

О.В. ЧЕРМАЛИХ, Д.Д. МУГЕНОВ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ АМПЛІТУДИ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ З ЛАНКОЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

У статті розглянуто вплив іонізуючого випромінювання на роботу електромеханічного обладнання мостового крана сховища радіоактивних відходів. Синтезована математична модель врахування впливу поглиненої дози іонізуючого випромінювання на амплітуду вихідної напруги перетворювача частоти з ланкою постійного струму середньої потужності. Побудована схема силового каналу перетворювача частоти з драйверами, виконаними за біполярною комплементарною технологією, на підставі якої записані рівняння електричної рівноваги. Визначено елементи, радіаційна зміна параметрів яких найбільш суттєво впливає на радіаційну стійкість системи.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, електропривод, перетворювач частоти, драйвер, метал оксид напівпровідник, біполярний транзистор, оптрон.

ALEXANDR VALENTYNOVYCH CHERMALYKH, DANIIL DZHALILOVYCH MUHENOV
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

RESEARCH OF THE OUTPUT VOLTAGE AMPLITUDE RADIATION DEPENDENCE OF THE FREQUENCY CONVERTER WITH DC LINK BY USING MATHEMATICAL MODEL

Introduction. The article considers the influence of ionizing radiation on the operation of electric drive power electronics of the radioactive waste storage bridge crane. **Problem.** The equipment of bridge crane electric systems is done in general industrial implementation. Since electric drives are exposed to radiation caused by radioactive waste activity and elevated radiation background, it is relevant to explore the effect of ionizing radiation on their performance. Insulated gate bipolar transistor (IGBT) driver chips can be made on the basis of metal-oxide-semiconductor (MOS) or bipolar junction transistors (BJT) complementary technology. **Goal.** To synthesize frequency converter (FC) output voltage amplitude on radiation model for IGBT driver chips which made on the basis of BJTs. To determine the semiconductor device in the circuit, which radiation-dependent parameter affects the most significantly on FC output voltage amplitude. **Methodology.** To achieve this goal, FC power electronics equivalent scheme was built. To obtain its mathematical model, the equation of electric equilibrium was written. In the developed model the idealized, insensitive to radiation, components were substituted turn by turn. **Results.** An electric power channel mathematical model of a medium-power FC is obtained. According to the results of the study it is determined that idealized optocoupler increases the radiation resistance in four times with a monotonic output voltage decrease for circuits with MOS drivers. For a circuit with BJT drivers, the idealized optocoupler shows an increase in radiation resistance almost twice with a monotonic decrease in the output voltage amplitude, but the idealized BJT in the IGBT equivalent circuit gives constant amplitude with the same stability as the real system. **Originality.** The radiation stability analysis of general industrial implementation variable-frequency drive is carried out for the first time. The most radiation-sensitive components of the variable-frequency drive system are revealed. The FC electric power channel scheme with MOS drivers is compared to scheme with BJT drivers. **Practical value.** The obtained results show that in order to increase the radiation resistance of general industrial implementation electric drives, it is necessary to pay attention to the replacement of optocouplers and BJT in IGBT equivalent circuit with more radiation-resistant components.

Key words: ionizing radiation, electric drive, frequency converter, driver, metal oxide semiconductor, bipolar junction transistor, optocoupler.

Постановка проблеми. Згідно зі Стратегією поводження з радіоактивними відходами в Україні, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2009 р. № 990-р, безпечне поводження з такими відходами є важливою складовою загальної системи забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії. В Чорнобильській зоні відчуження для захоронення радіоактивних відходів (РАВ) комплексом виробництв "Вектор" споруджено спеціально обладнані приповерхневі сховища. Для забезпечення заповнення сховищ застосовуються мостові крани, які приводяться в рух засобами електричних приводів за схемою перетворювач частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму – асинхронний двигун. Оскільки електроприводи знаходяться під впливом радіації, викликаним активністю РАВ і підвищеним фоном місцевості, актуально дослідити вплив іонізуючого випромінювання (ІВ) на їх працездатність. Мостовий кран розглядається як реальний об'єкт, що працює в зоні іонізуючого випромінювання. Фактично, проведені дослідження підходять для будь-яких напівпровідникових перетворювачів електромеханічного обладнання машин і установок, які працюють в зоні підвищеного рівня радіації.

