

Ю. В. Батигін¹
О. Ф. Єрємона¹
С. О. Шиндерук¹
Є. О. Чаплигін¹

ВИХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РАЗІ ВАРІАЦІЇ СХЕМНИХ ПАРАМЕТРІВ

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Проведено теоретичне дослідження процесів, що проходять у резонансному підсилювачі реактивної електричної потужності, схема якого представлена двома індуктивно пов'язаними послідовними активно-реактивними контурами, за можливої варіації рівня електромагнітного зв'язку між ними та порушення умов резонансу. Оцінено вихідні характеристики підсилювача реактивної електричної потужності гармонічних сигналів у разі варіації рівня електромагнітного зв'язку між контурами та відхилення робочих частот від резонансних величин. Аналіз перебігу електромагнітних процесів проведено за допомогою відомих методів теорії електричних кіл без залучення будь-яких гіпотез про фізику резонансних явищ. Вперше проведено дослідження резонансного підсилювача реактивної електричної потужності, що дозволяє дати важливі для практики оцінки вихідних характеристик залежно від відхилень величин елементної бази від відповідних умов збудження резонансу напруг. Показано, що найбільше впливає на ефективність ступінь відхилення робочих частот від резонансних значень і рівень електромагнітного зв'язку між контурами запропонованої схеми підсилювача. Встановлено, що енергообмін між контурами підсилювача дозволяє реалізувати режим з максимально можливим коефіцієнтом підсилення за невеликих значень струмів, що збуджуються, або режим з удвічі меншим коефіцієнтом підсилення, але з істотно великими струмами. Практична значущість отриманих результатів визначається можливостями застосування запропонованого підсилювача залежно від потужності джерела напруги. У разі джерел з невеликими амплітудами збуджувального сигналу доцільним є режим з низьким рівнем зв'язку, а за використання потужних джерел гармонічної напруги ліпшим є режим з високим рівнем електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача. Важливим для практики є висновок про суттєве зниження коефіцієнта підсилення у разі відхилення частот збудження від резонансних величин. Показано, що варіація частот збудження близько $\pm 5\%$ призводить до пропорційного зміщення максимумів вихідної потужності щодо резонансної частоти підсилювача, причому однакового як для позитивних, так і негативних варіацій відхилення.

Ключові слова: електроенергетика, резонансні активно-реактивні електричні контури, підсилення електричної потужності.

Вступ, постановка задачі

Найвідомішим з перших пропозицій використання резонансу для підсилення електричних сигналів у контурах з реактивними елементами можна вважати пристрій, названий на ім'я винахідника «трансформатор Н. Тесла». Останній захищений авторськими патентами «Апарат для виробництва електричних струмів високої частоти та потенціалу» (1896) та «Спосіб передачі електричної енергії через природне середовище» (1907). Відмінною особливістю запропонованого пристрою є надзвичайно високий коефіцієнт перетворення напруги ($k > 1000$), що набагато перевищує коефіцієнт трансформації, зумовлений індуктивним зв'язком між обмотками [1].

Використання резонансних явищ для альтернативної електроенергетики висвітлено в досить багатьох роботах різних авторів, зокрема, можна назвати найілюстративніші публікації [2]—[5].

Так, авторами [2] описано електричні коливання в резонансному контурі, що збуджуються завдяки використанню енергії морських хвиль (відновлюване джерело). У цитованій статті обґрун-

товано дієздатність запропонованої схеми і показано, що саме збудження її в резонансному режимі дає значне збільшення вихідної електричної енергії. У роботах [3], [4] запропоновано дещо інші підходи до створення резонансних підсилювачів реактивної потужності. Перший представлений схемою, в якій послідовно пов'язані паралельні RLC -контури, включені в коло джерела високочастотної синусоїдальної напруги. За виконання резонансних умов, на думку автора, стає можливим багаторазове збільшення реактивної енергії вихідного сигналу [3]. Другий підхід ілюструється ідеалізованою схемою, представленою двома індуктивно пов'язаними, але послідовними RLC -контурами. Активний опір вихідного кола вважається нульовим. Схема порушується генератором гармонічної напруги [4]. Загальними недоліками останніх двох пропозицій є значні складнощі у їхній практичній реалізації.

