

ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ З АВТОМАТИЧНИМ УЗГОДЖЕННЯМ ОПОРУ НАВАНТАЖЕННЯ З ХВИЛЬОВИМ ОПОРОМ КАБЕЛЮ

Вступ

У вимірювальних системах, коли відбувається передача випробувальних сигналів (ВС) від джерела сигналу на вхід об'єктів, що досліджуються, задача відтворення форми ВС розв'язується безпосередньо на вході цих об'єктів з урахуванням впливу тракту передачі сигналу [1]. Задача має специфіку при передачі імпульсних ВС з фронтами нано- і субнаносекундного діапазону тривалості, коли кола передачі сигналів вже варто розглядати як кола з розподіленими параметрами [2, 3]. При цьому виникає проблема передачі ВС без спотворень, яка розв'язується шляхом застосування узгоджених за хвильовим опором широкосмугових високочастотних трактів. Наприклад, лінії передачі ВС виконуються у вигляді відрізків коаксіального кабелю [4]. При цьому виконується узгодження на обох кінцях кабелю.

Однак, в автоматизованих системах не завжди вдається забезпечити умови узгодження навантаження на кінцях кабелю з його хвильовим опором. Це відбувається при під'єднанні об'єктів із різним вхідним активним опором [5, 6, 7]. З іншого боку, узгодження опору на виході джерела ВС із опором кабелю призводить до втрати половини рівня сигналу на навантаженні [2]. Тому для забезпечення максимальної амплітуди вихідного сигналу джерела ВС навантажуються безпосередньо на хвильовий опір кабелю. При використанні ж джерела ВС з неузгодженим виходом виникають перевідбиття між джерелом і навантаженням, які призводять до істотних спотворень форми сигналу.

Таким чином, для забезпечення умов передачі ВС при максимальному рівні сигналу по коаксіальному кабелю без спотворень у вимірювальних системах, коли на іншому кінці кабелю відбувається під'єднання об'єктів із різним вхідним активним опором, особливо важливим є розв'язання задачі автоматичного узгодження опору навантаження з хвильовим опором кабелю.

Постановка задачі

Метою статті є викладення розробленого методу автоматичного узгодження опору на вході об'єктів досліджень із хвильовим опором кабелю, що дозволяє підвищити точність відтворення форми ступінчастих

випробувальних сигналів з фронтами наносекундного діапазону тривалості.

Теоретичні положення

Розглянемо характер спотворень форми ступінчастих ВС і визначимо умови, при яких може бути розв'язана задача автоматичного узгодження. Оцінка спотворень ВС за формою через перевідбиття (для сигналів із фронтами більше 0,5 нс і при довжині кабелю до 1 м) може бути отримана на основі аналізу перехідних процесів в однорідних лініях, що не мають втрат, із розподіленими параметрами з під'єднаними на кінцях зосередженими дискретними неоднорідностями [2, 3]. Спотвореннями форми ВС, що обумовлені неоднорідностями і втратами в самому кабелі, для сигналів із фронтами вже більшими 0,5 нс і при довжині кабелю до 0,5÷1 м – можна знехтувати [5, 6]. Так для ряду серійних коаксіальних кабелів, верхня гранична частота смуги пропускання яких для погоджених відрізків довжиною до 1 м складає не менше 6÷10 ГГц, час встановлення власної перехідної характеристики не перевищує 0,1 нс [5].

Як відомо, процес поширення сигналу в однорідних лініях без втрат описується системою “телеграфних рівнянь” у частинних похідних [2]. Розв'язуючи таку систему операторним методом з урахуванням граничних умов, можна отримати загальний вираз, що описує процес установаження сигналу на навантаженні

$$U_n(p) = \beta(p)U_c(p)[1 + K_2(p)] \cdot e^{-pT} \{1 + K_1(p)K_2(p)e^{-2pT} + K_1^2(p)K_2^2(p)e^{-4pT} + \dots\}, \quad (1)$$

де $U_n(p)$ – напруга на навантаженні; $U_c(p)$ – сигнал, що передається; $\beta(p) = Z_0/[Z_0 + Z_1(p)]$ – коефіцієнт передачі лінії з хвильовим опором Z_0 ; $K_1(p) = [Z_1(p) - Z_0]/[Z_0 + Z_1(p)]$, $K_2(p) = [Z_2(p) - Z_0]/[Z_0 + Z_2(p)]$ – коефіцієнти відбиття на початку і на кінці кабелю; $Z_1(p)$ – вихідний імпеданс джерела ВС; $Z_2(p)$ – імпеданс навантаження; $T = T_0 l$ – повна затримка сигналу у кабелі; T_0 – затримка, що зведена до одиниці довжини (погонна затримка); l – довжина кабелю. Так для радіочастотного коаксіального кабелю марки РК-50 із хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом погонна затримка складає $T_0 = 5$ нс/м [4].

