

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Моделювання та методи оптимізації електромеханічних систем»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

за темою № 8 – Математичне моделювання тиристорних перетворювачів

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

Розробник: старший викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Шмельов Ю.М.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент Шокарьов Д.А.
2. Старший викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.

План лекції:

1. Методи моделювання тиристорних перетворювачів.
2. Моделювання тиристорних перетворювачів по середніх значеннях випрямленої ЕРС.
3. Моделювання з обліком однонаправленості вентильного ланцюга.
4. Моделювання тиристорних перетворювачів по миттєвих значеннях випрямленої ЕРС.
5. Моделювання тиристорних перетворювачів методом перемикаючих функцій.
6. Моделювання тиристорних перетворювачів методом змінних опорів.

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна література:

1. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Кременчук, 2001. 410 с.

Допоміжна література:

1. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К. та інші Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2016. 302 с.
2. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
3. Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. 166 с.
4. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 2001. 137 с.
5. Дерещ О. Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем». Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 104 с.

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

Розглянемо процес пуску ДПС НЗ при подачі на якірну обмотку імпульсної напруги $U(t)$ від двуполярного широтноімпульсного перетворювача.

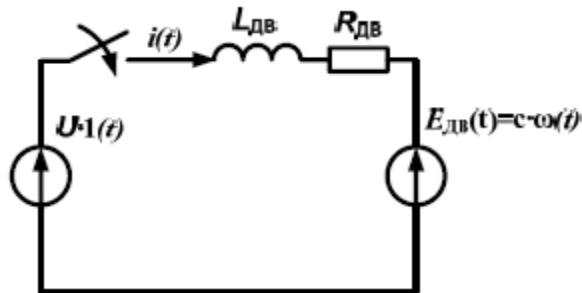


Рис. 52. Схема заміщення якірного ланцюга ДПС НЗ

Напруга якоря $U(t)$ графічно можна представити в такий спосіб:

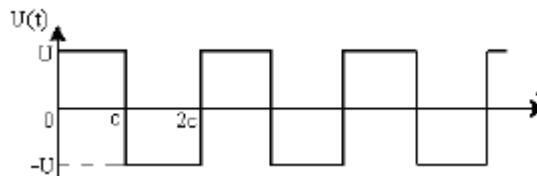


Рис. 53. Напруга, прикладена до якоря ДПС НЗ

Аналітично залежність зміни $U(t)$ за один період $T = 2c$ можна записати в такий спосіб:

$$U(t) = U \cdot 1(t) - 2U \cdot 1(t - c) + U \cdot 1(t - 2c).$$

СДР, що описує пуск ДПС НЗ на холостому ході:

$$\begin{cases} U(t) = R_{\text{дв}} \cdot i(t) + L_{\text{дв}} \cdot \frac{di(t)}{dt} + c \cdot \omega(t) \\ c \cdot i(t) = J_{\text{дв}} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases}$$

Тому що вільний член першого диференціального рівняння є функція, зображення якої важко знайти, у цьому випадку корисно скористатися однієї зі Спеціальних теорем - інтеграла Дюамеля або теореми Бореля. Розглянемо для початка застосування інтеграла Дюамеля для розв'язання задачі Коші.

Тому що інтеграл Дюамеля призначений для розв'язання не систем, а окремих ДР, те для знаходження кожного із двох рішень СДР необхідно вирішити диференціальне рівняння другого порядку, невідомою функцією якого була б тільки одного змінна стану ДПС.

Аналітичні методи математичного моделювання можуть бути корисні на етапі проектування електромеханічних систем. На основі математичної моделі, складеної за допомогою аналітичних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь, можна на етапі проектування електромеханічної системи проводити розв'язання таких завдань як аналіз вихідних процесів і стійкості системи.

У даному навчальному посібнику були розглянуті три аналітичних методи математичного моделювання - класичний, операторний і метод визначників Вандермонда.

До достоїнств класичного методу варто віднести комплексність отриманого розв'язання. Комплексність розв'язання полягає в можливості аналізу виду корінь характеристичного рівняння для оцінки стійкості й характеру (коливальних або аперіодичного) перехідних процесів, наявності можливості окремого аналізу як вільної, так і примушеного складового перехідного процесу. До недоліків класичного методу можна віднести досить більшу громіздкість і складність розв'язання у випадку електромеханічних систем високого порядку.