Розвиток теорії процесів у схемі з реальними послідовними активно-реактивними контурами, дозволив у режимі «резонансу напруг» отримати теоретично та експериментально обґрунтоване підсилення реактивної потужності більше ніж у 33...35 разів [5], [6]. І це не є межею. Як показали проведені дослідження, найбільше на вихідні характеристики запропонованого пристрою впливають ступінь відхилення робочих частот від резонансних значень і рівень електромагнітного зв'язку між контурами запропонованої схеми підсилювача.

Практичне застосування такого перетворювача електричної потужності ілюструється прикладом магнітно-імпульсної обробки металів, що є прогресивною екологічно чистою сучасною промисловою технологією. Включення резонансного підсилювача реактивної електричної потужності до схеми магнітно-імпульсного обладнання дозволить з підвищенням продуктивності суттєво знизити енергоспоживання, підвищити економію матеріальних ресурсів виробництва і, зрештою, призвести до істотного зниження собівартості продукції, що випускається [7], [8].

Метою роботи є оцінювання вихідних характеристик підсилювача реактивної електричної потужності гармонічних сигналів, схема якого представлена двома індуктивно пов'язаними послідовними контурами, з варіацією рівня електромагнітного зв'язку між ними та відхиленням робочих частот від резонансних величин.

Основні розрахункові співвідношення

Схема заміщення запропонованого перетворювача потужності двох послідовних резонансних контурів з повітряним трансформатором зв'язку між ними показана на рис. 1. Індуктивність первинної та вторинної обмоток трансформатора — $L_{1T,2T}$ відповідно.



Рис. 1. Схема підсилювача реактивної електричної потужності

Перший або «вхідний» контур з джерелом гармонічної напруги $E(t) = E_m \sin(\omega t)$ (E_m — амплітуда, ω — частота, t — час) містить послідовно з'єднані індуктивність L_{1T} , ємність C_1 , активний опір з'єднувальних проводів, внутрішнього опору джерела напруги та первинної обмотки трансформатора зв'язку R_1 .

Другий або «вихідний» контур містить індуктивність L_{2T} , індуктивність L_2 , яка розглядається як «вихідний» елемент перетворювача в цілому, ємність C_2 , активний опір з'єднувальних проводів та обмоток індуктивностей R_2 .

Примітка. Оскільки в резонансному режимі величина напруги на реактивних елементах є однаковою, то вихідним елементом перетворювача може служити і ємність C_2 .

Власні резонансні частоти першого та другого контурів відповідно

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{1T} \cdot C_1}} \quad \text{і} \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{(L_{2T} + L_2) \cdot C_2}}.$$

Рівняння, які описують процеси, що відбуваються, у наближенні до методу комплексних амплітуд, мають вигляд [5], [9]

$$\begin{cases} E = I_1 \cdot (iF_1(\omega, \omega_1) + R_1) + i\omega M_{12} \cdot I_2, \\ -i\omega \cdot M_{12} \cdot I_1 = (iF_2(\omega, \omega_2) + R_2) \cdot I_2; \end{cases} \quad (1)$$

де i — уявна одиниця, $F_1(\omega, \omega_1) = \omega L_{1T} \Delta_1$, $F_2(\omega, \omega_2) = \omega(L_{2T} + L_2) \Delta_2$, $M_{12} = k_{12} \cdot \sqrt{L_{1T} \cdot L_{2T}}$ — взаємодуктивність, $k_{1,2}$ — коефіцієнт електромагнітного зв'язку між обмотками трансформатора зв'язку, ω та ω_1 — робочі частоти збудження, $\Delta_{1,2} = \left(1 - \left(\frac{\omega_{1,2}}{\omega}\right)^2\right)$ — параметри відхилень робочих

частот від резонансних значень першого і другого контурів системи, відповідно.

