УДК 621.317

Ю. С. Шумков, М. В. Добролюбова

МІНІМІЗАЦІЯ ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ АНАЛОГОВИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Вступ

Похибка відтворення ступінчастого випробувального сигналу (ВС) за допомогою технічних засобів зумовлена відхиленням його моделі за формою від ідеального характеристичного сигналу, та відхиленням реально сформованого ВС від відомій його моделі [1]. При цьому визначальною похибкою знаходження прямим методом перехідних характеристик (ПХ) лінійних аналогових пристроїв у наносекундному діапазоні тривалості (з фронтами порядку 0,1-10 нс) є похибка, обумовлена неідеальністю моделі реального ВС. Зазначена похибка може бути мінімізована на основі врахування моделі реального ВС. При цьому пропонується оцінку моделі ВС здійснювати по "точковим" параметрам, що характеризують неідеальність форми ступінчастого ВС, які можна експериментально оцінити та за якими можна легко корегувати форму ВС.

У відомих працях [1, 2, 3] наведені розрахункові співвідношення для оцінок похибки визначення прямим методом ПХ в залежності від параметрів апроксимації неідеальності за формою реальних ступінчастих ВС, створюваних за допомогою технічних засобів. Однак, оцінки отримано для апроксимацій, які не враховують характер спотворень при формуванні ВС із фронтами в наносекундному діапазоні, коли неідеальність приймає вигляд викідів та осциляцій на вершині ВС. Крім того, наведена методика не встановлює зв'язку між оцінками похибки визначення ПХ, які задані в аналітичному вигляді (похибки визначення коефіцієнтів моделі ПХ), та частковими параметрами ПХ, які характеризують спотворення ВС, та які можна визначить експериментально – так званими "точковими" оцінками спотворень, тобто параметрами форми, які визначені за методом обраних точок [4, 5]). Вказані оцінки використовуються для характеристики неідеальності форми вихідних сигналів генераторів імпульсів [4] .

Таким чином, при реалізації автоматизованого контролю особливо важливим є розв'язання задачі мінімізації похибки із-за неідеальності за формою реальних ВС, що дозволяє проводить вимірювання перехідних характеристик шляхом їх прямий оцінки по відгуку, тим самим спростити процедуру контролю.

Постановка задачі

Метою статті є викладення розробленого методу мінімізації похибки експериментального визначення перехідних характеристик лінійних аналогових пристроїв із зосередженими параметрами у наносекундному діапазоні тривалості, що дозволяє проводить вимірювання шляхом їх прямий оцінки по відгуку та спростити процедуру контролю.

Теоретичні положення

Реальні ступінчасті ВС можуть бути представлені моделлю

$$S_{\text{p}}(t) = 1(t) + \Delta S(t), \quad t \geq 0, \tag{1}$$

де $\Delta S(t),\ t \geq 0$ – похибка відтворення ВС. Ступінчасті ВС при їхньому формуванні з фронтами в наносекундному діапазоні характеризуються тим, що мають кінцевий по тривалості фронт, викид, відкол і осциляції на вершині. Можливі наступні типові апроксимації неідеальності форми ВС:

$$\Delta S_1(t) = -(K+1)\cdot\exp(-\beta_1 t) + K\cdot\exp(-\beta_2 t)\,;$$

$$\Delta S_2(t) = -\exp(-\gamma t)\cdot\cos\lambda t\,;$$

$$\Delta S_3(t) = -\frac{1}{\cos\psi}\cdot\exp(-\gamma t)\cdot\cos(\lambda t+\psi)\,;$$

$$\Delta S_4(t) = -\frac{1}{\cos\psi}\cdot\exp(-\gamma t)\cdot\cos(\lambda t+\psi) + \exp(-\beta t)\,,$$

де $K, \beta_1, \beta_2, \psi, \gamma, \lambda$ – параметри аналітичної моделі.

Однак, на практиці зручно оперувати з параметрами, що описують відмінність форми реального ступінчастого ВС від ідеального характеристичного, що являє собою одиничну ступінчасту функцію $1(t)$, визначеними за методом "обраних точок" [4, 5]. Такими параметрами можуть бути, наприклад σ_m, t_m - координати точки максимуму викиду на вершині реального ВС; $t_{\text{p.s.}}$ – час становлення перехідного процесу на вершині ВС з похибкою $\Delta_{\text{p.s.}}$. При цьому вигляд моделі $\Delta S_i(t)$, що описує неідеальність ВС (характер перехідного процесу становлення ВС), а також "точкові" параметри σ_m, t_m, $t_{\text{p.s.}}$ і $\Delta_{\text{p.s.}}$ легко експериментально оцінити.

