

DOI 10.31891/2307-5732-2019-277-5-147-151
УДК 621.398

О.С. ПИВОВАР, В.Д. БИДЮК, Я.В. ВЕРЖБИЦЬКИЙ
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ НЕЛІНІЙНОЇ РЕАКЦІЇ У СЕГМЕНТОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ

Запропоновано ряд моделей функціонування методу нелінійної реакції у сегментованих кабельних лініях для використання у діагностичних кабельних системах та кабельних системах охорони периметрів об'єктів. Моделі враховують неідеальності кабельних та пристроїв нелінійної реакції на тестовий сигнал у вигляді постійного струму.

Ключові слова: кабельна система, лінія передачі, нелінійний елемент, стабілітрон, вольтметр.

OLEG SERGHIJOVYCH PYVOVAR, VOLODYMYR STEPANOVYCH BYDJUK,
JAROSLAV VIKTOROVYCH VERZHBYCJKYJ
Khmelnytskyi National University

MODELLING OF NONLINEAR REACTION METHOD IN SEGMENTED CABLE LINES

The method of nonlinear response to critical cable line damage can be used to build wired security systems aimed at control of the perimeter of objects. It is advisable to use this method to develop control and security equipment when tasked with operational deployment and minimization of hardware costs, and autonomous application. The essence of the nonlinear response method is to apply sharp fractures of the non-linear volt-current characteristic to detect the fact of critical damage during active use of the cable system when it is used as intended. Nonlinear elements are installed at the junction of segments of a fixed length cable line. The main factors limiting the tactical characteristics of the nonlinear response method are the imperfections of the transmission cable and nonlinear elements. However, the characteristic features of imperfections within the nonlinear reaction method can be constructive in nature, which not only improves tactical characteristics but also enhances functionality. For example, the presence of active resistance makes it easy to identify the critical damage of the break type and short circuit at the same time, and the noise properties of nonlinear elements and spurious leakage currents can be used as an additional factor in identifying transmission line damage. The use of the constructive nature of imperfections in the nonlinear response method is only possible if certain correlation exist between the test signal, the transmission line parameters, and the parameters of nonlinear elements. The article proposes a series of models that establish the correlation between the values of the test DC, the leakage currents of a distributed Zener system as nonlinear elements and the active resistance of a thin cable line. The results of the study of the proposed models are presented in the form of analytical correlations, graphs and recommendations.

Keywords: critical damage, Zener diode, segmented transmission line, voltmeter.

Постановка проблеми

Завдяки широкому поширенню кабельних систем та мереж завжди актуальним залишається завдання контролю їх працездатності під час експлуатації. Розроблено ряд методів та пристроїв, що призначено для контролю та визначення місця ушкодження в лініях передачі [1]. Подібні методи можуть використовуватись не тільки в телекомунікаційних, але і в протипожежних, охоронних, командних, телеметричних системах тощо. Як правило, використання систем контролю потребує переривання роботи основних системи та спряжене із застосуванням складних та коштовних засобів, що ґрунтуються на двох базових групах методів: рефлектометрії та аналізі параметрів кабельної лінії [2].

Якщо поставлено завдання оперативного розгортання, за умови мінімізації апаратних витрат та автономного застосування, то одним із перспективних методів контролю критичних ушкоджень є метод нелінійної реакції [3], що полягає у застосуванні різких зламів вольт-амперної характеристики (ВАХ) для виявлення факту ушкодження під час активного використання кабельної системи за телекомунікаційним призначенням. В охоронних кабельних системах завдання контролю факту ушкодження та передачі інформації часто об'єднуються та мають виконуватись одночасно [1].

Процеси, що протікають в нелінійних системах, мають особливості, що не зустрічаються в лінійних системах, в першу чергу, пов'язані з неможливістю застосування принципу суперпозиції для виявлення реакції системи та проблеми із визначенням стійкості за умови завад та варіації первинних умов [4]. Комп'ютерне моделювання нелінійних систем також спряжене з складністю моделей та алгоритмів їх обчислень.