З системи рівнянь (1) знаходимо збудні струми у першому та другому контурах. Опускаючи громіздкі проміжні тотожні перетворення, отримуємо такі аналітичні залежності:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E}{Z_1}, \\ I_2 = \frac{E}{Z_2}, \end{cases} \quad (2)$$

де $Z_{1,2}$ мають сенс еквівалентних комплексних опорів зв'язку збуджуваних струмів з напругою джерела $E(t)$

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{\omega M_{12} \cdot Z_2}{\sqrt{F_2^2(\omega, \omega_2) + R_2^2}} \cdot e^{i\varphi_{Z_1}}, \\ Z_2 = \frac{1}{\omega M_{12}} \sqrt{\left(R_1 R_2 + (\omega M_{12})^2 - F_1(\omega, \omega_1) F_2(\omega, \omega_2)\right)^2 + \left(F_1(\omega, \omega_1) R_2 + F_2(\omega, \omega_2) R_1\right)^2} \cdot e^{i\varphi_{Z_2}}, \\ \varphi_{Z_1} = \left(\arctg \frac{R_2}{F_2(\omega, \omega_2)} - \pi\right); \quad \varphi_{Z_2} = \left(\arctg \frac{\left(F_1(\omega, \omega_1) R_2 + F_2(\omega, \omega_2) R_1\right)}{\left(R_1 \cdot R_2 + (\omega M_{12})^2 - F_1(\omega, \omega_1) F_2(\omega, \omega_2)\right)} + \frac{\pi}{2}\right). \end{cases}$$

Формули (2) можна перевірити граничними переходами до раніше отриманих результатів у публікації [5], де роботу підсиловача реактивної електричної потужності досліджено за умов суворого резонансу. За аналогічних умов співвідношення для еквівалентних опорів і струмів (2) з точністю до позначень повторюють відповідні вирази у статті [5], що свідчить про достовірність аналітичних залежностей, отриманих у цій роботі.

Слід зазначити також практично цікаву особливість публікації [5]. Показано, що за певного вибору величини коефіцієнта електромагнітного зв'язку між обмотками трансформатора зв'язку

$k_{12} = \frac{1}{\omega_{1,2}} \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{L_{1T} \cdot L_{2T}}}$ струм у вторинному контурі досягає максимуму $I_2 \rightarrow I_{2\max} = \frac{E}{2\sqrt{R_1 \cdot R_2}}$, а

коефіцієнт підсилення реактивної електричної потужності $K_m = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega L_2}{R_2}\right)$.

Далі, за допомогою залежностей (2) можна доповнити роботу [5] вельми значущими з практичного погляду розрахунковими співвідношеннями.

Почнемо з режиму суворого резонансу, коли $\omega = \omega_1 = \omega_2$, $\Delta_{1,2} = 0$, але модуль «взаємодуктивного» опору $X_{L_{1,2}} = \omega M_{1,2}$ — величина змінна. Практично, варіацію $X_{L_{1,2}}$ можна здійснити зміною взаємного розташування обмоток трансформатора зв'язку, що спричиняє збільшення чи зменшення коефіцієнта електромагнітного зв'язку між ними — $k_{1,2} = \text{var}$.

Якщо $(\omega M_{1,2})^2 \gg R_1 R_2$, то з залежностей (2) впливає основний і найцікавіший для практики висновок про можливість подвоєння (порівняно з роботою [5]) вихідної енергії.

$$K_{\max} = 2K_m = \left(\frac{\omega L_2}{R_2}\right). \quad (3)$$

У разі довільного часового режиму вираз для коефіцієнта підсилення реактивної електричної потужності, нормованого на максимум свого значення (формула (3)), набуває вигляду:

$$K_0 = \frac{K_m}{K_{\max}} = \frac{P_{2m}}{P_{1m}} \cdot \frac{1}{K_{\max}} = \left(\frac{Z_{1m} \cdot R_2}{Z_{2m}^2} \right), \quad (4)$$

$$\text{де } Z_{2m} = \frac{1}{\omega M_{12}} \sqrt{\left(R_1 R_2 + (\omega M_{12})^2 - F_1(\omega, \omega_1) F_2(\omega, \omega_2) \right)^2 + \left(F_1(\omega, \omega_1) R_2 + F_2(\omega, \omega_2) R_1 \right)^2};$$

$$Z_{1m} = \frac{\omega M_{12}}{\sqrt{F_2^2(\omega, \omega_2) + R_2^2}} Z_{2m}; \quad F_2(\omega, \omega_2) = \omega(L_{2T} + L_2)\Delta_2; \quad F_1(\omega, \omega_1) = \omega L_{1T}\Delta_1; \quad \Delta_{1,2} = \left(1 - \left(\frac{\omega_{1,2}}{\omega} \right)^2 \right) \quad \text{—}$$

оціночні характеристики відхилень робочих частот ω від резонансних значень для першого та другого контурів відповідно.

