

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.314

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.98.0.77

## ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА АКТИВНУ

Батигін Ю. В., Гаврилова Т. В., Шиндерук С. О.,  
Чаплигін Є. О., Мірошніченко Д. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Запропоновано схеми і розраховано реальні характеристики резонансного перетворювача реактивної потужності на активну. Проведено чисельні оцінки для експериментальної моделі, виконаної за схемою з додатковим джерелом гармонійної напруги. Продемонстровано практичну дієвість та ефективність процесу перетворення реактивної потужності на активну.

*Ключові слова:* енергія, резонансне перетворення, реактивна потужність, активна потужність, електричні схеми.

**Вступ**

Резонанс як ключ до «енергетичного сплеску» у коливальних системах будь-якої фізичної природи вперше було відзначено у роботах Ніколи Тесла. Як впливає з його публікацій, основним завданням, що потребує негайного вирішення, насамперед, було завдання бездротового транспортування електроенергії на великі відстані. З цією метою Ніколою Тесла була побудована та успішно випробувана «Вежа Ворденкліфа (Wardenclyffe Tower)» – перша бездротова телекомунікаційна споруда, що призначалася для комерційної трансатлантичної телефонії, радіомовлення та демонстрації бездротової передачі електроенергії [1]. Не менш важливим, але вже для нашого часу, є вирішення завдань ефективного перетворення різних видів енергії (сонячної, вітряної, термальної та ін.) в електроенергію, що є безальтернативним фактором комфортності існування та розвитку всього Людства. При цьому слід особливо виділити безсумнівний інтерес світової громадськості до практично доступних технічних розробок, які вкладені у вирішення вищевказаних завдань сучасної електроенергетики.

**Аналіз публікацій**

Висвітлення різних типів перетворювачів енергії почнемо з винаходу, широко відомого як трансформатор Тесла, який є понад ефективним резонансним підсилювачем високої напруги з коефіцієнтом трансформації більше  $\sim 1000$ . Дослідженням даного перетворювача електричної енергії присвячено досить

багато робіт, наприклад [2, 3, 4], у тому числі пошук оптимальних рішень щодо подальшого підвищення ефективності «трансформатора Тесла» [2]. Розробкам конструкцій з максимальними можливостями, оформленими як практичне керівництво до проектування та створення перетворювача напруги, присвячено публікацію [3]. Авторами [4] із залученням методів теорії електричних кіл проведено дослідження перехідних процесів у контурах «трансформатора Тесла». Отримані результати та чисельні оцінки добре узгоджуються з якісними висновками великого винахідника, сформульованими ще на початку минулого століття. Нетрадиційним методам перетворення різних видів енергії присвячені роботи [5-8]. На основі теоретичних досліджень квантових станів вакууму, стійкості матерії та гравітації сформульовано інноваційні підходи до енергетики космічних апаратів [5]. Технічно обґрунтовані пропозиції конвертувати теплоту в електричну енергію захищені патентами [6, 7]. Поле електромагнітної біжучої хвилі, що збуджується об'єктами з високою густиною заряду, в якості джерела електричної та теплової енергії запропоновано автором патенту [8]. Працездатні та дуже ефективні резонансні конвертори електроенергії представлені у роботах [9,10]. Нарешті, практичним інтересом до резонансного посилення реактивної потужності зумовлено появу патенту [11] із досить широкою сферою застосування. Предмет винаходу відноситься до систем ударного збудження в електроенергетиці, але може знайти застосування у вторинних джерелах безперервного

живлення та передавачі електромагнітних коливань для створення надпотужних зондувальних сигналів. Істотним недоліком відомих пропозицій перетворення енергії на основі резонансних ефектів в електротехнічних системах (у тому числі й «трансформаторі Тесла») є вихід реактивної потужності, що є дуже проблематичним для практичного використання. У зв'язку з цим практичний інтерес становить трансформація реактивної потужності в активну, яка може використовуватися для виконання робіт різного призначення.