Для оцінки характеру спотворень при малих реактивних складових імпеданс джерела ВС і навантаження зручно представити активним опором $Z_1(p) = R_1$, $Z_2(p) = R_2$. Відповідно, коефіцієнти відбиття будуть $K_1 = [R_1 - Z_0]/[Z_0 + R_1]$, $K_2 = [R_2 - Z_0]/[Z_0 + R_2]$. Схема кола передачі ВС, що відповідає зазначеному випадку, наведена на рис. 1, де джерело ВС – генератор напруги $U_c(p)$ з внутрішнім опором R_1 .

Розглянемо два суттєво відмінні режими передачі сигналу в лінії. Перший режим має місце у випадку, коли тривалість фронту ступінчастого ВС більше $2T_0l$. Перевідбиття від зовнішніх неоднорідностей накладаються на фронт сигналу, що передається. При цьому форма встановлення напруги на навантаженні визначається багаторазовим накладенням на фронт сигналу фронтів перевідбитих хвиль, які щоразу приходять з затримкою $2T_0l$.

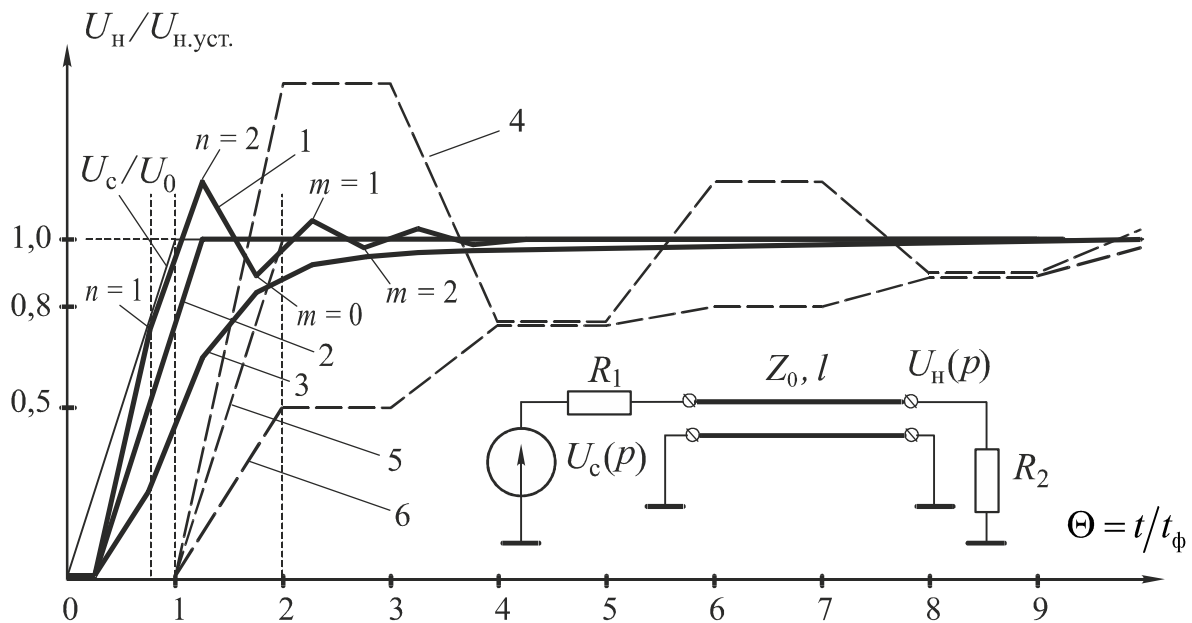


Рис. 1. Характер спотворень форми ступінчастого ВС у випадку, коли навантаження і вихідний імпеданс джерела сигналу активні

Аналітично це можна описати таким чином. Уявімо, що фронт ВС є лінійним з тривалістю t_ϕ . Тоді його модель в операторній формі [2] буде мати вигляд $U_c(p) = U_0 [1/p^2 t_\phi] \cdot (1 - e^{-t_\phi p})$, де U_0 – номінальне значення напруги на вершині ВС. Для випадку, коли кількість перевідбитків, що накладається на фронт (відношення $t_\phi / 2T_0l = n_0$) – ціле число, розв'язок (1) значно спроститься. Перехідна напруга на навантаженні без урахування множника e^{-Tp} , який характеризує затримку в кабелі, для дискретних моментів часу $\Theta'_n = qn$, $n=0,1,2,\dots$, де $q = 2T_0l / t_\phi$; $\Theta' = t' / t_\phi$ – відносний час на кінці кабелю без урахування затримки ($\Theta'_n = t'_n / t_\phi = (2T_0l / t_\phi)n = qn$), яке зв'язано з часом на початку кабелю $\Theta = t / t_\phi$ співвідношенням $\Theta = \Theta' + T_0l / t_\phi$, матиме вигляд

