



**Національна академія наук України
Інститут електродинаміки**

**Особливості розрахунку напівпровідникових
перетворювачів постійної напруги методом усереднення
в просторі станів на основі теорем Лагранжа**

**РУДЕНКО ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ,
д.т.н., пров.н.с.**

Відділ транзисторних перетворювачів

Київ - 2023

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів у перетворювачах

Система диференціальних рівнянь, що описують процеси в перетворювачі на n інтервалах постійності структури

Розв'язок вихідної системи рівнянь у часовій області на n інтервалах постійності структури

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(t) \\ \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(t) \\ \dots \\ \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_n \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_n \mathbf{u}(t) \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}_1(t) = F_1(a_{ij}^{(1)}, b_{ij}^{(1)}, t) \\ \mathbf{x}_2(t) = F_2(a_{ij}^{(2)}, b_{ij}^{(2)}, t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_n(t) = F_n(a_{ij}^{(n)}, b_{ij}^{(n)}, t) \end{array} \right. \rightarrow$$

Інтегральні характеристики:

середні значення

$$\mathbf{X}_{cp} = \Psi(F_1, F_2 \dots F_n)$$

діючі значення

$$\mathbf{X}_d = \Theta(F_1, F_2 \dots F_n)$$

коефіцієнт пульсацій

$$K_{II} = \Phi(F_1, F_2 \dots F_n)$$

Особливості традиційних методів аналізу:

- необхідність розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують процеси, з використанням трудомістких процедур та перетворень;
- потреба додаткових розрахунків та перетворень для визначення інтегральних характеристик перетворювача (середні, діючі значення, пульсації та інш.);
- неможливість аналітичного розрахунку внутрішніх параметрів перетворювачів при заданих зовнішніх інтегральних характеристиках (зворотній аналіз);
- збільшення трудомісткості при розрахунках багатоінтервальних процесів.

Характеристики основних методів розрахунку напівпровідникових перетворювачів

Назва методу	Основні операції методу
Припасовування	Розв'язання диференціальних рівнянь класичним способом на всіх інтервалах процесу з визначенням сталих інтегрування та граничних умов
Змінних стану	Розв'язання диференціальних рівнянь з визначенням перехідної матриці стану у вигляді нескінченного ряду послідовних інтегралів
Операторні	Розв'язання диференціальних рівнянь за допомогою перетворень Лапласа, пов'язаних з матричними перетвореннями, визначенням зображень, оригіналів, граничних умов
Різницевих рівнянь	Визначення розв'язку диференціальних рівнянь на інтервалах, складання різницевих рівнянь для визначення граничних умов за рекурентними формулами

Метод усереднення на основі теорем Лагранжа.

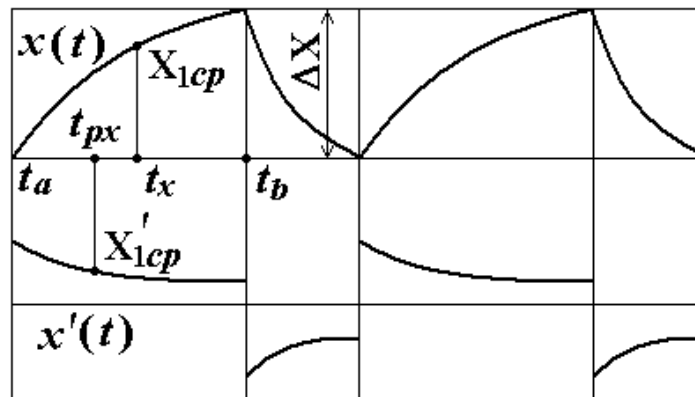
Теорема Лагранжа про середні значення функцій на інтервалах безперервності

1. Середнє значення функції X_{cp} на інтервалі безперервності дорівнює миттєвому значенню цієї функції $\mathbf{x}(t_x)$ у момент часу (t_x) , що належить даному інтервалу:

$$\mathbf{x}_{cp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} \mathbf{x}(t) dt = \mathbf{x}(t_x)$$

2. Середнє значення похідної функції \mathbf{x}'_{cp} на інтервалі безперервності дорівнює миттєвому значенню похідної цієї функції $\mathbf{x}'(t_{px})$ у момент часу t_{px} , що належить даному інтервалу:

$$\mathbf{x}'_{cp} = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} \mathbf{x}'(t) dt = \frac{\mathbf{x}(t_b) - \mathbf{x}(t_a)}{(t_b - t_a)} = \mathbf{x}'(t_{px})$$



$$\mathbf{x}(t_b) - \mathbf{x}(t_a) = \Delta \mathbf{x}$$

$$(t_b - t_a) = \Delta t$$

Розрахунок методом усереднення на основі теорем Лагранжа при двохінтервальному процесі у перетворювачі

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}'_{1cp} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_{1cp} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_{1cp} \\ \mathbf{x}'_{2cp} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_{2cp} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_{2cp} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}(t_b) - \mathbf{x}(t_a) = \Delta \mathbf{x} \\ (t_b - t_a) = \Delta t \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta \mathbf{x}_1}{\Delta t_1} = \mathbf{A}_1^* \mathbf{x}_{1cp} + \mathbf{B}_1^* \mathbf{u}_{1cp} \\ \frac{\Delta \mathbf{x}_2}{\Delta t_2} = \mathbf{A}_2^* \mathbf{x}_{2cp} + \mathbf{B}_2^* \mathbf{u}_{2cp} \end{array} \right.$$

\mathbf{A}_1^* , \mathbf{A}_2^* , \mathbf{B}_1^* , \mathbf{B}_2^* - матриці, члени яких відповідають членам матриць \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 із точністю до знаку у відповідності зі знаком приросту функцій вектора змінних станів $\Delta \mathbf{x}$ і законами Кірхгофа для контурів схем заміщення на інтервалах.

У двоінтервальному режимі $\Delta \mathbf{x}_1 = \Delta \mathbf{x}_2 = \Delta \mathbf{x}$ $\mathbf{x}_{1cp} = \mathbf{x}_{2cp} = \mathbf{x}_{cp}$ $\mathbf{u}_{1cp} = \mathbf{u}_{2cp} = \mathbf{u}_{cp}$

Математична модель у вигляді алгебраїчних рівнянь

Пошукові параметри відносно базису
незалежних змінних системи рівнянь

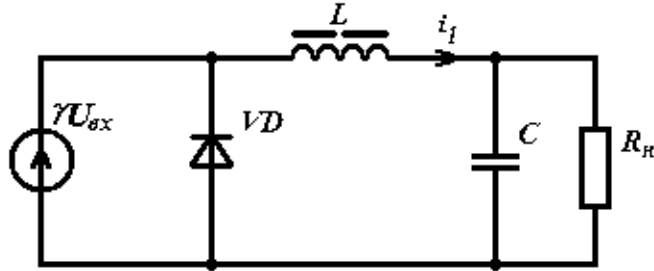
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta t_1} = \mathbf{A}_1^* \mathbf{x}_{cp} + \mathbf{B}_1^* \mathbf{u}_{cp} \\ \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta t_2} = \mathbf{A}_2^* \mathbf{x}_{cp} + \mathbf{B}_2^* \mathbf{u}_{cp} \end{array} \right. \quad \mathbf{x}_{cp} = (\mathbf{A}_1^*)^{-1} \times \left[\frac{\Delta \mathbf{x}}{T_i} - \mathbf{B}_1^* \mathbf{u}_{cp} \right] \quad \Delta \mathbf{x} = \mathbf{G}^{-1} \times \mathbf{r}$$

$$\mathbf{G} = \left(\frac{T - T_i}{T_i} \right) \mathbf{A}_2^* (\mathbf{A}_1^*)^{-1} - \mathbf{I}$$

$$\mathbf{r} = (T - T_i) \mathbf{A}_2^* (\mathbf{A}_1^*)^{-1} \times (\mathbf{B}_1^* - \mathbf{B}_2^*) \mathbf{u}_{cp}$$

Порівняння результатів розрахунку за допомогою методів на основі усереднення в просторі станів

Структурна схема перетворювача



$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & kT \leq t \leq kT + T_i, \\ 0, & kT + T_i \leq t \leq (k+1)T \end{cases}$$

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + u_C = \gamma U_{ex} \\ C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n} = i_1 \end{cases}$$