Практичне вирішення цієї проблеми можна реалізувати за допомогою схеми з двох паралельних та послідовних резонансних контурів з індуктивним зв'язком. Фізична сутність пропозиції полягає у такому. Реактивна потужність від джерела подається на вхід паралельного контуру, що збуджується в режимі резонансу струмів, коли струми у виходах джерела дорівнюють нулю і відповідно, коли виключається вплив власне на джерело реактивної потужності. За рахунок індуктивного зв'язку сигнал трансформується в ланцюг послідовного контуру, налаштованого на резонанс напруги, що дозволяє максимізувати вихідну електричну потужність вже в активному навантаженні перетворювача. У представленому варіанті перетворювача умови для збудження резонансу струмів у вхідному паралельному контурі створюються за рахунок відповідного вибору його параметрів, спрямованого на те, щоб виключити вплив перетворювача на процеси в джерелі реактивної потужності і стабілізувати роботу пристрою в цілому. Можливий інший спосіб створення резонансних умов у вхідному паралельному контурі. Для цього в його ланцюг вводиться стороннє джерело гармонічної напруги. Призначення останнього, аналогічно попередньому варіанту, також у тому, щоб виключити взаємообмін енергією між перетворювачем і джерелом реактивної потужності. Фізично дію стороннього джерела у схемі паралельного контуру з реальними параметрами можна трактувати як запровадження умовного «негативного» імпедансу, що нівелює вплив активного опору та індуктивного зв'язку з вихідним контуром на збудження резонансу струмів у вхідному контурі перетворювача [12].

#### Мета та постановка завдання

Метою цієї роботи є пропозиція та теоретичне обґрунтування дієвості можливих схем

резонансного перетворювача реактивної потужності в активну, об'єднаних наявністю двох індуктивно пов'язаних активно-реактивних контурів та різних за способами створення резонансних умов у кожній з них.

Для досягнення поставленої мети необхідно одержати розрахункові співвідношення та провести аналіз процесів, що протікають у запропонованих електричних схемах.

#### Виклад основного матеріалу

##### 1. Електричні схеми.

На рис. 1 представлені різні варіанти схем заміщення пропонованого резонансного перетворювача реактивної потужності в активну. Спільним для них є наявність двох контурів з індуктивним зв'язком – 1 і 2. Перший з них збуджується в резонансі струмів, другий – в резонансі напруг [12]. Навантаження пропонованих схем перетворювачів – активний опір  $R_2$  у другому резонансному контурі. Джерело реактивної потужності – індуктивність  $L_0$  зі струмом  $J_{01}$  та напругою  $U_0$  підживлюється струмом  $J_0$ . Відмінність представлених варіантів полягає у методах збудження резонансу струмів у контурі 1. У схемі на рис. 1а створення відповідних умов здійснюється за рахунок вибору її елементної бази. У схемі на рис. 1б це завдання вирішується запровадженням додаткового стороннього джерела гармонічної напруги.

##### 2. Принцип дії.

Природно, що у робочому стані має місце вплив електромагнітних процесів у контурах перетворювача на струм і напругу у джерелі реактивної потужності.

Якщо контур 1 збуджується в режимі резонансу струмів, він не повинен впливати на процеси в індуктивності  $L_0$ , оскільки струми у вихідних струмопроводах дорівнюють нулю ( $J_{02} = 0$ ) і різниця потенціалів на клеммах джерела реактивної потужності без спотворення повинна визначати напругу  $U_0(t)$  на ємності  $C_1$ . Далі, електромагнітна енергія в контурі 1 за рахунок індуктивного зв'язку « $L_1 - L_2$ » трансформується в контур 2. Останній збуджується в режимі резонансу напруг, що дозволяє мінімізувати втрати та отримати в навантаженні перетворювача  $R_2$  вихідну активну потужність струму, що протікає.

Відношення активної потужності на виході до реактивної потужності джерела є кількісним показником трансформації одного виду електромагнітної енергії в інший за допомогою пропонованої схеми резонансного перетворювача. Підкреслимо відмінні електрофі-

зичні особливості запропонованих електричних схем. Перша полягає у застосуванні паралельного контуру з резонансом струмів, що дозволяє мінімізувати вплив на процеси у джерелі реактивної потужності. Друга – у за-

стосуванні послідовного контуру з резонансом напруги, що дозволяє максимізувати вихідну активну потужність у навантаженні перетворювача. Розглянемо кожну із представлених схем окремо.

