

9.2 НЕЛІНІЙНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

9.2.1 Кола з інерційними нелінійними опорами

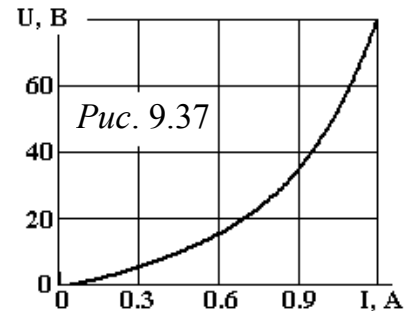
В техніці широко застосовуються нелінійні елементи, зміна параметрів яких обумовлена зміною їх температури під час протікання струму (терморезистори, термістори та ін.) Оскільки температура не може змінитися миттєво (або достатньо швидко), такі елементи зберігають певну інерцію, коли параметри змінюються. Якщо стала часу, яка характеризує швидкість зміни параметрів, набагато більше періоду напруги живлення, то в межах періоду або декількох періодів, коли температура практично незмінна, нелінійний елемент поводить себе так само, як і лінійний. Він не є джерелом вищих гармонік і не спотворює форму струму. Такі елементи називають *інерційними*. Для їх математичного опису використовують характеристики $U(I)$ (ВАХ) для діючих значень.

ЗАДАЧА 9.34. До лампи розжарювання, вольт-амперна характеристика $U(I)$ якої наведена на рис. 9.37, прикладена синусоїдна напруга

$$u(t) = 56,6 \sin(314t) \text{ В.}$$

Визначити діюче значення струму і потужність лампи розжарювання.

Відповідь: 0,95 А, 38 Вт.



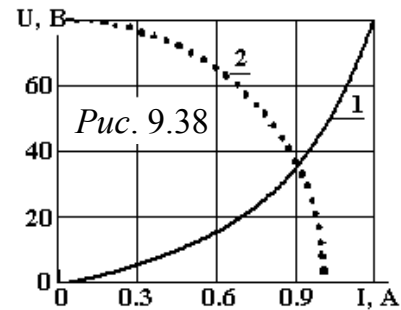
ЗАДАЧА 9.35. До кола, що складається з лампи розжарювання (ВАХ наведена на рис. 9.37), яка з'єднана послідовно з ємністю $x_C = 80 \text{ Ом}$, прикладена синусоїдна напруга $u_0(t) = 113,1 \sin(314t) \text{ В}$.

Визначити струм і напругу лампи розжарювання, перевірити баланс потужностей кола.

Розв'язання

Режим кола синусоїдний. Діюче значення прикладеної напруги $U_0 = 80 \text{ В}$. Вона врівноважується векторною сумою напруг на лампі U і ємності $(I \cdot x_C)$. Це значить, що розв'язання задачі зводиться до графічного розв'язання системи:

$$\begin{cases} U = f(I), & (9.1) \\ U = \sqrt{U_0^2 - (I \cdot x_C)^2}, & (9.2) \end{cases}$$



де формула (9.1) є ВАХ лампи розжарювання, а (9.2) – рівняння кола за другим законом Кірхгофа, яке за суттю є ВАХ джерела, ЕРС якого дорівнює U_0 , а внутрішній опір – x_C .

Графічне розв'язання системи (9.1)-(9.2) наведено на рис. 9.38. Лінія 1 представляє ВАХ лампи, а лінія 2 є графіком другого рівняння системи. Точка їх перетину визначає розв'язання системи і режим нелінійного елемента: $U = 35 \text{ В}$, $I = 0,9 \text{ А}$, для якого кут зсуву фаз між струмом і напругою джерела: $\varphi = -\arctg(x_C \cdot I / U) = -64^\circ$. Активна і реактивна потужності джерела: $P = U_0 \cdot I \cdot \cos \varphi = 31,5 \text{ Вт}$, $Q = U_0 \cdot I \cdot \sin \varphi = -64,8 \text{ вар}$. Потужність лампи: $P = UI = 31,5 \text{ Вт}$, конденсатора: $Q = -I^2 \cdot x_C = -64,8 \text{ вар}$.

Примітка. Підвищити точність графічного розв'язання можна, збільшивши масштаб графіків. За умови використання системи MathCAD можливо також застосування режиму трасування графіків.

ЗАДАЧА 9.36. В умовах задачі 9.35 ємність замінена на активний опір $r = 42 \text{ Ом}$. Визначити струм і напругу лампи розжарювання, перевірити баланс потужностей.

Відповідь: 0,95 A; 40 B; 76 Вт.

ЗАДАЧА 9.37. В умовах задачі 9.34 послідовно з лампою розжарювання увімкнений ідеальний діод. Визначити діюче значення напруги, струму і потужність лампи розжарювання.

Відповідь: 28,3 B; 0,8 A; 22,6 Вт.

9.2.2 Кола з безінерційними нелінійними елементами

Безінерційними називають такі нелінійні елементи, у яких стала часу, яка характеризує швидкість зміни їх параметрів, значно менше періоду напруги живлення. Ці елементи є джерелами вищих гармонік, при цьому форми кривих струму і напруги елементів істотно відрізняються.

Для математичного опису стану електричних кіл з безінерційними нелінійними елементами застосовують характеристики для миттєвих значень:

- для резистивних елементів – ВАХ $u(i)$;
- для індуктивних елементів – ВБАХ $\Psi(i)$;
- для ємнісних елементів – КВХ $q(u)$.

Усталені процеси в нелінійних колах з безінерційними елементами розраховуються графічними, аналітичними, графо-аналітичними методами.

Графо-аналітичні методи доцільно застосовувати для розв'язання задач, коли нелінійні характеристики на робочих ділянках можна замінити відрізками прямих.

Аналітичні методи засновані на аналітичній апроксимації характеристики нелінійного елемента достатньо простою функцією, бажано такою, щоб рівняння Кірхгофа при цьому безпосередньо розв'язувалися. В інших випадках застосовують різні аналітичні методи наближеного розв'язання системи рівнянь Кірхгофа:

- метод гармонійного балансу;
- метод гармонійної лінеаризації;
- методи малого параметра (метод Пуанкаре, метод повільно змінних амплітуд і ін.)

9.2.2.1 Графічний і аналітичний методи розрахунку

ЗАДАЧА 9.38. Графічним методом розрахувати напругу $u(\omega t)$ на нелінійному резисторі з симетричною характеристикою $u(i)$, якщо струм у колі рис. 9.39 змінюється за синусоїдним законом $i = j_k(t) = I_m \sin(\omega t) = 5 \sin(\omega t) \text{ A}$, а ВАХ резистора задана табл. 9.24.

Розкласти криву $u(\omega t)$ в ряд Фур'є, обмежившись першою і третьою гармоніками. Визначити діюче значення напруги на резисторі.

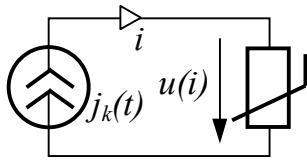


Рис. 9.39

Таблиця 9.24

u, B	0	3,5	16	46,5	104	197,5	336
i, A	0	1	2	3	4	5	6

Розв'язання

Графічний розрахунок кола виконаний на рис. 9.40. Результати розрахунку напруги і струму в різні моменти ωt_p (з кроком 15° для додатної напівхвилі) зведені до табл. 9.25. Для зручності порівняння струму резистора і напруги на ньому крива струму $i(\omega t)$ також наведена на рис. 9.40.

Таблиця 9.25

p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\omega t_p, \text{град}$	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
i_p, A	1,29	2,5	3,54	4,33	4,83	5	4,83	4,33	3,54	2,5	1,29	0
u_p, B	7,13	31,3	77,6	134,9	181,6	197,5	181,6	134,9	77,6	31,3	7,13	0

Розкладемо криву $u(\omega t)$ у ряд Фур'є графо-аналітичним методом. Розрахована крива $u(\omega t)$ задовольняє двом умовам симетрії, тому не містить постійної складової, парних гармонік і косинусних складових. Тобто

$$u(\omega t) = U_{1m} \sin \omega t + U_{3m} \sin 3 \omega t + U_{5m} \sin 5 \omega t + \dots,$$

де $U_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n u_p \sin(k \cdot \omega t_p)$, де $n = 12$ частин на половині періоду.

Після підстановки даних табл. 9.25 одержуємо:

$$U_{1m} = 154,5 B, \quad U_{3m} = -45,32 B, \quad U_{5m} = -1,14 B.$$

З урахуванням перших двох складових ряду Фур'є маємо:

$$u(\omega t) = 154,5 \sin \omega t - 45,32 \sin 3 \omega t B.$$

Діюче значення напруги

$$U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n u_p^2} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{p=1}^n (7,13^2 + 31,3^2 + \dots + 7,13^2 + 0)} = 113,8 B.$$

ЗАДАЧА 9.39. Графічним методом розрахувати струм ідеальної котушки з феромагнітним осердям, якщо вона увімкнена до джерела синусоїдної напруги $u = U_m \cos \omega t$ з діючим значенням $U = 76,4 B$ і частотою $f = 50 \text{ Гц}$. ВБАХ котушки для миттєвих значень задана табл. 9.26.

Таблиця 9.26

$\Psi, Bб$	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
i, A	0	0,092	0,311	0,737	1,44	2,47	3,15	5,9

Розкласти несинусоїдну функцію $i(\omega t)$ в ряд Фур'є, обмежившись першими двома складовими ряду. Розрахувати діюче значення струму I .

Відповідь: $i(\omega t) = 2,81 \sin \omega t - 0,937 \sin 3 \omega t A$; $I = 2,10 A$.

ЗАДАЧА 9.40. Графічним методом розрахувати напругу $u(\omega t)$ варіконда (конденсатора з сегнетоелектриком), якщо він увімкнений до джерела синусоїдного струму $i = I_m \cos(\omega t)$ з діючим значенням струму $I = 4,45 A$ частотою

Рис. 9.40
Див. файл «Album»

$f = 50 \text{ Гц}$. КВХ конденсатора для миттєвих значень задана табл. 9.27.

Таблиця 9.27

$q, \times 10^{-2} \text{ Кл}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U, \text{ В}$	0	3,1	25	84,4	200	391	675

Розкласти несинусоїдну функцію $u(\omega t)$ в ряд Фур'є, обмежившись першими двома складовими. Розрахувати діюче значення U .

Відповідь: $u(\omega t) = 150 \sin \omega t - 50 \sin 3 \omega t \text{ В}$; $U = 111,8 \text{ В}$.

ЗАДАЧА 9.41. Апроксимувати ВАХ нелінійного резистора задачі 9.38 методом обраних точок (табл. 9.24) поліномом $u = a \cdot i + b \cdot i^3$. Аналітичним методом розрахувати напругу на резисторі $u(\omega t)$.

Відповідь: $u = 2i + 1,5i^3$, де $i[\text{А}]$, $u[\text{В}]$; $u = 150,6 \sin \omega t - 46,9 \sin 3 \omega t \text{ В}$.

ЗАДАЧА 9.42. Апроксимувати ВБАХ котушки задачі 9.39 методом обраних точок (табл. 9.26) виразом $i = a \Psi^3$. Аналітичним методом розрахувати її струм.

Відповідь: $i = 92,1 \Psi^3$, де $i[\text{А}]$, $\Psi[\text{Вб}]$, $i = 2,81 \sin \omega t - 0,937 \sin 3 \omega t \text{ А}$.

ЗАДАЧА 9.43. Апроксимувати КВХ конденсатора задачі 9.40 методом обраних точок (табл. 9.27) виразом $u = bq^3$. Аналітичним методом розрахувати напругу на конденсаторі.