Аналіз останніх досліджень на які спирається автор. Інформація щодо досліджень радіаційної стійкості ПЧ середньої потужності (1.5 ÷ 500 кВт) на сьогодні практично відсутня. В джерелі [1] розглянуто вплив іонізуючого випромінювання на силовий канал ПЧ потужністю 18.5 кВт із драйверами з метал-діелектрик-напівпровідниковими (МДН) транзисторами.

В теперішній роботі враховані дослідження радіаційної стійкості окремих напівпровідникових елементів електричних кіл: діодів [2], біполярних (БТ) і польових МДН транзисторів [2, 3] та оптронів [4, 5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Існують також драйвери виготовлені за біполярною комплементарною технологією, та комбіновані, в яких біполярний транзистор відпирає, а польовий – закриває вихідні силові ключі ПЧ. Раніше радіаційна стійкість цих драйверів не була

опрацьована.

Цілі статті.

1. Синтезувати математичну модель драйвера за біполярною комплементарною технологією для розробленої раніше математичної моделі силового каналу ПЧ задля оцінки впливу поглиненої дози гамма випромінювання на його вихідну напругу.

2. Порівняти радіаційну стійкість систем із МДН і БТ драйверами.

3. Визначити напівпровідниковий пристрій в схемі, радіаційна зміна параметрів якого найсуттєвіше впливає на амплітуду вихідної напруги ПЧ.

Виклад основного матеріалу. Оскільки дослідження проводиться для електротехнічного обладнання сховища радіоактивних відходів, доцільно дізнатися які типи іонізуючого випромінювання присутні в його просторі. Згідно з [6], сховища радіоактивних відходів є джерелами нейтронного і гамма випромінювання. Гамма випромінювання має найбільшу проникаючу здатність, завдяки високій частоті електромагнітних хвиль, тому відносно глибоко проникає в міжatomне середовище [7].

Відповідно до [8], радіаційні пошкодження, які можуть бути спричинені напівпровідниковим пристроям, поділяються на три типи:

1) викликані пошкодженням зміщення (Displacement Damage Dose – DDD), також відомі як неіонізуючі втрати енергії в речовині;

2) ефекти одиначної події (Single Event Effects – SEE), являють собою зміну стану напівпровідникового приладу, викликану одиначною іонізуючою частинкою, як показує огляд літератури, такий тип пошкодження або призводить до короткострокового пікового збою з подальшим поверненням в нормальний режим, або до виходу пристрою з ладу;

3) викликані накопиченою поглиненою дозою (Total Ionizing Dose – TID).

В даній роботі розглядатиметься тільки вплив поглиненої дози іонізуючого випромінювання на силові напівпровідникові пристрої перетворювача частоти.

Пошкодження, яке викликає іонізуюче випромінювання, залежить від наступних умов [9]:

- тип, енергія і спектр частинок, що іонізують речовину;
- щільність потоку частинок або потужність дози опромінювання;
- тривалість опромінювання;
- температура;
- інші зовнішні впливи.

Відомо [10], що енергія гамма квантів може бути в діапазоні від 50 кеВ до 10 МеВ. Що стосується нейтронів, то залежно від типу, вони можуть мати енергію від 0.025 еВ і до значень, що перевищують 20 МеВ. Передбачити склад радіоактивних відходів, а відповідно і енергію частинок наперед в довгостроковій перспективі важко, тому для спрощення розрахунків будемо враховувати лише дію гамма випромінювання із енергією квантів 1 МеВ. Проте підставити необхідні значення енергії нейтронного випромінювання в існуючій математичній моделі не складе труднощів.