$$U_{\text{н}}(\Theta'_n) = \begin{cases} \frac{U_0\beta(1+K_2)}{(1-S)n_0} \cdot \left[n - \frac{S(1-S^n)}{1-S} \right], n = 0, 1, \dots, n_0; \\ \frac{U_0\beta(1+K_2)}{(1-S)n_0} \cdot \left[n_0 - \frac{S^{m+2}(1-S^{n_0})}{1-S} \right], n = n_0 + m + 1; m = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

де $S = K_1 \cdot K_2$; $\beta = Z_0 / [Z_0 + R_1]$. Параметр S враховує відбиття на обох кінцях кабелю. Стале значення напруги на навантаженні (при $m \rightarrow \infty$)

$$U_{\text{н,уст.}} = U_0\beta(1+K_2) \cdot \frac{1}{1-S} = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

На рис. 1 суцільною тонкою лінією представлений нормований за рівнем сигнал джерела ВС $\bar{U}_c(\Theta) = U_c(\Theta) / U_0$, що передається. Суцільними жирними лініями 1÷3 показана нормована за рівнем відносно сталого значення перехідна напруга на навантаженні $\bar{U}_{\text{н}}(\Theta) = U_{\text{н}}(\Theta) / U_{\text{н,уст.}}$, яка має зсув відносно сигналу $U_c(\Theta)$, при різному $S = K_1 \cdot K_2$ (відповідно для ліній 1, 2 і 3 значення S дорівнюють $-0,5; 0; 0,5$) та при співвідношенні $t_{\phi} = 4T_0 l$ ($n_0 = 2$). Так для відрізка кабелю марки РК-50 довжиною $l = 10$ см повна затримка $T = 0,5$ нс і при тривалості фронту ВС $t_{\phi} = 2$ нс отримуємо, що $n_0 = 2$. Таким чином, відбувається суттєве затягування (на час, що набагато перевищує t_{ϕ}) процесу встановлення напруги на навантаженні (лінія 1), а при $S > 0$ подовження наростаючої частини сигналу (лінія 3). Характер установа (лінії 1 і 3) залежить від знака $S = K_1 \cdot K_2$. Відносна відхилення напруги $\bar{U}_{\text{н}}(\Theta)$ за формою від моделі початкового ВС $\bar{U}_c(\Theta)$ (без урахування зсуву $\Theta = q/2$) має вигляд

$$\delta \bar{U}_{\text{н}}(\Theta'_n) = \begin{cases} S \cdot \frac{1-S^n}{n_0(1-S)}, n = 0, 1, \dots, n_0; \\ S^{m+2} \cdot \frac{1-S^{n_0}}{n_0(1-S)}, n = n_0 + m + 1; m = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

Максимальне значення оцінка (4) приймає при $\Theta'_n = 1$ і складе величину $\delta \bar{U}_{\text{н,макс}} = S \cdot (1-S^{n_0}) / n_0(1-S)$. Таким чином, при $t_{\phi} < 2T_0 l$ за формою перехідного процесу важко виділити інформацію про неузгодженість навантаження з хвильовим опором кабелю.

Другий режим передачі сигналу в лінії на рис. 1 виникає при $2T_0 l > t_\phi$. Тоді фронти сигналу і відбитих хвиль рознесені в часі відносно один одного. Відбиті хвилі своїм фронтом накладаються на вершину ВС. При цьому встановлення напруги відбувається у вигляді окремих сходинок. Тому при аналізі процесу встановлення щодо рівня сходинок можна не враховувати фронт сигналу, що передається, і представити ВС більш простою моделлю $U_c(p) = U_0 \cdot [1/p]$. Розв'язок (1) щодо рівня окремих сходинок без врахування зсуву буде мати вигляд:

$$U_n(\Theta'_n) = U_0 \beta (1 + K_2) \cdot \frac{1 - S^n}{1 - S} = U_{н,уст.} (1 - S^n), \quad (5)$$

