

УДК 621.3(075)

Ю. Г. Ведміцький, к.т.н.

## СИМВОЛЬНО-КЛАСИЧНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: wjug@ukr.net

*В роботі на основі комплексних зображень перехідних миттєвих струмів і напруг розроблено теоретичний базис символно-класичного метода для розв'язування задачі Коші у відношенні розрахунку та аналізу перехідних процесів в електричних колах синусоїдного струму.*

**Ключові слова:** електричне коло, струми та напруги, перехідний процес, задача Коші, закони Кірхгофа, компонентні співвідношення, диференціальне рівняння, закони комутації.

**Вступ.** Однією з важливих складових загальної задачі аналізу електричних кіл є розрахунок та аналітичне дослідження перехідних процесів в електротехнічних системах з періодичною формою руху. Така увага пояснюється дією різних чинників. Зокрема, наприклад, з поміж динамічних режимів електроенергетичних або електромеханічних систем, найбільш “важкими” як для самих систем, так і для їх зовнішнього оточення є саме перехідні процеси. Виражена аперіодичність, зміна характеру обміну і дисипації електромагнітної та інших видів енергії, параметричні перенавантаження і ряд інших численних явищ, які не тільки супроводжують перехідний процес, але, власне, і є його сутністю, негативно позначаються на більшості з показників якості функціонування практично всіх систем, а промислових і високоенергетичних – в першу чергу.

За таких умов математичні моделі, які здатні безпосередньо відображати і описувати перехідні процеси в якісній або аналітичній формах розв'язків задачі Коші, набувають надзвичайно важливого значення. Насамперед ті з них, які явно визначають як характерні загальні, так і окремі та аномальні особливості перебігу фізичного перехідного процесу в технічній системі. На думку автора, найкраще така можливість виявляє себе лише тоді, коли структура математичної моделі перехідного процесу сформована на основі декомпозиційних ланок, кожна з яких описує ту чи іншу властивість або якість перехідного процесу окремо і незалежно від інших, а в сукупності – перехідний процес в цілому.

Побудова зазначеної математичної моделі – завдання доволі важке, часто – неможливе. Водночас синусоїдний режим, а отже – і періодичний несинусоїдний, є сприятливим для формування саме такої моделі. Відомо, що синусоїдний струм (або напруга) в усталеному режимі характеризується трьома параметрами – амплітудою, початковою фазою і частотою,

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) . \quad (1)$$

Тому під час перехідного процесу від одного синусоїдного режиму до іншого зміна миттєвого струму в загальному випадку супроводжується зміною у часі за певними законами кожного з цих трьох параметрів, що аналітично можна описати так:

$$i(t) = I_m(t) \sin[\omega(t) t + \psi_i(t)] , \quad (2)$$

де  $I_m(t)$ ,  $\psi_i(t)$ ,  $\omega(t)$  – миттєві амплітуда, початкова фаза і частота відповідно.

Необхідно зазначити, що серед основних методів аналізу перехідних процесів в лінійних електричних колах, а це – класичний, операторний, спектральний методи та метод інтеграла Дюамеля [1-4], жоден не надає розв'язку задачі Коші в формі (2). А перехід до неї від запропонованих потребує проведення доволі значних додаткових розрахунків навіть в простих випадках.

Водночас зазначена перешкода може бути частково, але помітно, усунута, якщо скористатися комплексною формою запису виразу (2)

$$i(t) = \text{Im} \left\{ I_m(t) \cdot e^{j\psi_i(t)} \cdot e^{j\omega(t)t} \right\} , \quad (3)$$

яка створює можливість і є підставою для відображення перехідного процесу не миттєвим струмом  $i(t)$ , а його комплексним зображенням

$$\underline{I}_m^*(t) = I_m(t) \cdot e^{j\psi_i(t)} \cdot e^{j\omega(t)t} . \quad (4)$$

Необхідно зауважити, що з поміж відомих формула (4) найкраще відповідає критеріям заявленої вище математичної моделі.