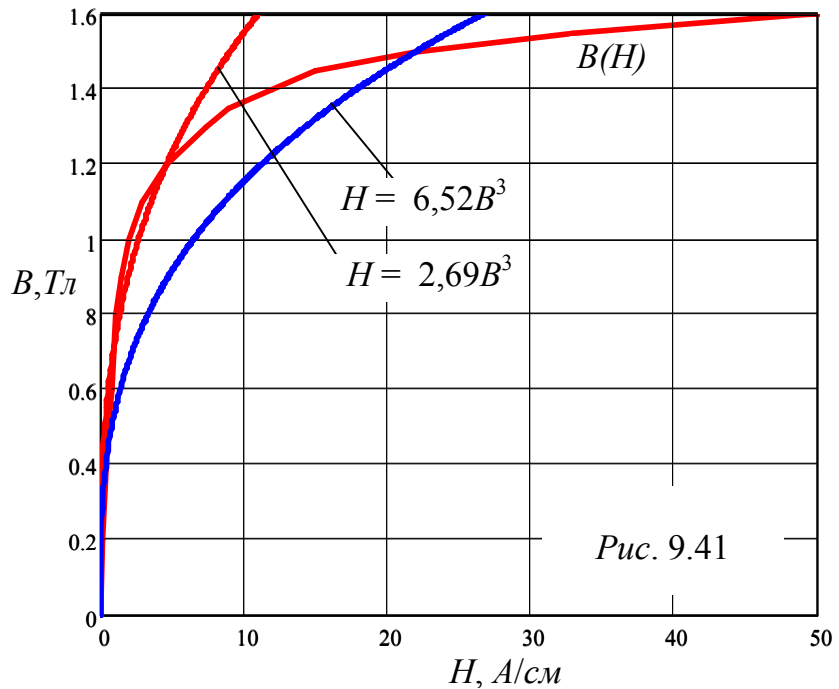
Відповідь: $u = 0,02q^3$, де $q[\text{Кл}]$, $u[\text{В}]$, $u = 150 \sin \omega t - 50 \sin 3 \omega t \text{ В}$.

ЗАДАЧА 9.44. Крива намагнічування електротехнічної сталі 1512 задана табл. 9.28.

Апроксимувати залежність $B(H)$ виразом $H = b \cdot B^3$ методом обраних точок:

- 1) $B_1 = 1,2 \text{ Тл}$,
 $H_1 = 4,65 \text{ А/см}$;
- 2) $B_2 = 1,5 \text{ Тл}$,
 $H_2 = 22 \text{ А/см}$.

Навести графіки вихідної і побудованої за наближеним виразом кривої $B(H)$.



Таблиця 9.28

$B, \text{ Тл}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,55	1,6
$H, \text{ А/см}$	0	0,25	0,5	0,8	1,15	2	4,65	12	22	33	49

Відповідь: 1) $H = 2,69B^3$, 2) $H = 6,52B^3$, где $H[A/cm]$, $B[Tл]$.

Криві наведені на рис. 9.41.

Примітка. Пропонується переконатися, що при апроксимації наведеної кривої намагнічування виразом $H = aB + bB^3$ коефіцієнт a виходить від'ємним, що суперечить фізичному сенсу, оскільки в області малих значень індукції B напруженість H стає від'ємною.

ЗАДАЧА 9.45. Переріз осердя ідеальної котушки $S = 10 \text{ см}^2$, середня довжина магнітопроводу $l = 50 \text{ см}$, число витків котушки $w = 100$. Крива намагнічування матеріалу осердя наведена у табл. 9.28. Осердя має повітряний зазор l_{Π} (рис. 9.42,а). Розрахувати і побудувати вебер-амперну характеристику котушки $\Phi(i)$ для миттєвих значень величин для двох значень повітряного зазору: $l_{\Pi} = 0,1$ і $0,25 \text{ мм}$.

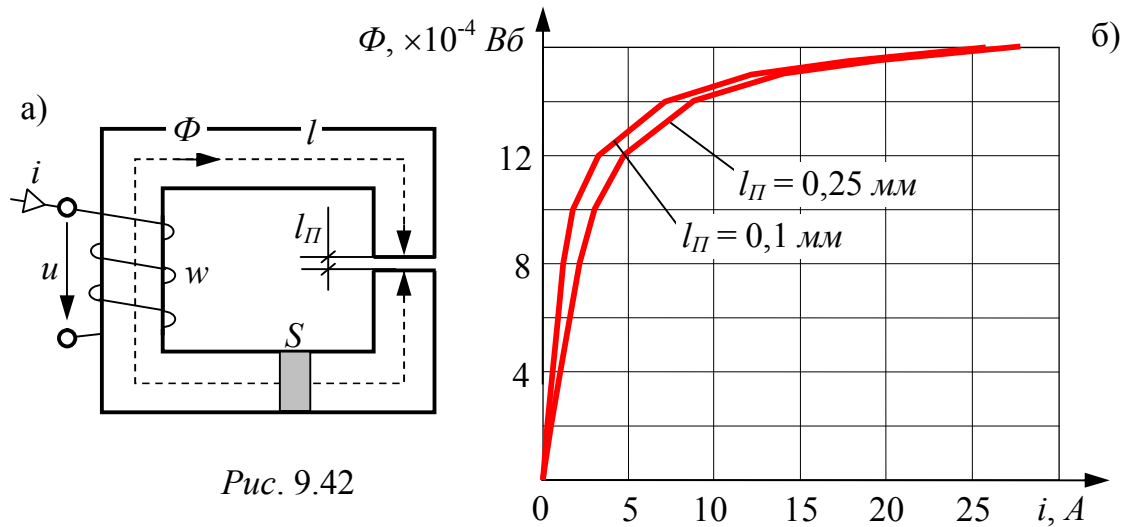


Рис. 9.42

Розв'язання

Задаючись різними значеннями B , розраховуємо відповідні значення $\Phi = BS$, які визначають миттєві значення струму

$$i = \frac{Hl + H_{\Pi}l_{\Pi}}{w}, \text{ де } H_{\Pi} = \frac{B}{\mu_0} = 8 \cdot 10^3 B \text{ A/cm, якщо } B[Tл].$$

Результати розрахунку вебер-амперної характеристики котушки з повітряним зазором зведені до табл. 9.29, крива наведена на рис. 9.40,б для двох значень l_{Π} : $l_{\Pi 1} = 0,1 \text{ мм}$ і $l_{\Pi 2} = 0,25 \text{ мм}$.

Таблиця 9.29

$\Phi, \text{ мВб}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,55	1,6
$i(l_{\Pi 1}), \text{ A}$	0	0,29	0,58	0,88	1,22	1,8	3,29	7,12	12,2	17,7	25,8
$i(l_{\Pi 2}), \text{ A}$	0	0,5	1,05	1,6	2,18	3	4,73	8,8	14	19,6	27,7

ЗАДАЧА 9.46. Котушка задачі 9.45, осердя якої має повітряний зазор $l_{\Pi} = 0,25 \text{ мм}$, увімкнена до джерела синусоїдної напруги з діючим значенням $U = 31 \text{ В}$ частотою $f = 50 \text{ Гц}$.

Із застосуванням аналітичної апроксимації ВБАХ виразом $i = a\Phi^3$ розрахувати миттєве і діюче значення струму, а також еквівалентну індуктивність котушки.

Розв'язання

Приймемо $u = U_m \cos \omega t$, тоді $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$,

$$\text{де } \Phi_m = \frac{U_m}{\omega W} = \frac{31\sqrt{2}}{314 \cdot 100} = 14 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

За ВБАХ котушки при цьому значенні потоку $i = I_m = 8,8 \text{ А}$, на підставі цих двох значень визначимо коефіцієнт апроксимації

$$a = \frac{I_m}{\Phi_m^3} = \frac{8,8}{(14 \cdot 10^{-4})^3} = 32,07 \cdot 10^8 \text{ А/Вб}^3.$$

Миттєве значення струму при потоці $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

$$i = a\Phi_m^3 \sin^3 \omega t = \frac{3}{4} \cdot a\Phi_m^3 \sin \omega t - \frac{1}{4} \cdot a\Phi_m^3 \sin 3\omega t = 6,6 \sin \omega t - 2,2 \sin 3\omega t \text{ А.}^*)$$

Діюче значення струму

$$I = \sqrt{0,5(I_{1m}^2 + I_{3m}^2)} = \sqrt{0,5(6,6^2 + 2,2^2)} = 4,92 \text{ А},$$

$$\text{еквівалентний індуктивний опір котушки } x_E = \frac{U}{I} = \frac{31}{4,92} = 6,3 \text{ Ом},$$

$$\text{еквівалентна індуктивність } L_E = \frac{x_E}{\omega} = \frac{6,3}{314} = 0,02 \text{ Гн.}$$

ЗАДАЧА 9.47. Реактор із сталевим магнітопроводом і лінійний конденсатор ємністю $C = 30 \text{ мкФ}$ з'єднані послідовно і увімкнені до джерела синусоїдного струму $j_k = i = I_m \sin \omega t$. Частота струму $f = 50 \text{ Гц}$.

Нехтуючи втратами в сталі, активним опором обмотки реактора і потоком розсіяння, знайти амплітуду струму, при якій у колі буде режим резонансу напруг, а також діюче значення загальної напруги і напруг на реакторі і конденсаторі в режимі резонансу.

Зв'язок між миттєвими значеннями потокозчеплення реактора і струму в його обмотці заданий рівнянням

$$\Psi = ai + bi^3, \quad \text{де } a = 0,4 \text{ Вб/А}, \quad b = -0,03 \text{ Вб/А}^3, \quad i[\text{А}], \Psi[\text{Вб}].$$

Розв'язання

Визначимо спочатку, до якого граничного значення струму реактора I_{max} справедлива наведена апроксимація вебер-амперної характеристики реактора. З фізичних міркувань ВБАХ $\Psi(i)$ не може мати ділянки, на якій

потокозчеплення зменшується. Тому I_{max} визначимо з умови $\frac{d\Psi}{dt} = 0$:

$$a + 3bI_{max}^2 = 0, \quad \text{звідки } I_{max} = \sqrt{\frac{-a}{3b}} = \sqrt{\frac{0,4}{3 \cdot 0,03}} = 2,11 \text{ А.}$$

Таким чином, шукане розв'язання задачі повинне задовольняти умові

$$I_m < I_{max}.$$

*) Математична тотожність $\sin^3 \alpha = \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{4} \sin 3\alpha$.

Для послідовного резонансного контуру відповідно до другого закону Кірхгофа $u_L + u_C = u$, а $u_L = \frac{d\Psi}{dt}$, $u_C = \frac{1}{C} \int idt$. За умови синусоїдного струму

$$i = I_m \sin \omega t \text{ в усталеному періодичному процесі } u_C = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t.$$

$$\begin{aligned} \text{Потокозчеплення } \Psi &= ai + bi^3 = (a + \frac{3}{4}bI_m^3) \sin \omega t - \frac{1}{4}bI_m^3 \sin 3\omega t, \\ \text{а } u_L &= \omega(a + \frac{3}{4}bI_m^3) \cos \omega t - \frac{1}{4}b3\omega I_m^3 \cos 3\omega t. \end{aligned}$$

При резонансі напруг $u_L + u_C = 0$, що можливе тільки на основній частоті, оскільки u_C не має третьої гармоніки: $u_L^{(1)} + u_C^{(1)} = 0$, звідки після скорочення на множник $\cos \omega t$ отримуємо

$$\omega(a + \frac{3}{4}bI_m^3) - \frac{I_m}{\omega C} = 0.$$

Після підстановки чисел одержуємо кубічне рівняння

$$7,065I_m^3 + 106,2I_m - 125,6 = 0,$$

канонічна форма якого $y^3 + 3py + 2q = 0$: $I_m^3 + 15,03I_m - 17,78 = 0$.

Тут $p = 5,01$, $q = -8,89$.

Дискримінант $D = q^2 + p^3 = 204,8 > 0$, $\sqrt{D} = 14,31$.

За умови позитивного дискримінанту канонічне рівняння має один дійсний корінь, який знайдемо за формулами Кардана

$$y_1 = s + v, \text{ де } s = \sqrt[3]{-q + \sqrt{D}}, \quad v = \sqrt[3]{-q - \sqrt{D}}.$$

В нашому випадку $s = \sqrt[3]{8,89 + 14,31} = 2,852$, $v = \sqrt[3]{8,89 - 14,31} = -1,757$.

Шукане значення $I_m = s + v = 1,095 \text{ A}$. За цього значення в досліджуваному колі настає резонанс напруг на першій гармоніці.