Умова існування режиму переривчастих струмів

$$I_H = I_{Lcp} < \Delta I_L / 2$$

Припущення:
миттєвість комутації
перемикаючих елементів та
їх заміна S моделями

Двохінтервальний процес в режимі безперервного струму дроселя при тривалості інтервалу накопичення T_i		
Розрахункові параметри	Метод Мідлбрука	Новий метод
Середні складові змінних станів I_{Lcp} , U_{Ccp}	$I_{Lcp} = (U_{ex} / R_n)(T_i / T)$ $U_{Ccp} = I_{Lcp} R_n$	
Прирости функцій змінних станів ΔI_L , ΔU_C	Немає визначення	$\Delta I_L = \frac{U_{ex}}{L} \frac{(T - T_i)T_i}{T}$ $\Delta U_C = 0$

Триінтервальний процес в режимі переривчастого струму дроселя при тривалості інтервалу накопичення T_i		
Розрахункові параметри	Аналітичне визначення	
	Метод Мідлбрука	Новий метод
Тривалість інтервалу віддачі енергії	Немає визначення	$T_B = \phi T_i / 2$ $\phi = \sqrt{1 + 8TL / R_n T_i^2} - 1$
Середні складові змінних станів I_{Lcp} , U_{Ccp}		$I_{Lcp} = (2 / (2 + \phi))(U_{ex} / R_n)$ $U_{Ccp} = I_{Lcp} R_n$
Прирости змінних станів ΔI_L , ΔU_C		$\Delta I_L = (\phi / (2 + \phi))(T_i U_{ex} / L)$ $\Delta U_C = 0$

Порівняння трудомісткості алгоритмів розрахунку

Розрахунок інтегральних характеристик змінних станів (середнього значення, величини приросту) на прикладі понижуючого перетворювача в режимі безперервних струмів

Метод припасовування

Новий метод

I. Розв'язання диференціальних рівнянь на інтервалі накопичення

$$i_I(t) = e^{\omega t} (A1 \cos \omega t + A2 \sin \omega t) + E/R$$

$$u_I(t) = E - Le^{\omega t} [(\tau A1 + \omega A2) \cos \omega t + (\tau A2 - \omega A1) \sin \omega t]$$

$$\tau = -1/2RC \quad \omega = \sqrt{|(1/2RC)^2 - 1/LC|} \quad \text{- результат розв'язання характеристичного рівняння}$$

- Розв'язання двох систем алгебраїчних рівнянь для визначення сталих інтегрування $A1, A2$ із врахуванням початкових умов I_{Io}, U_{Io}

I. Визначення $I_{cp}, \Delta I, U_{cp}, \Delta U$ шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь

$$L \frac{\Delta I}{T_H} = E - U_{cp}$$

$$C \frac{\Delta U}{T_H} = I_{cp} - \frac{U_{cp}}{R}$$

$$L \frac{\Delta I}{T - T_H} = U_{cp}$$

$$C \frac{\Delta U}{T - T_H} = I_{cp} - \frac{U_{cp}}{R}$$

II. Розв'язання диференціальних рівнянь на інтервалі віддачі енергії

$$i_{II}(t) = e^{\omega t} (B1 \cos \omega t + B2 \sin \omega t)$$

$$u_{II}(t) = -Le^{\omega t} [(\tau B1 + \omega B2) \cos \omega t + (\tau B2 - \omega B1) \sin \omega t]$$

- Розв'язання двох систем алгебраїчних рівнянь для визначення сталих інтегрування $B1, B2$ із врахуванням початкових умов $I_{IIo} = i_I(T_H), U_{IIo} = u_I(T_H)$

Кількість обчислювальних операцій: 1

Можливість розрахунку в інших базисах змінних лише завдяки вибору відповідного базису

III. Визначення початкових значень I_{Io}, U_{Io} за умови періодичності

процесу $i_{II}(T - T_H) = I_{Io}, u_{II}(T - T_H) = U_{Io}$ шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь

IV. Визначення $I_{cp}, \Delta I, U_{cp}, \Delta U$ шляхом розрахунку функцій

$$i_I(t), u_I(t), i_{II}(t), u_{II}(t)$$

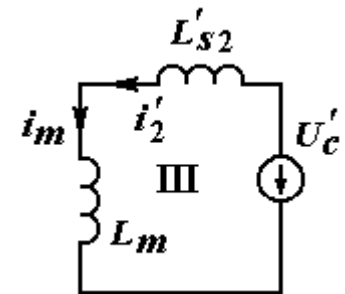
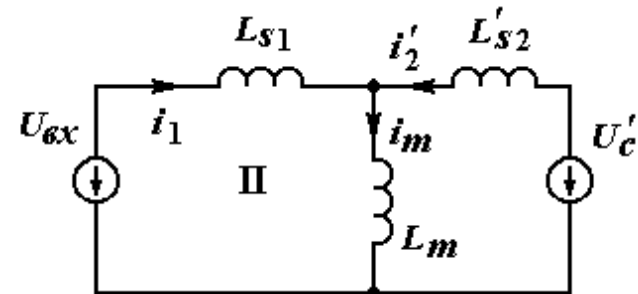
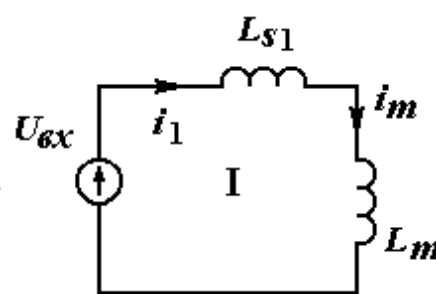
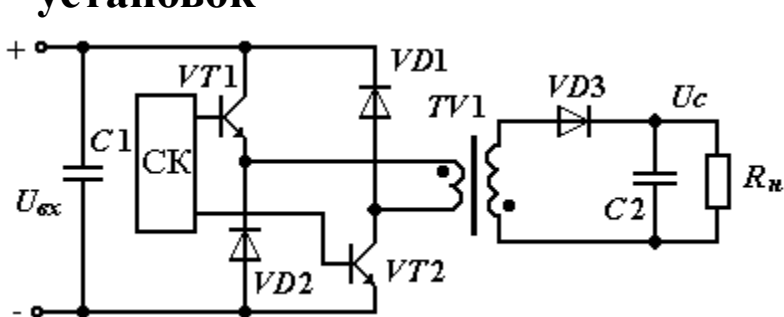
Кількість обчислювальних операцій: 6

Одиниця трудомісткості – процедура розв'язання системи алгебраїчних рівнянь

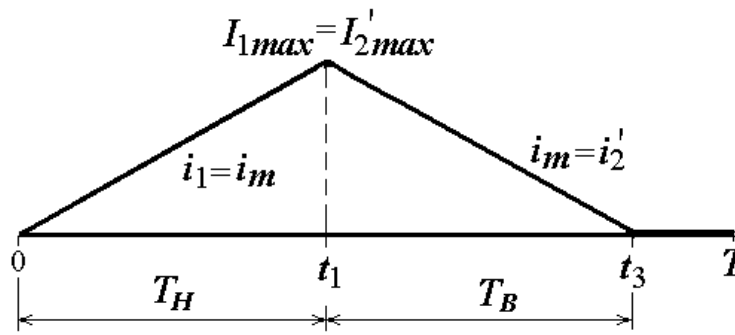
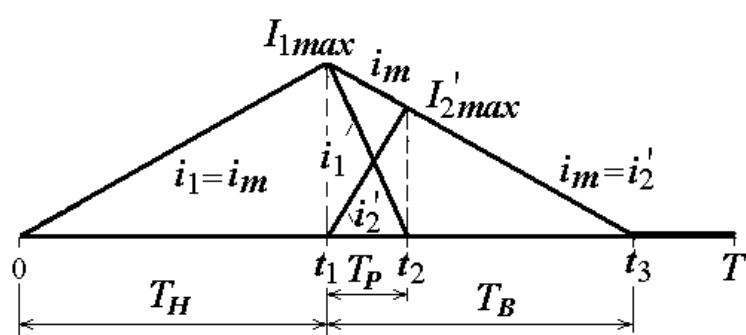
Застосування методу усереднення на основі теорем Лагранжа при дослідженнях в рамках науково-дослідних робіт Інституту електродинаміки НАН України

(Теми Джерело, Сігма Ш та інші)

1. Розрахунок процесів в перетворювачах з високопотенціальними трансформаторами для регуляторів анодного струму електронно-променевих установок



