$$\Delta R_{K.\text{нас}}(\Phi) = \frac{\exp(K_N \cdot \Phi)}{q \cdot N_{K0} \cdot \mu_{K.\text{онз}} \cdot S_{K.\text{эф}}} \cdot \left[\frac{W_{K.\text{еп}} - 2 \cdot \sqrt{D_{K.\text{онз}} \cdot \left(\frac{I_{B(\text{нас})}}{I_K} - \frac{1}{h_{21E}(0)} - K_{\text{эф}} \cdot t_A \cdot \Phi \right)}}{\sqrt{\frac{1}{\tau_{n0}} + K_\tau \cdot \Phi}} \right], \quad (3)$$

где K_N – коэффициент радиационного изменения концентрации легирующей примеси в высокоомной части коллектора; N_{K0} – концентрация легирующей примеси в высокоомной части коллектора; $\mu_{K.\text{онз}}$ – подвижность основных носителей заряда в эпитаксиальной области коллектора; $S_{K.\text{эф}}$ – эффективная площадь коллектора, по которой протекает весь коллекторный ток; $W_{K.\text{еп}}$ – толщина эпитаксиального слоя коллектора; $D_{K.\text{онз}}$ – коэффициент диффузии основных носителей заряда в области коллектора; $I_{B(\text{нас})}$ – ток базы, при котором транзистор переходит в режим насыщения; I_K – ток коллектора; $h_{21E}(0)$ – коэффициент усиления тока транзистора; $K_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент радиационных повреждений в транзисторе; t_A – время пролёта

неосновных носителей заряда через активную базу транзистора; τ_{n0} – время жизни неравновесных носителей заряда.

4. Оптрон DA1. Вследствие радиационного облучения у оптрона происходит деградация коэффициента передачи по току, что вызвано уменьшением интенсивности света, излучаемого светодиодом, и снижением чувствительности фотоприемника [7]. Экспериментальные исследования [8, 9] демонстрируют снижение отношения коэффициента передачи по току облученного оптрона к коэффициенту необлученного до нуля при дозе в 1 Мрад. Обозначим это отношение радиационным изменением коэффициента передачи оптрона по току $K_{OP}(D) = CTR(D)/CTR_0$, тогда

$$K_{OP}(D) = 1 - K_{\text{рад.изм.}} \cdot D^{2/3}, \quad (4)$$

где CTR_0 – коэффициент передачи оптрона до облучения; $K_{\text{рад.изм.}}$ – коэффициент радиационного изменения коэффициента передачи по току.

Для дальнейшей наглядности приведем формулы (1) - (4) к единому аргументу – поглощенной дозе D . Поскольку (1) и (3) являются функциями от интегрального потока,

воспользовавшись выражением из [10, с. 4] для нахождения дозы гамма излучения в радах определим, что поглощенной дозе в 1 [Мрад] соответствует поток $2.17 \cdot 10^{15}$ [1/см²]. На рис. 3 представлены графики зависимостей от поглощённой дозы, построенные по выражениям (1)

- (4) для полупроводниковых устройств в составе ПЧ мощностью 18.5 кВт.