Щільність потоку іонізуючого випромінювання – це кількість іонізуючих частинок ядерного випромінювання, що перетинають за 1 с площу 1 см^2 , яка розташована нормально до потоку [10]. Помноживши щільність на час під опромінюванням отримуємо флюенс. Скориставшись виразом із [11 с. 4] можна перевести флюенс гамма квантів в поглинену дозу, вираз справедливий для області енергій від $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^6$ еВ, похибка $\pm 15\%$. Завантаження сховища радіоактивними відходами відбувається нелінійно у часі, тобто блоки із РАВ простоюють у відкритому сховищі, тому і накопичення поглиненої дози відбувається нерівномірно.

Сховище РАВ обладнано будівлею без опалення, тому коливання температури близькі до сезонних, температура є природним фактором.

В основу математичної моделі покладена схема силового каналу ПЧ з драйверами на основі біполярної комплементарної технології (далі – БТ драйвери), котра зображена на рис. 1.

Позначення наступні: An, Cath – анод і катод драйвера; Ucc, Uee – напруги відпирання і запирання, які драйвер комутує на затвор біполярного транзистора з ізолюваним затвором (БТІЗ); Ua – напруга фази А; N – нейтраль; Logic – блок формування таблиці істинності драйвера; VD1 – випрямний діод; VT1 – ррп транзистор драйвера; VT2 – ррп транзистор у складі схеми заміщення БТІЗ; VT3 – n-канальний МДН транзистор у складі БТІЗ; VT4 – ррп транзистор драйвера; DA1 – оптрон; Zload – опір навантаження; C1, B1 – колектор і база транзистора драйвера; G, C, E – затвор, колектор і емітер БТІЗ; Ic – струм колектора БТІЗ.

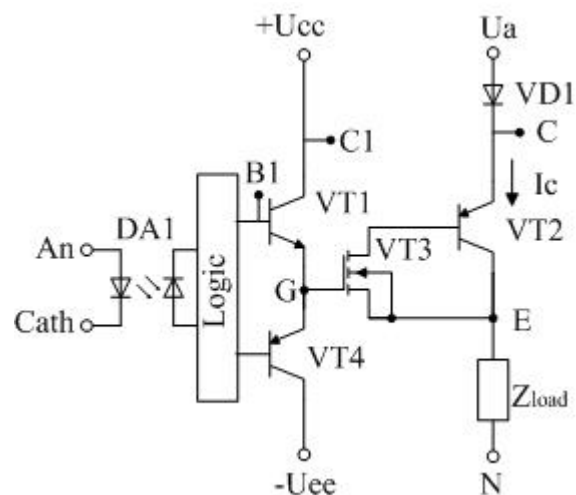


Рис. 1. Напівпровідникова структура силового каналу перетворювача частоти для одного транзистора

Подальші розрахунки потребують наявності чисельних значень параметрів транзисторів. Так, розглядається електропривод з перетворювачем частоти потужністю 18.5 кВт, номінальною напругою живлення 380 В та, виходячи із його робочого струму в 75 А, в якості прототипу обрано модуль БТІЗ BSM50GB120DN2, а за базовий елемент БТ в складі драйверів – транзистори типу BC547 та BC557. Необхідні чисельні значення відповідають паспортним даним вище зазначених виробів.

Оскільки подібна схема розглядалася в [1], висвітлимо лише її відмінності. На базу транзистора VT1 надходить сигнал напруги з виходу оптрона DA1. Виходом же транзистора VT1 є напруга в точці G. Отже, необхідно математично описати передаточну функцію біполярного транзистора, в якій і вхідним і вихідним сигналами є напруга. В роботі [12, с. 120] представлено вираз, який відображає залежність струму колектора БТ від напруги база-емітер, якщо знехтувати ефектом Ерлі:

$$I_C(U_{BE}) = I_S \cdot e^{U_{BE}/U_T}, \tag{1}$$

де I_C – струм колектора; U_{BE} – напруга між базою і емітером біполярного транзистора; I_S – струм насичення транзистора, $I_S \approx 10^{-16} \dots 10^{-12}$ А; U_T – температурний потенціал, $U_T \approx 26$ мВ [12, с. 55].