Структура силової частини зворотноходового перетворювача, еквівалентні схеми заміщення та часові діаграми процесів



наявність додаткового інтервалу перерозподілу енергії розсіювання

ідеальний варіант за відсутності полів розсіювання

Математична модель зворотноходового перетворювача у формі диференціальних рівнянь

$$(L_m + L_{S1}) \frac{di_1}{dt} = U_{BX}$$

$$L_{S1} \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_m}{dt} = -U_{BX}$$

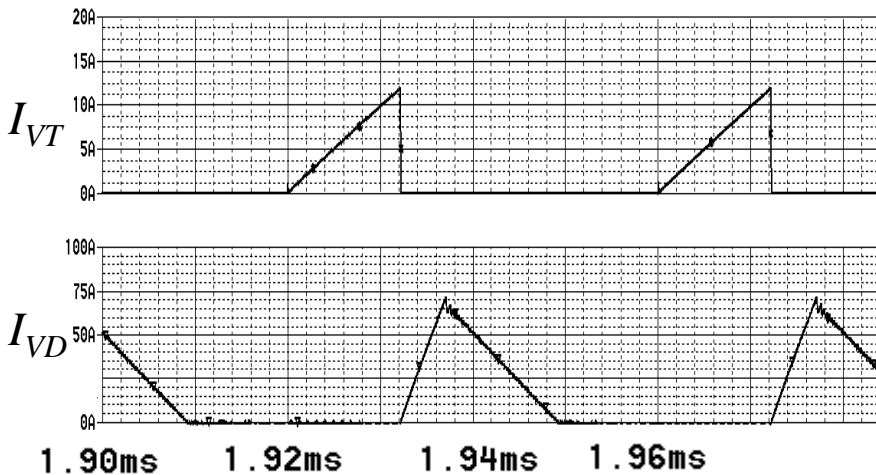
$$L_m \frac{di_m}{dt} + \frac{L'_{S2}}{K_{TP}} \frac{di_2}{dt} = -(U_C + U_D)K_{TP}$$

$$\frac{(L_m + L'_{S2})}{K_{TP}} \frac{di_2}{dt} = -(U_C + U_D)K_{TP}$$

$$I_{m2} \frac{(t_3 - t_1)}{2T} = I_H$$

індуктивність розсіювання

$$L_{S1} = L'_{S2} = \frac{L_S}{2}$$



Результати імітаційного моделювання

Математична модель з усередненими змінними

$$L_m \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\Delta I_1}{T_H} = U_{BX}$$

$$L_m \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\Delta I_1}{T_P} - L_m \frac{\Delta I_2}{K_{TP} T_P} = U_{BX}$$

$$L_m \frac{\Delta I_1}{T_P} - L_m \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\Delta I_2}{K_{TP} T_P} = (U_C + U_D)K_{TP}$$

$$L_m \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\Delta I_2}{K_{TP} (T_B - T_P)} = (U_C + U_D)K_{TP}$$

Незалежні змінні

$$\Delta I_2 \frac{T_B}{2T} = I_H$$

$\Delta I_1, \Delta I_2, U_C, T_P, T_B$

$$\alpha = \frac{L_S}{L_m}$$

вхідна напруга

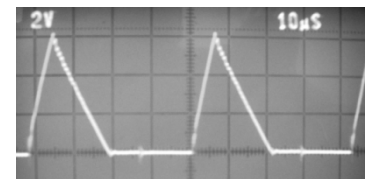
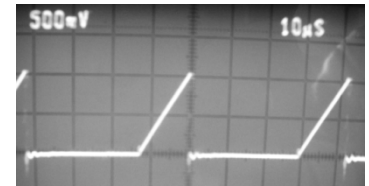
$$U_{vx} = 300 \text{ В}$$

період комутації

$$T = 40 \text{ мкс}$$

індуктивність розсіювання

$$L_S = 130 \text{ мкГн}$$

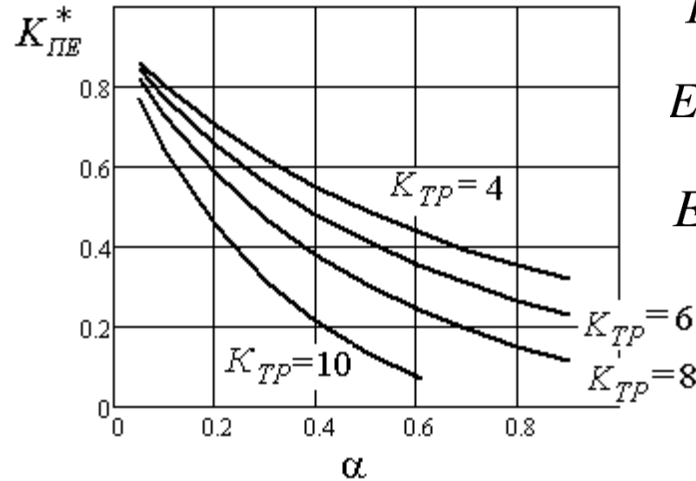


Результати експериментальних досліджень

Характеристики зворотноходового перетворювача

Параметри процесу при $T_H = 12$ мкс $L_S = 130$ мкГн	Іміт. модел.	Розр. за методом	Експ.
$\Delta I_1, A$	12.9	13.4	13
$\Delta I_2, A$	71,9	71.6	69
$T_P, мкс$	5,3	5.4	5
$T_B, мкс$	18,9	18.6	20
$U_H, В$	19,4	20	19.2
I_H, A	14,6	15	14.4

Графік залежності коефіцієнта передачі енергії від індуктивності розсіювання трансформатора



$$K_{ПЕ}^* = E_H / E_B$$

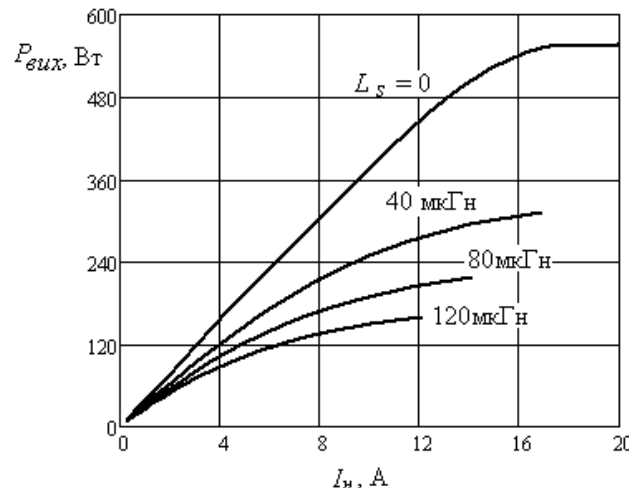
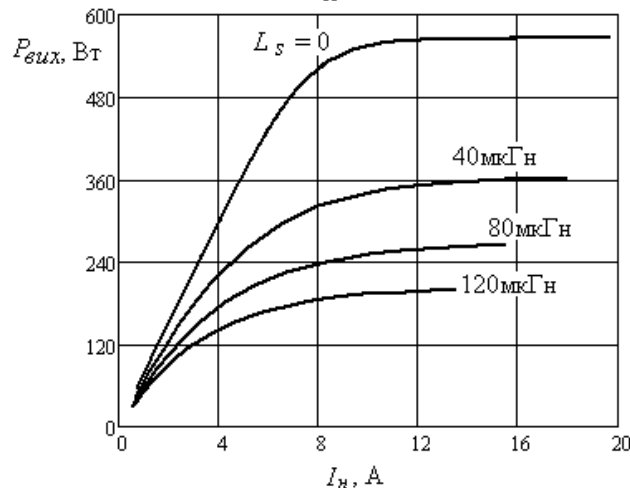
$$E_H = U_{BX} \Delta I_1 T_H / 2$$