Операторний метод дозволяє застосовувати потужний математичний апарат операційного вираховування, заснованого на інтегральних перетвореннях, зокрема перетворенні Лапласа. Необхідно відзначити, що початкові умови при рішенні задачі Коші операторним методом ураховуються автоматично, що дозволяє спростити розв'язання. До недоліків даного методу варто віднести складність застосування зворотного перетворення Лапласа в окремих випадках.

Для аналізу процесів пуску електромеханічних систем зручно застосовувати метод визначників Вандермонда. Достоїнством цього методу є можливість застосування зручного відпрацьованого математичного апарата матричної алгебри. Головним недоліком методу є обмеженість застосування (тільки нульові початкові умови).

Показники якості динаміки систем, отримані по перехідній характеристиці В даному навчальному посібнику знання методів розв'язання нелінійних рівнянь дозволить самостійно з достатньою точністю визначити такі показники динаміки ЕМС як час перехідного процесу $t_{пп}$, час досягнення першого максимуму $t_{макс}$, час наростання до сталого значення t_n (мал. П1).

Визначивши стале значення $U_{уст}$ і знаючи час досягнення першого максимуму $t_{макс}$ можна обчислити й перерегулювання $\Delta U\%$ як

$$\Delta U\% = (U_{макс} - U_{уст}) \cdot 100 / U_{уст}.$$

Показники якості динаміки систем, отримані по частотній характеристиці

Розглянемо показники якості динаміки ЕМС, обумовлені по амплітудно-частотних характеристиках (АЧХ), на прикладі АЧХ фільтра низьких частот (ФНЧ) $A(\omega)$ (мал. П2). На резонансній частоті $\omega = \omega_{PE3}$ на АЧХ спостерігається максимум $A(\omega) = A_{MAX}$. Частота смуги пропускання ФНЧ $\omega_{ПП}$ визначається для точки, у якій амплітуда зменшується в $\sqrt{2}$ разів у порівнянні з амплітудою $A(0)$ при $\omega \sim 0$.