Миттєві значення напруг під час резонансу

$$\text{на конденсаторі } u_C = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = -116,3 \cos \omega t \text{ B,}$$

$$\text{на реакторі } u_L = 116,3 \cos \omega t + 9,28 \cos 3\omega t \text{ B,}$$

$$\text{на вході схеми } u = u_L + u_C = 9,28 \cos 3\omega t \text{ B.}$$

Діючі значення цих напруг: $U_C = U_L = 82,5 \text{ B}$, $U = 6,56 \text{ B}$.

ЗАДАЧА 9.48. ВБАХ ідеальної котушки визначається аналітичною апроксимацією $i_L = 2 \cdot 10^3 \Psi^3$, де $i_L [A]$, $\Psi [Вб]$. В схемі рис. 9.43 $u = U_m \cos \omega t$, $f = 50 \text{ Гц}$, ємність $C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$.

Знайти діюче значення напруги мережі U , при якому в колі спостерігається ферорезонанс струмів. Знайти також діюче значення струму в загальній частині схеми під час резонансу.

Відповіді: $U = 80,5 \text{ B}$, $I = I^{(3)} = 16,86 \text{ A}$.

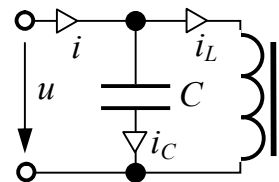


Рис. 9.43

ЗАДАЧА 9.49. Методом гармонійного балансу знайти першу гармоніку струму за умови послідовного з'єднання нелінійного резистора, ВАХ якого апроксимована виразом $u(i) = 5i^3$, де $u [B]$, $i [A]$, і лінійного активного опору $r = 40 \text{ Ом}$, якщо коло живиться від джерела синусоїдної ЕРС $e = 150 \sin \omega t \text{ B}$.

Відповідь: $i^{(1)} = 2,42 \sin \omega t \text{ A}$.

ЗАДАЧА 9.50. Нелінійний резистор, ВАХ якого апроксимована поліномом (задачі 9.36 і 9.39) $u = ai + bi^3 = 2i + 1,5i^3$, де $u[B]$, $i[A]$, з'єднаний послідовно з лінійною індуктивністю $L = 0,1$ Гн. Послідовне коло увімкнене в мережу синусоїдної напруги $U = 220$ В частоти $f = 50$ Гц.

Методом гармонійного балансу розрахувати першу гармоніку струму.

Розв'язання

За другим законом Кірхгофа для послідовного кола

$$u(i) + L \frac{di}{dt} = U_m \sin \omega t.$$

Шукана перша гармоніка струму $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$. Після підстановки рівняння Кірхгофа приймає вигляд:

$$aI_m \sin(\omega t + \psi) + bI_m^3 \sin^3(\omega t + \psi) + \omega LI_m \cos(\omega t + \psi) = U_m \sin \omega t. \quad (9.3)$$

Відзначимо, що $\sin^3 \alpha = \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{4} \sin 3\alpha$,

відкинемо складову $-\frac{1}{4} b I_m^3 \sin 3(\omega t + \psi)$, розглядаючи її як незначну похибку розрахунку;

$$\sin(\omega t + \psi) = \cos \psi \cdot \sin \omega t + \sin \psi \cdot \cos \omega t, \quad \cos(\omega t + \psi) = \cos \psi \cdot \cos \omega t - \sin \psi \cdot \sin \omega t.$$

Прирівняємо коефіцієнти при $\sin \omega t$ і при $\cos \omega t$ в лівій і правій частинах рівняння (9.3). Одержуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} (aI_m + \frac{3}{4} b I_m^3) \cos \psi - \omega L I_m \sin \psi = U_m, \\ (aI_m + \frac{3}{4} b I_m^3) \sin \psi + \omega L I_m \cos \psi = 0. \end{cases}$$

Після підстановки чисел одержуємо систему

$$\begin{cases} (2I_m + 1,125I_m^3) \cos \psi - 31,4I_m \sin \psi = 311, \\ (2I_m + 1,125I_m^3) \sin \psi + 31,4I_m \cos \psi = 0, \end{cases}$$

яку розв'яжемо за допомогою ЕОМ: $I_m := 1 \quad \psi := -1$

$$\text{Given } (2 \cdot I_m + 1,125 \cdot I_m^3) \cdot \cos(\psi) - 31,4 \cdot I_m \cdot \sin(\psi) = 311$$

$$(2 \cdot I_m + 1,125 \cdot I_m^3) \cdot \sin(\psi) + 31,4 \cdot I_m \cdot \cos(\psi) = 0$$

$$Qt := \text{Find}(I_m, \psi) \quad Qt = \begin{pmatrix} 5,948 \\ -0,644 \end{pmatrix}$$

Відповідь: $i^{(1)} = 5,948 \sin(314t - 0,644)$ А.

ЗАДАЧА 9.51. Розв'язати задачу 9.50 методом гармонійної лінеаризації.

Розв'язання

Шукана відповідь, на відміну від методу гармонійного балансу, повинна містити тільки першу гармоніку шуканого струму $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$.

Напруга нелінійного резистора при цьому

$$u = ai + bi^3 = aI_m \sin(\omega t + \psi) + \frac{3}{4} b I_m^3 \sin(\omega t + \psi) - \frac{1}{4} b I_m^3 \sin 3(\omega t + \psi).$$

Активний опір нелінійного резистора по першій гармоніці

$$r = \frac{U_m^{(1)}}{I_m^{(1)}} = a + \frac{3}{4} b I_m^2 = f(I_m).$$

Комплексний опір кола по першій гармоніці

$$\underline{Z} = r + j\omega L = (a + \frac{3}{4} b I_m^2) + j\omega L.$$

За законом Ома в комплексній формі $\underline{I}_m \underline{Z} = \underline{U}_m$ одержуємо

$$I_m e^{j\psi} (a + \sqrt[3]{4} b I_m^2 + j\omega L) = U_m e^{j\psi_u}; \quad \psi_u = 0; \quad e^{j\psi} = \cos\psi + j\sin\psi.$$

Рівняння в комплексній формі розпадається на два рівняння з дійсними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} (a I_m + \sqrt[3]{4} b I_m^3) \cos\psi - \omega L I_m \sin\psi = U_m, \\ (a I_m + \sqrt[3]{4} b I_m^3) \sin\psi + \omega L I_m \cos\psi = 0. \end{cases}$$

Ця система отримана і розв'язана в задачі 9.50.

9.2.2.2 Метод кусково-лінійної апроксимації характеристик

ЗАДАЧА 9.52. Розрахувати форму кривої напруги нелінійного резистивного елемента задачі 9.38 методом кусково-лінійної апроксимації (МКЛА) характеристики нелінійного елемента.

Розв'язання

За заданим струмом $i = j_k(t) = 5 \sin \omega t \text{ A}$ і ВАХ (табл. 9.24) визначаємо робочу ділянку характеристики – від початку координат до точки A найбільшого відхилення з координатами $i_A = I_m = 5 \text{ A}$, $u_A = 197,5 \text{ B}$ (рис. 9.44,а). Проведемо через цю точку дотичну AF до перетину з віссю напруги у точці F і визначимо координату точки F уздовж вісі напруги як $E_0 = -375 \text{ B}$. Рівняння цієї дотичної $u = E_0 + i r_{\partial A} = -375 + 114,5 i \text{ B}$ при $i[A]$, де диференціальний опір нелінійного резистора в т. A :

$$r_{\partial A} = \left. \frac{du}{di} \right|_{i=I_m} = 114,5 \text{ Ом.}$$

Проведемо січну OD так, щоб площа під ламаною ADO і площа під реальною ВАХ якомога ближче співпадали (це називається мінімізацією апроксимуючої залежності за інтегральною (за площею) ознакою).

Кут нахилу січної визначає на лінійній ділянці OBD опір $r_{\partial B} = 15,5 \text{ Ом}$, рівняння січної $u = i r_{\partial B} = 15,5 i$.

Координати точки перетину вказаних прямих:

$$u_D = 58,7 \text{ B}; \quad i_D = 3,79 \text{ A.}$$

На рис. 9.44,в,г наведені розрахункові схеми заміщення нелінійного резистора:

- рис. 9.44,в – при зміні струму $i(0 \dots i_D)$,

- рис. 9.44,г – при зміні струму $i(i_D \dots I_m \dots i_D)$.

За умови синусоїдного струму $i = 5 \sin \omega t \text{ A}$ для схеми рис. 9.44,в $u = i r_{\partial B} = 77,5 \sin \omega t \text{ B}$, для схеми рис. 9.44,г $u = E_0 + i r_{\partial A} = -375 + 572,5 \sin \omega t \text{ B}$.

Звернемо увагу на те, що струм і напруга резистивного елемента змінюються без запізнювання у часі. Це означає, що якщо $i \geq 0$, то $u \geq 0$, якщо $i \leq 0$, то $u \leq 0$, тобто струм і напруга в один і той же момент часу переходять через нуль, в інший момент часу одночасно досягають максимальних значень.

В даній задачі $I = I_m \sin \omega t$. Починаємо аналізувати процес з моменту $\omega t_1 = 0$, коли $i(\omega t_1) = 0$, $u(\omega t_1) = 0$. На інтервалі $\omega t(\omega t_1 \dots \omega t_2)$ струм зростає у позитивному напрямі $i(0 \dots i_D)$, напруга $u = i r_{\partial B} = 77,5 \sin \omega t \text{ B}$ (схема рис. 9.44,в); в кінці інтервалу

$$i(\omega t_2) = I_m \sin \omega t_2 = i_D = 3,79 \text{ A, звідки}$$

$$\omega t_2 = \arcsin \frac{i_D}{I_m} = \arcsin \frac{3,79}{5} = 49,3^\circ, \quad u(\omega t_2) = u_D = 58,7 \text{ B.}$$

Рис. 9.44
Див. файл «Album»

На інтервалі $\omega t(\omega t_2 \dots \omega t_3)$ напруга на резисторі розраховується за схемою рис. 9.44,г: $u = E_0 + ir_{\partial A} = -375 + 572,5 \sin \omega t$ В, межі інтервалу ωt_2 і ωt_3 визначаються умовою $u(\omega t_2) = u(\omega t_3) = 58,7 = -375 + 572,5 \sin \omega t_3$, звідки

$$\omega t_3 = 180^\circ - \arcsin \frac{58,7 + 375}{572,5} = 180^\circ - 49,3^\circ = 130,7^\circ.$$

Крива напруги на нелінійному резисторі, яка розрахована за МКЛА характеристики наведена на рис. 9.44,б. Порівняйте цю криву з графічним розв'язанням (рис. 9.40).

ЗАДАЧА 9.53. Виконати кусково-лінійну апроксимацію ВБХ задачі 9.39 двома відрізками прямих, які перетинаються при $i = 0,9$ А.

Відповідь: $\Psi = 0,27i$ в діапазоні $i(0 \dots 0,9)$, $\Psi = 0,2 + 0,048i$ при $i > 0,9$ А, де $\Psi[\text{Вб}]$, $i[\text{А}]$.

ЗАДАЧА 9.54. Виконати кусково-лінійну апроксимацію КВХ задачі 9.40 двома відрізками прямих, які перетинаються при $u = 77$ В.

Відповідь: $q = 2 \cdot 10^{-4}u$ в діапазоні $u(0 \dots 77)$, $q = 1,25 \cdot 10^{-2} + 37,5 \cdot 10^{-6}u$ при $u > 77$ В, де $q[\text{Кл}]$, $u[\text{В}]$.