Тому автор вважає, що задачу Коші щодо розрахунку перехідних процесів в лінійних колах синусоїдного струму доцільно формулювати не в термінах миттєвих фізичних величин (струмів, напруг,

зарядів, поточкозчеплень тощо), але в термінах їх комплексних зображень виду (4), де кожна з функцій часу  $I_m(t)$ ,  $\psi_i(t)$ ,  $\omega(t)$  і їх перші та вищі похідні як окремо, так і в різних сполученнях здатні описувати і виявляти не тільки видимі, але і приховані, глибинні властивості перехідного процесу і аналітично, і якісно.

Нажаль, у вищезазначених літературних джерелах така можливість не тільки нерозкривається, про неї навіть негадується.

Відтак метою роботи є формулювання задачі Коші відносно комплексних зображень миттєвих фізичних величин електричного кола та розробка теоретичного базису символічно-класичного методу для розв'язування даної фундаментальної задачі у відношенні розрахунку та аналізу перехідних процесів в лінійних колах синусоїдного струму, що дозволить в кожному конкретному випадку отримати ряд додаткових інформативних об'єктів, здатних аналітично або якісно розкривати характер перебігу перехідного процесу як в окремих його проявах, так і в спільній єдності цих проявів.

**Миттєві комплексні струми (напруги).** На прикладі дослідження зміни параметрів синусоїдного струму розглянемо перехідний процес в лінійному колі, який спричинено комутацією ключа. Під час перехідного процесу змінюються і амплітуда струму  $I_m$ , і його початкова фаза  $\psi_i$ , які за певними законами  $I_m(t)$  та  $\psi_i(t)$  переходять від усталених значень, що передували перехідному процесу, до значень нового усталеного режиму. Кутова ж частота  $\omega$  обох усталених режимів (до- та післякомутаційного) під час перехідного процесу залишається незмінною.

Зазначене дозволяє математично описати перебіг перехідного процесу за допомогою (2):

$$i(t) = I_m(t) \sin[\omega t + \psi_i(t)]. \quad (5)$$

Співвідношення (5) можна виразити в комплексній формі у вигляді (3):

$$i(t) = \text{Im} \left\{ I_m(t) e^{j\psi_i(t)} e^{j\omega t} \right\} = \text{Im} \left\{ \underline{I}_m(t) e^{j\omega t} \right\}. \quad (6)$$

$I_m(t)$  та  $\psi_i(t)$  в формулах (5) і (6) є миттєвими амплітудою і початковою фазою струму  $i(t)$ , а  $\underline{I}_m(t)$  надалі будемо називати миттєвою комплексною амплітудою струму або власне миттєвим комплексним струмом.

Отже, миттєвим комплексним струмом є функція часу, яка набуває значень з множини комплексних чисел, де модуль визначає миттєву амплітуду, а аргумент – миттєву початкову фазу перехідного струму  $i(t)$

$$\underline{I}_m(t) = I_m(t) e^{j\psi_i(t)}. \quad (7)$$

Поняття миттєвої комплексної напруги задається аналогічно.

#### Диференціальні рівняння перехідного процесу в комплексній формі

Перехідний процес в лінійному колі з одним джерелом синусоїдної напруги

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \text{Im} \left\{ U_m e^{j\psi_u} e^{j\omega t} \right\} = \text{Im} \left\{ \underline{U}_m e^{j\omega t} \right\} \quad (8)$$

в загальному випадку описується лінійним звичайним диференціальним рівнянням  $n$ -го порядку

$$\sum_{k=0}^n a_k \frac{d^k i}{dt^k} = \sum_{s=0}^w b_s \frac{d^s u}{dt^s} \quad (9)$$

з  $n$  початковими умовами:  $i(0_+)$ ,  $\frac{di(0_+)}{dt}$ , ...,  $\frac{d^{n-1}i(0_+)}{dt^{n-1}}$ . В рівнянні (9)  $w \leq n$ .