Розглянемо найбільш характерні моделі неідеальності ВС $\Delta S_1(t)$ і $\Delta S_3(t)$. На рис. 1 наведена форма реального ВС $S_{\text{p}}(\tau)$ і приклад реального відгуку $h_{\text{p}}(\tau)$, що відтворює ПХ $h_{\text{x}}(\tau)$, яку треба визначити, де $\tau = t/T_0$ – відносний час. На рис. 1,*а* – для моделі $\Delta S_1(t)$; на рис. 1,*б* – для моделі $\Delta S_3(t)$, де штрихова крива 1 – ПХ $h_{\text{x}}(\tau)$ при ідеальному ВС; суцільна крива 2 – відгук $h_{\text{р}}(\tau)$ при реальному ВС; суцільна крива 3 – відгук $h_{\text{р}}(\tau)$ при деякому оптимальному співвідношенні "точкових" параметрів $\{\sigma_{m0}, \tau_{m0}\}$ реального ВС.

Похибка $\Delta h_{\text{р}}(t)$ знаходження ПХ, що обумовлена неідеальністю ВС, при відомій номінальній ПХ $h_{\text{х}}(t) = h_{\text{х}0}(t)$ оцінюється виразом [1, 2]

$$\Delta h_{\text{р}}(t) = \int_0^t h'_{\text{х}0}(t)\,\Delta S_{\text{р}}(t-\tau)\,d\tau .$$

Розглянемо методику оцінки похибки визначення параметрів (коефіцієнтів) аналітичної моделі ПХ через неідеальність форми ВС.

Як відомо, визначення параметрів аналітичної моделі ПХ по відгуку при наявності випадкових похибок вимірювання відгуку, а також при неповній інформації про реальну модель ПХ (коректний розв'язок [6]) є апроксимаційною задачею [5]. Отриманий експериментально відгук $Y_{\text{х}}(t)$ апроксимується моделлю ПХ $H_{\text{м}}(\boldsymbol{a}_0, t)$, що настроюється за параметрами, коефіцієнти якої знаходять шляхом мінімізації квадратичного функціонала, який запишемо у вигляді норми похибки в метриці L_2:

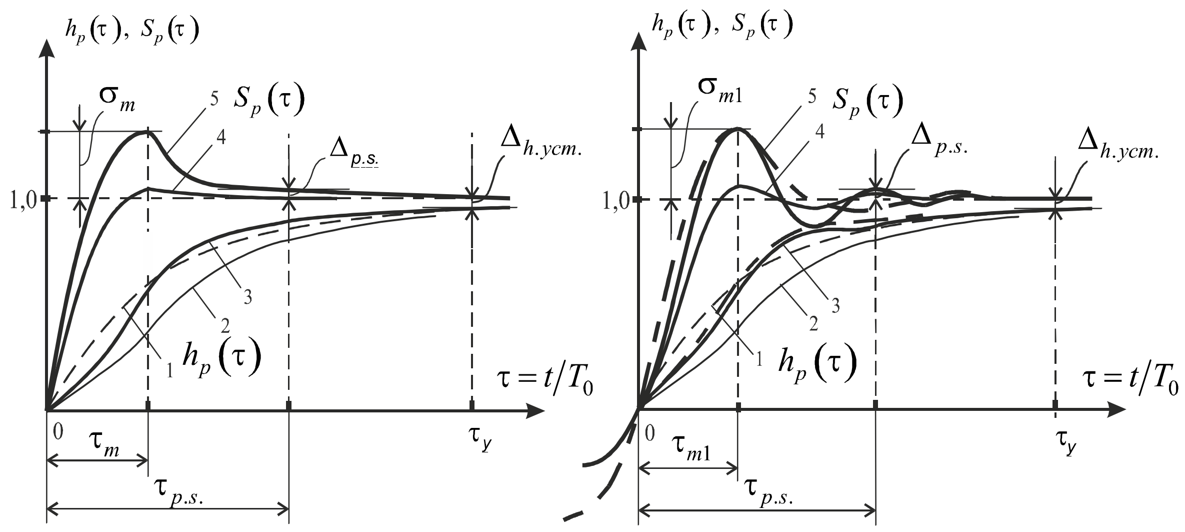


Рис. 1. Взаємна компенсація складових похибки визначення ПХ

$$\left\| Y_{\text{х}}(t) / y_{уст.} - H_{\text{м}}(\boldsymbol{a}_0, t) \right\|_{L_2}^{\Theta_{\text{н}}} \to \min, \tag{2}$$