В нашому випадку напругою база-емітер є вихідна напруга оптрона $U_{op.out}(D)$ [1, вираз (5)], яка є функцією від поглиненої дози ІВ. Підставивши $U_{op.out}(D)$ в (1) і обмеживши струм величиною його насичення отримаємо систему рівнянь:

$$I_{cd}(D) = \begin{cases} I_S \cdot e^{U_{BE}/U_T}, & I_S \cdot e^{U_{BE}/U_T} < I_{Csat}, \\ I_{Csat}, & I_S \cdot e^{U_{BE}/U_T} \geq I_{Csat} \end{cases}, \tag{2}$$

де $I_{cd}(D)$ – залежність колекторного струму біполярного транзистора драйвера від поглиненої дози іонізуючого випромінювання; I_{Csat} – струм колектора насичення, $I_{Csat} = 0.1$ А для BC547.

Побудоване графічне зображення системи рівнянь залежності струму колектора БТ драйвера від величини поглиненої дози ІВ (2) представлено на рис. 2.

З графіку видно, що до дози 745 крад, колекторний струм не змінюється і лишається рівним струму насичення колектора. Далі спостерігається експоненційне зниження струму до 0 при 785 крад, що означає, що транзистор перейде в режим відсічки.

Щоб в подальшому отримати величину напруги на виході транзистора VT1, скористаємось введеним раніше виразом

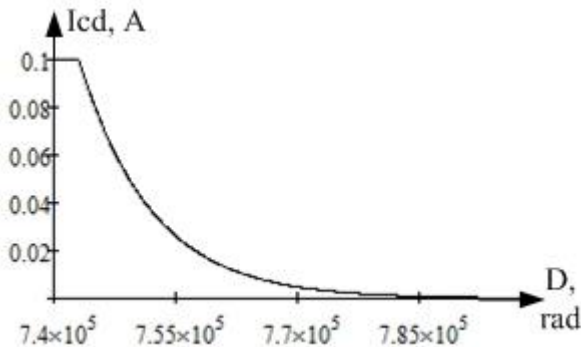


Рис. 2. Залежність колекторного струму біполярного транзистора драйвера від поглиненої дози

радіаційного динамічного опору колектора БТ [1, вираз (9)]. Залежність опору насичення колектора від поглиненої дози взято із [3, с. 80]. Підставивши у дану формулу чисельні значення транзистора BC547 побудовано графічну залежність динамічного радіаційного опору колектора транзистора драйвера, рис. 3.

Для того, щоб оцінити величину напруги на затворі БТІЗ, розглянемо транзистор VT1, вхідний опір БТІЗ і джерело напруги, яку комутує VT1 на затвор, як класичний дільник напруги:

$$U_{ZE}(D) = \frac{U_{cc} \cdot R_{GE}}{R_{rd}(D) + R_{GE}}, \tag{3}$$

де $U_{ZE}(D)$ – залежність напруги, яка подається на затвор БТІЗ від поглиненої дози; U_{cc} – напруга, яку комутує драйвер на затвор БТІЗ, в даному випадку $U_{cc} = 20$ В; $R_{rd}(D)$ – радіаційний динамічний опір каналу колектор-емітер біполярного транзистора драйвера; R_{GE} – вхідний опір БТІЗ, $R_{GE} = 20$ кОм для BSM50GB120DN2.

Побудований графік залежності напруги на затворі БТІЗ від поглиненої дози ІВ (3) показано на рис. 4.

З графіку видно, що радіаційна стійкість БТ драйвера обмежується величиною поглиненої дози 800 крад, після чого відбувається різке падіння його вихідної напруги до нуля.

Далі математична модель аналогічна до розробленої в [1], тому розглянемо лише фінальну

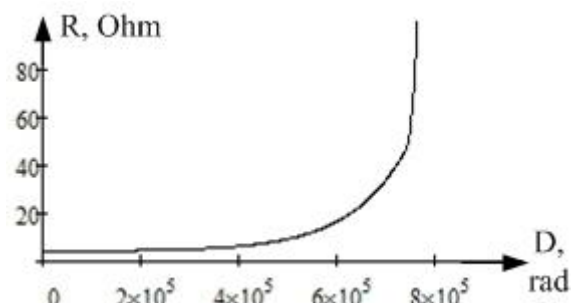


Рис. 3. Залежність динамічного радіаційного опору каналу колектор-емітер біполярного транзистора від поглиненої дози

стадію – розрахунок амплітуди вихідної напруги ПЧ:

$$U_{out}(D) = \frac{U_{rectif} \cdot Z_{load}}{R_{dyn}(D) + Z_{load}}, \quad (4)$$

де $U_{out}(D)$ – амплітуда вихідної напруги ПЧ; U_{rectif} – напруга на виході випрямляча; $R_{dyn}(D)$ – динамічний радіаційний опір колектора БТІЗ; Z_{load} – опір навантаження.