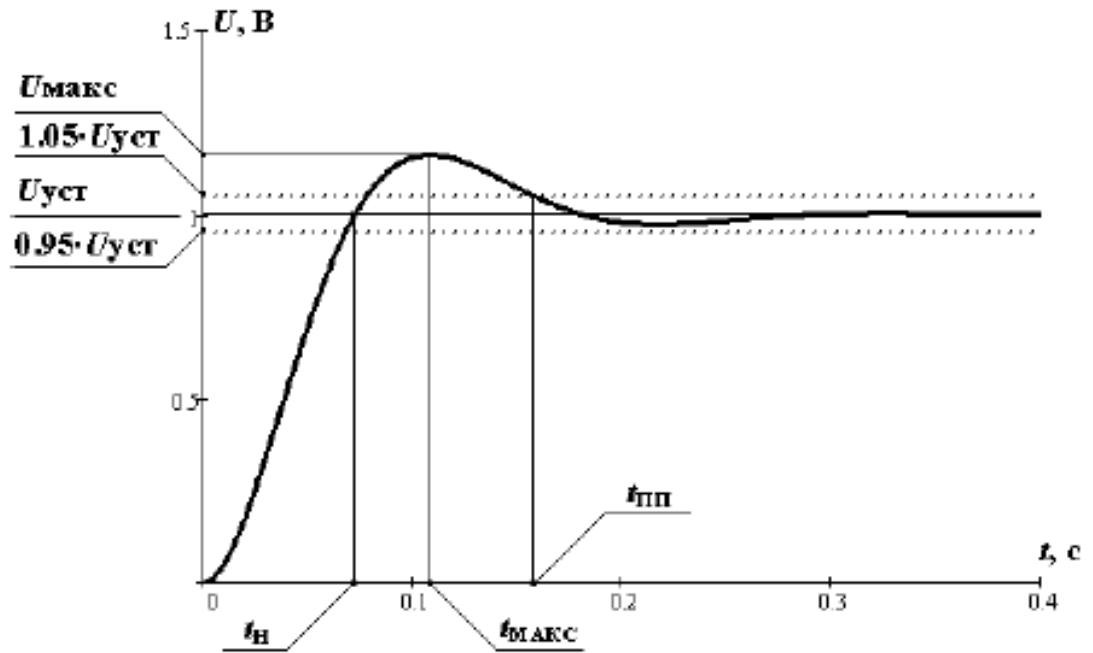


Рис. П1. Показники якості динаміки систем, отримані по перехідній характеристиці

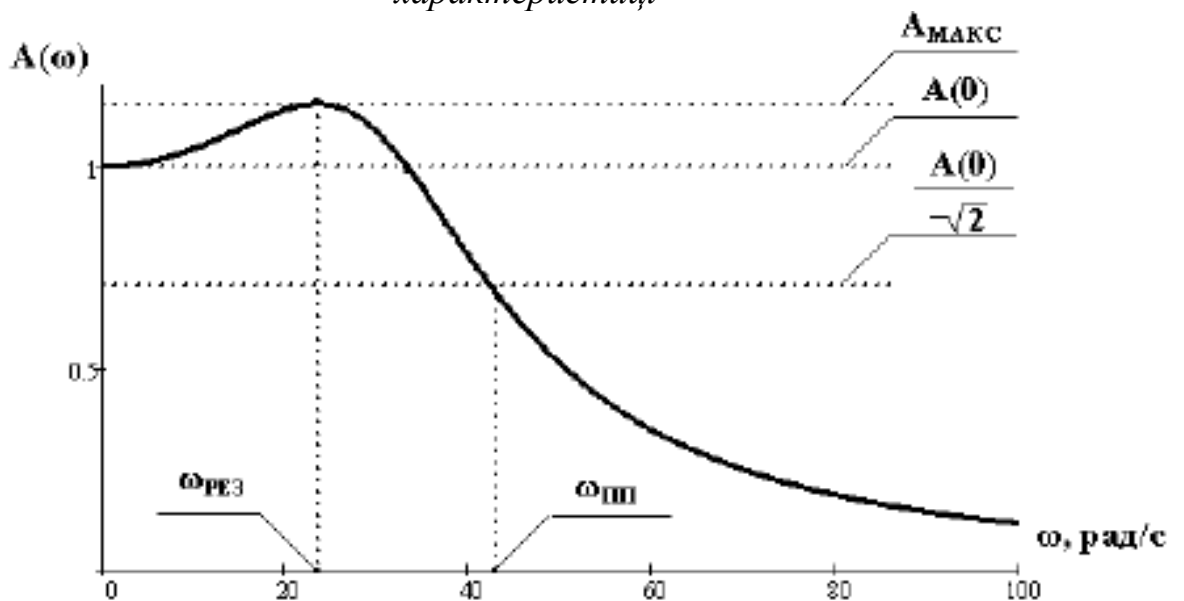


Рис. П2. Показники якості динаміки ЕМС, обумовлені по амплітудно-частотним характеристикам

Існує кілька методів розв'язання нелінійних рівнянь [13, 15, 16]. Перелічимо їх:

1. Метод відділення корінь.
2. Метод дихотомії.
3. Метод дотичних.
4. Метод січних.

Перед початком розв'язання нелінійних рівнянь рекомендується ознайомитися з літературою, присвяченій перерахованим вище методам.

Вирішувати нелінійні рівняння зручно з використанням математичних пакетів, наприклад MathCAD, Maple, Matlab, або мов програмування, таких як Pascal або C++ [14, 17-24].

Метод відділення корінь

Нехай нелінійне рівняння записується як $f(x)=0$, де x - змінна, а $f(x)$ - безперервна функція. Розв'язаннями нелінійного рівняння будуть всі значення змінної x , при підстановці яких у рівняння останнє перетворюється в тотожність.

Існує два різновиди цього методу: графічний і табличний. Якщо їсти можливість побудувати графік функції $f(x)$ з використанням масштабної сітки по осях абсцис й ординат, то розв'язання нелінійного рівняння знаходять у крапках перетинання графіка функції $f(x)$ з віссю абсцис.

При табличному методі графік функції $f(x)$ будувати не обов'язково, але потрібно заповнити таблицю, у якій значенням змінної x , узятим з рівними інтервалами, відповідають значення функції $f(x)$, що змінюють знак не менш одного разу на розглянутому інтервалі.

Розв'язаннями нелінійного рівняння вважаються ті значення змінної x , в околиці яких функція $f(x)$ міняє знак.

Метод дихотомії

Як показано на мал. П1, перехідний процес закінчується в момент часу $t = t_{пп}$, коли графік перехідного процесу вихідної напруги $U(t)$ ФНЧ останній раз входить у зону припустимих відхилень $\pm 5\%$ від сталого значення $U_{уст}$, а саме, при перетинанні лінії рівня $1.05 \cdot U_{уст}$. Введемо функцію помилки (рис. П3)