Метою статті є розробка та дослідження аналітичних моделей методу нелінійної реакції для встановлення обмежень та рекомендацій щодо застосування в системі контролю критичних ушкоджень сегментованих кабельних ліній та охоронних системах мінімізованої вартості та простоти.

Аналіз останніх джерел

У випадках використання тонких кабелів для провідно-охоронних систем контролю периметрів об'єктів зазвичай довжина лінії не перевищує декількох кілометрів, а точність та розрізняльна спроможність системи складає десятки-сотні метрів в межах зони огляду відкритих ділянок. Оперативне розгортання та використання в польових умовах вимагає автономного живлення на досить тривалий час [1]. Існуючі методи локалізації критичних ушкоджень, за умови високої розрізняльної спроможності та точності, не можливо віднести до методично та технічно простих, що обмежує можливість їх використання

в зазначених умовах [2]. Розвиток кабельної промисловості та електронної бази нелінійних схем дозволяє застосувати в провідово-охоронних системах метод нелінійної реакції, що за класифікаційними ознаками можливо віднести до нелінійних, енергетичних методів, що працюють із сегментованими кабельними лініями віддалено, через використання низькочастотного змінного або постійного струму [3].

Метод нелінійної реакції ґрунтується на поділі провідово-охоронної лінії на сегменти, довжина яких визначає точність та розрізнявальну спроможність локалізації критичних ушкоджень. На стикі сегментів встановлено суттєво-нелінійний елемент із різкими зламами ВАХ. Найбільш простим та доступним елементом є стабілітрон. Ідеальну ВАХ для використання в методі нелінійної реакції має ще один нелінійний напівпровідниковий пристрій – динистор [3], але ВАХ динистора має різкий гістерезис, також використання динисторів спряжене із необхідністю вимикання тестового сигналу для переведення усієї системи контролю в режим передачі даних.

Фіксація критичних ушкоджень в методі нелінійної реакції відбувається через вимірювання напруги тестового сигналу із одного боку лінії. Процес вимірювання напруги не вимагає складних та енергоємних вимірювачів, але її значення залежить від багатьох факторів, найбільш визначними із яких є наявність активного та реактивного опору лінії передачі та ідеальність ВАХ стабілітронів. Реактивний опір лінії передачі має значення за умови використання в якості тестового сигналу змінного струму. У випадку проведення контролю лише за постійним струмом, слід враховувати лише активний опір лінії, а реактивний опір буде впливати лише на перехідні процеси встановлення результатів контролю [4].

Загалом, лінія передачі із великою кількістю нелінійних елементів є складним об'єктом для аналізу, до того ж під час використання тестового змінного струму аналіз слід проводити на основі розгляду лінії передачі, як лінії із розподіленими параметрами. Можливе також використання для локалізації шумових властивостей лінії і навіть можливості появи хаотичних режимів роботи системи загалом [3].

Виклад основного матеріалу

Для первинного моделювання вважатимемо ВАХ нелінійного елемента – стабілітрона, що включено в розрив N сегментів лінії (рис. 1) – ідеальною. Тобто напруга на стабілітроні або дорівнює нулю, або дорівнює напрузі стабілізації. За таких умов струм стабілітрона або відсутній, або дорівнює значенню тестового струму I_0 . Для обраних умов тестовий струм під час розриву проходить лише через один стабілітрон. Взаємне розташування стабілітронів та контрольованих ними сегментів лінії передачі доцільно обрати таким чином, що відповідальним за контроль сегменту є нелінійний елемент, що встановлено перед цим сегментом. Таким чином, перший стабілітрон встановлено безпосередньо на виході системи контролю і вході лінії передачі. Останній сегмент підключено до навантаження або системи захисту вхідних кіл приймача сумісної телекомунікаційної системи. Кількість сегментів дорівнює кількості стабілітронів. В умовах ураження сегменту розглядається три можливих типи критичних пошкоджень (рис. 1): розрив сегменту та коротке замикання наприкінці та коротке замикання на початку сегменту. Встановлена нумерація сегментів (рис. 1) сприяє спрощенню аналітичних виразів та поліпшенню якості їх розуміння. Основним режимом роботи методу нелінійної реакції є режим розриву сегменту або режим холостого ходу (розрив сегменту), але, як буде показано далі, за методом нелінійної реакції можливий одночасний контроль також і короткого замикання лінії.