$$E_B = U_C \Delta I_2 T_B / 2$$

$K_{TP} = 4$

$K_{TP} = 8$

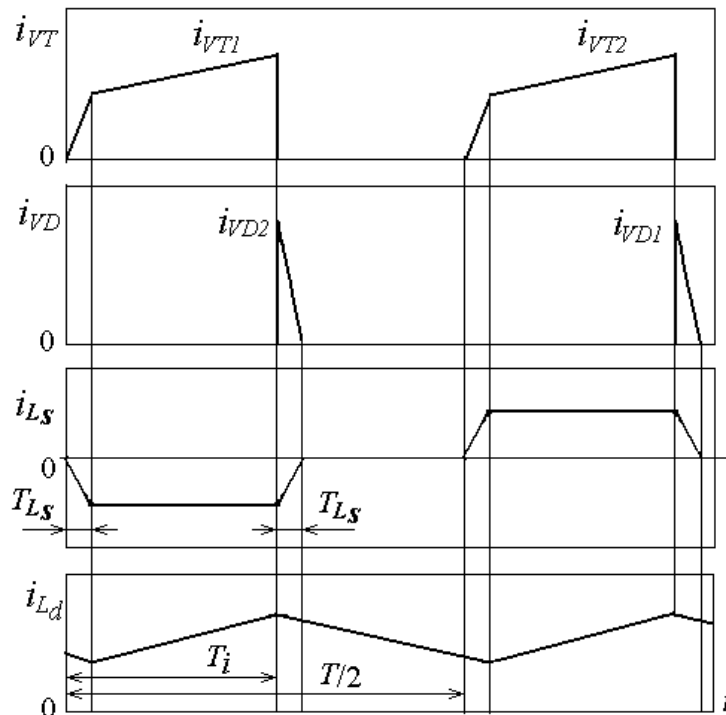
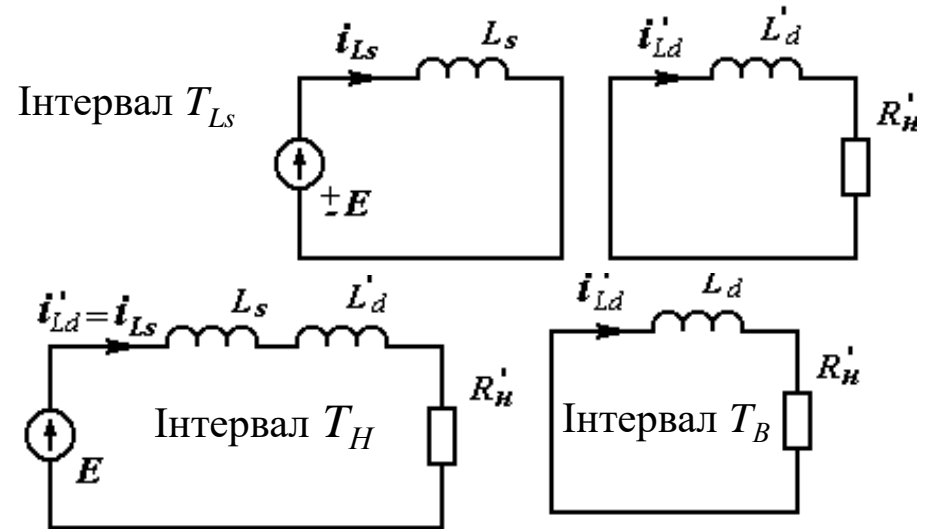
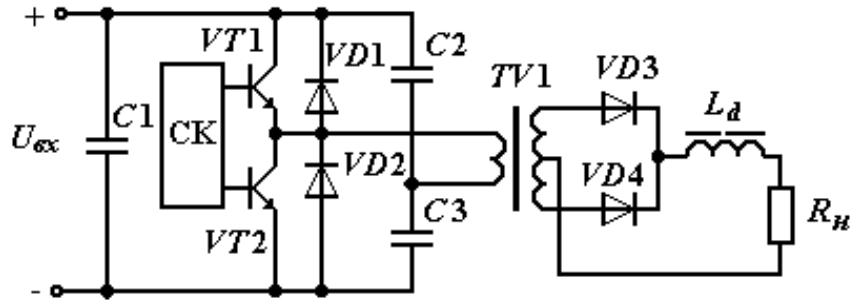
Навантажувальні характеристики перетворювача з урахуванням індуктивності розсіювання та коефіцієнта трансформації трансформатора



$$P_{вих} = U_H \Delta I_2 \frac{T_B}{2T}$$

2. Розрахунок характеристик двотактних перетворювачів з високопотенціальним трансформатором для електронно-променевої установки

Структурна та еквівалентні схеми двотактного перетворювача в керованому режимі



Математична модель з усередненими змінними

$$L_s \frac{\Delta I_{Ls}}{T_{Ls}} = E \quad L_d \frac{\Delta I_{dLs}}{T_{Ls}} = R_n I_{dcp} \quad E = U_{ex}/2$$

$$\left(L_s + L_d K_{TP}^2 \right) \frac{\Delta I_d}{K_{TP} T_H} + K_{TP} R_n I_{dcp} = E$$

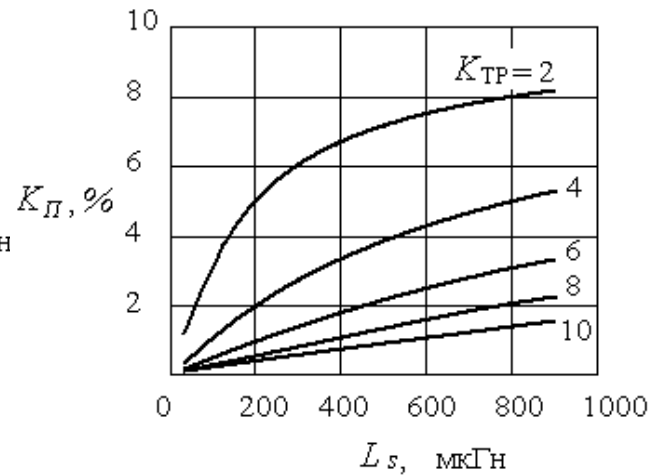
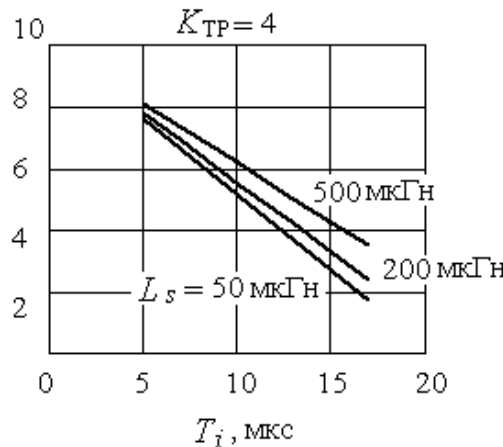
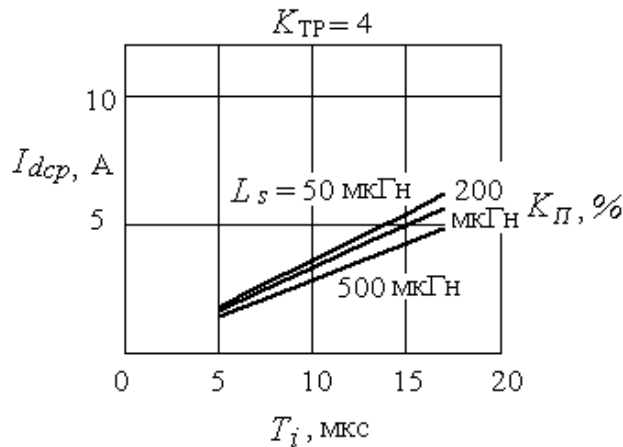
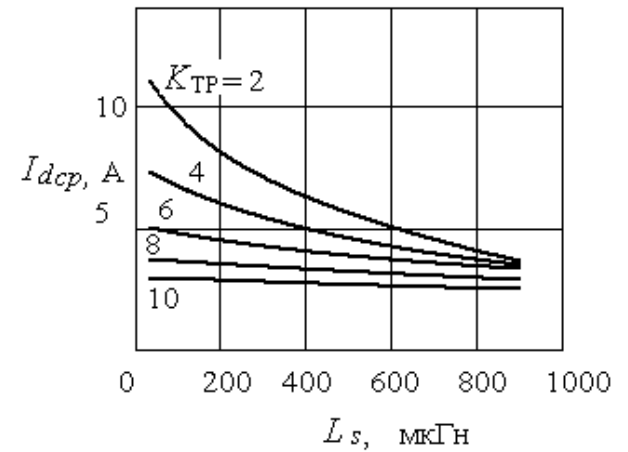
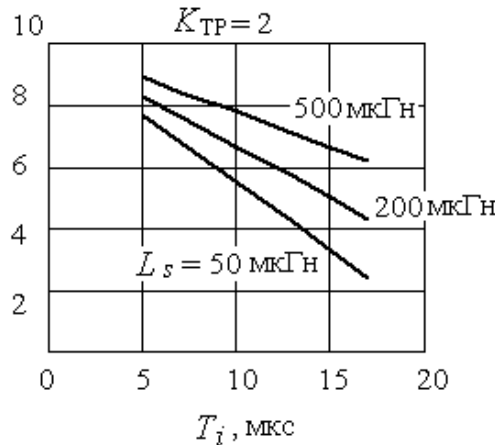
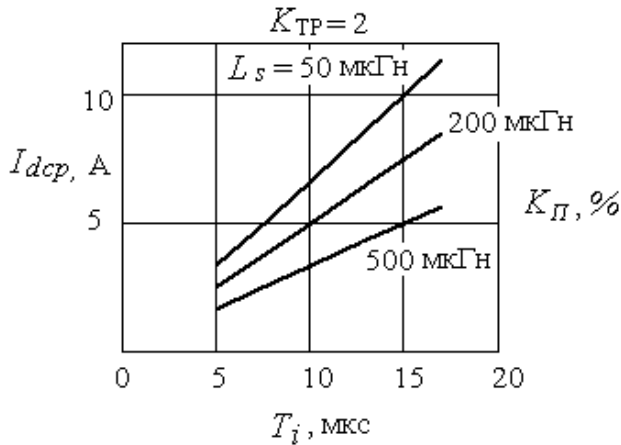
$$L_d \frac{(\Delta I_d - 2\Delta I_{dLs})}{T_B} = R_n I_{dcp} \quad \Delta I_{Ls} = \frac{I_{dcp}}{K_{TP}}$$