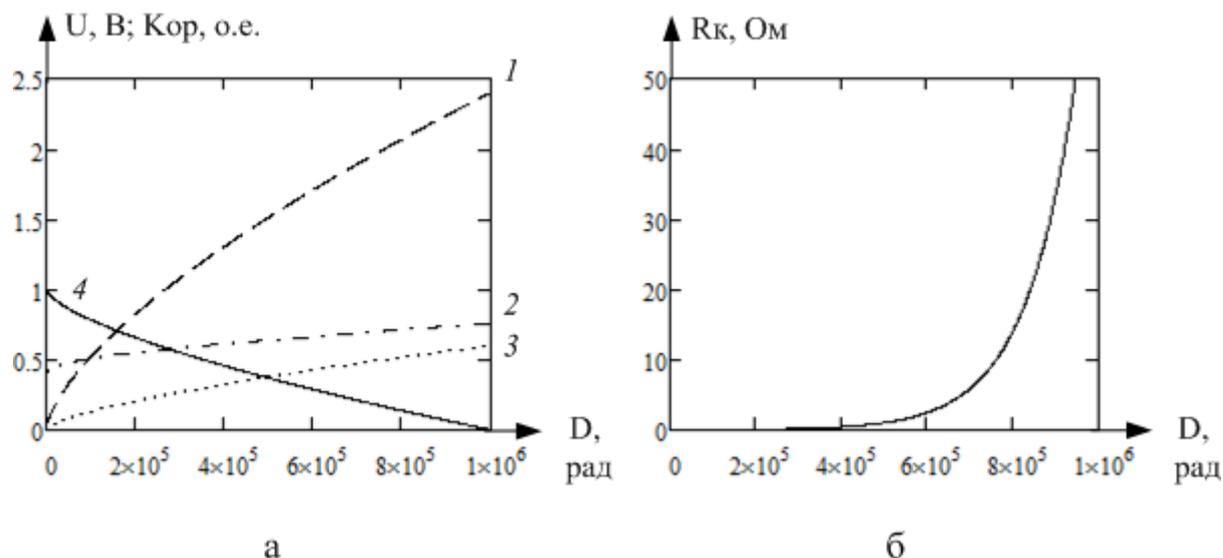


Рис.3. Графики зависимостей радиационно чувствительных параметров от поглощенной дозы. а: 1 – пороговое напряжение транзистора VT3; 2 – прямое падение напряжения на диоде VD1; 3 – пороговое напряжение транзисторов VT1 и VT4; 4 – коэффициент передачи по току DA1. б – коллекторное сопротивление биполярного транзистора VT2.

Для количественной оценки влияния ИИ на параметры выходного напряжения преобразователя запишем уравнения электрического равновесия для участков цепи (см. рис. 2).

$$U_{13И}(D) = U_{вхд} \cdot CTR_0 \cdot K_{OP}(D), \quad (5)$$

где $U_{вхд}$ – входное напряжение драйвера; $K_{OP}(D)$ – функция радиационного изменения коэффициента передачи оптрона по току, определяется выражением (4).

1. Напряжение между точками 31-И1 – напряжение затвор-исток транзистора VT1 как функция выходного напряжения драйвера:

2. Напряжение между точками 3-Э, или входное напряжение БТИЗ. Из источника [11] взято математическое выражение для стокзатворной характеристики транзистора и на её основе записана зависимость выходного напряжения VT1, которое является входным напряжением VT3:

$$U_{3Э}(D) = \begin{cases} R_{1d} \cdot I_{150} \cdot \left(\frac{1 - -U_{13И}(D)}{U_{10} - \Delta U_{порог}(D)} \right)^2, \\ -U_{13И}(D) < U_{10} - \Delta U_{порог}(D) \\ 0, -U_{13И}(D) \geq U_{10} - \Delta U_{порог}(D) \end{cases}, \quad (6)$$

где R_{1d} – сопротивление нагрузки VT1 равно входному сопротивлению БТИЗ; I_{150} – ток стока насыщения VT1; U_{10} – напряжение отсечки (пороговое) VT1; $\Delta U_{порог}(D)$ – изменение величины

порогового напряжения вследствие действия ИИ, выражение (2).

Зависимость напряжений затвор-исток транзистора VT1 и затвор-эмиттер БТИЗ от поглощенной дозы приведена на рис. 4.

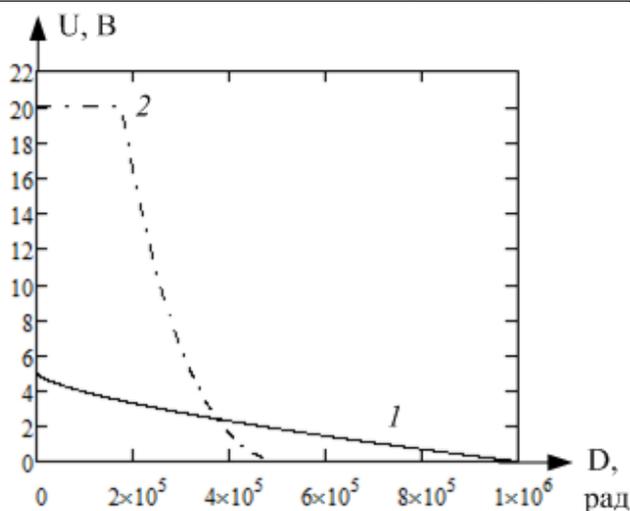


Рис. 4. Зависимости напряжений затвор-исток транзистора VT1 (кривая 1) и затвор-эмиттер БТИЗ (кривая 2) от поглощенной дозы