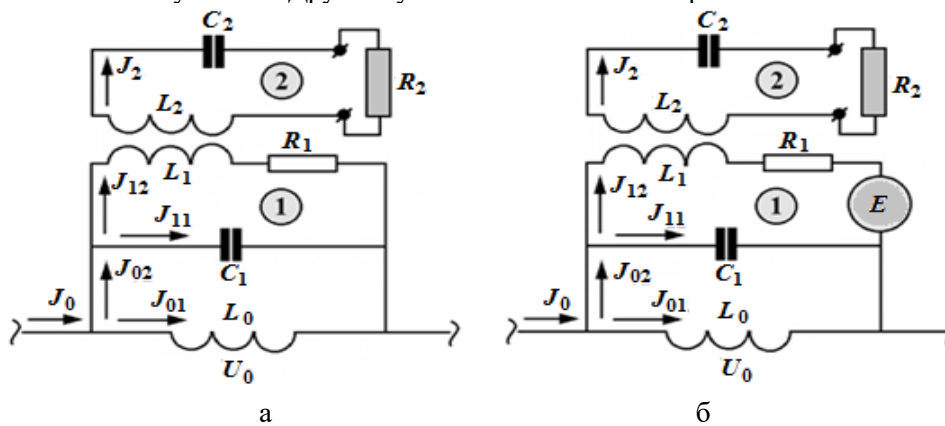


Рис. 1. Схеми заміщення резонансного перетворювача реактивної потужності в активну: а – схема без стороннього джерела напруги; б – схема із включенням стороннього джерела напруги  $E$

3. *Перетворювач реактивної потужності в активну, схема якого складається з двох резонансних RLC контурів.*

Схема даного перетворювача представлена на рис. 1а. Створення відповідних умов резонансу струмів у паралельному контурі здійснюється за рахунок вибору відповідної елементної бази. При вирішенні поставленого завдання приймемо, що:

- схема заміщення пропонуваного перетворювача потужності складається з двох паралельного та послідовного резонансних контурів з індуктивним зв'язком;
- частоти першого та другого контурів рівні між собою, отже,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  – резонансна частота всієї схеми перетворювача;
- перший резонансний контур 1 підключається паралельно до джерела реактивної потужності – котушки індуктивності  $L_0$  з гармонічними струмом та напругою –  $U_0(t) = U_m \sin(\omega t)$  ( $U_m$  – амплітуда,  $\omega$  – частота,  $t$  – час).

Розрахункові співвідношення для теоретичного обґрунтування дієвості даної схеми базуються на фізично «прозорих» феноменологічних положеннях і строгому математичному підході з використанням апарату теорії електричних ланцюгів [12].

Почнемо з другого послідовного активно-реактивного контуру. Рівняння стану має вигляд [12]

$$\left( i \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_2 \right) J_2 + i\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} J_{12} = 0, \quad (1)$$

де  $k_{12} \in [0, 1]$  – коефіцієнт, який визначає рівень електромагнітного зв'язку між індуктивностями –  $L_2$  і  $L_1$ .

У резонансному режимі з частотою  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$  зв'язок між струмами визначається залежністю

$$J_2 = - \frac{i\omega (k_{12} \sqrt{L_1 L_2})}{R_2} J_{12}. \quad (2)$$

У першому паралельному активно-реактивному контурі запишемо

$$\begin{cases} (i\omega L_1 + R_1) J_{12} + i\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} J_2 = U_{C_1}, \\ U_{C_1} = \frac{1}{i\omega C_1} \cdot J_{11}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $U_{C_1}$  – напруга на паралельних гілках цього контуру.