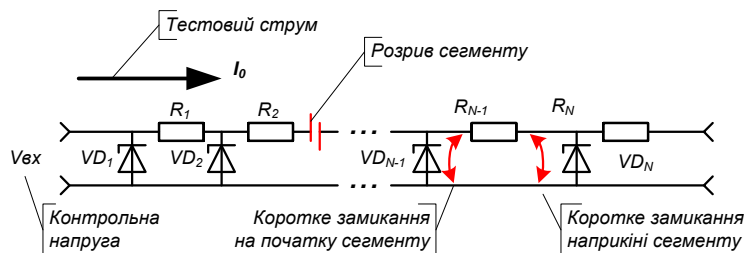


Рис. 1. Модель лінії та типи критичних пошкоджень для методу нелінійної реакції

За умов використання ідеальної ВАХ стабілітрона, напруга на вході лінії передачі під час розриву i -го сегменту буде визначатись як:

$$V_{\text{вх}}(i) = I_0 \sum_k^{i-1} R_k + V_{CT_i}, \tag{1}$$

де R_k – значення опору для кожної із k ділянок, що передують розірваному сегменту лінії; V_{CT_i} – напруга стабілізації стабілітрона, що передує розірваному сегменту лінії.

Якщо покласти у (1), що значення опорів усіх сегментів лінії передачі однакове та дорівнює R_0 , а напруги стабілізації стабілітронів обрані таким чином, що сусідні значення відрізняються на однакову величину ΔU_{CT} , то вираз для обчислення напруги на вході лінії буде мати вигляд:

$$V_{\text{вх}}(i) = (N-i) \Delta U_{CT} + V_{CT_{\text{мін}}} + I_0 R_0 \cdot (i-1), \tag{2}$$

де N – кількість сегментів у лінії передачі; $V_{CT_{\text{мін}}}$ – мінімальна напруга стабілізації, що визначається динамічним діапазоном змінного телекомунікаційного сигналу, що діє одночасно із тестовим. Максимальна

напруга стабілізації стабілітрона становитиме $V_{CT_{\max}} = (N-1)\Delta U_{CT} + V_{CT_{\min}}$, та визначає максимальну робочу напругу для джерела тестового постійного струму.

Завдяки наявності активного опору лінії значення напруги на вході лінії передачі не відповідає значенню напруг стабілізації стабілітронів, що вимагає наявності попереднього калібрування вольтметра відповідно характеру застосування та типу лінії передачі. Із зростанням значення активного опору сегментів лінії передачі різниця значень вхідної напруги за умови розриву сусідніх ділянок зменшується, що відповідає необхідності проведення більш точного контролю за значенням вхідної напруги, а це може призвести до збільшення часу реакції на ушкодження певного сегменту.

Для впевненого визначення напруги за допомогою простих, наприклад, стрілкових вольтметрів, значення ΔU_{CT} має складати сотні мілівольт – одиниці вольт. Неможливість визначення ураженого сегменту виникає у випадку, коли напруга на вході лінії буде однаковою під час ураження будь-якого сегменту: $V_{\text{вх}}(i) = V_{\text{вх}}(k)$. Для суміжних сегментів $V_{\text{вх}}(i) = V_{\text{вх}}(i+1)$ звідки із (2), можливо обрахувати критичне значення опору, що становитиме $R_0 = |\Delta U_{CT} / I_0|$.