$$\Delta U(t) = U(t) - 1.05 \cdot U_{уст}.$$

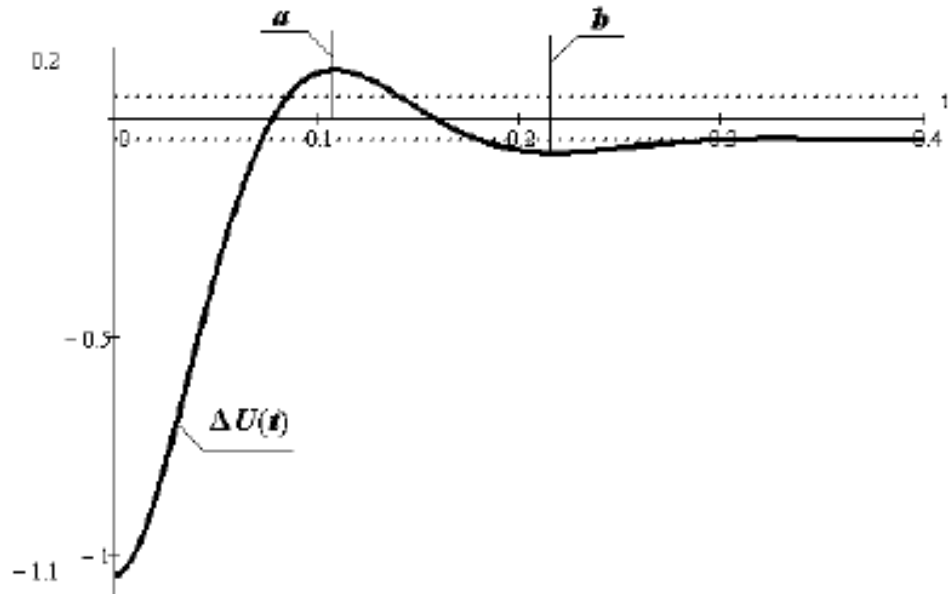


Рис. ПЗ. Графік функції помилки для методу дихотомії

$\Delta := 0.000001$

```

tIII :=
| a ← 0.11
| b ← 0.22
| while |b - a| ≥ Δ
|   | tIII ← (a + b) / 2
|   | a ← tIII if sign(ΔU(tIII)) = sign(ΔU(a))
|   | b ← tIII otherwise
| tIII

```

$t_{III} = 0.159$

Рис. П4. Програма в MathCAD для методу дихотомії

Функція помилки $\Delta U(t)$ при $t = t_{III}$ міняє знак з позитивного на негативний. На цій властивості засноване розв'язання нелінійного рівняння $\Delta U(t) = 0$ методом дихотомії.

Вихідними даними для цього методу служать:

- аналітичне вираження для функції помилки $\Delta U(t)$,
- початкове значення $a = 0.11$ тимчасового інтервалу для пошуку кореня нелінійного рівняння,
- кінцеве значення $b = 0.22$ тимчасового інтервалу для пошуку кореня нелінійного рівняння,
- точність шуканого розв'язання $\Delta = 0.000001$.

Програма для розв'язання нелінійного рівняння методом дихотомії в MathCAD наведена на мал. П4. У результаті розв'язання нелінійного рівняння методом дихотомії одержуємо $t_{III} = 0.159$ с.

Метод дотичних

Для знаходження кореня нелінійного рівняння методом дотичних (мал. П5) варто вибрати початкове наближення на такій ділянці, де знак другої похідної функції помилки $\Delta U(t)$ постійний.

Виберемо початкове наближення $t_0 = 0.12$ с.

Для похідної від функції помилки $\Delta U(t)$ рекомендується ввести власну функцію (мал. 6).