де $\Theta'_n = n2T_0 l / t_\phi$, $n = 0, 1, 2, \dots$. На рис. 1 пунктирними лініями 4÷6 показана нормована відносно $U_{н,уст.}$ перехідна напруга на навантаженні $\bar{U}_n(\Theta)$, де $\Theta_n = \Theta'_n + T_0 l / t_\phi$, при $t_\phi = T_0 l$ (відрізок кабелю довжиною $l = 40$ см, при цьому $T = 2$ нс, фронт ВС $t_\phi = 2$ нс) і при різному $S = K_1 \cdot K_2$ ((відповідно для ліній 4, 5 і 6 значення S дорівнюють $-0,5; 0; 0,5$). Спотворення ступінчастого ВС за формою оцінюється виразом

$$\delta \bar{U}_n(\Theta'_n) = S^n. \quad (6)$$

Максимальне значення оцінка (6) приймає при $n=1$ і складає величину $\delta \bar{U}_{н,мах} = S$. Час установалення сигналу на навантаженні визначається переважно багаторазовими затримками відбитих хвиль в кабелі і при цьому практично не залежить від параметрів форми ВС. Так при довжині кабелю $l = 1$ м (затримка $T = 5$ нс) і при $S = 0,5$ (наприклад $K_1 = K_2 = 0,707$) час установалення постійного рівня вершини ступінчастого ВС з похибкою 10% дорівнює 33,2 нс.

Розглянемо розв'язок задачі автоматичного узгодження у вимірювальних системах, коли відбувається під'єднання об'єктів з різним вхідним активним опором. На рис. 2 наведена схема генератора ступінчастого ВС з автоматичним узгодженням опору на вході об'єктів досліджень із хвильовим опором кабелю.

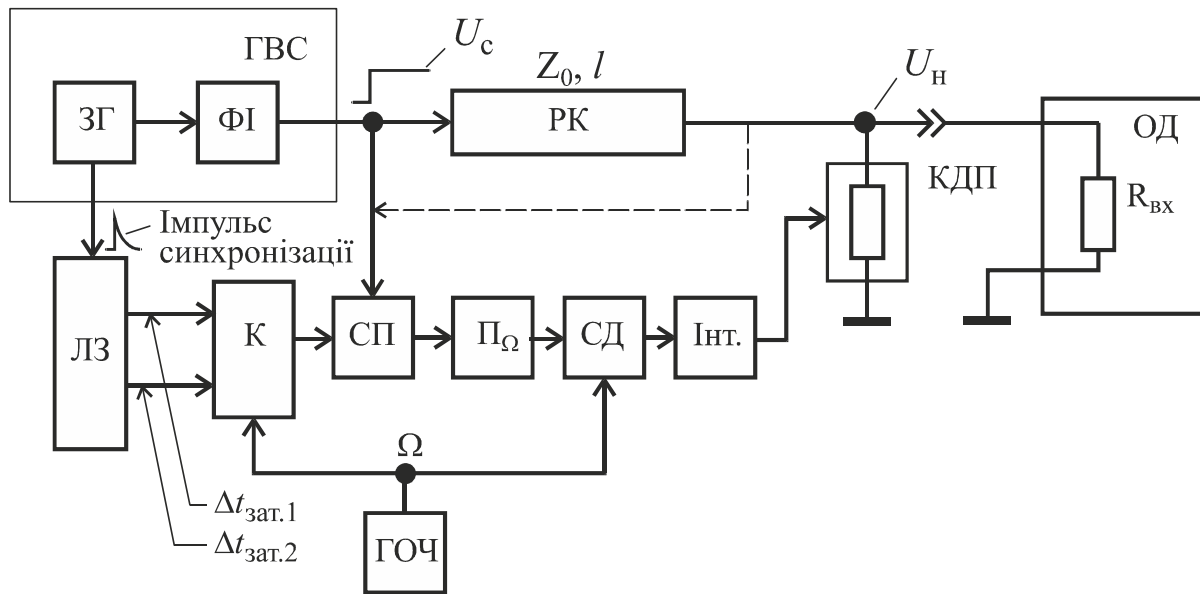


Рис. 2. Генератор ступінчастого ВС з автоматичним узгодженням опору на вході об'єктів досліджень з хвильовим опором кабелю

На схемі показані: ЗГ – задаючий генератор; ФІ – формувач імпульсів; РК – радіочастотний коаксіальний кабель; ЛЗ – лінія затримки; К – комутатор; СП – стробоскопічний перетворювач; P_{Ω} – вибіркового підсилювач; СД – синхронний детектор; Інт. – інтегратор, КДП – керований двополосник; ГОЧ – генератор низької опорної частоти; ОД – об'єкт досліджень. Задаючий генератор ЗГ визначає період проходження і тривалість імпульсів ВС. Формувач імпульсів ФІ, що має струмовий вихід, забезпечує відтворення параметрів форми ступінчастого ВС на низькоомному навантаженні. Вихід формувача синхроімпульсів, що входить до складу ЗГ, через лінію затримки ЛЗ і комутатор К є підключений до входу запуску генератора стробіруючих імпульсів СП. Змішувач СП є включений безпосередньо в тракт передачі сигналу на початку кабелю РК. Як вимірювальний блок використовується стробоскопічний перетворювач Я40-1700 (змінний блок до універсального осцилографу) зі смугою пропускання 3,5 ГГц [8].