де $\Theta_{t\text{н}}$ – верхня границя інтервалу вимірювання відгуку. При цьому вважатимемо, що вхідний ВС близький за формою до моделі ідеального, а також $Y_{\text{х}}(t)/y_{уст.} \cong h_{\text{х}0}(\boldsymbol{a}_{\text{х}}, t)$, де $\boldsymbol{a}_{\text{х}} = \{a_{\text{х}1}, a_{\text{х}2}, ..., a_{\text{х}n}\}$ – n-мірний вектор шуканих параметрів. У процесі мінімізації (2) одержують оцінки параметрів моделі $\boldsymbol{a}_0^* = \left\{a_{01}^*, a_{02}^*, ..., a_{0n}^*\right\}$, що приймають рівними $\boldsymbol{a}_0^* \cong \boldsymbol{a}_\text{х}$, які треба визначити для прийнятої структури ПХ.

Однак, внаслідок неідеальності ВС за формою похибка $\Delta h_\text{р}(t)$ відтворення функції $h_\text{х}(t)$ у вигляді відгуку призводить до зміщення оцінок $\boldsymbol{a}_0^*$ при мінімізації (2) по відношенню до оцінок параметрів $\boldsymbol{a}_\text{х}$, що мають місце при ідеальному ВС

$$a_{\text{х}j}^{/} = a_{\text{х}0j} + \Delta a_{\text{х}j}; \quad \delta a_{\text{х}j} = \frac{\Delta a_{\text{х}j}}{a_{\text{х}0j}}; \; j = \overline{1,n},$$

де $\Delta a_{\text{х}j}; \delta a_{\text{х}j}$ – відповідно абсолютна та відносна похибки визначення параметрів.

Одержимо оцінки похибки визначення параметрів ПХ, що обумовлені неідеальністю ВС. Так функціонал (2) можна подати у вигляді

$$\left\| h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, \boldsymbol{q}, t\right) - H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0 + \Delta\boldsymbol{a}, t\right) \right\|_{L_2}^{\Theta_\text{н}} \to \min,$$

где $h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_X, \boldsymbol{q}, t\right)$ – відгук при реальному ВС; $\boldsymbol{q}$ - вектор параметрів моделі (апроксимації) спотворень реального ВС за формою. Враховуючи те, що

$$H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0 + \Delta\boldsymbol{a}, t\right) = H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, t\right) + \Delta H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, \Delta\boldsymbol{a}, t\right);$$

$$h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, \boldsymbol{q}, t\right) = h_{\text{х}0}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, t\right) + \Delta h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, \boldsymbol{q}, t\right),$$

де $h_{\text{х}0}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, t\right)$ – відгук при ідеальному ВС, а також те, що функції $H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, t\right) \cong h_{\text{х}0}\left(\boldsymbol{a}_\text{х}, t\right)$ при значеннях параметрів $\boldsymbol{a}_\text{х} = \boldsymbol{a}_0$ рівні або дають мінімум для функціонала (2), то для приросту функції в межах точки $\boldsymbol{a}_\text{х} = \boldsymbol{a}_0$ можна записати

$$\left\| \Delta h_p\left(\boldsymbol{a}_0, \boldsymbol{q}, t\right) - \Delta H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, \Delta\boldsymbol{a}, t\right) \right\|_{L_2}^{\Theta_\text{н}} \to \min,$$

де $\Delta h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_0, \boldsymbol{q}, t\right)$ - складова відгуку, що обумовлена неідеальністю ВС при номінальних значеннях шуканих параметрів $\boldsymbol{a}_\text{Х} = \boldsymbol{a}_0$. Отже, похибка $\Delta h_\text{р}\left(\boldsymbol{a}_0, \boldsymbol{q}, t\right)$ компенсується приростом моделі $\Delta H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, \Delta\boldsymbol{a}, t\right)$.