Скориставшись формулою бінома Ньютона, кожену  $k$ -ту похідну струму (5) можна записати через миттєвий комплексний струм  $\underline{I}_m(t)$  та його похідні у спосіб

$$a_k \frac{d^k i}{dt^k} = \text{Im} \left\{ a_k \cdot \sum_{p=0}^k \left[ \frac{k!}{p!(k-p)!} \cdot (j\omega)^p \cdot \frac{d^{k-p} \underline{I}_m(t)}{dt^{k-p}} \right] \cdot e^{j\omega t} \right\}. \quad (10)$$

Для кожної  $s$ -тої похідної вхідної напруги (8), амплітуда і початкова фаза якої під час перехідного процесу залишаються сталими, маємо

$$b_s \frac{d^s u}{dt^s} = \text{Im} \left\{ b_s \cdot (j\omega)^s \cdot \underline{U}_m \cdot e^{j\omega t} \right\}. \quad (11)$$

Тому перехідний процес в колі можна описати і іншим диференціальним рівнянням – рівнянням в

комплексній формі, складеним відносно миттєвого комплексного струму  $\underline{I}_m(t)$ . З урахуванням формул (5) - (11) це рівняння має вигляд

$$\sum_{k=0}^n \underline{A}_k \frac{d^k \underline{I}_m(t)}{dt^k} = \underline{B}_n \underline{U}_m \quad (12)$$

і доповнене  $n$  початковими умовами:  $\underline{I}_m(0_+)$ ,  $\frac{d \underline{I}_m(0_+)}{dt}$ , ...,  $\frac{d^{n-1} \underline{I}_m(0_+)}{dt^{n-1}}$ .

Комплексні коефіцієнти в (12) безпосередньо пов'язані з коефіцієнтами рівняння (9):

$$\underline{A}_k = \sum_{p=0}^{n-k} \left[ \frac{(k+p)!}{k! p!} \cdot (j\omega)^p \cdot a_{k+p} \right]; \quad \underline{B}_n = \sum_{s=0}^n \left[ (j\omega)^s \cdot b_s \right]. \quad (13)$$

Математичні зв'язки для коефіцієнтів  $\underline{A}_k$  в (13) неважко встановити, якщо перегрупувати уявну частину в формулі (10) з наступним приведенням до вигляду (12):

$$\sum_{k=0}^n \left\{ a_k \cdot \sum_{p=0}^k \left[ \frac{k!}{p!(k-p)!} \cdot (j\omega)^p \cdot \frac{d^{k-p} \underline{I}_m(t)}{dt^{k-p}} \right] \right\} = \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{p=0}^{n-k} \left[ \frac{(k+p)!}{k! p!} \cdot (j\omega)^p \cdot a_{k+p} \right] \cdot \frac{d^k \underline{I}_m(t)}{dt^k} \right\}. \quad (14)$$

Отже, наприклад, для кола 1-го порядку, де  $n=1$ , за зазначених умов диференціальним рівнянням в комплексній формі буде рівняння

$$\underline{A}_1 \frac{d \underline{I}_m(t)}{dt} + \underline{A}_0 \underline{I}_m(t) = \underline{B}_1 \underline{U}_m \quad (15)$$

з коефіцієнтами  $\underline{A}_1 = a_1$ ;  $\underline{A}_0 = a_0 + j\omega a_1$ ;  $\underline{B}_1 = b_0 + j\omega b_1$ , а для кола 2-го порядку ( $n=2$ ) –

$$\underline{A}_2 \frac{d^2 \underline{I}_m(t)}{dt^2} + \underline{A}_1 \frac{d \underline{I}_m(t)}{dt} + \underline{A}_0 \underline{I}_m(t) = \underline{B}_2 \underline{U}_m, \quad (16)$$

де  $\underline{A}_2 = a_2$ ;  $\underline{A}_1 = a_1 + j2\omega a_2$ ;  $\underline{A}_0 = a_0 - \omega^2 a_2 + j\omega a_1$ ;  $\underline{B}_2 = b_0 - \omega^2 b_2 + j\omega b_1$ .

### Перехідна комплексна схема і закони Кірхгофа в комплексно-часовій формі

Миттєві комплексні струми та напруги є самодостатніми аналітичними об'єктами. Серед іншого це означає, що диференціальне рівняння перехідного процесу виду (12) може бути складене і без використання коефіцієнтів рівняння (9) та співвідношень (13).