На рис. 3 наведені часові діаграми, що пояснюють принцип автоматичного узгодження. Так на рис. 3,а наведена модель передачі ВС, де джерело ступінчастого ВС представлено джерелом струму $I_c(p) = I_0 \cdot [1/p^2 t_{\phi}] \cdot (1 - e^{-t_{\phi} p})$. Вихідний активний опір джерела ВС $R_1 \rightarrow \infty$. При цьому коефіцієнт відбиття на початку лінії $K_1 \cong 1$ (без врахування C_1).

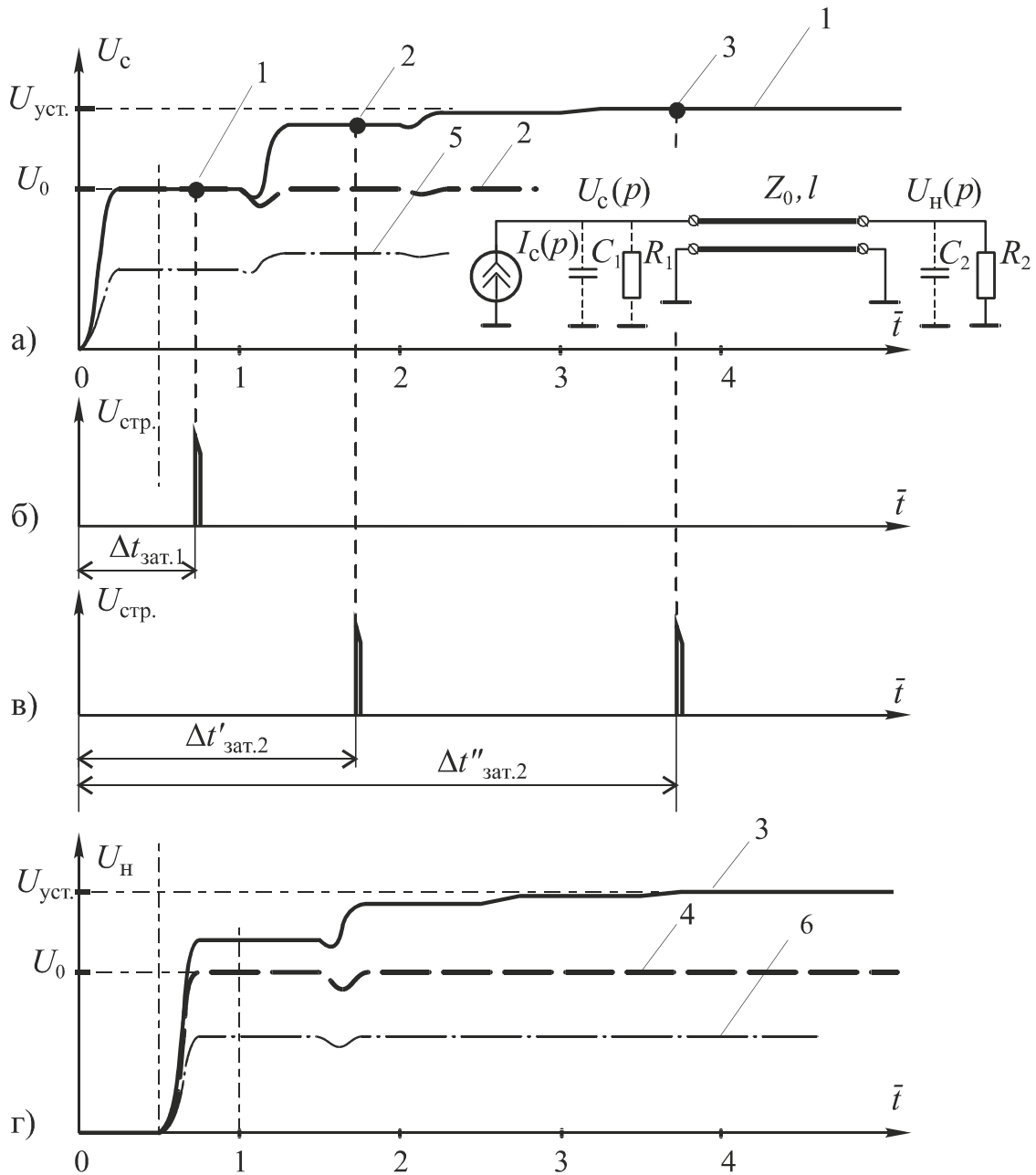


Рис. 3. Часові діаграми, що пояснюють принцип автоматичного узгодження опору на вході об'єктів досліджень з хвильовим опором кабелю по відбитому сигналу при $2T_0 l/t_\phi = 4$, $\bar{t} = t/2T_0 l$