За допомогою виразу (4) виконаємо конкретне чисельне оцінювання ефективності експериментальної моделі підсилювача реактивної електричної потужності, розробленої на кафедрі фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, за умови варіації рівня електромагнітного зв'язку між контурами та варіації робочих частот щодо резонансних величин.

Чисельне оцінювання, аналіз процесів

Експериментальна модель підсилювача

1. Джерело гармонічної напруги:

амплітуда $E_m = 1,0$ В; частота вихідного сигналу, що варіюється, $\omega = \text{var}$.

2. Вхідний контур — перший контур:

індуктивність $L_{1T} = 13,0$ мкГн; ємність $C_1 = 3,11757$ мкФ; активний опір з урахуванням внутрішнього опору джерела напруги $R_1 = 0,21$ Ом; власна частота $f_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{1T} \cdot C_1}} \approx 25000,0$ Гц; $\omega_1 = 2\pi f_1 = 157080$ Гц.

3. Вихідний контур — другий контур:

індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку $L_{2T} = 13,0$ мкГн; індуктивність «вихідного соленоїда» $L_2 = 172,8$ мкГн; сумарна індуктивність контуру $L_S = L_{2T} + L_2 = 185,8$ мкГн; активний опір $R_2 = 0,46$ Ом; ємність $C_2 = 0,218$ мкФ; власна частота $f_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{1T} \cdot C_1}} \approx 25000,0$ Гц; $\omega_2 = 2\pi f_2 = 157080$ Гц.

Примітка. Фактично, варіація робочих частот у контурах підсилювача за постійних індуктивностей може здійснюватися відповідною зміною величин їхніх ємностей. Варіація рівня електромагнітного зв'язку між контурами може здійснюватися, наприклад, варіацією взаємного розташування обмоток трансформатора зв'язку між ними або введенням в його конструкцію феритового сердечника [1], [4].

Як базову вважатимемо власну частоту вхідного контуру ω_1 . Для зручності в розрахунках і наочності в інтерпретації чисельних оцінок введемо величини, що кількісно визначають можливі варіації робочих частот щодо базового значення.

Тоді можна записати, що

$$\begin{cases} \omega_2 = \alpha \cdot \omega_1, \\ \omega = \beta \cdot \omega_1, \end{cases} \quad (5)$$

де α визначає відхилення власної частоти вихідного контуру, вважатимемо, що $\alpha \in [0,95, 1,05]$ (тобто відхилення не перевищують $\pm 5\%$).

З урахуванням залежностей (5) функціональні компоненти виразу (4) набудуть вигляду

$$\begin{cases} F_1(\omega, \omega_1) = \beta \omega_1 L_{1T} \left(1 - \frac{1}{\beta^2} \right), \\ F_2(\omega, \omega_2) = \beta \omega_1 (L_{2T} + L_2) \left(1 - \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 \right), \\ \omega M_{12} = \beta \omega_1 k_{12} \sqrt{L_{1T} L_{2T}}. \end{cases} \quad (6)$$

Результати обчислень з відповідними коментарями наведено нижче. На рис. 2 показана залежність відносного коефіцієнта підсилення реактивної потужності у разі варіації власних частот контурів $\omega_2/\omega_1 = \alpha = \text{var}$, за строгого збігу частоти збудження з її резонансним значенням для першого контуру $\omega = \omega_1$ ($\beta = 1$) і за різних величин рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача.