Введемо поняття *перехідної комплексної схеми*, якою будемо називати схематично структурований об'єкт з миттєвими комплексними струмами у вітках та напругами на їх ділянках, що пов'язані законами Кірхгофа, виписаними в *комплексно-часовій формі*.

Із зазначених обидва закони Кірхгофа є наслідками класичних законів і з них виводяться. *Перший закон* Кірхгофа в комплексно-часовій формі стверджує, що алгебраїчна сума миттєвих комплексних струмів віток, які сходяться у вузлі перехідної комплексної схеми в будь-який момент часу дорівнює нулю. Відповідно *другий закон* встановлює, що алгебраїчна сума миттєвих комплексних напруг вздовж замкнутого контуру перехідної комплексної схеми також в будь-який момент часу дорівнює нулю.

Перехідна комплексна схема будується на основі післякомутаційного електричного кола. До складу схеми можуть входити джерела миттєвої комплексної напруги або струму (заданої частоти) та пасивні двополосні елементи. Відповідність останніх елементам електричного кола розкриває табл. 1. В таблиці також наведено компонентні співвідношення між миттєвими комплексними напругами і струмами на резистивному, індуктивному та ємнісному елементах, що отримано на підставі формули (10) для випадку  $k=1$ .

Методика складання системи рівнянь за законами Кірхгофа в комплексно-часовій формі не відрізняється від усталеної. Самі ж рівняння потому можуть бути використані, наприклад, або самостійно, або для формування диференціального рівняння виду (12) відносно шуканого миттєвого комплексного струму чи напруги, а також задля визначення відповідних початкових умов на основі законів комутації.

### Закони комутації в комплексній формі

Як зазначалося вище, початковими умовами для рівняння (12) слугують значення шуканого миттєвого комплексного струму та його  $(n-1)$  похідних в першу мить після комутації, наприклад, в момент часу  $t=0_+$ . Для їх розрахунку необхідно скористатися *законами комутації в комплексній формі, перший з*

яких стверджує про нерозривність значень миттєвого комплексного струму, що проходить через індуктивний елемент  $\underline{I}_{mL}(0_-) = \underline{I}_{mL}(0) = \underline{I}_{mL}(0_+)$ , а другий – про нерозривність значень миттєвої комплексної напруги на ємнісному

Таблиця відповідності: елементи і компонентні співвідношення

Таблиця 1

Електричне коло		Перехідна комплексна схема	
<b>Резистивний елемент</b>			
	$u(t) = Ri(t)$		$\underline{U}_m(t) = R \underline{I}_m(t)$
<b>Індуктивний елемент</b>			
	$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$		$\underline{U}_m(t) = L \frac{d \underline{I}_m(t)}{dt} + j\omega L \underline{I}_m(t)$
<b>Ємнісний елемент</b>			
	$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$		$\underline{I}_m(t) = C \frac{d \underline{U}_m(t)}{dt} + j\omega C \underline{U}_m(t)$

елементі  $\underline{U}_{mC}(0_-) = \underline{U}_{mC}(0) = \underline{U}_{mC}(0_+)$ , в обох випадках – перехідної комплексної схеми.

**Миттєвий комплексний струм як розв’язок диференціального рівняння в комплексній формі. Класичний підхід**

Введення поняття миттєвого комплексного струму (напруги) дозволяє сформулювати кілька окремих, але взаємопов’язаних напрямків аналізу перехідних процесів в лінійних колах синусоїдного струму на основі класичного, операторного та спектрального методів, а також метода інтеграла Дюамеля.

Символьно-класичний метод ґрунтується на класичному підході в розв’язуванні диференціального рівняння (12) і передбачає подання шуканого розв’язку  $\underline{I}_m(t)$  у вигляді суми двох складових – примусової

$\underline{I}_{mnp}$  та вільної  $\underline{I}_{m\epsilon}(t)$ :

$$\underline{I}_m(t) = \underline{I}_{mnp} + \underline{I}_{m\epsilon}(t), \tag{17}$$

методика пошуку яких є схожою з методикою власне класичного методу [1-4].