При $2T_0 l > t_\phi$ перехідна напруга $U_H(t_n)$ на кінці кабелю у випадку неузгодженості навантаження за резистивною складовою ($R_2 \neq Z_0$, де $R_2 = R_{\text{кдп}} \parallel R_{\text{вх.ок}}$) для рівня окремих сходинок у моменти часу $t_n = (2n + 1)T_0 l$, буде визначатися виразом

$$U_H(t_n) = Z_0 I_0 (1 + K_2) \cdot \frac{1 - S^n}{1 - S} = U_{\text{н,уст.}} (1 - S^n); \quad S \cong K_2 \quad (7)$$

де $U_0 = Z_0 I_0$ – номінальне значення напруги ВС;
 $U_{н,уст.} = Z_0 I_0 (1 + K_2) / (1 - S) = R_2 I_0$ – сталі значення напруги на навантаженні (при $n \rightarrow \infty$). Так на рис. 3,а показана напруга $U_c(\bar{t})$ на початку кабелю при $2T_0 l / t_\Phi = 4$: суцільною лінією 1 – при неузгодженості опору навантаження з хвильовим опором кабелю, наприклад $R_2 = 1,5 Z_0$ (тобто $K_2 = 0,2$; $R_2 = 75$ Ом); пунктирною лінією 2 – коли навантаження погоджене з хвильовим опором ($R_2 = Z_0$) і відбитки через неузгодженість за резистивною складовою відсутні. На рис. 3,б представлена напруга $U_n(\bar{t})$ на навантаженні: суцільною лінією 3 при неузгодженості навантаження ($R_2 = 1,5 Z_0$); штриховою лінією 4 – за умови узгодження $R_2 = Z_0$. Так для ВС у вигляді одиничної ступінчастої функції, що має фронт $1 \div 2$ нс і час встановлення вершини $5 \div 7,5$ нс, зазначені параметри приблизно зберігаються в узгодженому режимі. При неузгодженості за резистивною складовою ($R_2 = 1,5 Z_0$) і при довжині кабелю 1 м (затримка 5 нс) час встановлення вершини ВС з похибкою 1 % через відбиття складе вже 30 нс, що робить зазначений ВС непридатним до проведення вимірювань [7, 8].

Для порівняння на рис. 3,а і рис. 3,б штрих-пунктирними лініями показаний сигнал на початку кабелю (лінія 5) і на навантаженні (лінія 6) у випадку, коли вихід джерела ВС є узгодженим з кабелем. У моделі кола на рис. 3,а режим узгодження відображено штрихами у вигляді підключення паралельно до джерела струму резистора, опір якого $R_1 = Z_0$. Однак на практиці повного узгодження отримати не вдається. Але навіть таке узгодження приводить до втрати половини рівня сигналу на навантаженні [9].

Ступінчастий характер, який набуває напруга при $2T_0 l > t_\Phi$ через відбиття, дозволяє відносно легко виділити сигнал, що несе інформацію про неузгодженість на кінці кабелю за резистивною складовою. Цю інформацію можна отримати на початку кабелю по відбитому від навантаження сигналу.

Оцінимо вплив реактивних складових вихідного опору джерела ВС і навантаження на можливість виділення інформації про неузгодженість опору на кінці кабелю за резистивною складовою. На рис. 3,а реактивні складові представлені, як дискретні ємності C_1 і C_2 (порядку $3 \div 5$ пФ) відповідно на початку і на кінці кабелю. Так при $C_1 = 5$ пФ стала часу кола на початку лінії передачі $\tau_1 = 0,25$ нс, де $\tau_1 \cong Z_0 C_1$ (при $R_1 \rightarrow \infty$). При цьому для фронту імпульсу струму джерела ВС реально виконується нерівність $(t_\Phi / \tau_1) > 3 \div 4$. Тоді для часу встановлення постійного рівня напруги падаючої хвилі $U_0 = Z_0 I_0$ з відносною похибкою $\xi_{уст.} = \Delta U / U_0$ при

лінійному фронту імпульсу струму $I_c(p)$ джерела ВС з тривалістю t_ϕ можна записати $t_{\text{уст.}/\xi} \cong t_\phi + \tau_1 |\ln(t_\phi \xi_{\text{уст.}}/\tau_1)|$. Відповідно до цього виразу, при $t_\phi = 1$ нс, $\tau_1 = 0,25$ нс і $\xi_{\text{уст.}} = 1\%$ час установлення складає $t_{\text{уст.}} \cong 1,8$ нс. При цьому не змінюється істотно фронт сигналу на початку кабелю.