Так как напряжение на выходе драйвера ограничивается допустимой величиной (для рассматриваемого случая выходное напряжение драйвера TLP5751 – не более 30 В), а предельное напряжение на затворе БТИЗ не должно превышать 20 В (IGBT модуль BSM50GB120DN2), выходное напряжение драйвера ограничим величиной в 20 В. Из графика рис. 4, кривая 2, видно, что до поглощенной дозы $2 \cdot 10^5$ рад облучение не влияет

на работу драйвера, а после $5 \cdot 10^5$ рад наступает его функциональный отказ.

3. Ток коллектора БТИЗ. Для БТИЗ справедливо уравнение для стокзатворных характеристик полевых транзисторов [11], о чём свидетельствует совпадение полученных проходных характеристик с заводскими данными. Система уравнений для определения тока коллектора БТИЗ имеет вид:

$$I_K(D) = \begin{cases} I_{K0} \cdot \left(\frac{1 - \frac{U_{зз}(D)}{U_0 + \Delta U_{порог}(D)}}{U_0 + \Delta U_{порог}(D)} \right)^2, & U_{зз}(D) \geq U_0 + \Delta U_{порог}(D) \\ 0, & U_{зз}(D) < U_0 + \Delta U_{порог}(D) \end{cases}, \quad (7)$$

где I_{K0} – ток коллектора насыщения; U_0 – напряжение отсечки (пороговое); $\Delta U_{порог}(D)$ – напряжение отсечки, вызванное радиационным влиянием (2).

Зависимость тока коллектора от поглощенной дозы и передаточные характеристики БТИЗ изображены на рис. 5.

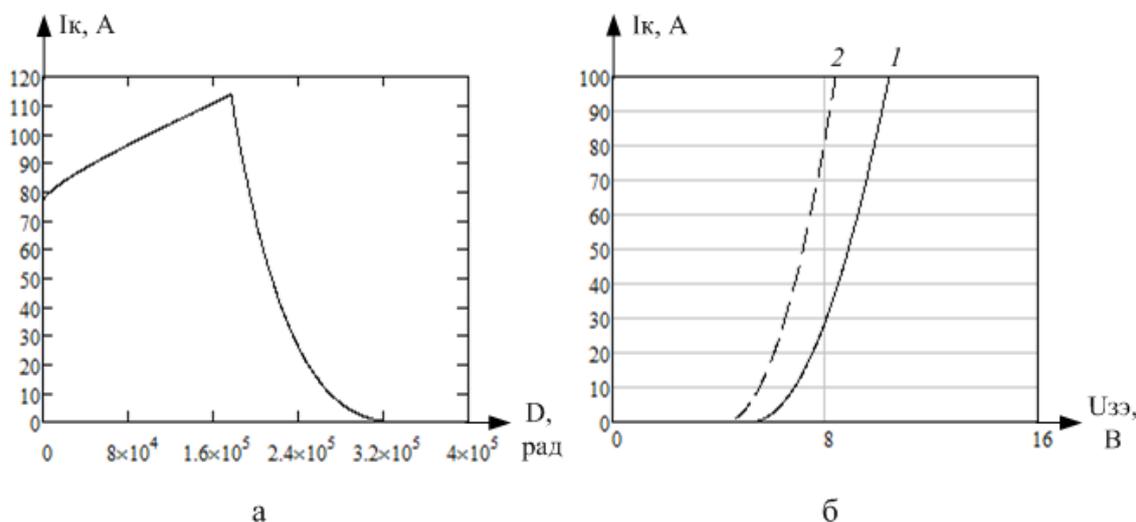


Рис. 5. Зависимость тока коллектора от поглощенной дозы (а) и передаточные характеристики БТИЗ (б): 1 – до облучения, 2 – после облучения