**Приклад розрахунку перехідного процесу символьно-класичним методом**

Для прикладу розглянуто перехідний процес в лінійному колі 2-го порядку, електрична схема якого наведена на рис. 1, а де необхідно визначити миттєвий комплексний струм  $\underline{I}_m(t)$  і додатково – через нього миттєвий струм  $i(t)$ , якщо вхідна напруга є синусоїдною  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ .

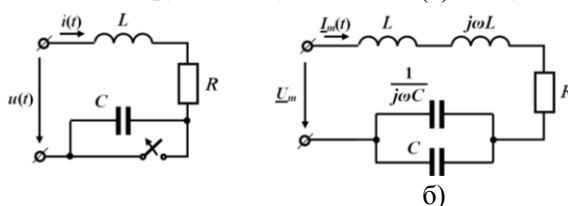


Рисунок 1 – Електричне коло та перехідна комплексна схема

Відповідно до символно-класичного метода на підставі системи рівнянь, які складено для перехідної комплексної схеми (рис. 1, б) за законами Кірхгофа в комплексно-часовій формі,

$$\begin{cases} \underline{I}_m(t) - j\omega C \cdot \underline{U}_{mC}(t) - C \frac{d\underline{U}_{mC}(t)}{dt} = 0, \\ L \frac{d\underline{I}_m(t)}{dt} + (R + j\omega L) \cdot \underline{I}_m(t) + \underline{U}_{mC}(t) = \underline{U}_m = U_m e^{j\Psi_u} \end{cases} \quad (18)$$

формується диференціальне рівняння перехідного процесу відносно миттєвого комплексного струму  $\underline{I}_m(t)$

$$LC \frac{d^2 \underline{I}_m(t)}{dt^2} + (RC + j2\omega LC) \frac{d\underline{I}_m(t)}{dt} + (1 - \omega^2 LC + j\omega CR) \underline{I}_m(t) = j\omega C \underline{U}_m \quad (19)$$

з початковими умовами  $\underline{I}_m(0_+) = \frac{U_m}{R + j\omega L}$  та  $\frac{d\underline{I}_m(0_+)}{dt} = 0$ . Останні отримано на основі законів комутації в комплексній формі та рівнянь системи (18).

Розв'язком задачі Коші, наприклад, для коливального режиму є

$$\underline{I}_m(t) = \underline{I}_{mnp} + \underline{I}_{m\epsilon}(t) = \underline{I}_{mnp} + e^{\delta t} \underline{A}_1 \left( \cos \omega^* t - \frac{\delta}{\omega^*} \sin \omega^* t \right), \quad (20)$$

$$\text{де } \underline{I}_{mnp} = \frac{j\omega C}{1 - \omega^2 LC + j\omega CR} \underline{U}_m; \quad \underline{A}_1 = \frac{\underline{U}_m}{R + j\omega L} - \underline{I}_{mnp}; \quad \delta = -\left( \frac{R}{2L} + j\omega \right); \quad \omega^* = \omega_0 \sqrt{1 - \left( \frac{R}{2\rho} \right)^2};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{– частота власних коливань контуру}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{– його характеристичний опір.}$$

Закон зміни миттєвого струму  $i(t)$  легко отримати на підставі формули (6)

$$\begin{aligned} i(t) = \text{Im} \left\{ \underline{I}_m(t) e^{j\omega t} \right\} = & \left| \underline{I}_{mnp} \right| \cdot \sin \left( \omega t + \Psi_{\underline{I}_{mnp}} \right) + \left( \left| \underline{A}_1 \right| \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin \Psi_{\underline{A}_1} \right) \cdot \cos \omega^* t - \\ & - \left( \left| \underline{A}_1 \right| \cdot \frac{|\delta|}{\omega^*} \cdot \sin \left( \Psi_{\underline{A}_1} + \Psi_{\underline{\delta}} \right) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \right) \cdot \sin \omega^* t. \end{aligned} \quad (21)$$

### Графічна інтерпретація миттєвого комплексного струму. Часовий годограф

За аналогією з частотним (звичайно ж, суто формальною) введемо і розглянемо поняття часового годографа, оскільки під час перебігу перехідного процесу вектор, який є відображенням миттєвого комплексного струму  $\underline{I}_m(t) = I_m(t) e^{j\Psi_i(t)}$  на комплексній площині, з плином часу змінює свою довжину та напрям через зміну значень миттєвої амплітуди та миттєвої початкової фази фізичного процесу.