Побудовану графічну інтерпретацію виразу (4) відтворено на рис. 5.

З рис. 5 можна відзначити, що після дози 300 крад починається монотонне зниження амплітуди вихідної напруги, а після досягнення 800 крад спостерігається її різке падіння до нуля, тобто настає функціональна відмова перетворювача частоти.

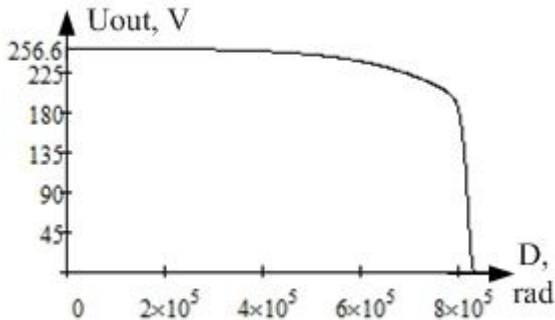


Рис. 5. Залежність амплітуди вихідної напруги перетворювача частоти від поглиненої дози для схеми з БТ драйверами

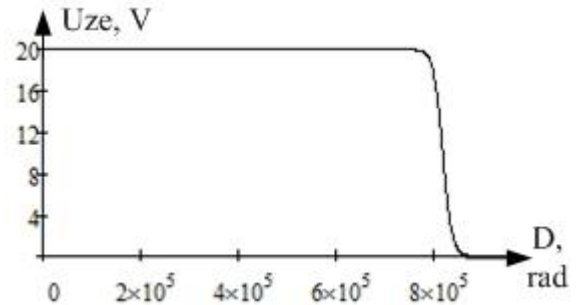


Рис. 4. Залежність напруги затвор-емітер БТІЗ від поглиненої дози в схемі з БТ драйвером

Визначимо напівпровідниковий пристрій в схемі, радіаційна зміна параметрів якого найсуттєвіше впливає на амплітуду вихідної напруги ПЧ. Для вирішення цього питання необхідно в дійсній математичній моделі замість існуючих напівпровідникових пристроїв по черзі підставити ідеалізовані, тобто нечутливі до впливу радіації. Дослідимо обидва варіанти схем: з МДН [1] і з БТ драйверами. Зі схеми на рис. 1 виділимо такі радіаційно чутливі пристрої: оптрон, БТ драйвера, n-канальний МДН в складі схеми заміщення БТІЗ, ррр транзистор в складі БТІЗ, випрямний діод. В схемі з МДН драйвером відповідно буде розглянуто р-канальний МДН драйвера.

В таблиці 1 представлені величини радіаційно чутливих параметрів ідеалізованих варіантів вищезазначених пристроїв.

Таблиця 1

Радіаційно чутливі параметри напівпровідникових пристроїв і їх ідеалізованих математичних моделей

Напівпровідниковий пристрій	Радіаційно чутливий параметр	Величина радіаційно чутливого параметру ідеалізованого пристрою
Оптрон	Коефіцієнт передачі	1
БТ драйвера	Зміна опору насичення колектора	0
МДН драйвера	Зміна напруги відсічки	0
МДН в БТІЗ	Зміна напруги відсічки	0
БТ в БТІЗ	Зміна опору насичення колектора	0
Діод	Зміна прямого падіння напруги	0

Згідно з обраним підходом отримано графіки, представлені на рис. 6, 7.