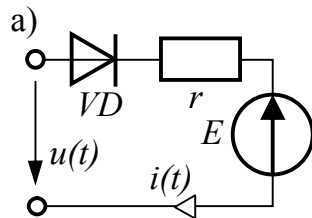


Рис. 9.45

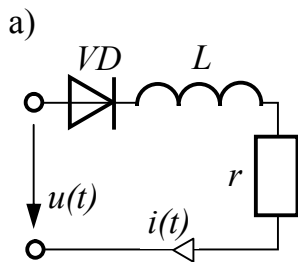
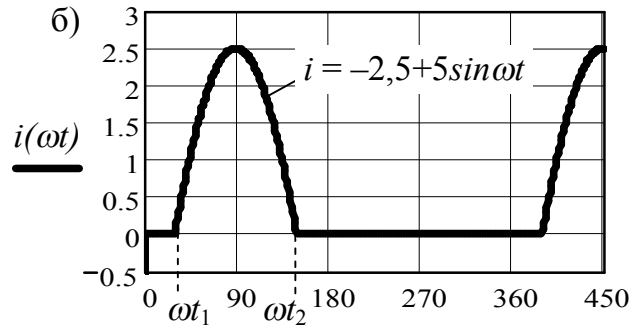
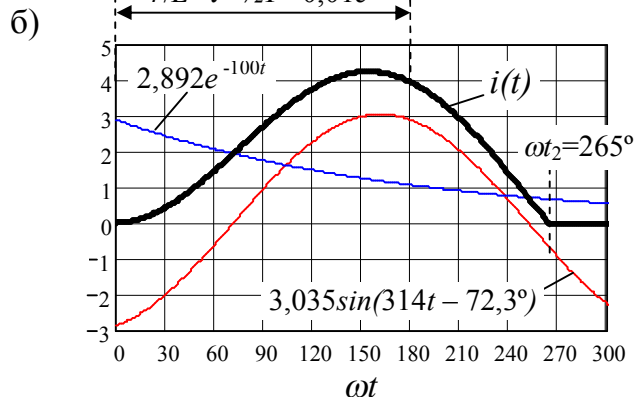


Рис. 9.46



ЗАДАЧА 9.55. На рис. 9.45,а подана схема однофазного випрямляча, яка вживається, наприклад, для заряду акумулятора. Відомо, що

$$E = 5 \text{ В}; \quad u(t) = 10 \cdot \sin(314 \cdot t) \text{ В}; \quad r = 2 \text{ Ом}, \quad \text{діод ідеальний.}$$

Побудувати графік струму, визначити його середнє і діюче значення, а також максимальну зворотну напругу на діоді.

Відповідь: 0,545 А, 1,04 А, 15 В; графік струму наведений на рис. 9.45,б.

ЗАДАЧА 9.56. Однофазний однопівперіодний випрямляч (рис. 9.46,а) працює на rL -навантаження. Відомо: $r = 10 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$, а прикладена напруга $u(t) = 100 \cdot \sin(314 \cdot t) \text{ В}$.

Побудувати графік струму, визначити його середнє і діюче значення.

Відповідь: 1,73 А, 2,37 А; графік струму наведений на рис. 9.46,б.

Примітка. Момент закриття діода $\omega t_2 = 265^\circ$ визначається розв'язанням на ступного трансцендентного рівняння $3,035 \sin(314 \cdot t_2 - 1,262) + 2,892 e^{-100 \cdot t_2} = 0$.

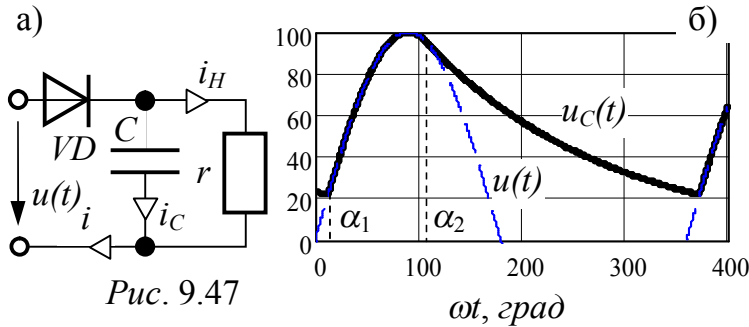


Рис. 9.47

ЗАДАЧА 9.57. Однофазний однопівперіодний випрямляч із ємністю $C = 100 \text{ мкФ}$ навантажений активним опором $r = 100 \text{ Ом}$ (рис. 9.45,а). Прикладена напруга – $u(t) = 100 \cdot \sin(314 \cdot t) \text{ В}$.

Побудувати графік

напруги на навантаженні $u_C(t)$, визначити його середнє і діюче значення.

Відповідь: 57,1 В, 62,2 В; графік наведений на рис. 9.47,б.

Примітка. $\alpha_2 = \pi - \arctg(\omega r C) = 1,88 \text{ рад} = 107,7^\circ$. Момент $\alpha_1 = 12,6^\circ = 0,22 \text{ рад}$ (або t_1) визначається з умови відкриття діода, коли напруга джерела і напруга

на ємності стають рівними: $U_m \sin(\alpha_1) = U_m \sin(\alpha_2) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_1 - \alpha_2 + 2\pi}{\omega r C}\right)$. Це

трансцендентне рівняння розв'язується методом підбору або графічно.

ЗАДАЧА 9.58. У колі рис. 9.48,а діють джерела змінної і постійної напруги: $u(t) = 10 \cdot \sin(\omega t) \text{ В}$, $E = 5 \text{ В}$. Номінали резисторів: $r_1 = 5 \text{ Ом}$, $r_2 = 4 \text{ Ом}$, $r_3 = 2 \text{ Ом}$. Вважаючи діод VD ідеальним, розрахувати струми.

Розв'язання

Ідеальний діод може знаходитися в одному з двох станів – відкритому або закритому, еквівалентні схеми наведені на рис. 9.48,б і 9.48,в, відповідно.

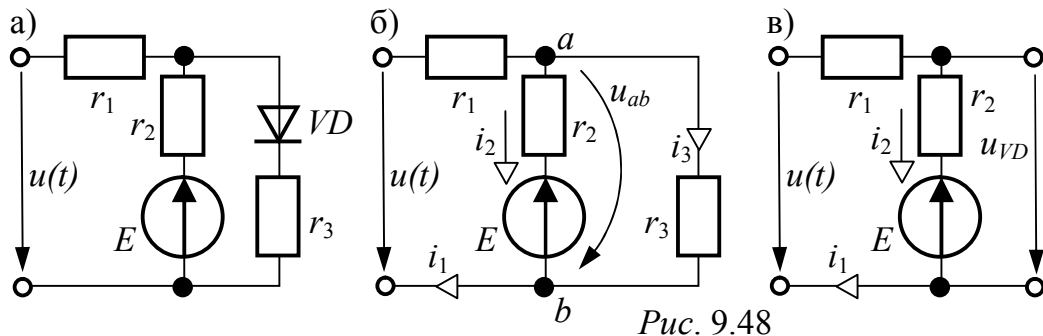


Рис. 9.48

Розрахуємо коло рис. 9.48,б методом двох вузлів. Вузлової напруга

$$u_{ab} = \frac{\frac{u}{r_1} + \frac{E}{r_2}}{r_1^{-1} + r_2^{-1} + r_3^{-1}} = \frac{\frac{10 \sin(\omega t)}{5} + \frac{5}{4}}{5^{-1} + 4^{-1} + 2^{-1}} = 2,105 \sin(\omega t) + 1,316 \text{ В}.$$

Струми у вітках:

$$i_1 = \frac{u - u_{ab}}{r_1} = \frac{10 \sin \omega t - 2,105 \sin \omega t - 1,316}{5} = 1,579 \sin(\omega t) - 0,263 \text{ A},$$

$$i_3 = \frac{u_{ab}}{r_3} = \frac{2,105 \sin \omega t + 1,316}{2} = 1,053 \sin(\omega t) + 0,658 \text{ A},$$

$$i_2 = i_1 - i_3 = 1,579 \sin(\omega t) - 0,263 - 1,053 \sin(\omega t) - 0,658 = 0,526 \sin(\omega t) - 0,921 \text{ A}.$$

Кутовий діапазон відкритого стану діода визначимо з умови, що його струм може бути лише позитивним: $i_3 > 0$:

$$1,053 \sin(\omega t) + 0,658 > 0; \quad \sin(\omega t) > -0,625; \quad -38,7^\circ < \omega t < 218,7^\circ.$$

Виконаємо розрахунок кола рис. 9.48,в, в якому діод закритий:

$$i_3 = 0; \quad i_1 = i_2 = \frac{u - E}{r_1 + r_2} = \frac{10 \sin \omega t - 5}{5 + 4} = 1,111 \sin(\omega t) - 0,556 \text{ A},$$

$$u_{VD} = u - r_1 \cdot i_1 = 10 \sin(\omega t) - 5,555 \sin(\omega t) + 2,778 = 4,445 \sin(\omega t) + 2,778 \text{ B}.$$

Умова закритого стану діода – $u_{VD} < 0$ – дає нерівність:

$$4,445 \sin(\omega t) + 2,778 < 0; \quad \sin(\omega t) < -0,625; \quad 218,7^\circ < \omega t < 321,3^\circ.$$

Остаточню одержуємо:

$$i_1(\omega t) = \begin{cases} 1,579 \sin \omega t - 0,263 \text{ A} & \text{нпу } 0 \leq \omega t \leq 218,7 \quad \text{і } 321,3 \leq \omega t \leq 360, \\ 1,111 \sin \omega t - 0,556 \text{ A} & \text{нпу } 218,7 \leq \omega t \leq 321,3. \end{cases}$$

$$i_2(\omega t) = \begin{cases} 0,526 \sin \omega t - 0,921 \text{ A} & \text{нпу } 0 \leq \omega t \leq 218,7 \quad \text{і } 321,3 \leq \omega t \leq 360, \\ 1,111 \sin \omega t - 0,556 \text{ A} & \text{нпу } 218,7 \leq \omega t \leq 321,3. \end{cases}$$

$$i_3(\omega t) = \begin{cases} 1,053 \sin \omega t + 0,658 \text{ A} & \text{нпу } 0 \leq \omega t \leq 218,7 \quad \text{і } 321,3 \leq \omega t \leq 360, \\ 0 & \text{нпу } 218,7 \leq \omega t \leq 321,3. \end{cases}$$

ЗАДАЧА 9.59. У наведеній на рис. 9.49,а схемі з параметрами – $E = 50 \text{ B}$, $u(t) = 100 \cdot \sin(\omega t) \text{ B}$, $r = 20 \text{ Ом}$, $U_S = 10 \text{ B}$ – розрахувати струм джерела змінної напруги. Обчислити його діюче значення і побудувати його графік. Стабілітрон вважати ідеальним.

Розв'язання

Задачу розв'язуємо методом кусково-лінійної апроксимації для одного періоду змінної напруги. ВАХ стабілітрона при її кусково-лінійній апроксимації (ВАХ так званого ідеального стабілітрона) подана на рис. 9.49,б.

На інтервалі $0 \leq \omega t \leq \omega t_1$ стабілітрон за рахунок дії постійного джерела E відкритий, тобто працює на ділянці 1 ВАХ, де його опір дорівнює нулю. Еквівалентна схема кола для цього інтервалу має вид рис. 9.50,а. Струми кола, які обчислені за цією схемою:

$$i = \frac{u}{r} = \frac{100 \sin \omega t}{20} = 5 \sin(\omega t) \text{ A}, \quad i_E = \frac{E}{r} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ A},$$

$$i_{VD} = i_E - i = 2,5 - 5 \sin(\omega t) \text{ A}.$$

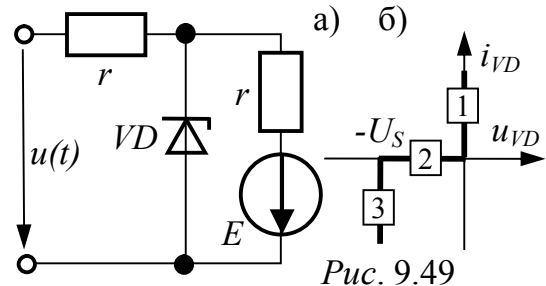
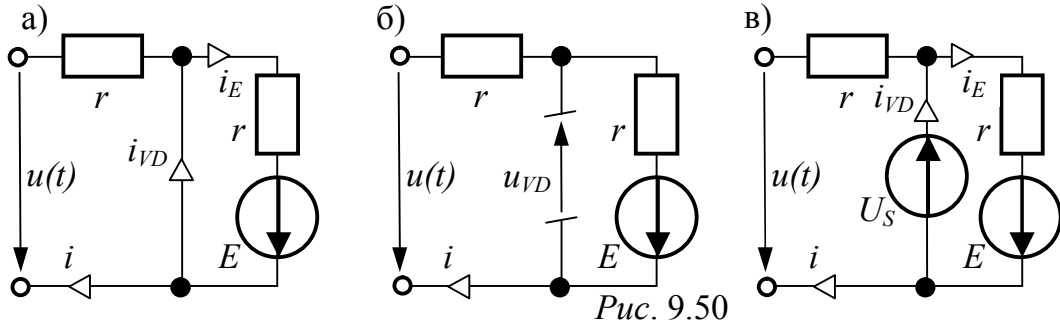


Рис. 9.49

З умови закриття стабілітрона ($i_{VD}(\omega t_1) = 0$) визначимо межу інтервалу:
 $2,5 - 5\sin(\omega t_1) = 0$; $\sin(\omega t_1) = 0,5$; $\omega t_1 = 30^\circ = \pi/6 \text{ рад}$.