*Часовим годографом* будемо називати траєкторію, накреслену кінцем вектора миттєвого комплексного струму на комплексній площині за зміни часу від нуля (моменту комутації) до нескінченності (закінчення перехідного процесу). Цей аналітичний об'єкт є графічною інтерпретацією миттєвого комплексного струму і здатен відображати характер та описувати перебіг перехідних процесів в колах синусоїдного струму.

На рис. 2 показано приклади часових годографів, які побудовано за формулою (20) за різних співвідношень між значеннями параметрів елементів розрахованого вище електричного кола.

В першому випадку (рис. 2, а) вхідний опір післякомутаційного кола є суто активним і в ньому спостерігається резонанс напруг, а в другому (рис. 2, б) – опір має активно-індуктивний характер. Поряд на цьому ж рисунку наведено часові діаграми зміни значень миттєвого струму  $i(t)$ , які побудовані за формулою (21) за зазначених умов.

На рис. 3 показано графіки миттєвих амплітуд  $I_m(t) = \left| \underline{I}_m(t) \right|$  та миттєвих початкових фаз  $\Psi_i(t) = \arg \left\{ \underline{I}_m(t) \right\}$  як функцій часу за тих же умов.

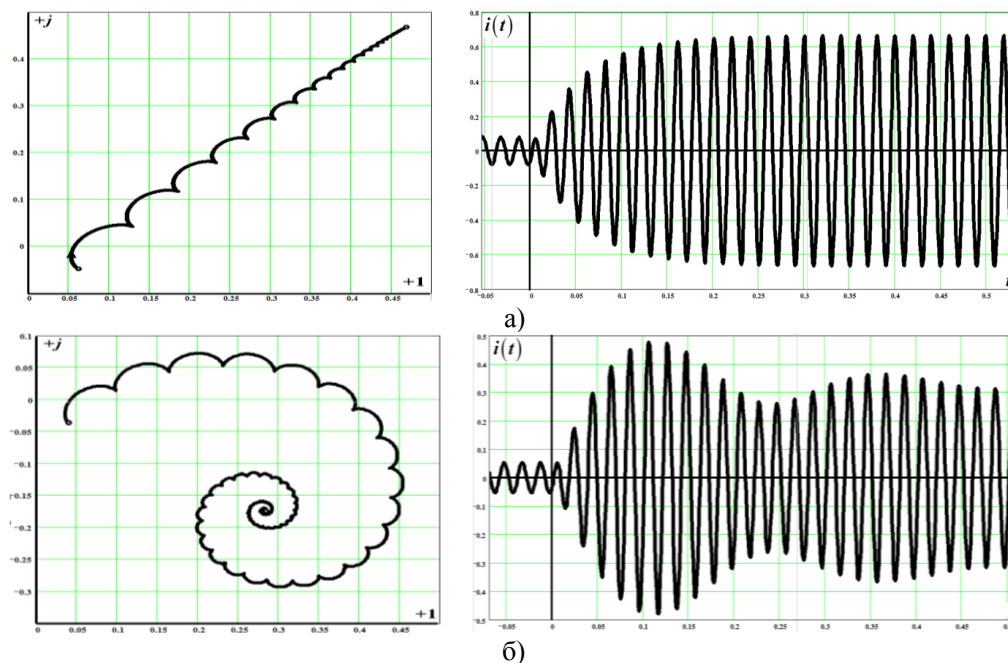


Рисунок 2 – Часові годографи та часові діаграми перехідного процесу

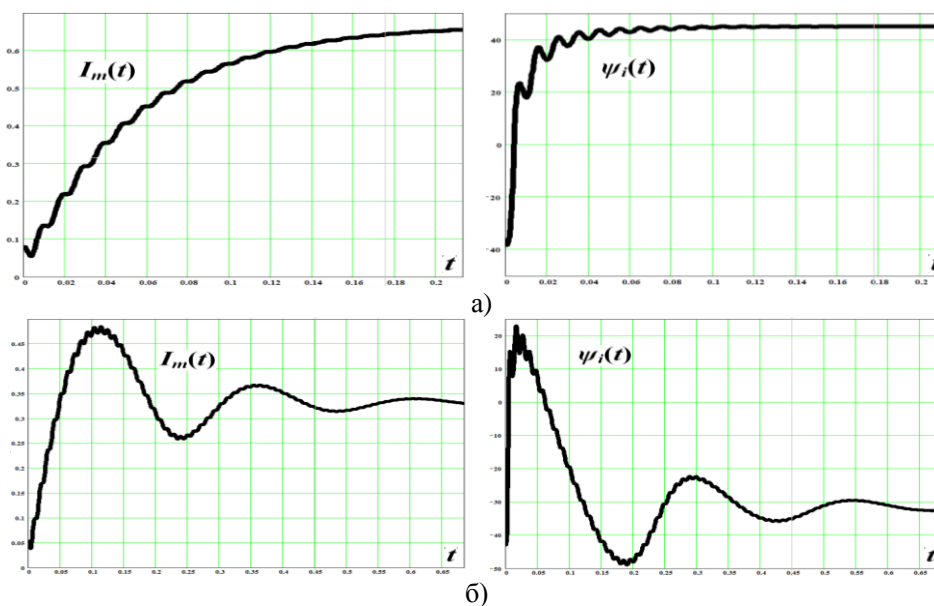


Рисунок 3 – Графіки миттєвих амплітуд і миттєвих початкових фаз перехідних процесів

Ілюстративний матеріал отримано в програмному середовищі системи комп'ютерної математики Mathcad.

#### Недоліки та переваги метода

Перш за все символічно-класичний метод потрібно розцінювати не як альтернативу відомим методам розрахунку перехідних процесів в колах синусоїдного струму, але як теоретичне та практичне доповнення до них. Водночас – доповнення, яке має всі ознаки самодостатності.