Під час короткого замикання деякого сегменту лінії весь тестовий струм лінії проходить через точку замикання i -го сегменту, в результаті напруга на вході лінії вже не визначається напругами стабілізації стабілітронів, а залежить лише від активного опору ділянки лінії до замикання, в найгіршому випадку, коли замикання виникає наприкінці сегменту $V_{\text{вх}}(i) = I_0 \sum_k^i R_k$, у випадку замикання на початку сегменту, тобто

безпосередньо перед встановленням нелінійного елемента, значення вхідної напруги буде зменшено відносно до $V_{\text{вх}}(i) = I_0 \sum_k^{i-1} R_k$. Якщо опори сегментів лінії однакові, то вхідна напруга лінійно залежить від

номера ураженого сегменту $V_{\text{вх}}(i) = I_0 R_0 i$. Таким чином, під час розриву лінії значення напруги зменшується, а під час короткого замикання значення вхідної напруги в методі нелінійної реакції збільшується зі зростанням номера ураженого сегменту. Значення напруги на вході лінії під час критичних ушкоджень різного характеру (розриву або короткого замикання) будуть суттєво різнитися, якщо:

$$\min\{(N-i)\Delta U_{CT} + V_{CT_{\min}} + I_0 R_0 \cdot (i-1)\} > \max\{I_0 R_0 \cdot i\}. \quad (3)$$

Умова одночасного контролю розриву та короткого замикання (3) має виконуватись для найгіршого випадку $i = N$, що дає можливість встановити обмеження для мінімального значення напруги стабілізації:

$$V_{CT_{\min}} + I_0 R_0 (N-1) > I_0 R_0 N \text{ або } V_{CT_{\min}} > I_0 R_0. \quad (4)$$

Чим більша різниця значень вхідних напруг для сусідніх сегментів, тим більш надійніше буде визначення номеру ураженого сегменту (див. рис. 3). В найкращому випадку слід дотримуватись умови $\frac{V_{CT_{\max}} - V_{CT_{\min}}}{2} \cong I_0 R_0 N$, але така умова не є достатньою умовою, необхідно також, щоб значення тестового струму

перевищувало мінімальний струм стабілізації стабілітронів із урахуванням струмів витікання, пов'язаних із неідеальністю ВАХ. Завдяки неідеальності ВАХ частина тестового струму буде відгалужуватись в нелінійні елементи, що розташовано ближче до джерела струму, а отже до дальніх сегментів прийде лише частина цього струму. Частини струму, що залишились, має бути достатньо для підтримання останнього стабілітрону в режимі стабілізації. Решта стабілітронів, крім останнього буде знаходитись в режимі відсікання, струм через ці стабілітрони набагато менший, але через їх велику кількість, сумарне значення може бути приблизно рівним струму стабілізації останнього стабілітрона.

В таких умовах, із першим ступенем наближення, можливо описати ВАХ стабілітрона за допомогою кусково-лінійної моделі, аналітичний вираз якої наступний:

$$I_{CT}(U) = \begin{cases} I, & \text{для } |U| > |U_{CT}|, U < 0 \\ U \frac{I_{\min}}{U_{CT}}, & \text{для } 0 < |U| < |U_{CT}| \\ 0, & \text{для } U > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

де I – поточний струм стабілізації, що задається зовнішніми колами; I_{\min} – мінімальний струм стабілізації;

U_{CT} – середня напруга стабілізації стабілітрона.

Реакція ланцюжкового електричного кола із нелінійними елементами з кусково-лінійною апроксимацією ВАХ за (6) на роботу пристрою контролю лінії буде дещо складніша: залежність вхідної напруги від номеру ураженого сегменту лінії вже не буде лінійною; енергетичні витрати за рахунок необхідності збільшення тестового струму підвищаться; збільшиться рівень шуму на вході та виході лінії передачі за рахунок того, що стабілітрони із мікрострумами почнуть працювати в режимі лавинного пробую, який характеризується значними шумами; за тих самих умов зменшиться загальна довжина лінії, що підлягає тестуванню методом нелінійної реакції.