На інтервалі $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$ стабілітрон закритий (ділянка 2 ВАХ), схема приймає вигляд рис. 9.50,б. Шуканий струм i напруга на стабілітроні:

$$i = \frac{u + E}{2r} = \frac{100 \sin \omega t + 50}{40} = 2,5 \sin(\omega t) + 1,25 \text{ A},$$

$$u_{VD} = -u + ri = -100 \cdot \sin(\omega t) + 50 \sin(\omega t) + 25 = -50 \sin(\omega t) + 25 \text{ B}.$$

Для знаходження межі інтервалу ωt_2 розв'язуємо рівняння $u_{VD}(\omega t_2) = 0$ – умова закриття стабілітрона,

$(\omega t_2) = -U_S$ – умова переходу в стан стабілізатора.

$$-50 \sin(\omega t_2) + 25 = 0; \quad \sin(\omega t_2) = 0,5; \quad \omega t_2 = 30^\circ \text{ або } 150^\circ;$$

$$-50 \sin(\omega t_2) + 25 = -10; \quad \sin(\omega t_2) = 0,7; \quad \omega t_2 = 44,4^\circ \text{ або } 135,6^\circ.$$

Таким чином, маємо різні значення ωt_2 , з яких потрібно вибрати мінімальне. Проте, значення $\omega t_2 = 30^\circ$ не задовольняє умові $\omega t_2 > \omega t_1$, тому слід вибрати $\omega t_2 = 44,4^\circ = 0,775 \text{ рад}$.

На інтервалі $\omega t_2 \leq \omega t \leq \omega t_3$ стабілітрон знаходиться в режимі стабілізації (ділянка 3 ВАХ). Складаємо розрахункову схему рис. 9.50,в. Виконуємо розрахунок струмів:

$$i = \frac{u - U_S}{r} = \frac{100 \sin \omega t - 10}{20} = 5 \sin(\omega t) - 0,5 \text{ A}, \quad i_E = \frac{U_S + E}{r} = \frac{10 + 50}{20} = 3 \text{ A},$$

$$i_{VD} = i_E - i = 3,5 - 5 \sin(\omega t) \text{ A}.$$

З умови закриття стабілітрона ($i_{VD}(\omega t_3) = 0$) визначаємо межу інтервалу ωt_3 : $3,5 - 5 \sin(\omega t_3) = 0$; $\sin(\omega t_3) = 0,7$; $\omega t_3 = 44,4^\circ$ або $135,6^\circ$. Проте, значення $\omega t = 44,4^\circ$ вже пройдено, тому ми вимушені прийняти $\omega t_3 = 135,6^\circ = 2,366 \text{ рад}$.

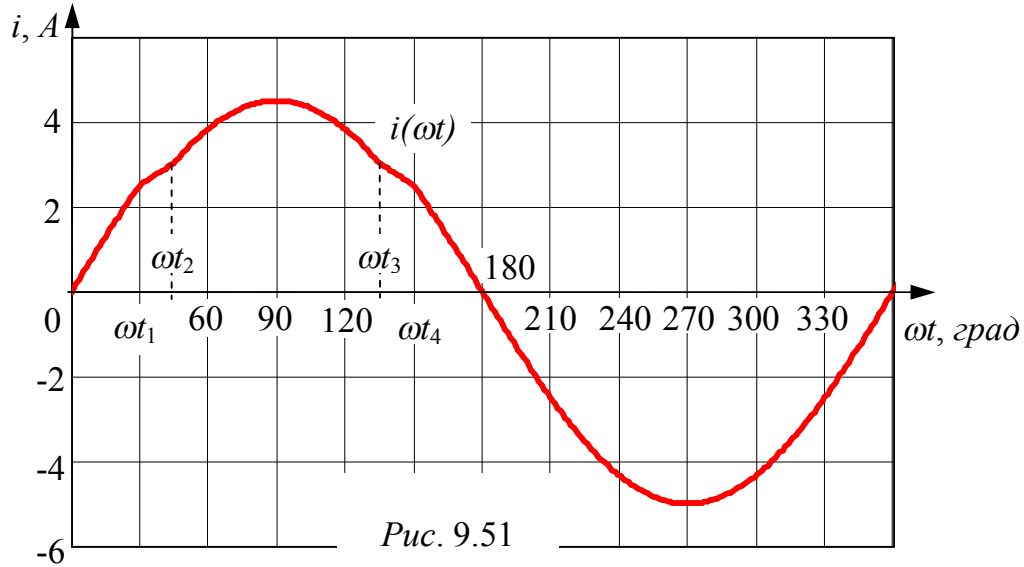
На інтервалі $\omega t_3 \leq \omega t \leq \omega t_4$ стабілітрон знову закритий (схема рис. 9.50,б). Шуканий струм $i = 2,5 \sin(\omega t) + 1,25 \text{ A}$.

Умова переходу на ділянку 1 ВАХ: $u_{VD}(\omega t_4) = 0$; $\omega t_4 = 30^\circ$ або 150° . Оскільки $\omega t_4 > 135,6^\circ$, то $\omega t_4 = 150^\circ = 5\pi/6 \text{ рад}$.

З моменту $\omega t = \omega t_4$ і до кінця періоду $\omega t_5 = 360^\circ$ знову працює схема рис. 9.50,а. Тут $i(\omega t) = 5 \sin(\omega t) \text{ A}$. Таким чином,

$$i(\omega t) = \begin{cases} 5 \sin \omega t \text{ A} & \text{npu } 0 \leq \omega t \leq \omega t_1 = 30^\circ & i & \omega t_4 = 150^\circ \leq \omega t \leq 360^\circ, \\ 2,5 \sin \omega t + 1,25 \text{ A} & \text{npu } \omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2 = 44,4^\circ & i & \omega t_3 \leq \omega t \leq \omega t_4, \\ 5 \sin \omega t - 0,5 \text{ A} & \text{npu } \omega t_2 \leq \omega t \leq \omega t_3 = 135,6^\circ. \end{cases}$$

Графік струму $i(\omega t)$ побудований на рис. 9.51.

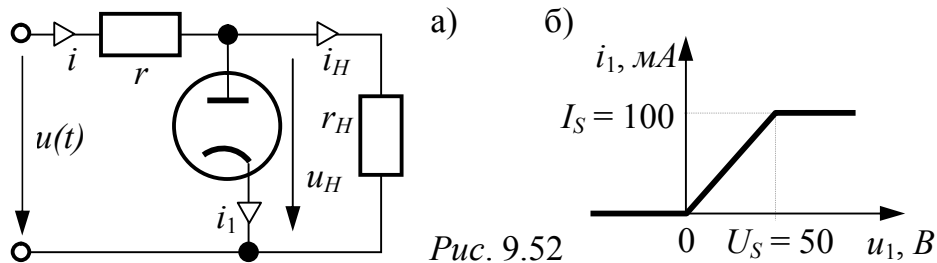


Діюче значення струму може бути обчислене за формулою

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t)^2 d\omega t}.$$

Але оскільки графік $i(\omega t)$ симетричний відносно осей ординат, проведених при $\omega t = \frac{\pi}{2}$ і $\omega t = \frac{3\pi}{2}$, інтегрування може бути виконане за половину

періоду:
$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} i(\omega t)^2 d\omega t} = 3,36 \text{ A}.$$



ЗАДАЧА 9.60. Побудувати криву струму в опорі навантаження $r_H = 5 \text{ кОм}$ (рис. 9.52,а) в колі з вакуумним діодом, ВАХ якого апроксимована відрізками прямих рис. 9.52,б. До кола прикладена напруга $u = 320 \sin \omega t \text{ В}$; $r = 1 \text{ кОм}$.

Розв'язання

Розглянемо інтервал $\omega t(0 \dots \omega t_1)$, коли $u > 0$ і діод працює на ділянці ВАХ $i_1(0 \dots I_S)$. В цьому діапазоні діод може бути представлений лінійним

опором $r_{1\partial} = \frac{U_S}{I_S} = \frac{50}{0,1} = 500 \text{ Ом}$ (рис. 9.53,а).

Відповідно до схеми рис. 9.53,а
$$i_H = \frac{U_m \sin \omega t}{r + \frac{r_{1\partial} r_H}{r_{1\partial} + r_H}} \cdot \frac{r_{1\partial}}{r_{1\partial} + r_H} = 20 \sin \omega t \text{ мА},$$

напруга на діоді і навантаженні $u_H = i_H \cdot r_H = 100 \sin \omega t \text{ В}.$

Перехід діода в стан насичення за струмом доводиться на момент часу t_1 , коли його струм досягає значення I_S , а напруга – величини U_S :

$$U_S = u_H(\omega t_1) = 100 \sin \omega t_1,$$

звідки
$$\omega t_1 = \arcsin \frac{U_S}{U_{Hm}} = \arcsin \frac{50}{100} = 30^\circ.$$

Вихід із стану насичення в силу періодичності має місце у момент часу

$$\omega t_2 = 180^\circ - \omega t_1 = 150^\circ.$$

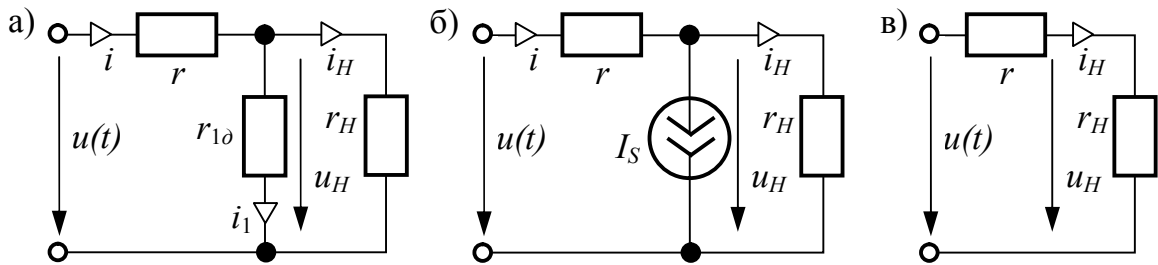


Рис. 9.53

В режимі насичення діода розрахункова схема приймає вид рис. 9.53,б, і струм навантаження в інтервалі $\omega t (\omega t_1 \dots \omega t_2)$

$$i_H = -I_S \frac{r}{r + r_H} + \frac{U_m \sin \omega t}{r + r_H} = -16,67 + 53,33 \sin \omega t \text{ мА}.$$

В інтервалі $\omega t (\pi \dots 2\pi)$ діод закритий, схема роботи установки подана на рис. 9.53,в, для якої

$$i_H = \frac{U_m \sin \omega t}{r + r_H} = 53,33 \sin \omega t \text{ мА}.$$

Графік струму навантаження наведений на рис. 9.54.

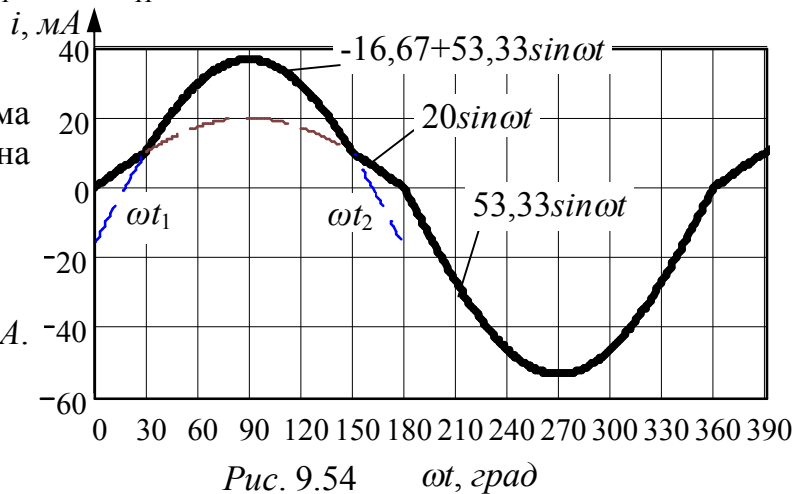


Рис. 9.54 $\omega t, \text{ град}$

ЗАДАЧА 9.61. Виконати розрахунок основних параметрів трифазної нульової схеми випрямляча з ідеальними діодами (рис. 9.55,а), якщо фазна напруга вторинної обмотки трансформатора $U = 220 \text{ В}$, а активний опір навантаження $r_H = 100 \text{ Ом}$.