$$T_H = T_i - T_{Ls} \quad T_B = T/2 - T_i + T_{Ls}$$

Часові діаграми 8-ми інтервального процесу в перетворювачі з керованим інвертором

Графіки залежності середнього вихідного струму та його коефіцієнта пульсацій двотактного перетворювача від тривалості сигналу керування

Графіки залежності середнього вихідного струму та коефіцієнта пульсацій вихідного струму двотактного перетворювача від індуктивності розсіювання



$U_{BX} = 300 \text{ В}$ $T = 40 \text{ мкс}$ $R_n = 5 \text{ Ом},$ $L_d = 1 \text{ мГн}$

Характеристики двотактного перетворювача в некерованому режимі з урахуванням індуктивності розсіювання та коефіцієнта трансформації трансформатора

Математична модель з усередненими змінними при умові $L_S \ll L_d$

Результат розв'язання системи алгебраїчних рівнянь математичної моделі

$$K_{TP} \left(L_d \frac{\Delta I_d}{T_H} + U_H \right) = \frac{U_{ex}}{2}$$

$$U_H = \frac{U_{ex}}{2K_{TP}} \left(1 - \frac{8L_S I_H}{U_{ex} T K_{TP}} \right)$$

$$P_{вих} = \frac{U_{ex} I_H}{2K_{TP}} \left(1 - \frac{8L_S I_H}{U_{ex} T K_{TP}} \right)$$

$$L_S \frac{\Delta I_{L_S}}{T_B} = E$$

максимальна потужність

припустиме значення L_S , що забезпечує задану вихідну потужність

$$L_d \frac{\Delta I_d}{T_B} = R_H I_{dcp}$$

$$P_{вих\max} = \frac{U_{ex}^2 T}{64 \cdot L_S} \text{ при } I_{екс} = \frac{U_{ex} T K_{TP}}{16 \cdot L_S}$$

$$L_S \leq \frac{U_{ex}^2 T}{64 P_{вих\max}}$$

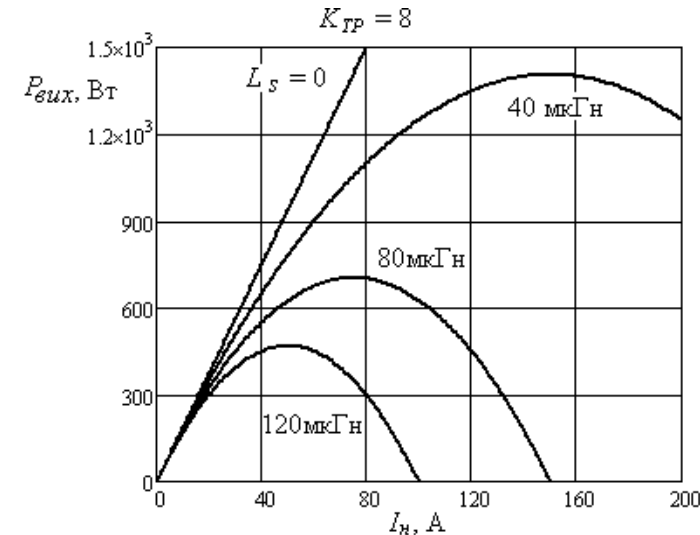
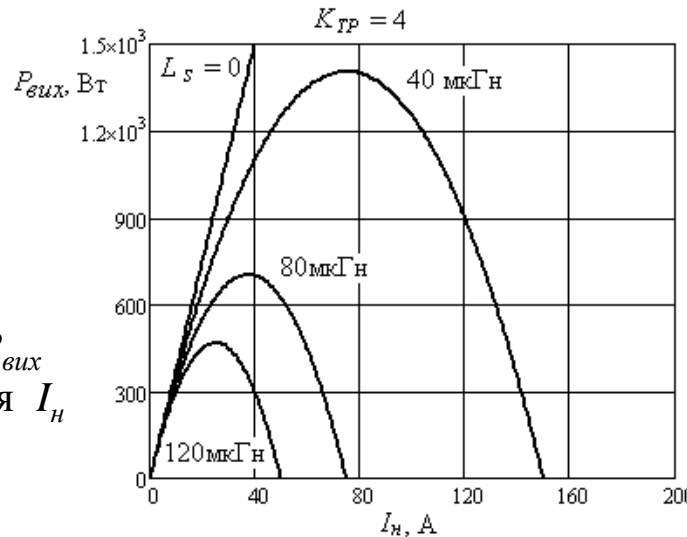
$$\Delta I_{L_S} = 2 \frac{I_{dcp}}{K_{TP}}$$

$$T_B + T_H = T/2$$

Графіки залежності потужності на виході $P_{вих}$ від струму навантаження I_H

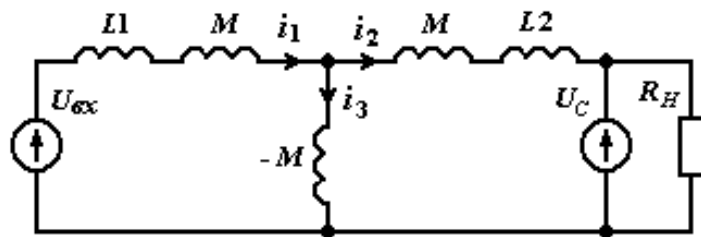
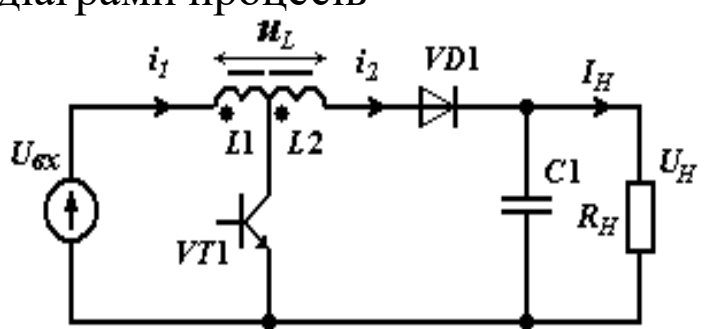
$$U_{вх} = 300 \text{ В}$$