Із виразів (2) і (3) знаходимо струми у паралельних гілках  $J_{12}$  і  $J_{11}$

$$\begin{cases} J_{12} = U_{C_1} \frac{1}{i\omega L_1 + (R_1 + k_{12}^2 (\omega L_1) (\omega L_2) / R_2)}, \\ J_{11} = U_{C_1} i\omega C_1. \end{cases} \quad (4)$$

Їх сума визначає струм у струмовідводі від джерела реактивної потужності до паралельного резонансного контуру  $J_{02}$  [12]. Опускаючи проміжні тотожні перетворення,

отримуємо, що

$$J_{02} = J_{11} + J_{12} = U_{C_1} \left( i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1 + \left( R_1 + k_{12}^2 (\omega L_1) (\omega L_2) / R_2 \right)} \right). \quad (5)$$

Проаналізуємо отримані результати. Відповідно (4) і (5) перепишемо у вигляді, зручному для подальшого аналізу:

$$\begin{cases} J_{02} = U_{C_1} \left( i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1 + R_1 (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)} \right), \\ J_2 = -ik_{12} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} Q_2 \frac{U_{C_1}}{i\omega L_1 + R_1 (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)}, \end{cases} \quad (6)$$

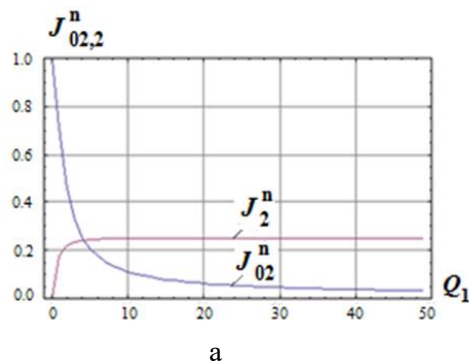
де  $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$ ,  $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$  – добротності резонансних контурів перетворювача.

З фізичних міркувань очевидно, що реалізація резонансу струмів у паралельному контурі вимагає досить малого активного опору та досить слабкого електромагнітного зв'язку з послідовним контуром, що забезпечує мінімальний вплив на джерело реактивної потужності.

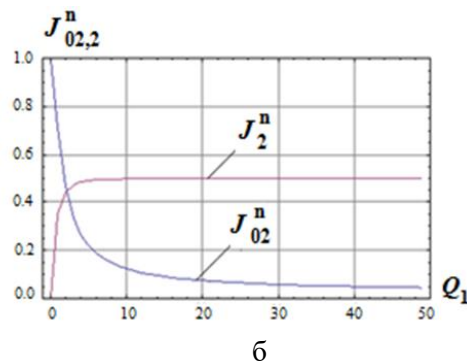
В ідеальному випадку при  $\left( \frac{R_1}{\omega L_1} \right) \rightarrow 0$  і  $k_{12}^2 \rightarrow 0$  із формул (6) отримуємо

$$\begin{cases} J_{02} = U_{C_1} \left( i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1} \right), \\ J_2 = -ik_{12} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} Q_2 \frac{U_{C_1}}{i\omega L_1}. \end{cases} \quad (7)$$

У режимі резонансу струмів з частотою  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$  вираз (7) набуде вигляду:



а



б

Рис. 2. Залежність збуджуваних струмів від добротності паралельного контуру при  $L_0 = L_1 = L_2 = 14,8$  мкГн; а –  $Q_2 = 5$ ,  $k_{12} = 0,05$ ; б –  $Q_2 = 10$ ,  $k_{12} = 0,05$

$$J_{02} \approx 0,$$

$$J_2 \approx -U_{C_1} k_{12} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} Q_2 \frac{1}{\omega L_1}. \quad (8)$$

З (8) випливає, що в рамках прийнятої ідеалізації струм у виведеній від джерела реактивній потужності перетворюється на нуль, а напруга на гілках паралельного контуру дорівнює напрузі на клеммах цього джерела,  $U_{C_1} = U_0$ . Відношення амплітуд вихідної активної та вхідної реактивної потужності, як коефіцієнт перетворення, запишеться таким чином:

$$K = \frac{P_2}{P_0} = k_{12}^2 \left( \frac{L_0}{L_1} \right) Q_2. \quad (9)$$

Отримана залежність є основним результатом прийнятої ідеалізації. Згідно із (9)

при  $k_{12}^2 \left( \frac{L_0}{L_1} \right) Q_2 > 1$  може мати місце не просто

перетворення, а навіть резонансне посилення електричної потужності.