Оцінимо вплив ємнісної складової C_2 на кінці кабелю. Для цього розглянемо схему за умови, що єдиним джерелом відбиттів є конденсатор C_2 (лінія передачі погоджена з опором навантаження за резистивною складовою, тобто $R_2 = Z_0$). Представимо фронт падаючої хвилі лінійним, тривалість якого t'_ϕ відповідає повному часу зростання з похибкою $\xi_{\text{уст.}} = 1\%$ від сталого значення $U_0 = Z_0 I_0$. Тоді форма відбитого від навантаження імпульсу, що визначена відносно U_0 , буде мати вираз

$$\delta U_{\text{відб.}}(t) = \begin{cases} -\frac{\tau_2}{t'_\phi} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}), & 0 \leq t \leq t'_\phi; \\ -\frac{\tau_2}{t'_\phi} \cdot (1 - e^{-\frac{t'_\phi}{\tau_2}}) \cdot e^{-\frac{(t-t'_\phi)}{\tau_2}}, & t'_\phi \leq t \leq \infty, \end{cases} \quad (8)$$

де $\tau_2 \cong 0,5 Z_0 C_2$. При $(t'_\phi/\tau_2) > 3 \div 4$ тривалість відбитого імпульсу $t_{\text{відб.}} \cong t'_\phi + \tau_2 |\ln(t'_\phi \xi_{\text{в.уст.}}/\tau_2)|$. Так при $C_2 = 5$ пФ; $\tau_2 = 0,125$ нс; $t'_\phi = 1,8$ нс і при $\xi_{\text{в.уст.}} = 1\%$ тривалість складе $t_{\text{відб.}} \cong 2$ нс. Відносна амплітуда відбитого імпульсу, яка рівна коефіцієнту відбиття, при лінійному фронті падаючої хвилі, виходячи з (8), буде приблизно $\delta U_{\text{відб./max}} \cong -\tau_2/t'_\phi$. Так при зазначених вище параметрах ($C_2 = 5$ пФ; $\tau_2 = 0,125$ нс; $t'_\phi = 1,8$ нс) відносна амплітуда складе $\delta U_{\text{відб./max}} \cong 7\%$. Відбита від C_2 хвиля накладається на вершину сигналу, що передається, приходить до початку кабелю і відбувається нове перевідбиття. На рис. 3 представлений випадок, коли $l = 40$ см, $2T_0 l = 4$ нс.

Таким чином, якщо фронт падаючої хвилі $t'_\phi < 2T_0 l$ і виконується умова, що тривалість відбитої хвилі $t_{\text{відб.}} < 2T_0 l$ (для передачі використовується відрізок кабелю більше 20 см, при цьому подвійна затримка більш 2 нс), то ступінчастий характер встановлення напруги через відбиття зберігається. При цьому вплив C_1 і C_2 на можливість виділення інформації про неузгодженість кабелю можна виключити. Перевідбиття між генератором, роз'ємними з'єднаннями і діодами

змішувача СП при тривалості фронту порядку $t_{\phi} \cong 1 \div 2$ нс мають малу величину [8], діючи на ділянці фронту сигналу, що передається, при цьому затягується його встановлення, що, у свою чергу, враховується у відповідних затримках, що вводяться для зчитування сигналу, відбитого від навантаження.