$$T = 40 \text{ мкс}$$

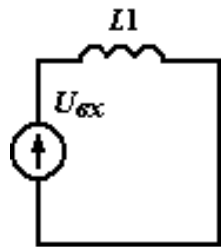
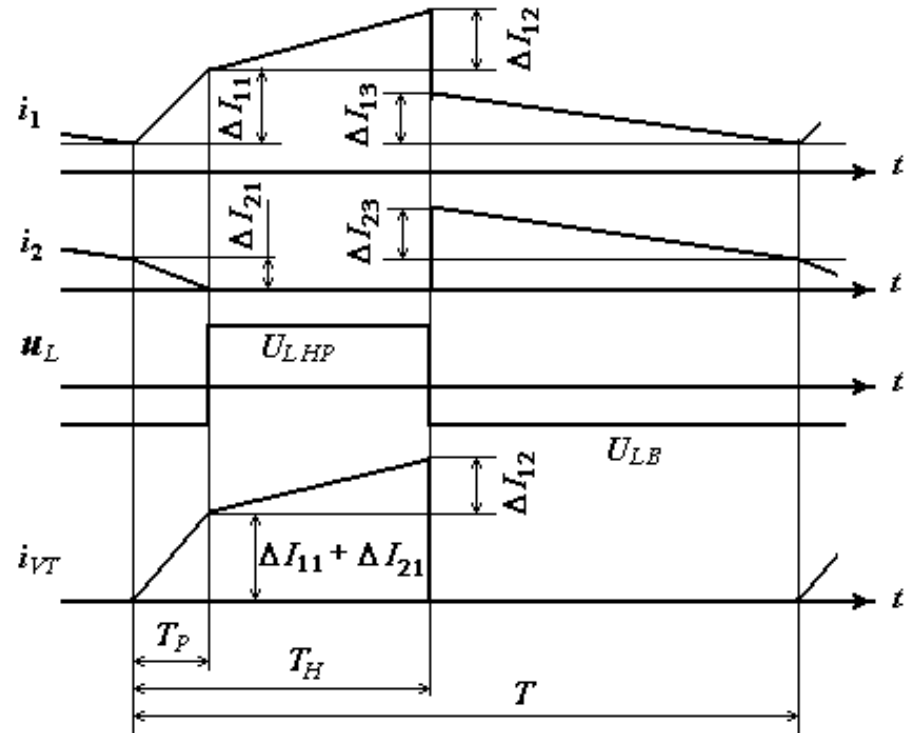


Особливості розрахунку процесів методом усереднення на основі теорем Лагранжа у перетворювачах з магнітопов'язаними елементами

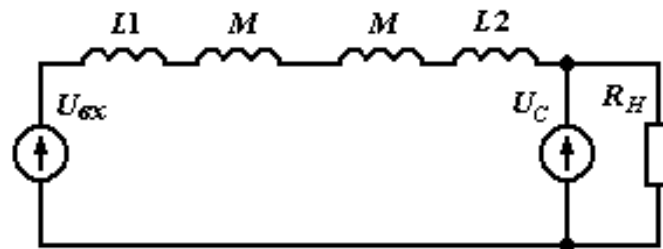
Структурна, еквівалентні схеми перетворювача на інтервалах роботи та часові діаграми процесів



a



б



в

$$M = K_{36} \sqrt{L1L2}$$

Математична модель перетворювача у формі диференціальних рівнянь

$$(L1 + M) \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_3}{dt} = U_{\text{ex}};$$

$$(L1 + M) \frac{di_1}{dt} + (L2 + M) \frac{di_2}{dt} + U_C = U_{\text{ex}}$$

$$L1 \frac{di_1}{dt} = U_{\text{ex}}$$

$$(L1 + L2 + 2M) \frac{di_1}{dt} + U_C = U_{\text{ex}}$$

Математична модель з усередненими змінними

$$L1 \frac{\Delta I_{11}}{T_P} - M \frac{\Delta I_{21}}{T_P} = U_{\text{ex}};$$

$$(L1 + M) \frac{\Delta I_{11}}{T_P} - (L1 + M) \frac{\Delta I_{21}}{T_P} + U_C = U_{\text{ex}}$$

$$L1 \frac{\Delta I_{12}}{T_H - T_P} = U_{\text{ex}}$$

$$-(L1 + L2 + 2M) \frac{\Delta I_{13}}{T - T_H} + U_C = U_{\text{ex}}$$

Додаткові співвідношення між незалежними змінними згідно з балансом енергії в реактивних елементах в усталеному режимі на інтервалах роботи перетворювача за період комутації: вольт-секундні інтеграли функцій напруги на індуктивних накопичувальних елементах та ампер-секундні інтеграли функцій струму конденсаторів у вихідних колах перетворювача дорівнюють нулю за період комутації в усталеному режимі.

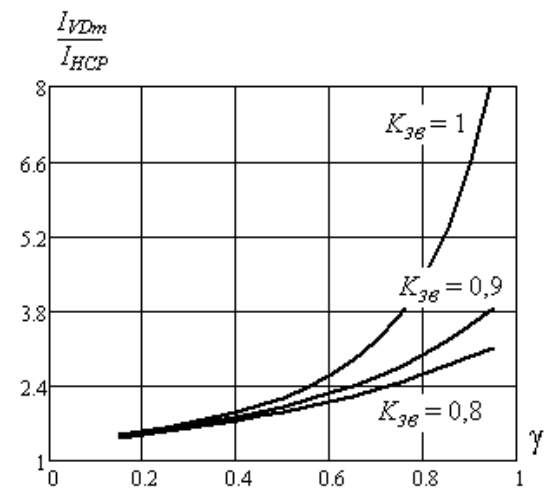
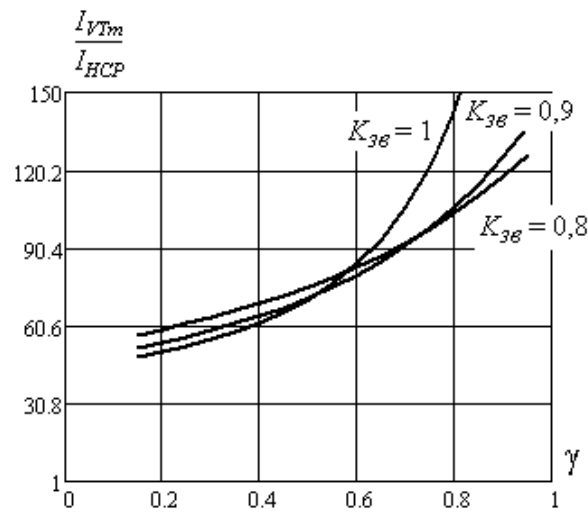
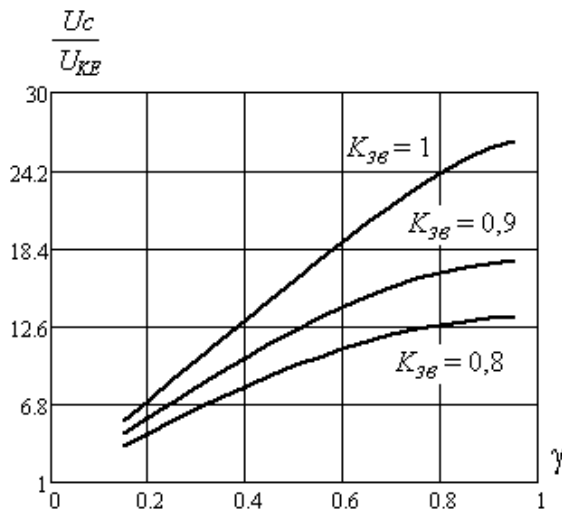
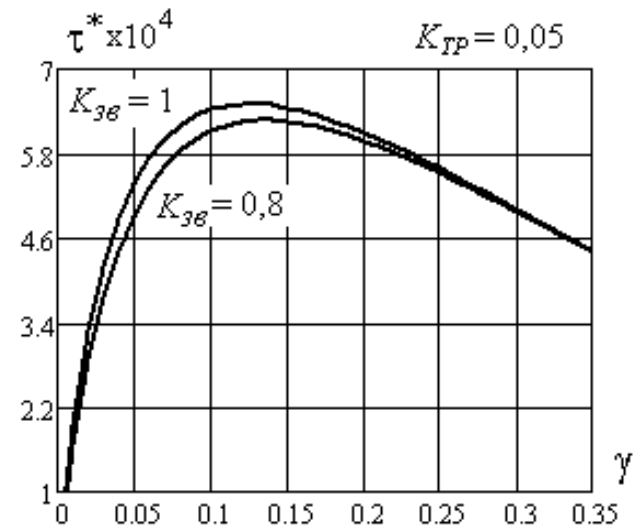
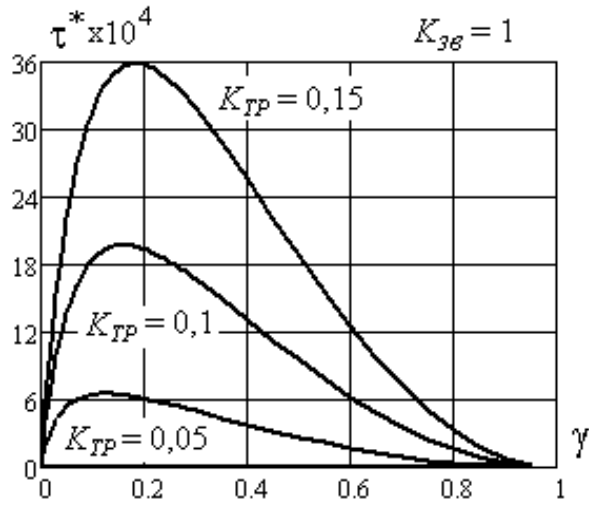
$$U_{LB} T_{BP} = U_{LHP} T_{HP} \quad \longrightarrow \quad (L1 + L2 + 2M) \left(\frac{\Delta I_{13}}{T - T_H} \right) (T - T_H + T_P) = (L1 + M) \Delta I_{12}$$

$$I_{HCP} = U_C / R_H \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta I_{21} T_P}{2T} + \frac{\Delta I_{13} (T - T_H)}{2T} + \frac{\Delta I_{21} (T - T_H)}{T} = \frac{U_C}{R_H}$$