Для чисельних оцінок за реальних значень параметрів паралельного контуру перетворимо залежності (6) з нормуванням на амплітуду струму в індуктивності джерела реактивної потужності:

$$\begin{cases} J_{02}^n = \frac{J_{02}}{J_{01}} = \left( \frac{L_0}{L_1} \right) \left( \frac{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)}{\sqrt{Q_1^2 + (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2}} \right); \\ J_2^n = \frac{J_2}{J_{01}} = \frac{k_{12} \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} Q_1 Q_2}{\sqrt{Q_1^2 + (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2}}. \end{cases} \quad (10)$$

Розрахункові графічні залежності експериментальної моделі перетворювача з розглянутою електричною схемою представлені на рис. 2 – 4.

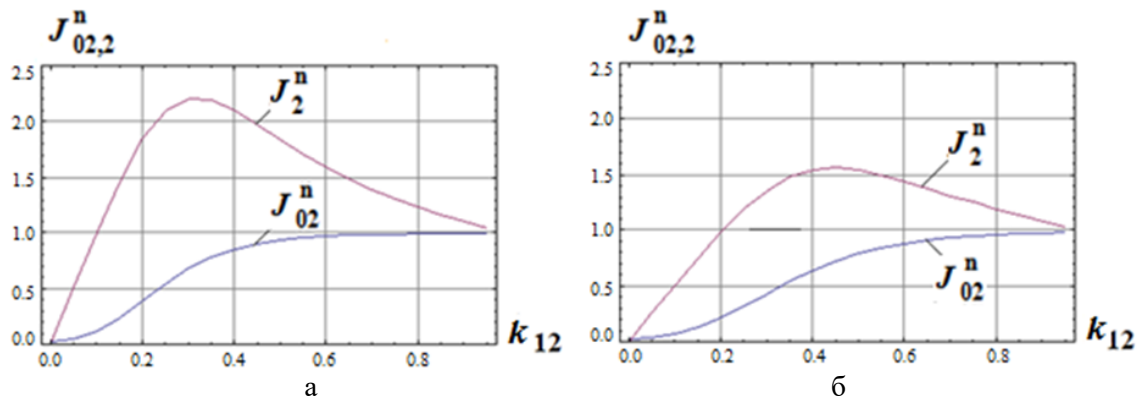


Рис. 3. Залежність збуджуваних струмів від рівня електромагнітного зв'язку між контурами при  $L_0 = L_1 = L_2 = 14,8$  мкГн;  $k_{12} = 0,05$ ; а –  $Q_1 = 50$ ,  $Q_2 = 10$ ; б –  $Q_1 = 50$ ,  $Q_2 = 5$

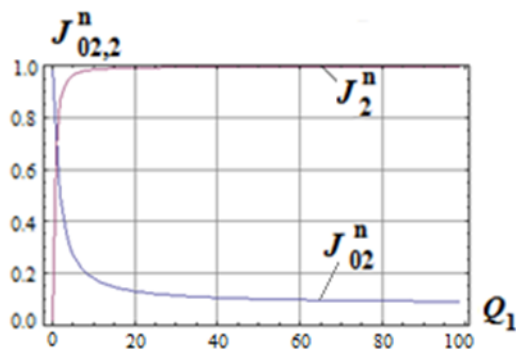


Рис. 4. Ілюстрація характеристик в оптимальному варіанті перетворювача при  $L_0 = L_1 = L_2 = 170$  мкГн;  $Q_2 = 125$ ;  $k_{12} = 0,08$ ;  $K = 1,0$

Проведені обчислення показали, що ефективність перетворювача реактивної потужності в активну визначається такими факторами.

- Збільшення добротності паралельного (першого) контуру дозволяє знизити його вплив на процеси в джерелі, що пояснюється зростанням індуктивного опору контуру щодо його активного опору (умова резонансу струмів).