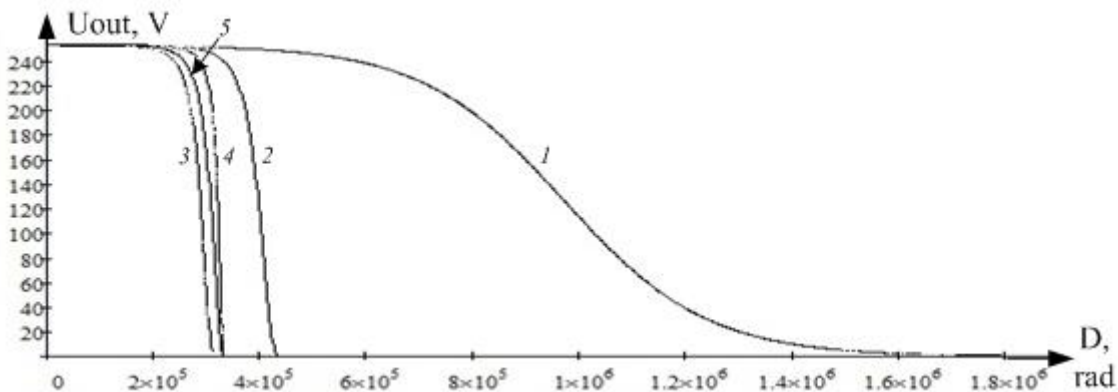


Рис. 6. Залежності амплітуди вихідної напруги перетворювача частоти з МДН драйверами від поглиненої дози з ідеалізованим: крива 1 – оптроном; 2 – МДН транзистором драйвера; 3 – МДН транзистором в складі БТІЗ; 4 – біполярним транзистором в складі БТІЗ; 5 – діодом

З отриманих кривих (рис. 6) можна зробити висновок, що найбільшу радіаційну стійкість показує система з нечутливим до радіації оптроном. До дози 400 крад амплітуда напруги майже не змінюється, від 400 крад до 1,6 Мрад відбувається її монотонне зниження до нуля. Схеми із ідеалізованими діодом, МДН в БТІЗ і БТ в БТІЗ мають приблизно однакову стійкість близьку до реальної системи, що складає ≈ 250 крад. Нечутливий до іонізуючого випромінювання МДН драйвера демонструє більшу стійкість через те, що зменшення його затворної напруги не супроводжується збільшенням напруги відсічки.

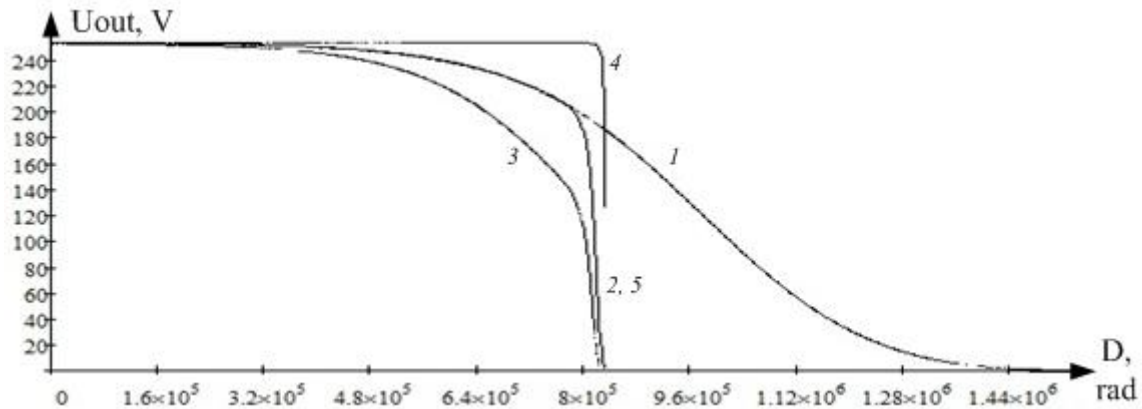


Рис. 7. Залежності амплітуди вихідної напруги перетворювача частоти з БТ драйверами від поглиненої дози з ідеалізованим: крива 1 – оптроном; 2 – біполярним транзистором драйвера; 3 – МДН транзистором в складі БТІЗ; 4 – біполярним транзистором в складі БТІЗ; 5 – діодом