Здійснімо лінеаризацію відносно приросту для оцінок параметрів ДХ. Функцію $\Delta H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0, \Delta\boldsymbol{a}, t\right)$ можна надати інакше, якщо розкласти $\Delta H_\text{м}\left(\boldsymbol{a}_0 + \Delta\boldsymbol{a}, t\right)$ в ряд Тейлора в межах точки $\boldsymbol{a}_0$. Обмежуючись двома членами ряду, одержимо лінеаризований відносно оцінок похибки $\delta a_{Xj} = \Delta a_j / a_{0j}$, $j = \overline{1, n}$ функціонал

$$\left\| \sum_{j=1}^{n} \Psi_j\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) \cdot \delta a_{Xj} - \Delta h_P\left(\boldsymbol{m}_0, \chi, \tau\right) \right\|_{L_2}^{\Theta_{н}} \to \min,$$

де для зручності параметри надані у відносному вигляді: $\Psi_j\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) = \left[dH_{м}\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) / da_j\right] \cdot a_{0j},\ j = \overline{0, n}$ – функції чутливості 1-го порядку для наданої моделі відгуку на ідеальний ВС до відносного приросту j-го параметра в межах точки $\boldsymbol{a}_{х} = \boldsymbol{a}_0$, где $\boldsymbol{a}_0$ – n-мірний вектор значений номінальних параметрів (коефіцієнтів) моделі ПХ; $\Delta h_{р}\left(\boldsymbol{m}_0, \chi, \tau\right)$ – похибка відтворення ПХ в вигляді відгуку; $\boldsymbol{m}_0$ – вектор відносних параметрів шуканої ПХ; χ – вектор відносних параметрів моделі реального ВС; $\tau = t/T$ – відносний час. Функції $\Psi_{j}\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right)$, $\Delta h_{р}\left(\boldsymbol{m}_0, \chi, \tau\right)$, які використовуються при розрахунках, можуть легко заздалегідь одержані для різних моделей типових динамічних ланок та моделей $\Delta S_i\left(t\right),\ i = \overline{1, n}$, що описують неідеальність ВС у наносекундному діапазоні. Інтервал $\Theta_{\tau н}$ визначається моментом часу, починаючи з котрого наведені функції відрізняються від свого усталеного значення на величину, яка не більше похибки визначення коефіцієнта передачі досліджуваного пристрою у статиці.

Мінімум функціонала визначається розв’язком наступної системи лінійних рівнянь відносно шуканих оцінок похибки $\delta a_{х j},\ j = \overline{1, n}$:

$$\sum_{j=1}^{n} \left[\int_0^{\Theta_{\tau H}} \Psi_j\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) \Psi_i\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) d\tau \right] \delta a_{xj} - \int_0^{\Theta_{\tau H}} \Psi_i\left(\boldsymbol{a}_0, \tau\right) \Delta h_p\left(\boldsymbol{m}, \chi, \tau\right) d\tau = 0,$$
$$i = \overline{1, n}. \tag{3}$$

Розглянемо докладніше оцінку похибки на прикладі визначення сталої часу T_X динамічної ланки 1-го порядку. Модель динамічної ланки:

$$W(p) = \frac{1}{T_{х0}\, p + 1}.$$

Функція чутливості:

$$\Psi_{T}\left(T_{х0}, \tau\right) = -\tau \cdot e^{-\tau}.$$

Похибка знаходження ПХ $\Delta h_p\left(\boldsymbol{m}, \chi, \tau\right)$ для моделі $\Delta S_1(t)$:

$$\Delta h_p\left(K, \chi_{10}, \chi_{20}, \tau\right) = \frac{1 - \left(K + 1\right)\chi_{20} + K\chi_{10}}{\left(\chi_{10} - 1\right)\left(\chi_{20} - 1\right)} e^{-\tau} + \frac{K + 1}{\chi_{10} - 1} e^{-\chi_{10}\tau} - \frac{K}{\chi_{20} - 1} e^{-\chi_{20}\tau}, \tag{4}$$

де $\tau = \frac{t}{T_{X0}}$; $\chi_{10} = \beta_1 T_{X0}$; $\chi_{20} = \beta_2 T_{X0}$; $K > 1$; $\beta_1 > \beta_2 > \frac{1}{T_{X0}}$.

Похибка знаходження ПХ $\Delta h_p(\boldsymbol{m}, \chi, \tau)$ для моделі $\Delta S_3(t)$:

$$\Delta h_p(\psi, \chi_{10}, \chi_{20}, \tau) = \frac{1}{(\chi_{10} - 1)^2 + \chi_{20}{}^2} \Big\{ (\chi_{10} - \chi_{20} tg\psi - 1) e^{-\tau} -$$

$$- \frac{e^{-\chi_{10}\tau}}{\cos\psi} \Big[(1 - \chi_{10}) \cos(\chi_{20}\tau + \psi) + (1 - \chi_{10}) \cos(\chi_{20}\tau + \psi) + \Big] \Big\},$$

$$+ \chi_{20} \sin(\chi_{20}\tau + \psi) \Big] \Big\}, \tag{5}$$

де $\tau = \frac{t}{T_{X0}}$; $\chi_{10} = \gamma T_{X0}$; $\chi_{20} = \lambda T_{X0}$; $\chi_{10} > 1$; $\chi_{20} > 1$.