Характеристики перетворювача, розраховані згідно отриманої математичної моделі

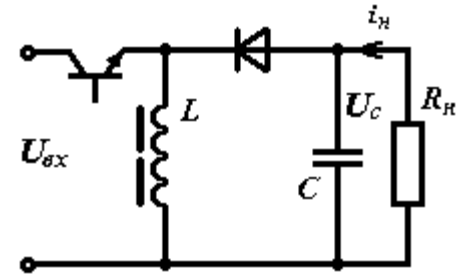
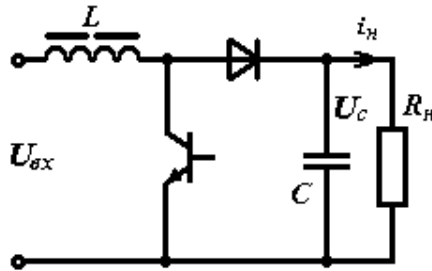
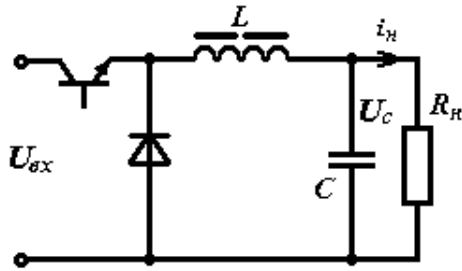
Графічне зображення границь областей режимів безперервної та переривчастої провідності перетворювача та співвідношень для максимальних параметрів напруги та струму у вентилях

$$\tau^* = L1/R_H T$$

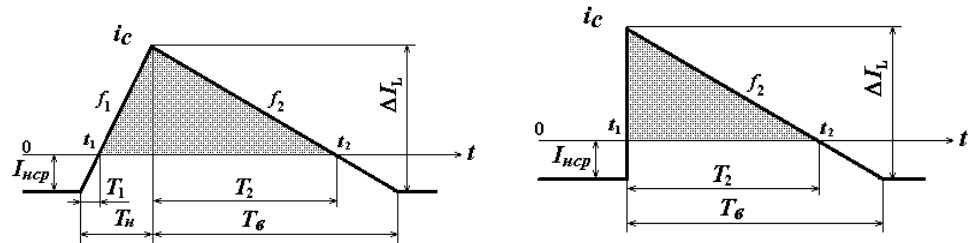
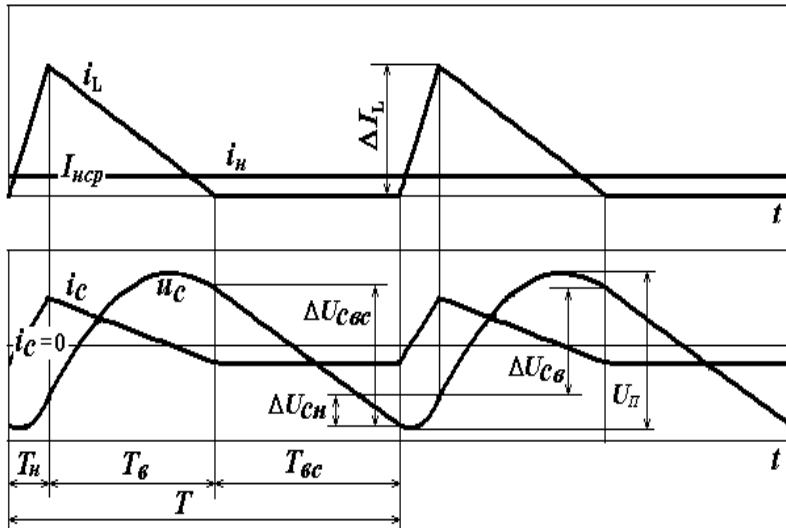


Особливості розрахунку пульсацій вихідної напруги перетворювачів постійної напруги з використанням метода усереднення на основі теорем Лагранжа

Базові структурні схеми перетворювачів постійної напруги



Часові діаграми процесів у вихідному колі перетворювача



$$C = \frac{\Delta Q}{U_{\Pi}} \quad i_C = \frac{dQ}{dt} \quad \Delta Q = \int_{\Delta T} i_C dt$$

$$U_{\Pi} = u(t_2) - u(t_1) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_C dt$$

$$S_{nn} = \frac{1}{2} \left((T_H - T_1)(\Delta I_L - I_{нсп}) + T_2(\Delta I_L - I_{нсп}) \right)$$

$$S_{nni} = \frac{1}{2} T_2 (\Delta I_L - I_{нсп})$$

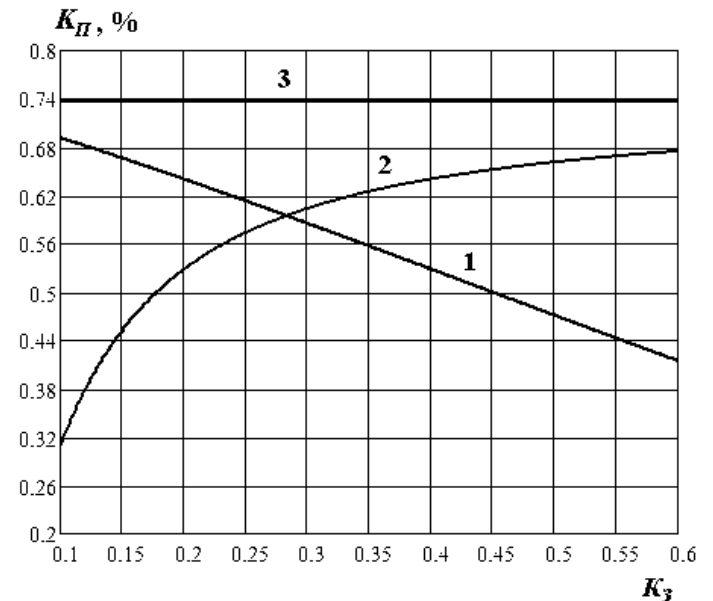
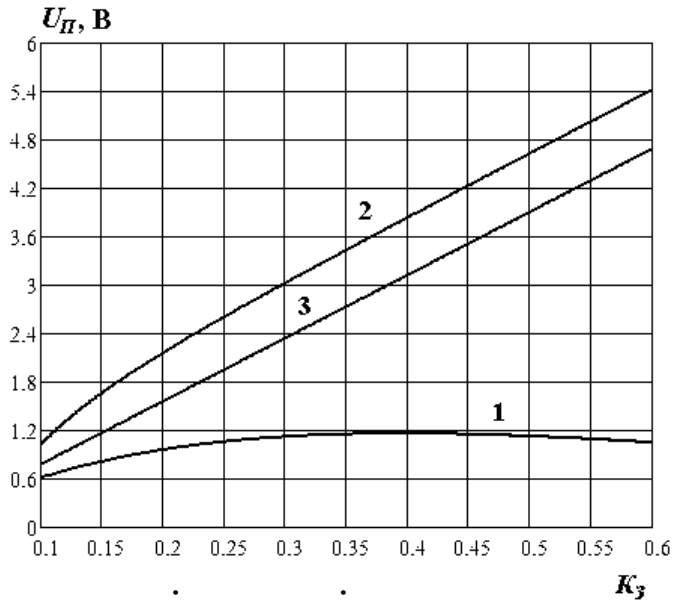
Розроблені аналітичні вирази для розрахунку процесів в режимі переривчастої провідності