- Граничне значення струму у виведенні джерела при фіксованій величині добротності послідовного (другого) контуру визначається співвідношенням:

$$\lim_{Q_1 \rightarrow \infty} J_{02}^n = \left( \frac{L_0}{L_1} \right) k_{12}^2 Q_2.$$

- Амплітуда струму в навантаженні, починаючи з деякого значення добротності паралельного (першого) контуру, не залежить від її величини і в межах дорівнюватиме:

$$\lim_{Q_1 \rightarrow \infty} J_2^n = k_{12} \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} Q_2.$$

- Збереження балансу між зростанням ви-

хідного струму та зниженням струму у виводі від джерела вимагає досить малого рівня електромагнітного зв'язку між контурами, що визначається умовою резонансу струмів у паралельному контурі. Слід підкреслити також, що ефективна дієвість досліджуваного пристрою означає максимум струму та потужності навантаження при мінімумі впливу на індуктивність джерела реактивної потужності.

Як показали розрахунки, оптимальним режимом запропонованого перетворювача реактивної потужності на активну є режим, в якому індуктивності контурів однакові –  $L_0 = L_1 = L_2 = 170$  мкГн, добротності резонансних контурів  $Q_1 = 100,0$  і  $Q_1 = 12,5$  при рівні електромагнітного зв'язку між контурами  $k_{12} = 0,08$ . Якщо робоча частота дорівнює  $\sim 25$  кГц, активний опір паралельного контуру  $R_1 \approx 0,27$  Ом, а величина активного навантаження перетворювача  $R_1 \approx 2,14$  Ом (підкреслимо – низькоомна). При цьому спотворення струму і відповідно показник впливу на джерело становить  $\sim 8,5\%$ ; струми в джерелі і навантаженні є рівними між собою, реактивна потужність джерела без втрат трансформується в активну електричну потужність навантаження.

4. *Перетворювач реактивної потужності в активну, схема якого містить додаткове джерело гармонічної напруги.*

Створення відповідних умов резонансу струмів у паралельному контурі перетворювача (рис. 16) здійснюється за рахунок введення додаткового стороннього джерела гармонічної напруги. При вирішенні поставленого завдання приймемо, що:

- схема заміщення запропонованого перетворювача потужності складається з двох паралельного та послідовного резонансних

контурів з індуктивним зв'язком;

- частоти контурів рівні між собою, отже,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  – резонансна частота всієї схеми перетворювача;

- на вхід паралельного резонансного контуру 1, паралельно до його гілок, підключається джерело реактивної потужності з гармонічною напругою  $U_0(t) = U_m \sin(\omega t)$  ( $U_m$  – амплітуда,  $\omega$  – частота,  $t$  – час);

- у ланцюг паралельного контуру, паралельно його ємності, підключається додаткове джерело гармонічної напруги  $E(t) = E \cdot \sin(\omega t)$ .

Аналогічно попередньому розділу отримуємо розрахункові співвідношення для теоретичного обґрунтування дієвості схеми, що розглядається. З урахуванням стороннього джерела напруги запишемо, що [12]:

$$\begin{cases} R_2 J_2 + i\omega(k_{12}\sqrt{L_1 L_2}) J_{12} = 0; \\ (i\omega L_1 + R_1) J_{12} + i\omega(k_{12}\sqrt{L_1 L_2}) J_2 - \\ - E = U_{C_1}; \\ J_{11} = i\omega C_1 U_{C_1}; \end{cases} \quad (11)$$

де  $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$ ,  $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$  – добротності контурів перетворювача.

Із системи лінійних алгебраїчних рівнянь (11) знаходимо струми в елементах схеми перетворювача.

$$\begin{cases} J_2 = -\frac{i\omega(k_{12}\sqrt{L_1 L_2})}{R_2} J_{12}; \\ J_{12} = \frac{U_{C_1} + E}{R_1(iQ_1 + (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2))}; \\ J_{11} = i\omega C_1 U_{C_1}. \end{cases} \quad (12)$$

Підсумовуючи струми у гілках паралельного контуру з урахуванням резонансу, знаходимо струм у виводі від джерела реактивної потужності:

$$J_{02} = J_{11} + J_{12} = \frac{\left( E + i \frac{U_{C_1}}{Q_1} (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2) \right)}{R_1 (iQ_1 + (1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2))}. \quad (13)$$