Похибка знаходження одного параметра T_{x}, як випливає з системи (3), оцінюється виразом

$$\delta T_{\text{x}} = \frac{\int_0^{\Theta_{\text{тн}}} \Psi_{\text{T}}(T_0, \tau) \Delta h_{\text{p}}(\boldsymbol{m}, \chi, \tau) d\tau}{\int_0^{\Theta_{\text{тн}}} \Psi_{\text{T}}^2(T_0, \tau) d\tau}. \tag{6}$$

При апроксимації неідеальності ВС моделлю $\Delta S_1(t)$ система для визначення параметрів $\{K, \beta_1, \beta_2\}$ аналітичної моделі за заданими "точковими" оцінками спотворень $\{\sigma_m, t_m, t_{\text{p.s.}}\}$ може бути розв'язана чисельно, використовуючи спільно метод мінімізації квадратичного функціонала і метод Ньютона. Однак, при визначенні параметрів $\{K, \beta_1, \beta_2\}$ за довільно обраними "точковим" оцінкам $\{\sigma_m, t_m, t_{\text{p.s.}}, \Delta_{\text{p.s.}}\}$ виникає проблема існування розв'язку системи. Система може бути несумісною, тобто прийнята модель $\Delta S_{p,i}(t)$ при довільно заданих "точковим" оцінках фізично не реалізована, або система може бути погано зумовленою [7, 8]. Крім того, при розв'язку системи завжди існує проблема збіжності розв'язку в залежності від вибору початкового наближення. У зв'язку з цим був використаний опосередкований алгоритм обчислення параметрів.

Для безлічі припустимих значень параметрів моделі $\{K, \beta_1, \beta_2\}$ одержуємо розрахунковим шляхом відповідну йому множину можливих значень "точкових" параметрів $\{\sigma_m, t_m, t_{\text{p.s.}}, \Delta_{\text{p.s.}}\}$, з яких відбираються лише ті, котрі відповідають заданим, за умови, що $t_{\text{p.s.}} = const$ і $\Delta_{\text{p.s.}} \le \Delta_{\text{доп.}} = \Delta_{h,уст.}$. Таким чином, одержуємо відповідність між зазначеними системами параметрів для фізично реалізованої моделі, що описує спотворення ВС. Для одержаних оцінок $\{K, \beta_1, \beta_2\}$ за формулою (6) обчислюємо значення похибки δT_{x} у координатах $\{\sigma_m, \tau_m\}$.

Для розглянутого прикладу динамічної ланки 1-го порядку розрахунок похибки δT_{x} в залежності від значень параметрів σ_{m1}, τ_{m1} проведено для моделей неідеальності ВС $\Delta S_1(t)$ і $\Delta S_3(t)$. На рис. 2 наведені одержані залежності δT_{x} для моделей $\Delta S_1(t)$ і $\Delta S_3(t)$: 1 (суцільні жирні криві) – для моделі $\Delta S_1(t)$; криві 2-3 – для моделі $\Delta S_3(t)$ при $\lambda T_0 = \pi$ і $\lambda T_0 = \frac{3}{4}\pi$. Розрахунок похибки δT_X виконано при наступних обмеженнях: $\tau_{\text{p.s.}} = 2{,}0$; $\Delta_{\text{p.s.}} \le \Delta_{\text{доп.}} = 0{,}005$ і $\lambda T_0 \in [3\pi/4; \pi]$. Штрихова крива 3 показує випадок, коли результати розрахунків похибки δT_{x} для моделей $\Delta S_1(t)$ і $\Delta S_3(t)$ близькі між собою.