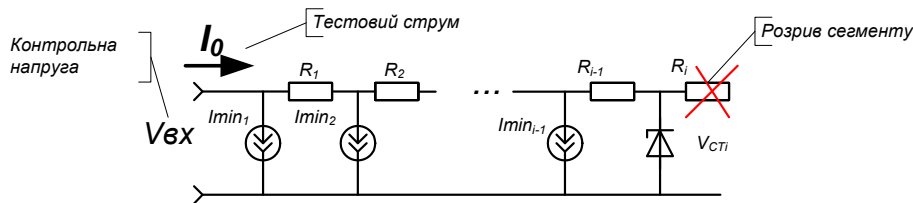


Рис. 2. Електрична схема моделювання роботи методу нелінійної реакції за умови стабільних струмів витікання

Для попереднього оцінювання реакції ланцюжкового нелінійного кола (рис. 2) введемо наступні припущення: падіння напруги на активному опорі сегментів набагато менше за різницю напруг стабілізації суміжних стабілітронів; під час розриву сегменту лінії із урахуванням струмів витікання значення струму через попередній сегмент достатньо для переведення стабілітрону в режим насичення; значення струмів витікання хоча б на порядок менше за значення тестового струму. Значення напруги на вході лінії під час розриву i -го сегменту становитиме відповідно (2) та правилу обчислення суми ряду натуральних чисел [4]:

$$U_{ex}(i, i \geq 2) = \sum_k U_{R_k} + U_{CT_i} = R_0 \sum_{k=1}^{i-1} (I_0 - I_{min_0} k) + U_{CT_i} = R_0 \left[\sum_{k=1}^{i-1} (I_0) - \sum_{k=1}^{i-1} (I_{min_0} k) \right] + U_{CT_i} = R_0 I_0 \cdot (i-1) + U_{CT_i} - R_0 I_{min_0} \sum_{k=1}^{i-1} (k) = (6)$$

$$= R_0 I_0 \cdot (i-1) + U_{CT_i} - R_0 I_{min_0} \frac{i(i-1)}{2},$$

а для випадку рівномірного розташування стабілітронів за (6) із кроком ΔU_{CT} рівняння для вхідної напруги для розриву та короткого замикання відповідно виглядатимуть як:

$$U_{ex_{XX}}(i) = R_0 I_0 \cdot i + (N-i) \Delta U_{CT} + U_{CT_{min}} - R_0 I_{min_0} \frac{i(i-1)}{2}, (7)$$

$$U_{ex_{XZ}}(i) = I_0 R_0 \cdot (i) - R_0 I_{min_0} \frac{i(i+1)}{2}.$$

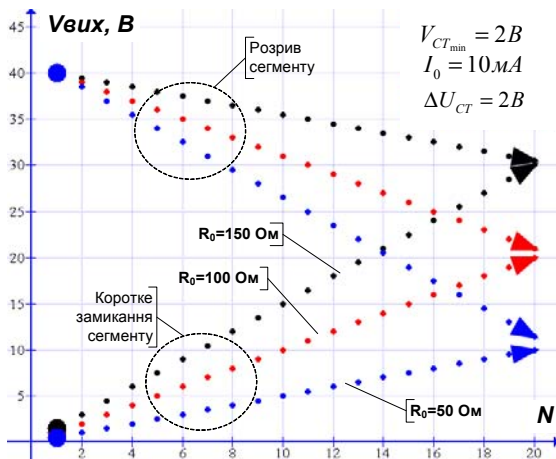


Рис. 3. Сукупна діаграма залежності вхідної напруги методу нелінійної реакції для випадку холостого ходу та замикання сегменту