Пристрій на рис. 2 функціонує таким чином. При під'єднанні об'єкту досліджень на кінці кабелю автоматично відбувається настройка загального опору навантаження рівним хвильовому опору кабелю. Виділення інформації про неузгодженість кабелю з навантаженням відбувається по відбитому сигналу і здійснюється шляхом періодичного порівняння значень напруги, що формується на початку кабелю, в точках 1 і 2 (рис. 3,а) відповідно в моменти часу до приходу першої відбитої від навантаження хвилі і після її приходу. Порівняння може здійснюватися з напругою в точці 3, яка відповідає встановленню вершини ВС. Для цього синхроімпульси із задаючого генератора ЗГ через лінію затримки ЛЗ і комутатор К подаються на вхід запуску генератора стробіруючих імпульсів СП. Таким чином, відбувається задання фіксованих затримок стробіруючих імпульсів (рис. 3,б і рис. 3,в) щодо переднього фронту ВС $U_c(\bar{t})$ на початку кабелю РК і відповідно моментів зчитування миттєвих значень сигналу в змішувачі СП. Частота Ω , з якої відбувається переключення затримок, вибирається набагато меншою за частоту генерації імпульсів ВС. При цьому в кожний напівперіод частоти Ω у змішувачі СП відбувається багаторазове зчитування значень сигналу $U_c(\bar{t})$ в тих самих точках з наступним їх усередненням. Стробоскопічний перетворювач працює у режимі "накопичування". Затримки вибираються такими, що зчитування відбувається на ділянках установаження постійних рівнів сигналу, що передається, і відбитої хвилі. Так, наприклад, якщо довжина кабелю $l=40$ см (подвоєна затримка в кабелі 4 нс), то при C_1 і C_2 порядку 5 пФ, затримки відліків повинні складати $\Delta t_{\text{зат.1}} \cong 2 \div 3$ нс і $\Delta t'_{\text{зат.2}} \cong 6 \div 7$ нс (або $\Delta t''_{\text{зат.2}} \geq 30 \div 40$ нс). При цьому на аналоговому виході СП формується сигнал, змінна складова якого має частоту Ω . Амплітуда її несе інформацію про неузгодженість на кінці кабелю за резистивною складовою навантаження. Змінна складова вихідного сигналу СП виділяється вибіркоким підсилювачем Π_{Ω} і потім випрямляється за допомогою синхронного детектора СД. Вихідний сигнал СД через інтегратор Інт впливає на керований двополюсник КДП, що під'єднаний на кінці кабелю паралельно вхідному опору ОД (при $R_{\text{вх}} > Z_0$) і служить для узгодження. Система настроєна таким чином, що зміна опору КДП приводить до зменшення рівня відбитої хвилі. Після узгодження система буде підтримувати загальний опір навантаження, рівним хвильовому. При кожному новому під'єднанні ОД система буде автоматично настроювати

опір на кінці кабелю, тим самим підвищуючи точність відтворення форми ступінчастого ВС.

Роздільна здатність оцінки відхилення опору навантаження від хвильового по відбитому сигналу обмежена рівнем власних шумів СП, що складає $2 \div 5$ мВ. У режимі “накопичування” роздільна здатність на порядок вище. Це дозволяє при амплітуді ВС в 1В установити відхилення активного опору навантаження від хвильового з похибкою меншою, ніж $0,2 \div 0,5$ Ом.

Висновки

Основним фактором, що обумовлює ступінчастий характер спотворень, є відбиття від зовнішніх дискретних неоднорідностей, що мають місце при неузгодженості навантаження за резистивною складовою і виникають при під'єднанні об'єктів з різним вхідним опором. Розроблена схема джерела ступінчастих випробувальних сигналів із автоматичним узгодженням опору навантаження з хвильовим опором кабелю по відбитому сигналу дозволяє суттєво зменшити похибку відтворення форми ступінчастих випробувальних сигналів із фронтами наносекундного діапазону тривалості. Метод автоматичного узгодження доцільно розвинути для підвищення точності відтворення форми сигналів, що мають fronti з тривалістю пікосекундного діапазону.

Список використаної літератури

1. *Системы* автоматизированного контроля радиоэлектронной аппаратуры / Е. Т. Володарский, В. И. Губарь, Л. Л. Никифоров та ін. – К.: Техніка, 1983. – 151 с.
2. *Зернов Н.В., Карпов В.Г.* Теория радиотехнических цепей. – М.: “Энергия”, 1972. – 816 с.
3. *Чурин Ю.А.* Переходные процессы в линиях связи быстродействующих схем ЭВМ. – М.: Сов радио, 1975. – 362 с.
4. *Справочник* по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М., «Энергия», 1977. – 576 с.
5. *Глебович Г.В.* Искажения наносекундных импульсов при прохождении по коаксиальному кабелю. – “Радиотехника”, 1963, т. 18, № 10. – С. 54-62.
6. *Глебович Г.В., Ковалев И.П.* Широкополосные линии передачи импульсных сигналов. – М.: Сов радио, 1973. – 223 с.
7. *Андрянов А.В., Захтаренко В.С., Чепурнов А.В.* Методы автоматизированных измерений параметров цепей и трактов во временной области //Техника средств связи. Серия РИТ. – 1983. – Вып. 1. – С. 1-13 //Вып. 2. – С. 1-32.

8. *Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов* / Глебович Г.И., Андриянов А.В., Введенский Ю.В. и др. – М.; Радио и связь, 1984. – 256 с.
9. *Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 816 с.