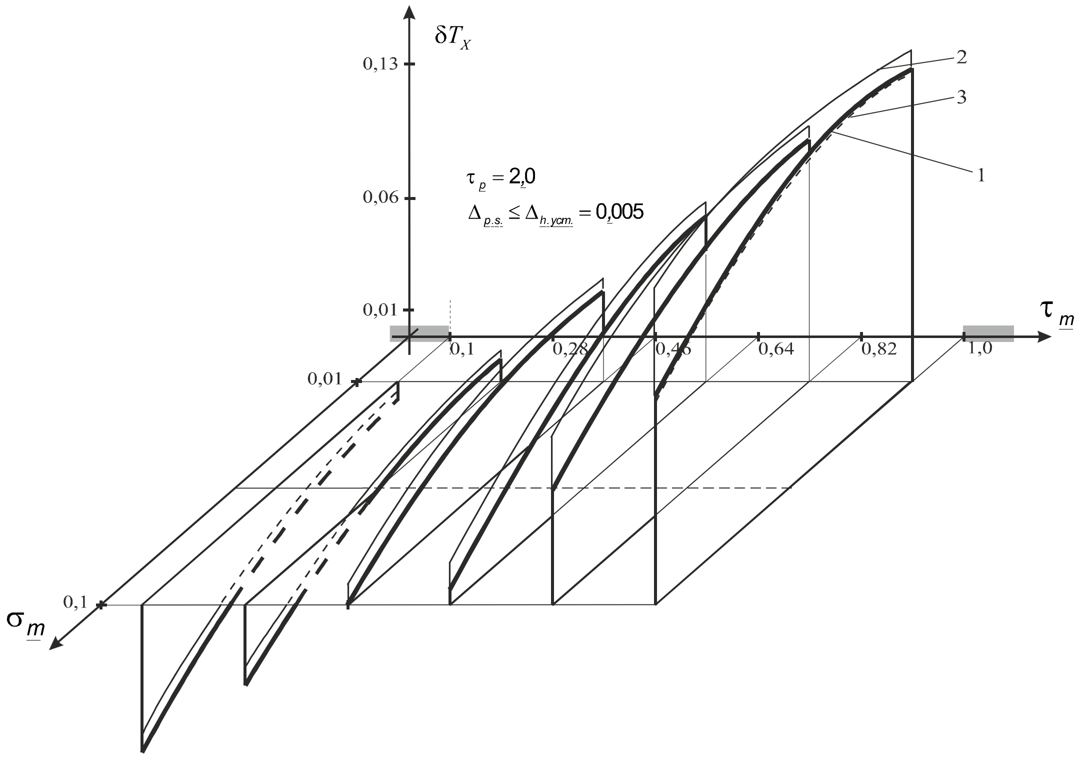


Рис. 2. Оцінка похибки визначення постійної часу динамічної ланки 1-го порядку через неідеальність форми ВС

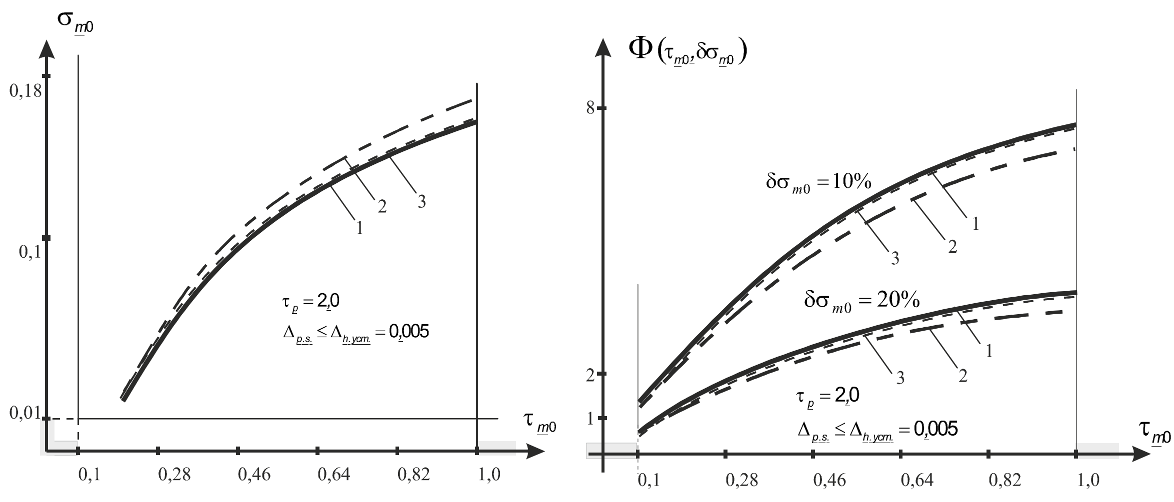
З отриманих залежностей похибки δT_{x} (рис. 2) випливає, що існує можливість її мінімізації. Як бачимо, існує лінія нульового рівня похибки. Тобто, для прийнятої моделі $\Delta S_1(t)$ або $\Delta S_3(t)$, що описує неідеальність форми ВС, існує оптимальне співвідношення між "точковими" параметрами (їх оцінками) σ_{m0}, τ_{m0} при $\tau_{\text{p.s.}} = const$ і при цьому $\Delta_{\text{p.s.}} \le \Delta_{\text{доп.}} = \Delta_{h,уст.}$, що характеризують неідеальність, при яких похибка мінімальна. Фізично це означає, що викид на вершині компенсує вплив кінцевої тривалості фронту реального ВС на похибку знаходження параметра T_x. Характер взаємної компенсації спотворень для моделі $\Delta S_1(t)$, що оцінюються по "точковим" параметрам, пояснює рис. 1,а. Крива 1 (штрихова) – шукана функція $h_x(\tau)$ при ідеальному ступінчатому ВС. Суцільна крива 2 – відгук $h_p(\tau)$ при реальному ВС $S_p(\tau)$, що має кінцевий за тривалістю фронт і деякий викид на вершині. Збільшення викиду на вершині ВС $S_p(\tau)$ наближує відгук $h_p(\tau)$ (суцільна крива 3) за формою до функції $h_x(\tau)$, яку треба визначити.