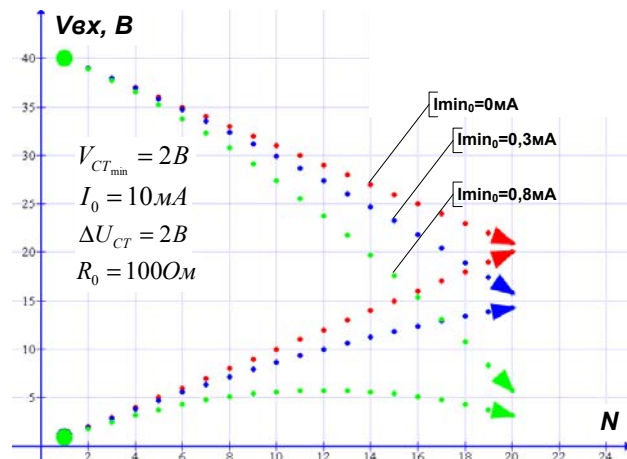


Рис. 4. Залежність контрольованої напруги від номера сегменту холостого ходу та короткого замикання

Таким чином, струми витікання під час роботи за вказаною моделлю призводять до зменшення контрольованої напруги відносно ідеальних умов. Це пояснюється зменшенням падіння напруги на активному опорі лінії через протікання менших струмів. В попередньому випадку застосовувалась умова, що струми витікання стабілітронів однакові та опосереднені, хоча насправді значення струмів витікання стабілітронів, що розташовано ближче до точки розриву в напрямку початку лінії будуть більшими, а струми витікання стабілітронів, що розташовані близько початку лінії, будуть набагато меншими завдяки тому, що їх напруга стабілізації обрана більшою [3]. В такому випадку, якщо розрив лінії здійснюється на першому сегменті, то струмів витікання не буде, а весь тестовий струм (рис. 2) буде проходити через перший стабілітрон, тобто $U_{ex}(1) = U_{CT1} = N \Delta U_{CT} + U_{CT_{min}}$. Вхідна напруга під час розриву другого і далі сегментів визначатиметься так:

$$U_{ex}(i, i \geq 2) = \sum_k U_{R_k} + U_{CT_i}, (8)$$

а струм витікання k -го стабілітроні (до розриву) можливо знайти як:

$$I_{min_k} \cong S U_{CT_i} = \frac{I_{min}}{U_{CT_k}} U_{CT_i} = \frac{I_{min}}{(N-k) \Delta U_{CT} + U_{CT_{min}}} (N-i) \Delta U_{CT} + U_{CT_{min}}; \text{ для } U_{CT_i} < U_{CT_k}; k < i. (9)$$

Повне падіння напруги на сегментах лінії за (8) із урахуванням (9) становитиме:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вх}}(i, i \geq 2) &= R_0 \sum_{k=1}^{i-1} \left(I_0 - \frac{I_{\min}}{U_{CTk}} U_{CTi} \right) + U_{CTi} = R_0 \sum_{k=1}^{i-1} \left(I_0 - \frac{I_{\min}}{(N-k)\Delta U_{CT} + U_{CT_{\min}}} U_{CTi} \right) + U_{CTi} = \\
 &= R_0 I_0 (i-1) - [(N-i)\Delta U_{CT} + U_{CT_{\min}}] \left[R_0 I_{\min} \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{1}{(N-k)\Delta U_{CT} + U_{CT_{\min}}} \right) - 1 \right].
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Характер залежності під час обрахунків за (11) у середовищі MATLAB для деяких значень параметрів лінії та стабілітронів відтворено на рис. 5, 6.

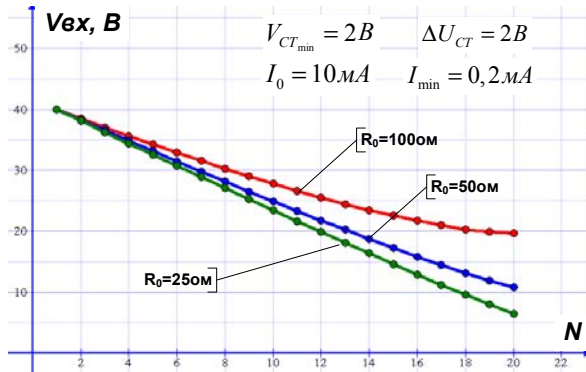


Рис. 5. Залежність вхідної напруги від номера ураженого сегменту із різними опорами за постійним струмом