Понижувальний перетворювач	Підвищувальний перетворювач	Інвертуючий перетворювач
$\Delta I = \frac{\varphi_I}{2 + \varphi_I} \cdot \frac{T_H U_{\text{вх}}}{L}$	$\Delta I = \frac{T_H U_{\text{вх}}}{L}$	$\Delta I = \frac{T_H U_{\text{вх}}}{L}$
$U_C = \frac{2}{2 + \varphi_I} \cdot U_{\text{вх}}$	$U_C = \frac{\varphi_{II}}{2} \cdot U_{\text{вх}}$	$U_C = \frac{K_3}{\sqrt{2\rho}} \cdot U_{\text{вх}}$
$T_\epsilon = \varphi_I \cdot \frac{T_H}{2}$	$T_\epsilon = \varphi_{II} \cdot \frac{\tau T}{T_H}$	$T_\epsilon = T \sqrt{2\rho}$

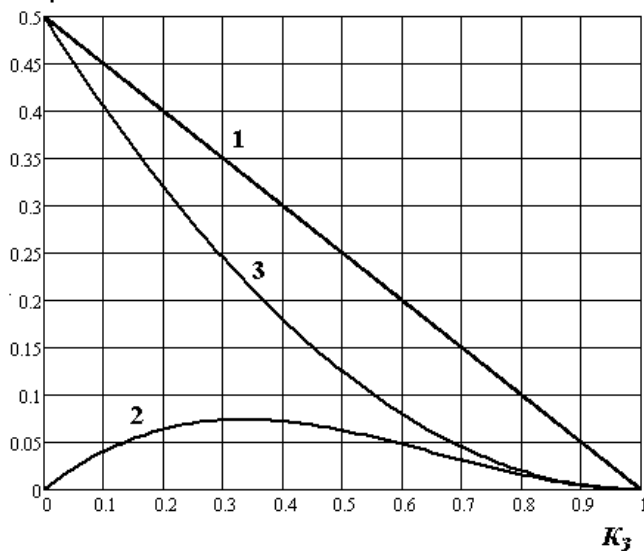
Понижувальний перетворювач	Підвищувальний перетворювач	Інвертуючий перетворювач
$U_{\text{Пнн}} = \frac{U_{\text{вх}} T^2}{LC} \cdot \frac{(\varphi_I K_3 - 2\rho)^2}{4\varphi_I}$	$U_{\text{Пнн}} = \frac{U_{\text{вх}} T}{2K_3^2 R_H C} \left(K_3 - \frac{\varphi_{II} \rho}{2} \right)^2 \varphi_{II}$	$U_{\text{Пнн}} = \frac{U_{\text{вх}} T^2 K_3}{2LC} \left(1 - \frac{\rho}{\sqrt{2\rho}} \right)^2 \sqrt{2\rho}$
$K_{\text{Пнн}} = \frac{T^2 (\varphi_I K_3 - 2\rho)^2 (2 + \varphi_I)}{8LC\varphi_I}$	$K_{\text{Пнн}} = \frac{T(2K_3 - \varphi_{II} \rho)^2}{2K_3^2 R_H C}$	$K_{\text{Пнн}} = \frac{T^2 \rho}{LC} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\sqrt{2\rho}} \right)^2$

$$\varphi_I = \sqrt{1 + 8\rho/K_3^2} - 1 \quad \varphi_{II} = \sqrt{1 + 2K_3^2/\rho} + 1 \quad \rho = \tau/T \quad \tau = L/R_H$$

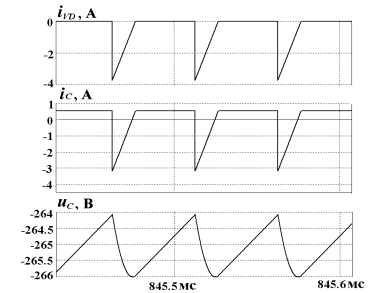
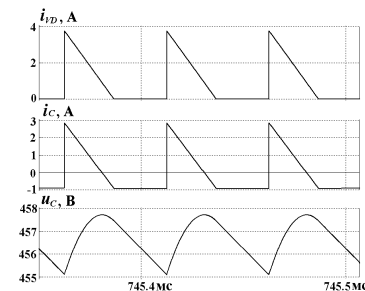
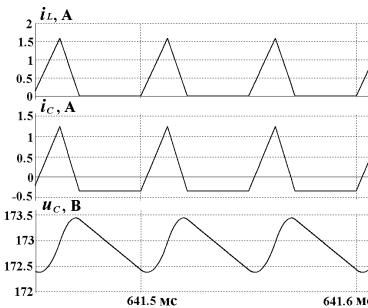
Характеристики перетворювачів в режимі переривчастої провідності



Розраховані границі областей провідності



Результати моделювання



Параметри перетворювачів: $U_{6X} = 300$ В, $L = 1$ мГн, $C = 10$ мкФ, $R_H = 500$ Ом, $T = 50$ мкс.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. На основі використання теорем Лагранжа розроблено новий метод аналізу багатоінтервальних процесів напівпровідникових перетворювачів шляхом визначення середніх значень змінних станів та їх похідних на всіх інтервалах незмінності структури, що дає змогу спростити розрахунок середніх і пульсаційних складових усталених процесів та тривалості інтервалів комутації.

2. Вперше встановлено кількісні зв'язки між параметрами процесів у RLC-схемах заміщення перетворювачів, зокрема, постійними часу і власними частотами контурів на інтервалах незмінності структури та періодом комутації для визначення точності розрахунків, що на порядок уточнює відомі емпіричні обмеження та розширює діапазон застосування методів на основі усереднення в просторі станів.

3. Розроблено нові математичні моделі високочастотних напівпровідникових перетворювачів з високопотенціальними вузлами за усередненими змінними та визначено графо-аналітичні закономірності між параметрами високопотенціальних трансформаторів і інтегральними характеристиками цих перетворювачів, що дає змогу спростити та уточнити розрахунки процесів в них, а також врахувати взаємний вплив процесів у перетворювачах та технологічному навантаженні.

Практичне значення отриманих результатів:

Використання розробленого метода аналізу процесів у напівпровідникових перетворювачах забезпечує скорочення кількості обчислювальних процедур і проміжних перетворень, що підвищує швидкість і точність розрахунків.

Отримані при дослідженнях математичні моделі перетворювачів доповнюють інструментарій для аналізу процесів шляхом усереднення на основі теорем Лагранжа, що дає змогу аналізувати процеси в таких пристроях у режимах як переривчастої, так і безперервної провідності за наявності множинної кількості станів перетворювачів.

Отримані аналітичні формули та математичні моделі дозволяють досліджувати як характеристики перетворювачів, так і їх властивості на етапі проектування, застосовуючи в тому числі методи математичного аналізу.

Запропоновані математичні моделі, методика та рекомендації для розрахунку багатоінтервальних процесів у напівпровідникових перетворювачах використано при розробці джерел електроживлення електромагнітних систем та джерел внутрішнього живлення кіл керування силовими модулями для іонно-плазмового обладнання по нанесенню захисних покриттів за допомогою r_{vd} -технологій.

Розроблено методика розрахунку необхідних значень параметрів схем заміщення високопотенціальних трансформаторів напівпровідникових перетворювачів джерел живлення електровакуумного обладнання, що забезпечує реалізацію максимальної вихідної потужності в діапазоні заданої навантажувальної характеристики.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень знайшли застосування і впровадження в Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України та в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України у вигляді розроблених та створених напівпровідникових високочастотних джерел живлення для плазмових технологій, на підприємстві СВП «Київські ТЕЦ» ПАТ «Київенерго» у вигляді рекомендацій по розрахункам електромагнітних процесів та визначенню ефективних параметрів вузлів в перетворювачах резервного електроживлення.

Отримані результати використано в учбовому процесі кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

Наукові результати роботи рекомендуються для використання при розробці і модернізації напівпровідникових перетворювачів, в електричних колах яких виникають багатоінтервальні електромагнітні процеси, зокрема в джерелах живлення електровакуумного обладнання. Результати рекомендуються також до використання у навчальних програмах кафедр електротехнічного профілю вищих навчальних закладів України.

Дякую за
увагу