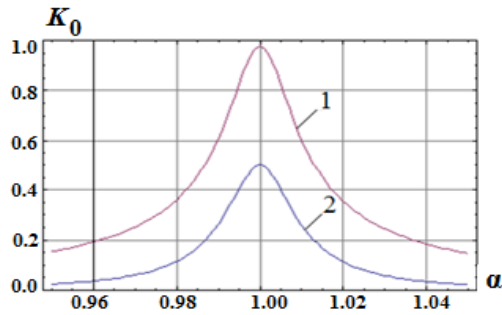


Рис. 2. Відносний коефіцієнт підсилення реактивної потужності з варіацією власних частот контурів: 1 — $k_{12} = 1,0$; 2 — $k_{12} = 0,16$

Із залежностей, показаних на рис. 2, очевидне зростання генерованої реактивної електричної потужності зі збільшенням рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача. Практично значуща особливість цього факту полягає в тому, що за низького рівня зв'язку, незважаючи на менше значення інтегрального коефіцієнта підсилення потужності в порівнянні з аналогом з високим рівнем зв'язку, генеруються струми з вищими амплітудами.

З фізичної точки зору зазначена особливість пояснюється різним характером процесів енергообміну між контурами підсилювача за різного рівня електромагнітного зв'язку між ними. Так, у разі низького рівня зв'язку досить мала потужність первинного контуру збуджує вторинний контур за незначного повернення енергії назад у первинний контур (практично односторонній обмін відповідає режиму резонансного збудження, зазначеного Н. Теслою [1]). За високого рівня зв'язку двосторонній взаємний енергообмін між контурами призводить, відповідно, до значної зміни співвідношення струмів і потужностей у кожному з них, що в підсумку є причиною зниження інтегральної величини коефіцієнта підсилення потужності всієї схеми в цілому.

Кількісно зазначена особливість ілюструється чисельними оцінками табл. 1, виконаними для резонансного стану системи, коли частота збудження збігається з частотами контурів підсилювача (амплітуда збуджувальної напруги джерела $E = 1$ В). У таблиці $P_1 = I_1 E$; $P_2 = I_2^2 \cdot (\omega L_2)^2$.

Чисельні оцінки характеристик за резонансного збудження підсилювача контурів електричної реактивної потужності

Характеристики процесів	k_{12}	I_2/I_1	I_1, A	I_2, A	P_2/P_1	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$
1	0,16	0,676	2,38	1,61	29,5	2,38	70,36
2	1,0	4,45	0,11	0,49	59,0	0,11	0,65

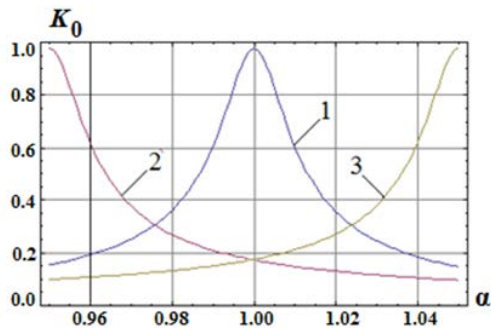


Рис. 3. Відносний коефіцієнт підсилення реактивної потужності за різних величин відхилення частот збудження від резонансних значень:

- 1 — $\omega/\omega_1 = 1,0$ ($\beta = 1,0$);
- 2 — $\omega/\omega_1 = 0,95$ ($\beta = 0,95$);
- 3 — $\omega/\omega_1 = 1,05$ ($\beta = 1,05$)

Значущість цього факту для практики визначається можливостями застосування запропонованого підсилювача в залежності від рівня потужності, що генерується джерелом напруги. У разі джерел з невеликими амплітудами збуджувального сигналу доцільним є режим з низьким рівнем зв'язку, а за використання потужних джерел гармонічної напруги, кращим є режим з високим рівнем електромагнітного зв'язку між підсилювачами контурами.

Графіки на рис. 3 кількісно характеризують зсув максимумів коефіцієнтів підсилення реактивної потужності в залежності від відхилення частот $\omega_2/\omega_1 = \alpha$ збуджувальної напруги джерела від резонансних частот для активно-реактивних контурів схеми підсилювача за фіксованого рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача $k_{12} = 1,0$. Наведені залежності дають змогу оцінити зміну коефіцієнта підсилення в інтервалі зміни частот збудження в інтервалі $\pm 5\%$ щодо резонансного значення. Наприклад, вже у разі відхилення на $\pm 2,2\%$ (відповідають точкам перетину кривих 1, 2, 3), коефіцієнт підсилення реактивної потужності становить 0,3 максимального значення, тобто падає більше ніж у 3 рази. У разі відхилення частот збудження від резонансних на $\pm 5\%$ величина коефіцієнта підсилення знижується майже на порядок.