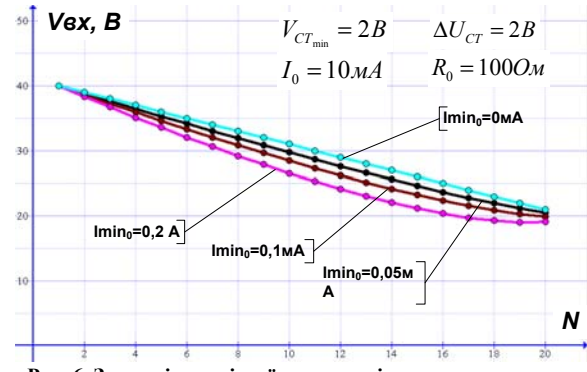


Рис. 6. Залежність вхідної напруги від номера ураженого сегменту з різними початковими струмами витікання стабілітронів

Висновки

1. Доведена можливість використання методу нелінійної реакції для одночасного контролю критичних ушкоджень лінії передачі (розрив та коротке замикання) простими засобами.

2. Запропоновано ряд моделей для контролю сегментованої лінії передачі за методом нелінійної реакції. Моделі побудовані на основі кусково-лінійної апроксимації ВАХ стабілітронів та вбирають в себе параметри сегментів лінії передачі, наведено аналітичні співвідношення. На основі дослідження моделей встановлені комплексні умови для параметрів використовуваних стабілітронів та ліній передачі.

3. Побудовано ряд графічних залежностей для умов використання типових ліній та стабілітронів, на основі їх аналізу встановлено, що зі збільшенням значення струму витікання стабілітронів у місці стику сегментів посилюється нелінійність характеру залежності вхідної напруги від номера ураженого сегменту, що призводить до зменшення розрізняльної спроможності щодо точного контролю критичних ушкоджень дальніх сегментів. Характер нелінійної залежності зі збільшення струмів витікання близький до експоненційного. Для компенсації зменшення чутливості для дальніх ділянок лінії можливо запропонувати розташування напруги стабілізації вздовж лінії як обернену до експоненційної залежності. В такому випадку різниця напруги стабілізації на початку лінії має бути меншою за різницю напруги наприкінці лінії.

Література

1. Груба И.И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения / И.И. Груба. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 220 с.
2. Мокренко П. В. Элементы і пристрої фізичної та електронної охорони об'єктів : конспект лекцій / П. В. Мокренко ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Фенікс, 2000. – 186 с.
3. Пивовар О.С. Метод нелінійної реакції у сегментованих кабельних лініях діагностичних та охоронних систем / О.С. Пивовар, Я.В. Вержбицький // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 4(275). – С. 154–157.
4. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи / И.Г. Бакланов. – М. : Изд-во «Эко-Трендз», 1999. – 278 с.

References

1. Gruba I.I. Sistemy ohrannoї signalizacii. Tehnicheskie sredstva obnaruzheniya / I.I. Gruba. – M. : SOLON-PRESS, 2012. – 220 s.
2. Mokrenko P. V. Elementy i prystroi fizychnoi ta elektronnoi okhorony ob'ektiv : konspekt lektcii / P. V. Mokrenko ; Nats. un-t «Lviv. politekhnika». – Lviv : Feniks, 2000. – 186 s.
3. Pyvovar O.S. Metod nelineinoї reaktcii u shmentovanykh kabelnykh liniyakh diahnostychnykh ta okhoronnykh system / O.S. Pyvovar, Ya.V. Verzhbitskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 4(275). – С. 154–157.
4. Baklanov I.G. Metody izmerenij v sistemah svyazi / I.G. Baklanov. – M. : Izd-vo «Eko-Trendz», 1999. – 278 s.

Рецензія/Peer review : 27.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О.І. Полікарівських