Серед найбільш помітних недоліків метода – комплексний характер практично усіх об'єктів теоретичного базису, що складає його основу: рівнянь, побудованих за законами Кірхгофа, самих законів Кірхгофа, диференціального і характеристичного рівнянь перехідного процесу, розв'язків першого та коренів останнього, початкових умов, сталих інтегрування тощо. Звичайно ж, все це не може не ускладнювати формулювання та розв'язування задачі Коші. Однак з поміж питань, які постають у зв'язку із вказаним недоліком, найсуттєвішими є тільки два. Чи є таке ускладнення критичним, і якщо так, то чи воно виправдане?

Насамперед необхідно зауважити, що в своїй аналітичній частині зазначений недолік суттєво не позначається ані на обсязі проведених розрахунків, ані на їх якості. Це врешті його нівелює і тим самим надає заявленому методу адекватності порівняно з відомими.

Водночас, як було сказано вище і попередні дослідження цього не заперечують, миттєвий комплексний струм  $I_m(t)$  (напряга), його модуль  $I_m(t)$ , аргумент  $\psi_i(t)$ , перша та вищі похідні, часовий годограф, фазові траєкторії є надзвичайно інформативними базисними об'єктами, які здатні у додатковий до відомих спосіб відображати перебіг фізичних перехідних процесів і в якісній, і в аналітичній формах розв'язків задачі Коші. Для прикладу на рис. 4 показано декілька можливих реалізацій перехідного процесу у вищезрозглянутому колі 2-го порядку за коливального режиму в термінах поняття миттєвого комплексного струму. З них перші три (у верхньому ряду) – реалізації перехідного процесу в колі з активно-індуктивним вхідним опором в новому усталеному режимі, а інші – з активно-ємнісним. Помітні регулярності спонукають до подальшого і більш глибокого вивчення кореляційних властивостей зазначених базисних елементів в їх відношенні до електричних кіл з динамічними режимами роботи, однак ці елементи вже і за безпосереднього дослідження виявляють свою спроможність ефективно розкривати і характер перехідного процесу в колах, і особливості його перебігу.