Криві на рис. 4 ілюструють динаміку зростання коефіцієнта підсилення реактивної потужності в залежності від рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача за різних величин

відхиленнь частот збуджувальної напруги щодо їхніх резонансних частот $\omega_2/\omega_1 = \alpha$ та $\omega = \beta \cdot \omega_1$.

Так, вже за $k_{12} \geq 0,5$ коефіцієнти підсилення потужності прагнуть свого максимуму. Абсолютна ж величина для резонансної частоти збудження дорівнює добротності вихідного контуру підсилювача. Тобто, як випливає з оцінок таблиці,

$$K_m = \left| \frac{P_2 = I_2^2 \cdot (\omega L_2)}{P_1 = I_1 \cdot E} \right| \approx \frac{\omega_1 L_2}{R_2} \rightarrow 59.$$

Щодо частотних відхилень від резонансу, то слід відмітити, що їхній вплив дуже суттєвий. Так, для $\pm 5\%$ відхилень інтегральна величина коефіцієнта підсилення реактивної потужності знижується у 5...10 разів.

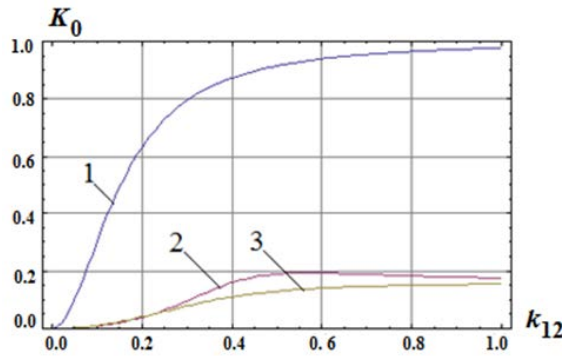


Рис. 4. Відносний коефіцієнт підсилення реактивної потужності залежно від рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача: 1 — $\omega_2/\omega_1 = \alpha = 1,0$ та $\omega = \omega_1$ ($\beta = 1$); 2 — $\omega_2/\omega_1 = \alpha = 1,0$ та $\omega = \beta \cdot \omega_1$ ($\beta = 0,95$ та $1,05$); 3 — $\omega = \omega_1$ ($\beta = 1$), $\omega_2/\omega_1 = \alpha$ ($\alpha = 0,95$ та $1,05$)

Висновки

1. Отримано узагальнені аналітичні залежності та чисельні оцінки вихідних характеристик експериментального підсилювача реактивної електричної потужності гармонічних сигналів з двох індуктивно пов'язаних послідовних контурів з урахуванням можливої варіації рівня електромагнітного зв'язку між ними та збудження умов резонансу.

2. Встановлено, що енергообмін між контурами підсилювача дозволяє реалізувати режим з максимально можливим коефіцієнтом підсилення при невеликих значеннях збуджуваних струмів, або режим з удвічі меншим коефіцієнтом підсилення, але з істотно більшими струмами, що відповідає резонансному збудженню, зазначеному Н. Тесла.

3. Показано зростання генерованої реактивної електричної потужності зі збільшенням рівня електромагнітного зв'язку між контурами підсилювача, а також суттєве зниження коефіцієнта підсилення у разі відхилення частот збудження від резонансних величин.