Розв'язання

Прийемо потенціал нульової точки трансформатора $\varphi_0 = 0$, а фазну напругу $u_a = U_m \sin \omega t = 220 \sqrt{2} \sin \omega t \text{ В} = \varphi_a.$

Тоді потенціали лінійних затискачів вторинних обмоток трансформатора $\varphi_b = u_b = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, $\varphi_c = u_c = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$. Ці криві подані на рис. 9.55,б по відношенню до потенціалу $\varphi_0 = 0$.

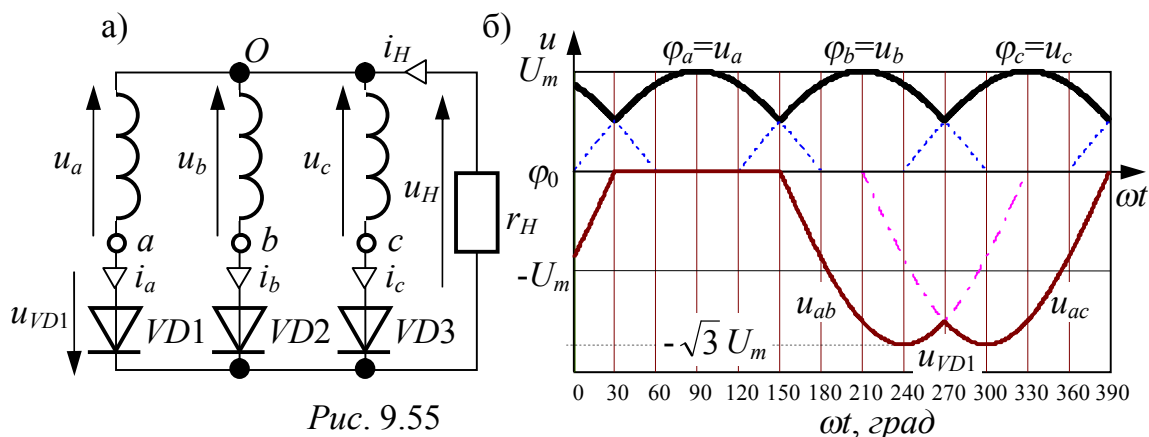


Рис. 9.55

В діапазоні $\omega t(\pi/6 \dots 5\pi/6)$ найбільший потенціал на виході випрямляча φ_a , відкритий діод VD_1 , $u_H = \varphi_a = U_m \sin \omega t$, а напруги на закритих діодах

$$u_{VD2} = u_{ba} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t - 150^\circ), \quad u_{VD3} = u_{ca} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 150^\circ).$$

Максимальна напруга на закритому діоді

$$U_{VDmax} = \sqrt{3} U_m = \sqrt{3} \sqrt{2} \cdot 220 = 540 \text{ В.}$$

Діоди відкриваються по черзі, крива випрямленої напруги подана суцільною лінією на рис. 9.55,б з кількістю пульсацій на періоді $m = 3$, тут же подана крива напруги на діоді VD_1 .

Середнє значення випрямленої напруги

$$U_0 = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{3U_m}{2\pi} \left(-\cos \frac{5\pi}{6} + \cos \frac{\pi}{6} \right) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{2\pi} = \frac{3\sqrt{6}U}{2\pi} = 1,17U = 1,17 \cdot 220 = 257,4 \text{ В.}$$

Відмітимо, що $U_0 = k_c U$, де $k_c = 1,17$ – коефіцієнт схеми випрямляча.

Постійна складова струму навантаження $I_0 = \frac{U_0}{r} = \frac{257,4}{100} = 2,574 \text{ А.}$

Потужність навантаження по постійному струму

$$P_0 = U_0 I_0 = I_0^2 r_H = 662,5 \text{ Вт.}$$

Вона називається *корисною потужністю* випрямляча.

Діюче значення струму навантаження

$$I = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = I_m \cdot 0,841 = 2,615 \text{ А.}$$

Активна потужність навантаження $P = I^2 r_H = 683,8 \text{ Вт.}$

Коефіцієнт корисної дії випрямляча $\eta = \frac{P_0}{P} = \frac{662,5}{683,8} = 0,969.$

Діюче значення фазного струму джерела живлення

$$I_A = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = I_m \cdot 0,485 = \frac{I}{\sqrt{3}} = 1,51 \text{ А.}$$

Повна встановлена потужність трифазного трансформатора

$$S = 3UI = 3 \cdot 220 \cdot 1,51 = 996,5 \text{ ВА.}$$

Відношення корисної потужності до повної $n = \frac{P_0}{S} = \frac{662,5}{996,5} = 0,665.$

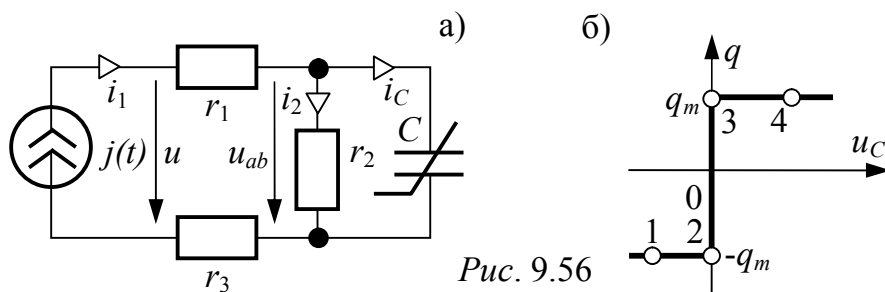


Рис. 9.56

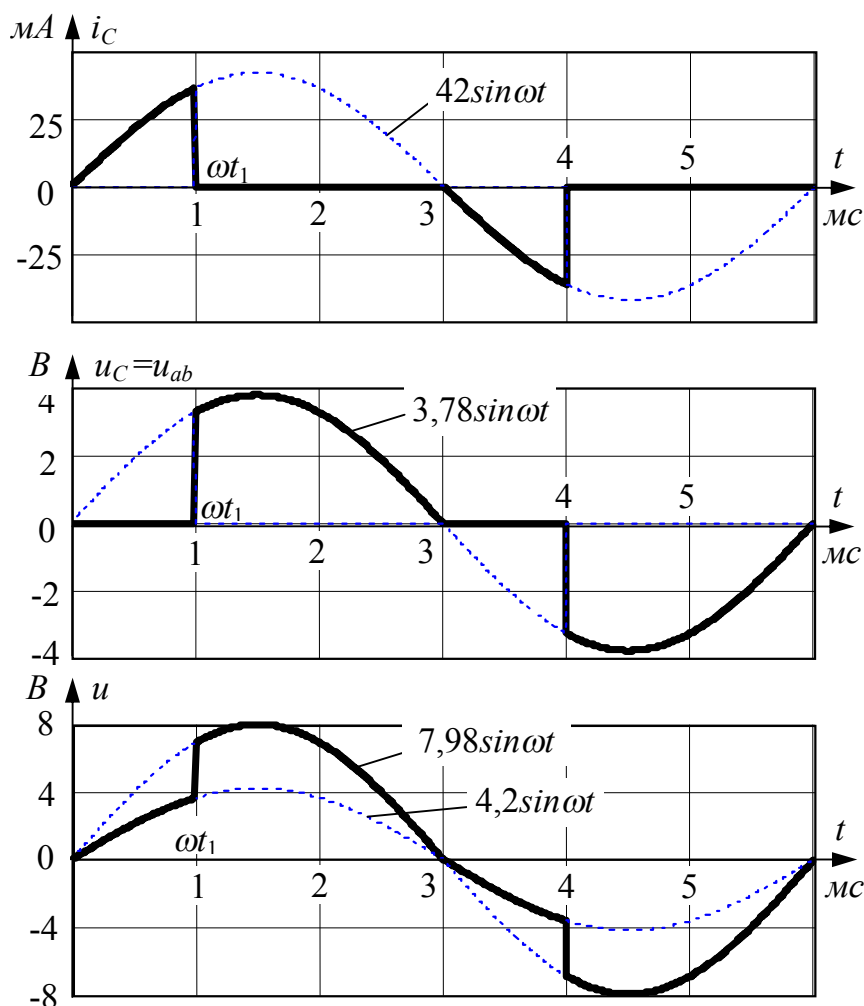


Рис. 9.57

ЗАДАЧА 9.62. Для схеми рис. 9.56,а відомо: $r_1 = 70 \text{ Ом}$, $r_2 = 90 \text{ Ом}$, $r_3 = 30 \text{ Ом}$, струм джерела струму $j(t) = I_m \sin \omega t$, причому $I_m = 42 \text{ mA}$, $\omega = 1050 \text{ c}^{-1}$. Кулон-вольтна характеристика нелінійного конденсатора апроксимована відрізками прямих (рис. 9.56,б), причому $q_m = 10^{-5} \text{ Кл}$.

Розрахувати і побудувати криві $u_{ab}(t)$, $i_c(t)$, $u(t)$.

Відповідь: $\omega t_1 = \frac{\pi}{3}$, $t_1 = 1 \text{ мс}$, період $T = \frac{2\pi}{\omega} = 6 \text{ мс}$. Криві побудовані на рис.

9.57.

ЗАДАЧА 9.63. Для кола рис. 9.58,а розрахувати і побудувати криві $i(t)$, $\Psi(t)$, якщо $u(t) = U_m \sin \omega t$, $U_m = 31,4 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $r = 535 \text{ Ом}$, ВБAX нелінійної котушки з урахуванням гістерезису подана на рис. 9.58,б, де $\Psi_S = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, $I_C = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ А}$.

Розв'язання

Відповідно до другого зако-

ну Кірхгофа $ir + \frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin \omega t$, що справедливе для будь-якого моменту часу.

Якщо припустити, що вся напруга джерела прикладена тільки до котушки, то максимальне потокозчеплення $\Psi_m = \frac{U_m}{\omega} = \frac{31,4}{314} = 0,1 \text{ Вб} > \Psi_S$, тому під час роботи схеми у котушки будуть обидва стани: 1) насичене, коли $\Psi = \pm \Psi_S = \text{const}$, $\frac{d\Psi}{dt} = 0$, $i = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = 0,0587 \sin \omega t \text{ А}$; 2) ненасичене,

коли $\frac{d\Psi}{dt} \neq 0$, а струм $i = \pm I_C$, для якого

$$\Psi = \int (I_C r + U_m \sin \omega t) dt = I_C r t - \frac{U_m}{\omega} \cos \omega t + \Psi_0 = 7,22t - 10 \cdot 10^{-2} \cos \omega t + \Psi_0.$$

При виході з негативного насиченого стану (т.3 на ВБAX) у момент часу t_1 $i(\omega t_1) = \frac{U_m}{r} \sin \omega t_1 = +I_C$,

$$\text{звідки } \omega t_1 = \arcsin \frac{I_C r}{U_m} = \arcsin \frac{1,35 \cdot 535}{100 \cdot 31,4} = 0,023 \text{ рад} = 13,3^\circ, \quad t_1 = 7,39 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

а потокозчеплення $\Psi(\omega t_1) = -\Psi_S$.

Під час переходу через межу інтервалу ωt_1 потокозчеплення не може змінитися стрибком (принцип безперервності силових ліній магнітного поля у будь-який момент часу, відомий в теорії ПП як перший закон комутації).