На графике зависимости тока коллектора от поглощённой дозы (рис. 5, а) рост тока до дозы $2 \cdot 10^5$ рад вызван снижением порогового напряжения БТИЗ (рис. 5, б). Выражение (7) и его графическая интерпретация (рис. 5, а) показывает, что БТИЗ теоретически сможет пропускать больший ток, потому, можно утверждать, что до дозы $2 \cdot 10^5$ рад работа БТИЗ не будет изменяться. С ростом дозы от $2 \cdot 10^5$ до $3.2 \cdot 10^5$ рад происходит снижение тока

коллектора, что вызвано радиационным изменением выходного напряжения драйвера (6). При поглощённой дозе более $3.2 \cdot 10^5$ рад в коллекторе БТИЗ прекращает протекать ток.

4. Выходное напряжение диода VD1 – напряжение между точками К-Н. Запишем уравнение выходного напряжения диода как функцию от поглощённой дозы:

$$U_1(D) = \begin{cases} U_a - (U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D)), \\ U_a \geq U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D) \\ 0, U_a < U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D) \end{cases}, \quad (8)$$

где U_a – мгновенное значение напряжения фазы А; $U_{\text{пр}}$ – прямое падение напряжения на необлученном диоде; $\Delta U_{\text{прям}}(D)$ – функция изменения прямого падения напряжения на диоде от поглощённой дозы (1). Поскольку падение напряжения на диоде от радиационного излучения возрастает на 0.8 В к дозе 1 Мрад, что составляет 0.31% от величины выпрямленного напряжения, этот параметр практически не влияет на работу системы.

5. Напряжение на нагрузке – между точками Е-Н. Так как под влиянием ИИ ток коллектора снижается до нуля, то БТИЗ из ключевого режима работы переходит в активный, что вызвано изменением сопротивления канала коллектор-эмиттер. Введем понятие радиационного динамического сопротивления для количественной оценки поведения канала коллектор-эмиттер в условиях облучения, используя функции (7) и (8):

$$R_{\text{рд}}(D) = R_{\text{к.ном}} + \Delta R_{\text{к.нас}}(D) + \frac{U_1(D)}{I_k(D)}, \quad (9)$$

где $R_{\text{к.ном}}$ – номинальное сопротивление коллектора; $R_{\text{к.нас}}(D)$ – функция сопротивления насыщения коллектора, определяется выражением (3).

Зависимость динамического радиационного сопротивления от поглощённой дозы иллюстрирует рис. 6.

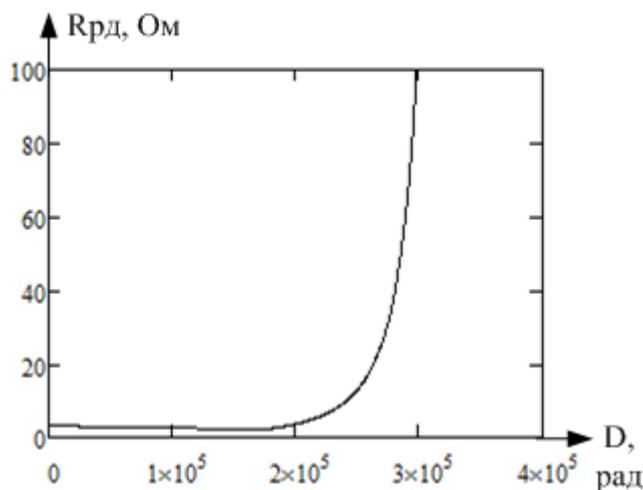


Рис. 6. Зависимость динамического радиационного сопротивления от поглощённой дозы

Таким образом, начиная с дозы приблизительно в $2.5 \cdot 10^5$ рад сопротивление канала коллектор-эмиттер резко возрастает, что говорит о закрытии транзистора при достижении критической поглощённой дозы.