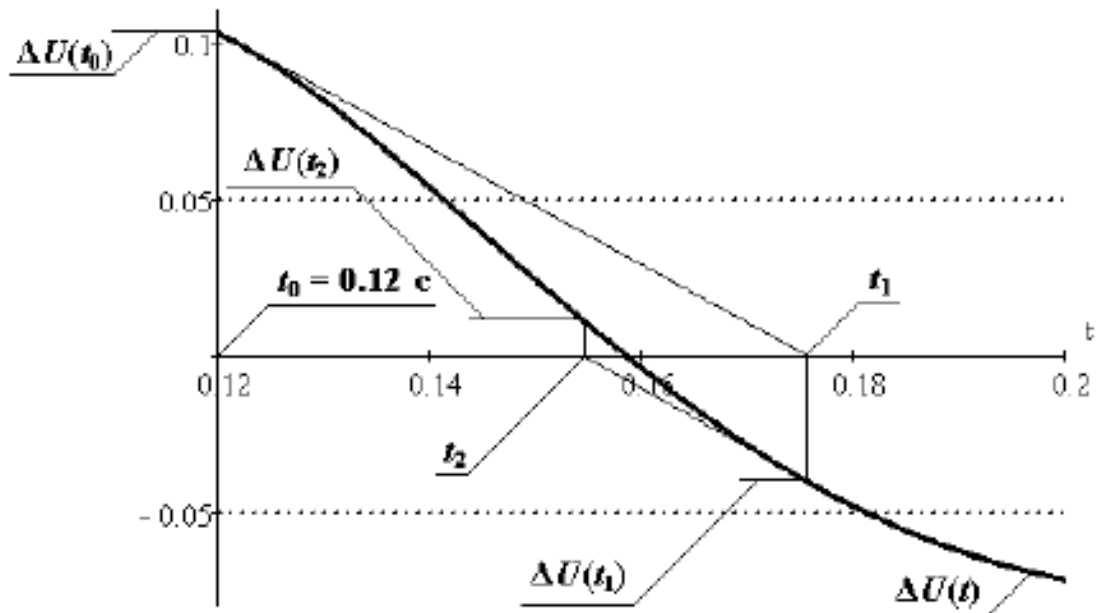


Рис. П5. Графік функції помилки для методу дотичних

У випадку якщо результат, отриманий методом січних (мал. П6) сильно відрізняється від наближеного розв'язання, отриманого графічним методом, то рекомендується повторити обчислення при іншому початковому наближенні, більше близькому до шуканого кореня.

```

DΔU(t) :=  $\frac{d}{dt} \Delta U(t)$ 
Δ := 0.000001
t_III :=  $\left| \begin{array}{l} t_0 \leftarrow 0.12 \\ t_N \leftarrow t_0 - \frac{\Delta U(t_0)}{D\Delta U(t_0)} \\ \text{while } |t_0 - t_N| \geq \Delta \\ \quad \left| \begin{array}{l} t_0 \leftarrow t_N \\ t_N \leftarrow t_0 - \frac{\Delta U(t_0)}{D\Delta U(t_0)} \end{array} \right. \\ t_N \end{array} \right.$ 
t_III = 0.159

```

Рис. П6. Програма в MathCAD для методу дотичних

Як видно з мал. П4 і П6 результати, отримані методом дихотомії й методом дотичних, збігаються $t_{пп} = t_{пп1} = 0.159$ с.

Метод січних

Для випадку, коли є два близьких по величині початкові наближення t_0 й t_1 , можна замість методу дотичних скористатися методом січних (мал. П7).

Нехай початкові наближення становлять $t_0 = 0.185$ с и $t_1 = 0.17$ с.

Складемо програму в MathCAD для визначення кореня нелінійного рівняння методом січних (мал. П8).

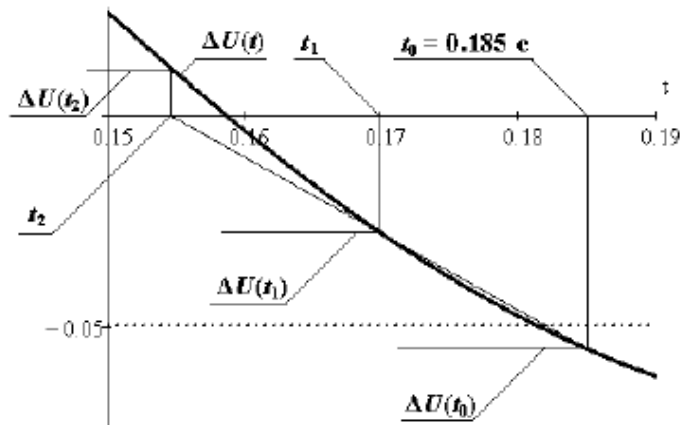


Рис. П7. Графік функції помилки для методу січних

```

 $\Delta := 0.000001$ 
 $t_{\text{пп2}} :=$ 
   $t0 \leftarrow 0.185$ 
   $t1 \leftarrow 0.17$ 
  while  $|t - t1| \geq \Delta$ 
     $t \leftarrow t1$ 
     $t1 \leftarrow t1 - \frac{t1 - t0}{\Delta U(t1) - \Delta U(t0)} \cdot \Delta U(t1)$ 
     $t0 \leftarrow t$ 
   $t0$ 
 $t_{\text{пп2}} = 0.159$ 

```

Рис. П8. Програма в MathCAD для методу січних

Як видно з мал. П4 і П8 результати, отримані методом дихотомії й методом січних, збігаються $t_{\text{пп}} = t_{\text{пп2}} = 0.159$ с.