На цій підставі визначимо постійну інтегрування Ψ_0 з рівняння

$$\Psi(\omega t_1) = -I_C r t_1 - \frac{U_m}{\omega} \cos \omega t_1 + \Psi_0 = -\Psi_S,$$

$$\text{звідки } \Psi_0 = -2 \cdot 10^{-2} + 7,22 \cdot 7,39 \cdot 10^{-4} + 10 \cdot 10^{-2} \cos 13,3^\circ = 8,266 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

Таким чином, в стані перемагнічування котушки струм і потокозчеплення у колі наступні:

$$i = +I_C = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ А}, \quad \Psi = 8,266 \cdot 10^{-2} - 7,22t - 10 \cdot 10^{-2} \cos \omega t \text{ Вб}.$$

Момент закінчення перемагнічування ωt_2 визначимо з умови

$$\Psi(\omega t_2) = +\Psi_S \quad \text{або} \quad 2 \cdot 10^{-2} = 8,266 \cdot 10^{-2} - 7,22t_2 - 10 \cdot 10^{-2} \cos \omega t_2,$$

звідки $\omega t_2 = 70^\circ$, $t_2 = 0,389 \cdot 10^{-2} \text{ с}$.

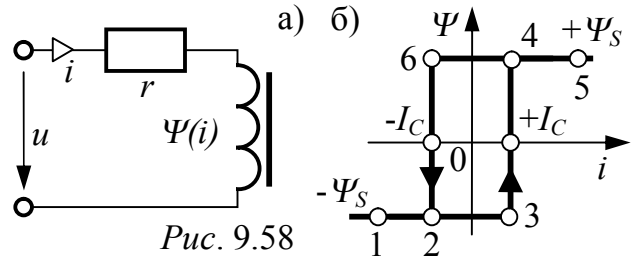


Рис. 9.58

На рис. 9.59 подані криві, побудовані за умови, що вони симетричні відносно осі абсцис.

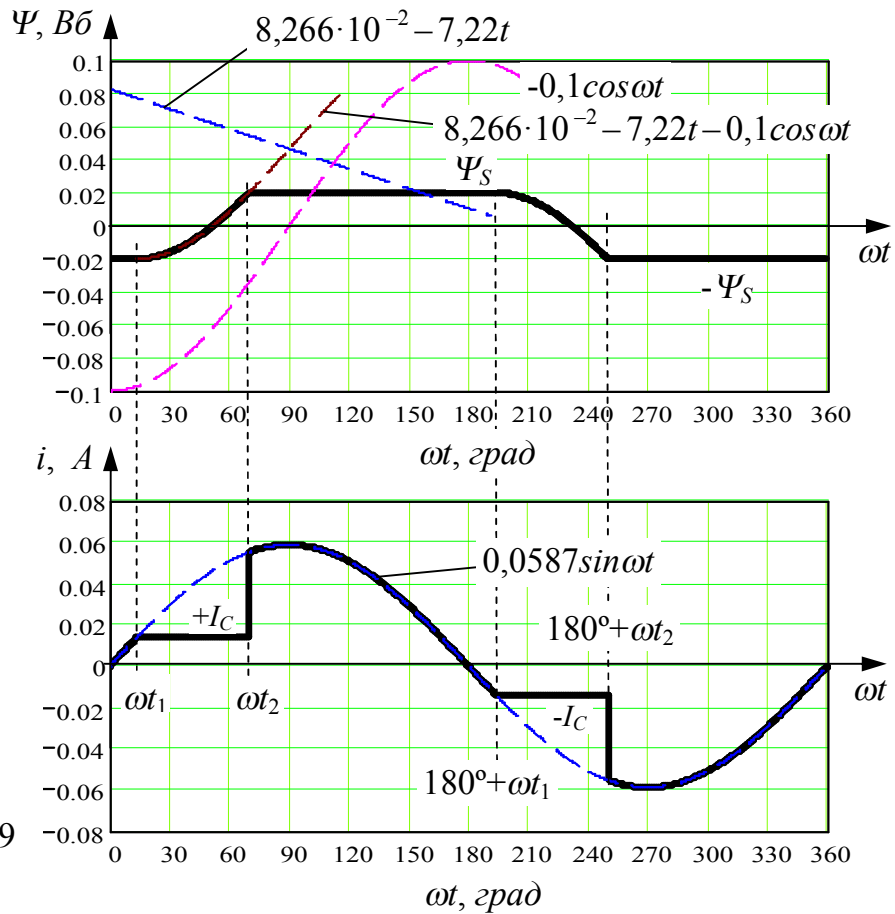


Рис. 9.59

9.2.3 Розрахунок по характеристиках для діючих значень

Методика базується на заміні несинусоїдних величин еквівалентними синусоїдами, діючі значення яких в основному визначаються першими гармоніками. Еквівалентні синусоїди напруг і струмів виражаються векторами або комплексами. Кількісний зв'язок між напругою і струмом (в діючих значеннях) в загальному випадку нелінійний, але, як і для синусоїдних струмів і напруг, $\underline{U}_r = \underline{I}r$, де $r = U_r/I = r(I)$, $\underline{U}_L = j\omega L_E \underline{I}$, $\underline{U}_C = -j \frac{1}{\omega C_E} \underline{I}$.

струмів і напруг, $\underline{U}_r = \underline{I}r$, де $r = U_r/I = r(I)$, $\underline{U}_L = j\omega L_E \underline{I}$, $\underline{U}_C = -j \frac{1}{\omega C_E} \underline{I}$.

ЗАДАЧА 9.64. До ідеальної котушки, осердя якої виконано зі сталі 1512, підведена синусоїдна напруга, діюче значення якої потрібно розрахувати, якщо її струм $I = 1\sin\omega t - 0,3\sin 3\omega t$ А, довжина середньої магнітної лінії $l = 25$ см, переріз осердя $S = 10$ см², а кількість витків $w = 442$.

Розв'язання

Розглядаючи вираз струму котушки, помічаємо, що при $\omega t = \pi/2$ складаються амплітуди струмів першої і третьої гармонік. Тому максимальне значення струму котушки $I_m = 1 + 0,3 = 1,3$ А. На підставі другого закону Кірхгофа для магнітного кола розрахуємо максимальну напруженість поля в осерді

$$H_m = \frac{I_m \cdot w}{l} = \frac{1,3 \cdot 442}{25} = 23 \text{ A/cm.}$$

За допомогою основної кривої намагнічування сталі 1512 визначаємо максимальне значення магнітної індукції $B_m = 1,5 \text{ Тл}$.

Підведена до котушки напруга іде на компенсацію ЕРС основного магнітного потоку і визначається за формулою:

$$U = 4,44 \cdot B_m \cdot w \cdot f \cdot S = 4,44 \cdot 1,5 \cdot 442 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-4} = 147,2 \text{ В.}$$

ЗАДАЧА 9.65. Для визначення параметрів котушки із сталевим осердям поставлено два експерименти при $f = 50 \text{ Гц}$: з осердям: $U = 100 \text{ В}$, $I = 1,25 \text{ А}$, $\cos \varphi = 0,2$; без осердя: $U = 32 \text{ В}$, $I = 4 \text{ А}$, $P = 51,2 \text{ Вт}$.

Скласти схему заміщення, визначити її параметри, втрати в сталі P_c .

Розв'язання

На рис. 9.60 подано послідовну схему заміщення реальної котушки з феромагнітним осердям.

Експеримент без осердя:

$$x_0 = 0, \quad r_0 = 0, \quad r_M = \frac{P}{I^2} = 3,2 \text{ Ом}, \quad Z = \frac{U}{I} = 8 \text{ Ом}, \quad x_S = \sqrt{Z^2 - r_M^2} = 7,33 \text{ Ом}.$$

Експеримент з осердям:

$$Z = U/I = 80 \text{ Ом}, \quad R = Z \cdot \cos \varphi = 16 \text{ Ом}, \quad r_0 = R - r_M = 12,8 \text{ Ом},$$

$$x_0 = \sqrt{Z^2 - R^2} - x_S = 71,05 \text{ Ом},$$

$$P_c = r_0 \cdot I^2 = 20 \text{ Вт} \quad \text{або} \quad P_c = UI \cos \varphi - r_M I^2 = 20 \text{ Вт}.$$

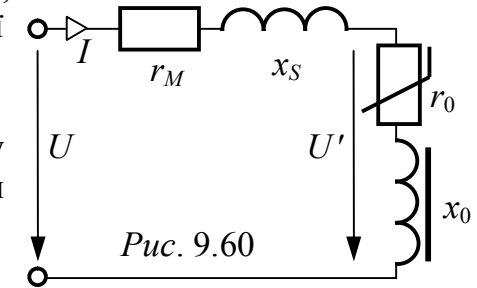


Рис. 9.60

ЗАДАЧА 9.66. Котушка з осердям (схема заміщення – на рис. 9.60) увімкнена у коло змінного струму, $f = 50 \text{ Гц}$. Прилади показали: $U = 120 \text{ В}$, $I = 4 \text{ А}$, $P = 280 \text{ Вт}$, $r_M = 2,5 \text{ Ом}$. Визначити ЕРС самоіндукції E , $\cos \varphi$, втрати в сталі P_c . Поток розсіяння знехтувати ($x_S = 0$).

Розв'язання

$$R = \frac{P}{I^2} = 17,5 \text{ Ом}, \quad r_0 = R - r_M = 15 \text{ Ом}, \quad Z = \frac{U}{I} = 30 \text{ Ом},$$

$$x_0 = \sqrt{Z^2 - R^2} = 24,4 \text{ Ом}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z} = 0,583, \quad P_c = r_0 \cdot I^2 = 240 \text{ Вт},$$

$$E = U' = \sqrt{r_0^2 + x_0^2} \cdot I = 115 \text{ В}.$$

ЗАДАЧА 9.67. При $U = 200 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$ струм в обмотці дроселя 5 А , $P = 300 \text{ Вт}$, $w = 600$, $r_M = 6 \text{ Ом}$, $\Phi_m = 1,2 \text{ мВб}$. Визначити параметри схеми заміщення, втрати в сталі P_c і міді P_M .

Розв'язання

$$Z = \frac{U}{I} = 40 \text{ Ом}, \quad R = \frac{P}{I^2} = 12 \text{ Ом}, \quad r_0 = R - r_M = 6 \text{ Ом},$$

$$P_M = r_M \cdot I^2 = 150 \text{ Вт}, \quad P_c = r_0 \cdot I^2 = 150 \text{ Вт}, \quad U' = \Phi_m \cdot 4,44fw = 160 \text{ В},$$

$$Z_0 = \frac{U'}{I} = 32 \text{ Ом}, \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = 31,4 \text{ Ом},$$

$$x = \sqrt{Z^2 - R^2} = 38,2 \text{ Ом}, \quad x_S = x - x_0 = 6,76 \text{ Ом}.$$

ЗАДАЧА 9.68. Магнітопровід дроселя із сталі 1512, $w = 410$, $r_M = 15 \text{ Ом}$, $x_S = 10 \text{ Ом}$. Визначити, яку напругу необхідно подати на дросель ($f = 50 \text{ Гц}$), щоб магнітна індукція в осерді склала величину $B_m = 1,1 \text{ Тл}$, якщо $S = 20 \text{ см}^2$, $g = 7800 \text{ кГ/м}^3$. При $B_m = 1,1 \text{ Тл}$ $H_m = 300 \text{ А/м}$, питомі активна і реактивна потужності осердя $P_0 = 1,46 \text{ Вт/кГ}$, $Q_0 = 6,5 \text{ вар/кГ}$, коефіцієнт поправки $\xi = 1,05$, маса осердя $M = 15,6 \text{ кГ}$.

Розв'язання

Активна і реактивна потужності осердя

$$P_c = P_0 \cdot M = 22,8 \text{ Вт}, \quad Q_c = Q_0 \cdot M = 101,4 \text{ вар}.$$

Довжина осердя $l = \frac{M}{gS} = 1 \text{ м}.$

Максимальне значення струму $I_m = \frac{H_m l}{w} = \frac{300 \cdot 1}{410} = 0,732 \text{ А},$

діюче значення струму $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}\xi} = 0,493 \text{ А}.$

Параметри послідовної схеми заміщення

$$r_0 = \frac{P_c}{I^2} = 93,9 \text{ Ом}, \quad x_0 = \frac{Q_c}{I^2} = 417,6 \text{ Ом}, \quad Z = \sqrt{(r_M + r_0)^2 + (x_S + x_0)^2} = 441 \text{ Ом}.$$

Напруга на дроселі $U = Z \cdot I = 218 \text{ В}.$

ЗАДАЧА 9.69. З котушкою із сталевим осердям проведені досліди: на постійному струмі – $U_{\sim} = 20 \text{ В}$, $I_{\sim} = 10 \text{ А}$; на змінному струмі – $f = 50 \text{ Гц}$, $U_{\sim} = 100 \text{ В}$, $I_{\sim} = 5 \text{ А}$, $P = 100 \text{ Вт}$.