Рассмотрим БТИЗ и нагрузку как классический делитель напряжения. Входным

напряжением будет $U_1(D)$ между точками К-Н, выходным напряжением – напряжением на нагрузке $U_H(D)$ между точками Е-Н (рис. 2). Сопротивлениями послужат $R_{\text{рд}}(D)$ (9) и сопротивление нагрузки Z_H . Тогда напряжение на нагрузке выражается как

$$U_H(D) = U_1(D) \frac{Z_H}{Z_H + R_{pд}(D)} \quad (10)$$

Зависимость амплитуды выходного напряжения полупроводникового преобразователя от поглощённой дозы представлена на рис. 7.

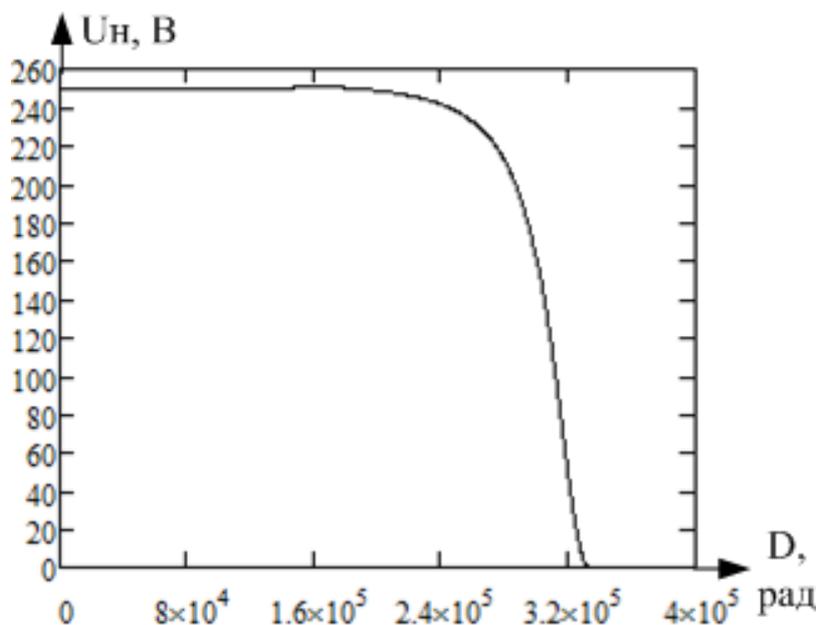


Рис. 7. Зависимость амплитуды выходного напряжения полупроводникового преобразователя от поглощённой дозы

Из графика видно, что начиная приблизительно с $1.8 \cdot 10^5$ рад начинается плавное спадание амплитуды выходного напряжения, его величина достигнет 90% от номинала при дозе $2.65 \cdot 10^5$ рад, при дальнейшем облучении функция экспоненциально спадает и достигает 0 при дозе $3.3 \cdot 10^5$ рад. Формулы (1) – (10) представляют собой математическую модель для расчета выходного напряжения преобразователя частоты средней мощности от величины поглощённой дозы.

Исследования проводились с использованием программной среды Mathcad 15.

Выводы и предположения. Выполнено теоретическое исследование влияния радиационного излучения на силовой канал полупроводникового преобразователя в составе электропривода подъема мостового крана. Установлено, что под влиянием радиации уменьшается амплитуда выходного напряжения преобразователя, а частота остается заданной. Поскольку с ростом поглощенной дозы внутренние емкости транзисторов уменьшаются, а так как их значения имеют порядок $10^{-9} \div 10^{-12}$ фарад, то можно считать, что радиация не влияет на скорость коммутации.

Получена и исследована математическая модель влияния ИИ на амплитуду выходного напряжения преобразователя частоты в составе системы электропривода.

Определено, что радиационно чувствительными полупроводниковыми устройствами в составе преобразователя частоты, оказывающими наибольшее влияние на работоспособность системы, являются: оптрон, полевые *p* и *n*-канальные МДП транзисторы в составе драйвера, полевой *n*-канальный силовой МДП, биполярный *npn* транзисторы в составе БТИЗ и выпрямительный диод.

На основании полученного закона изменения выходного напряжения электрического преобразователя появляется возможность разработки программного средства компенсации радиационного воздействия на полупроводниковые устройства в системе электропривода.