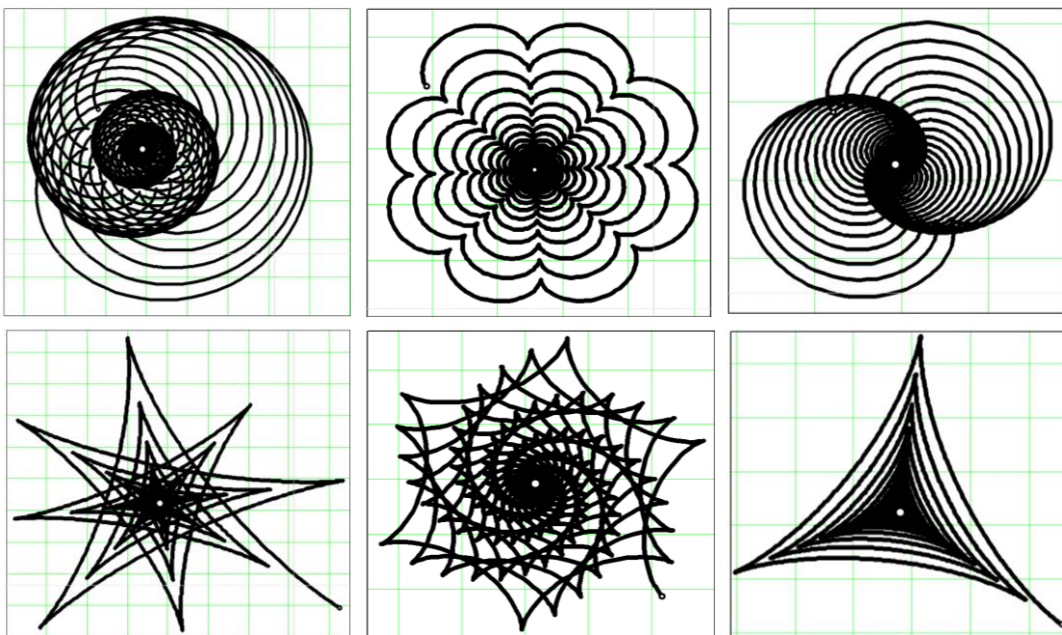


Рисунок 4 – Часові годографи складних перехідних коливань в колах 2-го порядку

Додатково позиції посилює і можлива широка область застосування метода – від низькочастотних енергетичних до високочастотних інформаційних електротехнічних систем змішаної або суто електромагнітної фізичної природи.

**Висновок.** В роботі сформульовано задачу Коші відносно комплексних зображень миттєвих фізичних величин електричного кола, що дозволило на цій основі розробити окремі елементи теоретичного базису символічно-класичного метода для розв'язування заявленої фундаментальної задачі у відношенні розрахунку та аналізу перехідних процесів в лінійних колах синусоїдного струму і отримати ряд додаткових інформативних об'єктів, здатних аналітично або якісно розкривати характер перебігу перехідного процесу як в окремих його проявах, так і в спільній їх єдності.

#### Список літературних джерел

1. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола : підручник / В. С. Перхач. – К.: Вища шк., 1992. – 439 с.
2. Бойко В. С. Теоретичні основи електротехніки : підручник. Т.2. Перехідні процеси у лінійних колах із зосередженими параметрами. Нелінійні та магнітні кола / В. С. Бойко та ін. ; заг. ред. І. М. Чиженко, В. С. Бойко. – К.: НТУУ “КПІ”, 2008. – 224 с.
3. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук та ін.; за ред. Ю. О. Карпова. – Х.: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. – 456 с.
4. Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С. Г. Гинзбург. – М.: Сов. Радио, 1959. – 404 с.