Визначити втрати в сталі і міді, параметри схеми заміщення, коефіцієнт потужності, кут втрат. Поток розсіяння знехтувати ($\Phi_S = 0$).

Розв'язання

$$r_M = U/I_{\sim} = 2 \text{ Ом}, \quad Z = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}} = 20 \text{ Ом}, \quad R = \frac{P}{I_{\sim}^2} = 4 \text{ Ом}, \quad r_0 = R - r_M = 2 \text{ Ом},$$

$$x_0 = \sqrt{Z^2 - R^2} = 19,60 \text{ Ом}. \quad P_c = r_0 \cdot I_{\sim}^2 = 50 \text{ Вт}, \quad P_M = r_M \cdot I_{\sim}^2 = 50 \text{ Вт},$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = 0,2, \quad \text{кут втрат } \delta = \arctg \frac{g_0}{b_0} = \arctg \frac{r_0}{x_0} = \arctg \frac{2}{19,6} = 5,83^\circ.$$

ЗАДАЧА 9.70. До первинної обмотки трансформатора (рис. 9.61) прикладена напруга $U_1 = 220 \text{ В}$ частотою $f = 150 \text{ Гц}$. Осердя трансформатора набране з ізольованих листів сталі 1512 товщиною $\Delta = 0,5 \text{ мм}$, слой ізоляції між листами складає $\delta = 0,01 \text{ мм}$. Розміри магнітопроводу: $a = 500 \text{ мм}$, $b = 50 \text{ мм}$,

$c = 60 \text{ мм}$, $h = 600 \text{ мм}$. Числа витків обмоток $w_1 = 75$, $w_2 = 35$. Повітряний зазор $l_{\Pi} = 0,5 \text{ мм}$.

Потрібно при розімкненій вторинній обмотці розрахувати напругу на її затискачах, а також струм в первинній обмотці, якщо магнітний потік розсіяння складає 5% від основного магнітного потоку, а вимір активного опору проводу первинної обмотки на постійному струмі дав $r_M = 0,461 \text{ Ом}$.

Розрахувати параметри послідовної та мішаної схем заміщення котушки.

Розв'язання

Розрахуємо довжину середньої магнітної лінії l і переріз лише сталі S в осерді.
 $l = 2 \cdot (a + h) = 2 \cdot (500 + 600) = 2200 \text{ мм} = 2,2 \text{ м}$,
 $S = b \cdot c \cdot k_3$,

де коефіцієнт заповнення $k_3 = \frac{\Delta}{\Delta + \delta} = \frac{0,5}{0,5 + 0,01} = 0,98$;

$$S = 50 \cdot 60 \cdot 0,98 = 2941 \text{ мм}^2 = 2,941 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Оскільки вторинна обмотка розімкнена і в ній відсутній струм, то вона не має впливу на струм первинної обмотки, який розрахуємо методом послідовних наближень.

Припустимо, що складова напруги U_1 , яка компенсує ЕРС основного магнітного потоку, складає $U' = 0,96U_1 = 211,2 \text{ В}$.

Тоді амплітуди основного магнітного потоку і магнітної індукції

$$\text{будуть } \Phi_m = \frac{U'}{4,44 f w_1} = \frac{211,2}{4,44 \cdot 150 \cdot 75} = 4,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{4,23 \cdot 10^{-3}}{2,94 \cdot 10^{-3}} = 1,44 \text{ Тл}.$$

По основній кривій намагнічування сталі 1512 визначаємо максимальне значення напруженості магнітного поля $H_m = 14,26 \text{ А/см} = 1426 \text{ А/м}$.

На підставі другого закону Кірхгофа для магнітного кола маємо

$$H_m \cdot l + H_{\Pi m} \cdot l_{\Pi} = I_{pm} \cdot w_1,$$

де $H_{\Pi m} = B_m / \mu_0$ – максимальне значення напруженості магнітного поля в повітряному зазорі.

Тоді максимальне значення реактивної складової струму

$$I_{pm} = \frac{H_m \cdot l + H_{\Pi m} \cdot l_{\Pi}}{w_1}.$$

Для визначення його діючого значення використаємо коефіцієнт ξ , який враховує несинусоїдність кривої струму, яка має місце внаслідок насичення сталі. Він залежить від амплітуди магнітної індукції і при $B_m = 1,44 \text{ Тл}$ дорівнює $\xi = 1,39$.

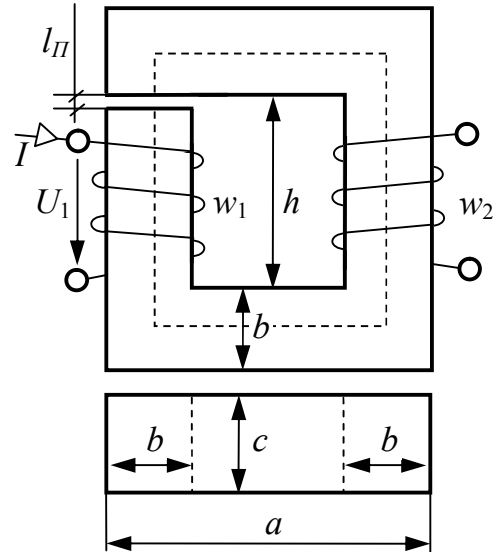


Рис. 9.61

$$\text{Тоді } I_p = \frac{\frac{H_m \cdot l}{\xi} + \frac{B_m}{\mu_0} \cdot l_{II}}{\sqrt{2} \cdot w_1} = \frac{1426 \cdot 2,2}{1,39} + \frac{1,44 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 26,68 \text{ A.}$$

Активну складову струму розрахуємо через втрати в сталі, які визначимо за формулою

$$P_c = p_{1/50} \cdot B_m^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} M,$$

де $p_{1/50}$ – питомі втрати (в 1 кг) при амплітуді магнітної індукції $B_m = 1 \text{ Тл}$ і частоті $f = 50 \text{ Гц}$; для сталі 1512 при товщині листів $\Delta = 0,5 \text{ мм}$ вони складають $3,3 \text{ Вт/кг}$; M – маса осердя.

$$M = g \cdot S \cdot l, \text{ де } g \text{ – питома вага сталі, яка складає } 7,8 \text{ г/см}^3.$$

$$M = 7,8 \cdot 29,41 \cdot 220 = 50470 \text{ г} = 50,47 \text{ кг};$$

$$P_c = 3,3 \cdot 1,44^2 \cdot \left(\frac{150}{50} \right)^{1,3} \cdot 50,47 = 1436 \text{ Вт.}$$

$$\text{Активна складова струму } I_a = \frac{P_c}{U'} = \frac{1436}{211,2} = 6,80 \text{ A.}$$

$$\text{Повний струм } I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{6,80^2 + 26,68^2} = 27,53 \text{ A.}$$

$$\text{Кут втрат } \alpha = \arctg \frac{I_a}{I_p} = \arctg \frac{6,80}{26,68} = 14,3^\circ.$$

Виконаємо перевірку вірності вибору U' . З цією метою згідно з рис. 9.60 знайдемо розрахункове значення напруги джерела

$$U_{розр} = |\underline{I}(r_M + jx_S) + \underline{U}'|, \text{ в якому приймемо } \underline{U}' = U' = 211,2 \text{ В.}$$

$$\text{Тоді } \underline{I} = I \cdot e^{-j(90^\circ - \alpha)} = 27,53 \cdot e^{-j75,7^\circ} \text{ A.}$$

Розрахуємо x_S . За умовами задачі $\Phi_S = 0,05\Phi$. Тому

$$L_S = \frac{w_1 \cdot \Phi_S}{I} = \frac{0,05 \cdot w_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2} \cdot I} = \frac{0,05 \cdot 75 \cdot 4,23 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 27,53} = 4,07 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

$$\text{Індуктивний опір } x_S = \omega \cdot L_S = 942 \cdot 4,07 \cdot 10^{-4} = 0,384 \text{ Ом.}$$

В результаті маємо

$$U_{розр} = |\underline{I}(r_M + jx_S) + \underline{U}'| = |27,53 \cdot e^{-j75,7^\circ} \cdot (0,461 + j0,384) + 211,2| = 224,8 \text{ В.}$$

$$\text{Похибка складає } \frac{U - U_{розр}}{U} \cdot 100\% = \frac{220 - 224,8}{220} \cdot 100\% = -2,18 \%.$$

Це дозволяє вважати розрахунок струму вірним.

Розрахуємо параметри схем заміщення котушки. Для послідовної схеми (рис. 9.60)

$$r_0 = \frac{P_c}{I^2} = \frac{1436}{27,53^2} = 1,89 \text{ Ом}, \quad z_0 = \frac{U'}{I} = \frac{211,2}{27,53} = 7,67 \text{ Ом},$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{7,67^2 - 1,89^2} = 7,43 \text{ Ом.}$$

Для мішаної схеми (рис. 9.62):

$$g_0 = \frac{I_a}{U'} = \frac{6,80}{211,2} = 0,032 \text{ См}, \quad b_0 = \frac{I_p}{U'} = \frac{26,68}{211,2} = 0,126 \text{ См},$$

$$Y_0 = \frac{I}{U'} = \frac{27,53}{211,2} = 0,13 \text{ См}.$$

Напруга на затискачах вторинної обмотки

$$U_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad \text{але} \quad U' = w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

З цих виразів маємо

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot U' = \frac{35}{75} \cdot 211,2 = 98,6 \text{ В}.$$

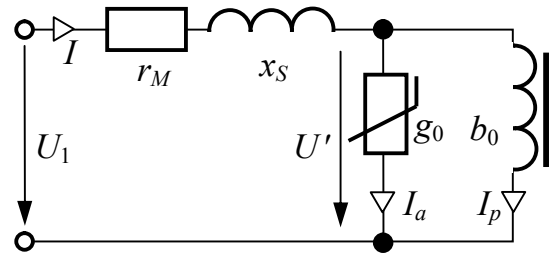


Рис. 9.62

ЗАДАЧА 9.71. Дросель із сталевим магнітопроводом, ВАХ якого для діючих значень за частоти $f = 50 \text{ Гц}$ в певних межах апроксимується виразом

$$U_L = 200I - 15I^3, \quad \text{де} \quad U_L[\text{В}], \quad I[\text{А}],$$

з'єднаний послідовно з лінійним конденсатором ємністю 20 мкФ .

Нехтуючи втратами в сталі, обмотці дроселя і конденсаторі, визначити, за якого значення струму: а) буде режим резонансу напруг, б) вхідна напруга досягає максимального значення за умови, що все коло має індуктивний характер.

Визначити: 1) за якої мінімальної ємності не можна досягти резонансу зміною напруги або струму джерела живлення; 2) за якої максимальної ємності вже не можна користуватися даною апроксимацією характеристики дроселя під час розрахунку резонансного струму.

Відповіді: а) $U_L - U_C = 200I - 15I^3 - \frac{I}{2\pi f C} = 0, \quad I = 1,65 \text{ А};$

б) $\frac{d(U_L - U_C)}{dI} = 40,8 - 45I^2 = 0, \quad I = 0,952 \text{ А};$

1) $x_L(0) = \frac{dU_L}{dI}(0) = 200 - 45 \cdot I^2 = 200 \text{ Ом} = x_{Cmax}, \quad C_{min} = \frac{1}{2\pi f x_{Cmax}} = 15,9 \text{ мкФ};$

2) $\frac{dU_L}{dI} = 200 - 45 \cdot I^2 = 0, \quad I = 2,11 \text{ А}, \quad x_{Cmin} = x_L(2,11) = \frac{U_L}{I}(2,11) = 133,3 \text{ Ом},$

$C_{max} = \frac{1}{2\pi f x_{Cmin}} = 23,89 \text{ мкФ}.$