4. Встановлено, що варіація частот збудження ($\pm 5\%$) зумовлює пропорційне зміщення максимумів вихідної потужності щодо резонансної частоти підсилювача, причому однаково як для позитивних, так і для негативних значень відхилення частоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] N. Tesla, *My Inventions and Other Writing*, Dover Thrift Edition, Dover Publication Inc., 2016, 144 p.
- [2] C. Boström, B. Ekergård, and M. Leijon, "Electric resonance-rectifier circuit for renewable energy conversion," *Applied Physics Letters*, vol. 100(4), 2012.
- [3] Yu. M. Likhovid, "The resonant power amplifier." Patent UA № 103215. 2015.
- [4] K. S. Demirchan, L. R. Neyman, N. V. Korovkin, and V. L. Chechurin, *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*, 4th ed., vol. 1. SPb: Pyter, 2003, 463 p.
- [5] Ю. В. Батигін, Г. С. Серіков, С. О. Шиндерук, В. А. Стрельникова, і Е. Р. Усмонов, «Резонансний підсилювач реактивної електричної потужності. Аналіз електромагнітних процесів,» *Електротехніка та електроенергетика*, вип. 2, с. 34-42, 2019.
- [6] Ю. В. Батигін, С. О. Шиндерук, Г. С. Серіков, і О. Ф. Єрєміна, «Резонансний підсилювач електричної потужності. Експериментальні дослідження,» *Перспективні технології та прилади*, Луцьк: ЛНТУ, зб. наук. пр., вип. 13, с. 18-24, 2018.
- [7] Yu. V. Batygin, E. A. Chaplygin, and O. S. Sabokar, "Magnetic pulsed processing metals for advanced technologies of modernity — a brief review," *Електротехніка і електромеханіка*, вип. 5, с. 35-39, 2016.
- [8] Yu. Batygin, M. Barbashova, and O. Sabokar, *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*, Springer International Publishing AG part of Springer Nature, 2014, 94 p.
- [9] J. J. Thomson, *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*, Publisher: Wentworth, 2016, 424 p.
- [10] L. Kantorovich, *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*, Springer Nature, Switzerland AG, 2018, 526 p.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.10.2023

Батигін Юрій Вікторович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Єрьоміна Олена Федорівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, e-mail: elena.yeryomina@gmail.com ;

Шиндерук Світлана Олександрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net ;

Чапльгін Євген Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com .

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Yu. V. Batygin¹
O. F. Yeryomina¹
S. O. Shinderuk¹
E. O. Chaplygin¹

Output Characteristics of a Reactive Electrical Power Resonant Amplifier in the Event of Varying Circuit Parameters

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

A theoretical study of the processes occurring in a resonant amplifier of reactive electrical power, the circuit of which is represented by two inductively coupled series active-reactive circuits, at a possible variation in the level of electromagnetic coupling between them and a violation of the resonance conditions was carried out. The assessment of the output characteristics of the reactive electrical power amplifier of harmonic signals is performed in case of variations in the level of electromagnetic coupling between them and deviations of operating frequencies from resonant values. The analysis of ongoing electromagnetic processes was carried out using well-known methods of the theory of electrical circuits without involving any hypotheses about the physics of the resonance phenomena. For the first time, a study has been carried out on a resonant amplifier of reactive electrical power, which makes it possible to give practical estimates of output characteristics depending on the deviations of the element base values from the corresponding conditions for excitation of voltage resonance. The greatest influence on the efficiency is exerted by the degree of deviation of operating frequencies from resonant values and the level of electromagnetic coupling between the circuits of the proposed amplifier circuit. It was found that energy exchange between the amplifier circuits makes it possible to implement a mode with the highest possible gain at small values of excited currents or a mode with half the gain, but with significantly higher currents. Practical significance of the obtained results is determined by the possibilities of using the proposed amplifier depending on the power of the voltage source. In the case of sources with small amplitudes of the exciting signal, a mode with a low coupling level is preferable, and when using powerful sources of harmonic voltage, a mode with a high level of electromagnetic coupling between the amplifier circuits is preferable. Of practical interest is the conclusion that the gain decreases significantly when the excitation frequencies deviate from the resonant values. It has been shown that a variation of the excitation frequencies of about $\pm 5\%$ leads to a proportional shift of the output power maxima relative to the resonant frequency of the amplifier, which are the same for both positive and negative deviation variations.

Keywords: electric power industry, resonant active-reactive electric circuits, electric power amplification.

Batygin Yuriy V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Physics, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

Yeryomina Olena F. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Physics, e-mail: elena.yeryomina@gmail.com ;

Shynderuk Svitlana O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Physics, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net ;

Chaplygin Evgen O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Physics, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com