Графіки на рис. 7 показують наступне. Хоча ідеалізований оптрон в системі проявляє найбільшу радіаційну стійкість – 1,44 Мрад, проте після дози в 320 крад амплітуда монотонно знижується, що призведе до такого ж монотонного зниження вантажопідйомності крану. З цієї точки зору вигідніше поводить система з нечутливим до ІВ біполярним транзистором в складі БТІЗ – до дози 800 крад спостерігається абсолютна жорстка залежність амплітуди від дози, однак, спостерігається різкий вихід з ладу схеми після 800 крад. Криві для ідеалізованих БТ драйвера і діода зливаються воедино і до дози 800 крад повторюють характеристику з ідеальним оптроном. Нечутливий до радіації МДН в складі БТІЗ має подібну залежність до реальної системи, що пов'язано із тим, що в реального n-канального МДН транзистора напруга відсічки зменшується при дозі 750 крад на 2 В (порогова напруга для неопроміненого BSM50GB120DN2 рівна 5,5 В), а напруга, яка подається на затвор при тій же дозі – 20 В. Таким чином ідеалізований і реальний n-канальні МДН транзистори в даному випадку поведуться однаково.

Висновки

1. Синтезовано математичну модель драйвера за біполярною комплементарною технологією для розробленої раніше математичної моделі силового каналу ПЧ задля оцінки впливу поглиненої дози іонізуючого гамма випромінювання на амплітуду вихідної напруги ПЧ. Моделювання проводились в програмному середовищі Mathcad 15.

2. Виявлено, що схема із драйвером на основі БТ радіаційно стійкіша і функціонує до дози 800 крад проти 250 крад у випадку драйвера з МДН транзистором.

3. Досліджено математичну модель силового каналу ПЧ задля визначення напівпровідникового пристрою, радіаційна зміна параметрів якого чинить найсуттєвіший вплив на роботу схеми. Визначено, що найістотніший вплив на радіаційну стійкість схеми силового каналу ПЧ вносить оптрон, оскільки його основний параметр – коефіцієнт передачі – монотонно спадає із зростанням поглиненої дози радіації [4, 5]. Виявлено, що застосування ідеалізованого оптрону, коефіцієнт передачі якого не залежить від радіації, дозволяє підвищити радіаційну стійкість системи з МДН драйверами від 250 крад до 1,6 Мрад з монотонним спаданням амплітуди до нуля; системи з БТ драйверами – від 800 крад до 1,44 Мрад з монотонним спаданням амплітуди до нуля. Застосування ж ідеалізованого біполярного транзистора в схемі з БТ драйверами не підвищує радіаційну стійкість, але забезпечує незмінну величину амплітуди вихідної напруги ПЧ.

Література

1. Chermalykh A.V. Ionizing radiation influence on the frequency converter output voltage / A.V. Chermalykh, D.D. Muhenov // East European Scientific Journal. – Warsaw, 2020. – Vol. 5(57). – P. 26–34.
2. Вологдин Э.Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов : учебное пособие / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – Москва : Московский гос. инст. электроники и математики, 2001. – 70 с.
3. Вологдин Э.Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов : учебное пособие / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – Москва : Московский гос. инст. электроники и математики, 2000. – 102 с.