Рис. 1, *б* ілюструє взаємну компенсацію впливу спотворень форми ВС для моделі $\Delta S_3(t)$ на похибку відтворення ПХ $h_x(\tau)$ у вигляді відгуку. Збільшення викиду σ_{m1} наближає реальний відгук $h_p(\tau)$ (суцільна крива 2) до відгуку як при ідеальному ВС (штрихова крива 3).

На рис. 3, *а* наведено оптимальне співвідношення параметрів $\{\sigma_{m0}, \tau_{m0}\}$ реального ВС для прийнятої моделі спотворень, яке мінімізує похибку знаходження сталої часу T_x (суцільна крива 1 – для моделі $\Delta S_1(t)$; штрихові криві 2-3 – для моделі $\Delta S_3(t)$ при $\lambda T_0 = \pi$ і $\lambda T_0 = \frac{3}{4}\pi$). Однак, через відмінність реальних параметрів, яки треба визначити, від номінальних, а також наближеної оцінки (або установки чи відтворення) оптимального співвідношення "точкових" параметрів σ_{m0}, τ_{m0} реального ВС вказана мінімізація буде неповною.

Оцінимо ефективність мінімізації похибки знаходження параметра T_x, зумовленої неідеальністю ВС. Визначальною похибкою в наносекундному діапазоні є похибка, зумовлена кінцевою тривалістю фронту. Вказану похибку треба мінімізувати. Граничний випадок для моделі $\Delta S_1(t)$ (крива 4 на рис. 1, *а*), коли величина викиду прямує до нуля $\sigma_m \to 0_+$. Модель неідеальності наближується до моделі сигналу з фронтом, тривалість якого $\tau_ф = \tau_{m0}$. Позначимо цю похибку $\delta T'(\tau_{m0}, \sigma_m \to 0_+)$. За умови, що σ_{m0} при заданому τ_{m0} можна встановити (або оцінити) приблизно з похибкою $\pm\Delta\sigma_{m0}$, одержана в результаті мінімізації похибка буде дорівнювати $\delta T''(\tau_{m0}, \sigma_{m0} \pm \Delta\sigma_m)$, де σ_{m0}, τ_{m0} – оптимальні значення "точкових" параметрів. Ефективність оцінюємо за формулою

$$\Phi(\tau_{m0}, \sigma_{m0}, \Delta\sigma_m) = \varepsilon T'(\tau_{m0}, \sigma_m \to 0_+) \Big/ \left|\delta T''(\tau_{m0}, \sigma_{m0} \pm \Delta\sigma_m)\right|_{max} .$$



а) *б*)

Рис. 3. Оптимальне співвідношення параметрів $\{\sigma_{m0}, \tau_{m0}\}$

На рис. 3, *б* наведені залежності ефективності $\Phi(\tau_{m0}, \sigma_{m0}, \Delta\sigma_m)$ мінімізації похибки знаходження параметра T_{x} від "точкових" параметрів, що характеризують неідеальність ВС, при заданих $\tau_{\text{p.s.}} = 2{,}0$; $\Delta_{\text{p.s.}} \le \Delta_{\text{доп.}} = 0{,}005$ для випадків, коли похибка встановлення (або оцінки) значення оптимального викиду складає 10% і 20% (суцільні жирні криві 1 – для моделі $\Delta S_1(t)$; пунктирні криві 2-3 – для моделі $\Delta S_3(t)$ при $\lambda T_0 = \pi$ і $\lambda T_0 = \frac{3}{4}\pi$). Отже, наведений аналіз дозволяє визначити, при яких умовах можна абстрагуватися від необхідності розгляду детальної моделі спотворень форми реального ВС і оперувати тільки з "точковими" параметрами, загальними для різних моделей спотворень. З результатів розрахунку похибки для моделей $\Delta S_1(t)$, $\Delta S_3(t)$ випливає:

1. За умови $\tau_{\text{p.s.}} \le 2{,}0$ (причому $\tau_m < \tau_{p.s.}$) і за умови $\lambda T_0 \le 3\pi/4$ для моделей $\Delta S_1(t)$ (аперіодична) і $\Delta S_3(t)$ (осцилююча) 2-го порядків існує близький збіг значень похибки і, відповідно, оптимального співвідношення "точкових" параметрів σ_{m0}, τ_{m0}, які мінімізують цю похибку. Тобто, незалежно від характеру спотворень (моделі) для мінімізації похибки достатньо оперувати тільки з "точковими" параметрами σ_{m0}, τ_{m0}.

2. *Якщо* $\tau_{\text{p.s.}} \le 2{,}0$ і $\lambda T_0 \in [3\pi/4; \pi]$, тоді вводиться поправка в результат обчислення параметра T_{x}, або, відповідно, в оптимальне співвідношення параметрів σ_{m0}, τ_{m0}. Тобто, можна якісно оцінити характер спотворень (аперіодична або осцилліруюча модель) і оперувати потім тільки з "точковими" параметрами σ_{m0}, τ_{m0}. Ефективність мінімізації похибки в обох випадках при наближеній оцінці (або установці) величини викиду з точністю до 20% – може складати 3-5 разів.

3. За умови $\tau_{\text{p.s.}} \in [2{,}0; 4{,}0]$ і $\tau_m \le 1{,}0$ варто враховувати модель $\Delta S_1(t)$ або $\Delta S_3(t)$.

Висновки

При наявності апріорних відомостей про номінальну модель перехідної характеристики, з урахуванням алгоритму обчислень, може бути мінімізована похибка знаходження реальної перехідної характеристики через неідеальність випробувальних сигналів, що формуються у наносекундному діапазоні. Мінімізація здійснюється шляхом встановлення оптимального співвідношення між "точковими" параметрами реального випробувального сигналу під час його формування. При цьому викид на вершині випробувального сигналу компенсує похибку через кінцеву тривалість фронту. Похибка може бути мінімізована також шляхом експериментальної оцінки значень "точкових" параметрів реального випробувального сигналу і введення поправки в результат обчислень параметрів аналітичної моделі перехідної характеристики.

Це дозволяє проводить вимірювання перехідних характеристик на основі їх прямої оцінки по відгуку з застосуванням реально сформованих ВС, що мають спотворення у наносекундному діапазоні, спростити процедуру контролю динамічних характеристик. Метод доцільно розвинути для побудови автоматизованих систем контролю.

Список використаної літератури

1. *Грановский В.А.* Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения [Текст] / В.А. Грановский. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.: ил. – Библиогр.: с. 214-218. – 8000 экз.
2. *РД 50-404-83.* Определение динамических характеристик линейных средств измерений с сосредоточенными параметрами. Методические указания. Общие положения [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 64 с.
3. *Фрумкин А.Л.* Определение переходной характеристики при пробном сигнале, близком к идеальному скачку [Текст] / А.Л. Фрумкин // Метрология. – 1989. – № 6. – с. 71-75.
4. *ГОСТ 11113-88.* Генераторы импульсные измерительные. Типы.

Основные параметры. Технические требования [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 26 с.

5. *Розенберг В.Я.* Введение в теорию точности измерительных систем [Текст] / В.Я. Розенберг. – М.: Сов. радио, 1975. – 304 с.: ил. – Библиогр.: с. 300-302. – 10000 экз..

6. *Солопченко Г.Н.* Некорректные задачи измерительной техники [Текст] / Г.Н. Солопченко // Измерительная техника. – 1974. – № 1. – с. 51-54.

7. *Грановский В.А.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.: ил. – Библиогр.: с. 284-286. – 17000 экз. – ISBN 5-283-04480-7.

8. *Мэтьюз Джон Г.* Численные методы. Использование MATLAB [Текст]: 3-е издание. Пер. с англ. / Джон Г. Мэтьюз, Куртис Д. Финк. – М.: Вильямс, 2001. – 720 с.: ил. – Библиогр.: с. 665-677. – 5000 экз. – ISBN 5-8459-0162-6 (рус.); ISBN 0-13-270042-5 (англ.); .

9. *Улахович Д.А.* Основы теории линейных электрических цепей [Текст] / Д.А. Улахович. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 816 с.: ил. – Библиогр.: с. 783-784. – 2000 экз. – ISBN 978-5-9775-0083-8.