Список литературы:

1. Светлаков В.А.,Пронькин И.Г., Бельков А.М. Модернизация источника вторичного электропитания для бортовой аппаратуры заказов серии «СОЮЗ» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 1. С. 47–55. [Svetlakov V.A.,Pron'kin I.G., Bel'kov A.M., Modernizacija istochnika vtorichnogo jelektropitanija dlja bortovoj apparatury zakazov serii «SOJuZ» // Vestnik JuUrGU. Serija «Komp'juternye tehnologii, upravlenie, radiojelektronika». 2018. vol. 18, (1). p. 47–55. (In Russ).] <https://doi.org/10.14529/ctcr180105>

2. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств», М., 2001. [Vologdin Je.N., Lysenko A.P. Radiacionnye jeffekty v nekotoryh klassah poluprovodnikovyh priborov: uchebnoe posobie po discipline «Radiacionnaja stojkost' poluprovodnikovyh priborov i radiojelektronnyh ustrojstv», М., 2001. (In Russ).]

3. Melikyan V., Hovsepyan A., Harutyunyan T. Schematic Protection Method from Influence of Total Ionization Dose Effects on Threshold Voltage of MOS Transistors. 2010 East-West Design & Test Symposium.

<https://doi.org/10.1109/ewdts.2010.5742096>

4. Srour J.R., McGarrity J.M. Radiation effects on microelectronics in space. United States: N. p., 1988. <https://doi.org/10.1109/5.90114>

5. Nagaraj Sh., Singh V., Jayanna H.S., et al. 60Co-Gamma Ray Induced Total Dose Effects on P-Channel MOSFETs Indian Journal of Materials Science Vol. 2013, Article ID 465905, 5 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/465905>

6. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационная стойкость биполярных транзисторов: учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств», М., 2000. [Vologdin Je.N., Lysenko A.P. Radiacionnaja stojkost' bipolarjnyh tranzistorov: uchebnoe posobie po discipline «Radiacionnaja stojkost' poluprovodnikovyh priborov i radiojelektronnyh ustrojstv», М., 2000. (In Russ).]

7. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах // Мн., «Наука и техника», 1978. [Korshunov F.P., Gatal'skij G.V., Ivanov G.M. Radiacionnye jeffekty v poluprovodnikovyh priborah // Мн., «Наука и техника», 1978. (In Russ).]

8. LaBel K.A., Kniffin S.D., Reed R.A. et al. A Compendium of Recent Optocoupler Radiation Test Data. 2000 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Workshop Record. Held in conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (Cat. No.00TH8527).

<https://doi.org/10.1109/redw.2000.896280>

9. Johnston A.H. The Effects of Space Radiation on Optocouplers. California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory; California Institute of Technology, Pasadena, California; USA- 91 109.

10. Роках А.Г. Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и приборы: конспект лекций по курсам «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и структуры» и «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы», Саратов: СГУ, 60 с. [Rokah A.G. Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye materialy i pribory: konspekt lekcij po kursam «Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye materialy i struktury» i «Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye pribory», Saratov: SGU, 60 p. (In Russ).]

11. Севин Л. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968. [Sevin L. Polevye tranzistory. М., «Sovetskoe radio», 1968. (In Russ).]

Azimova N.N.

*Assistant Professor in Mathematics & Computer sciences,
Don State Technical University*

Ashikhmin D.V.

*Bachelor in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Ladosha E.N.

*Ph.D in Mathematics & Computer sciences, Associate Professor,
Don State Technical University*

Kyptsova I.S.

*Undergraduate student in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

Kholodova S.N.

*Ph.D in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

Tchukarina N.A.

*Undergraduate student in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION NOISE FIELD AND AIR DUST POLLUTION ACOMPLISHED RAIL CUTTING

Азимова Наталья Николаевна

*Старший преподаватель кафедры прикладной математики,
Донской Государственный Технический Университет*

Ашихмин Денис Валерьевич

*бакалавр кафедры прикладной математики,
Донской Государственный Технический Университет*