4. LaBel K.A. 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) : зб. наук, праць за матеріалами міжнар. наук.-практ. конф. (24–28 лип. 2000 р., м. Ріно (Невада)). – Ріно (Невада), 2000. – 157 с. – DOI: 10.1109/REDW.2000.896280.
5. Reed R.A. Space radiation effects in optocouplers / R.A. Reed, P.W. Marshall, K.A. Label // International Journal of High Speed Electronics and Systems. – Singapore, 2004. – Vol. 14, No. 02. – P. 401–417. – DOI: 10.1142/S0129156404002430.
6. Буриев Н.Н. Внешнее излучение комбинированного хранилища радиоактивных отходов / Н.Н. Буриев, Н.Т. Буриев // Символ науки : Международный научный журнал. – 2016. – № 10-1. – С. 18–20.
7. Погосов А.Ю. Ионизирующая радиация: радиоэкология, физика, технологии, защита : навч. посіб. / А.Ю. Погосов, В.А. Дубковский. – Одеса : Наука и техника, 2012. – 804 с.
8. Fiore S. Radiation damage effects on detectors and electronic devices in harsh radiation environment / S. Fiore // Acta Physica Polonica Series – Варшава, 2015. – № 127(5). – С. 1560–1562. – DOI: 10.12693/APhysPolA.127.1560
9. Бекман И.Н. Радиоактивность и радиация [Электронный ресурс] : конспект лекций / И.Н. Бекман. – Москва : МГУ, 2006. – Режим доступа : <http://profbeckman.narod.ru/RR0.htm> (дата звернення: 04.03.2020).
10. Лощаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений : навч. посіб. / И.И. Лощаков. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2008. – 145 с.
11. Роках А.Г. Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и приборы : конспект лекций / А.Г. Роках. – Саратов : СГУ, 2007. – 60 с.
12. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. Том I / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 832 с.

References

1. Chermalykh A.V. Ionizing radiation influence on the frequency converter output voltage / A.V. Chermalykh, D.D. Muhenov // East European Scientific Journal. – Warsaw, 2020. – Vol. 5(57). – P. 26–34.
2. Vologdin E.N. Radiacionnye efekty v nekotorykh klassah poluprovodnikovyyh priborov : uchebnoe posobie / E.N. Vologdin, A.P. Lysenko. – Moskva : Moskovskij gos. inst. elektroniki i matematiki, 2001. – 70 s.
3. Vologdin E.N. Radiacionnaya stojkost bipolyarnyh tranzistorov : uchebnoe posobie / E.N. Vologdin, A.P. Lysenko. – Moskva : Moskovskij gos. inst. elektroniki i matematiki, 2000. – 102 s.
4. LaBel K.A. 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) : zb. nauk, prac za materialami mizhnar. nauk.-prakt. konf. (24–28 lip. 2000 p., m. Rino (Nevada)). – Rino (Nevada), 2000. – 157 s. – DOI: 10.1109/REDW.2000.896280.
5. Reed R.A. Space radiation effects in optocouplers / R.A. Reed, P.W. Marshall, K.A. Label // International Journal of High Speed Electronics and Systems. – Singapore, 2004. – Vol. 14, No. 02. – P. 401–417. – DOI: 10.1142/S0129156404002430.
6. Buriev N.N. Vneshnee izluchenie kombinirovannogo hranilisha radioaktivnyh othodov / N.N. Buriev, N.T. Buriev // Simvol nauki : Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. – 2016. – № 10-1. – S. 18–20.
7. Pogosov A.Yu. Ioniziruyushaya radiaciya: radioekologiya, fizika, tehnologii, zashita : navch. posib. / A.Yu. Pogosov, V.A. Dubkovskij. – Odesa : Nauka i tehnika, 2012. – 804 s.
8. Fiore S. Radiation damage effects on detectors and electronic devices in harsh radiation environment / S. Fiore // Acta Physica Polonica Series – Varshava, 2015. – № 127(5). – S. 1560–1562. – DOI: 10.12693/APhysPolA.127.1560
9. Bekman I.N. Radioaktivnost i radiaciya [Elektronnij resurs] : konspekt lekcij / I.N. Bekman. – Moskva : MGU, 2006. – Rezhim dostupu : <http://profbeckman.narod.ru/RR0.htm> (data zvernennya: 04.03.2020).
10. Loshakov I.I. Vvedenie v dozimetriyu i zashita ot ioniziruyushih izluchenij : navch. posib. / I.I. Loshakov. – Sankt-Peterburg : Izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta, 2008. – 145 s.
11. Rokah A.G. Dejstvие ioniziruyushih izluchenij na poluprovodnikovye materialy i pribory : konspekt lekcij / A.G. Rokah. – Saratov : SGU, 2007. – 60 s.
12. Titce U. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. Tom I / U. Titce, K. Shenk. – 12-e izd. – M. : DMK Press, 2008. – 832 s.

Рецензія/Peer review : 09.09.2020 р.

Надрукована/Printed : 03.11.2020 р.