Із (13) маємо, що для  $J_{02} = 0$  необхідно, щоб

$$E = -iU_{C_1} \left( \frac{1}{Q_1} + k_{12}^2 Q_2 \right). \quad (14)$$

Враховуючи, що  $U_{C_1} = U_0$  за умови (14), визначаємо струм у навантаженні перетворювача:

$$J_2 = \frac{U_0}{R_2} \left( k_{12} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) e^{-i\frac{\pi}{2}}. \quad (15)$$

Потужність, що виділяється у навантаженні  $R_2$ , знаходиться відомим чином за допомогою виразу (15) [12]:

$$P_2 = J_2^2 R_2 = \frac{E_0^2}{\omega L_1} k_{12}^2 Q_2. \quad (16)$$

Відношення амплітуд активної потужності навантаження до реактивної потужності джерела визначає коефіцієнт трансформації потужностей у запропонованій схемі перетворювача.

$$K = \left| \frac{P_2}{P_0} \right| = \left( \frac{L_0}{L_1} \right) k_{12}^2 Q_2, \quad (17)$$

де  $P_0 = \frac{U_0^2}{\omega L_0}$  – потужність джерела реактивної енергії.

Проаналізуємо отримані результати. З фізичних міркувань очевидно, що, з погляду максимуму ефективності перетворювача в цілому, внесок стороннього джерела гармонічної напруги у резонансі струмів в паралельному контурі повинен бути мінімальним. І, як випливає із залежності (14), для цього необхідна досить висока добротність –  $Q_1 \gg 1$  і досить слабкий електромагнітний зв'язок із послідовним контуром у поєднанні з його малою добротністю –  $k_{12}^2 \cdot Q_2 \ll 1$ . У той самий час залежність для коефіцієнта перетворення потужності (17) потребує певного збільшення параметра  $k_{12}^2 \cdot Q_2$ .

Виходячи з практичних міркувань, очевидно, що в оцінці ефективності запропонованого пристрою мінімум напруги стороннього джерела є основним параметром. По-перше, величина коефіцієнта перетворення менш значуща, оскільки поставлене завдання поля-

гає не в посиленні, а в трансформації реактивної потужності в активну. По-друге, коефіцієнт перетворення залежить від відношення  $\left(\frac{L_0}{L_1}\right)$ , що дозволяє регулювати його величину. У зв'язку з цим вибір параметра  $k_{12}^2 \cdot Q_2$ , насамперед, повинен орієнтуватися на залежність (14) і потім на (17). Очевидно, що, зрештою, варіація виділених величин і відповідно коректний вибір ключових параметрів запропонованої схеми дозволить отримати прийнятні для практики величини напруги стороннього джерела та коефіцієнта перетворення реактивної потужності в активну.

Чисельні оцінки, що ілюструють використання отриманих залежностей та результати якісного аналізу, виконаємо для експериментальної моделі перетворювача.

Почнемо з того, що прийнемо  $k_{12}^2 \cdot Q_2 = 0,1$ . При рівні електромагнітного зв'язку між контурами  $k_{12} = 0,1$  добротність послідовного контуру дорівнюватиме

$Q_2 = 10,0$ . Далі, нехай робоча частота  $\omega = 2\pi \cdot 25000$  кГц, індуктивність джерела реактивної потужності  $L_0 = 170$  мкГн, індуктивність паралельного контуру  $L_1 = 17$  мкГн. Якщо його індуктивність  $L_2 = L_0 = 170$  мкГн, то максимальна допустима величина активного опору навантаження може становити  $R_2 = \frac{\omega L_2}{Q_2} = 2,7$  Ом. При активному опорі паралельного контуру (опір обмотки котушки індуктивності)  $R_1 = 0,1$  Ом, його добротність дорівнюватиме  $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} = 26,7$ .

Тепер коефіцієнт перетворення з формули (17)  $K = 1,0$ , напруга стороннього джерела з формули (14)  $|E| \approx 0,14U_{C_1}$ , що становить  $\sim 14\%$  напруги джерела реактивної потужності. Функціональні залежності представлені на рис. 5.

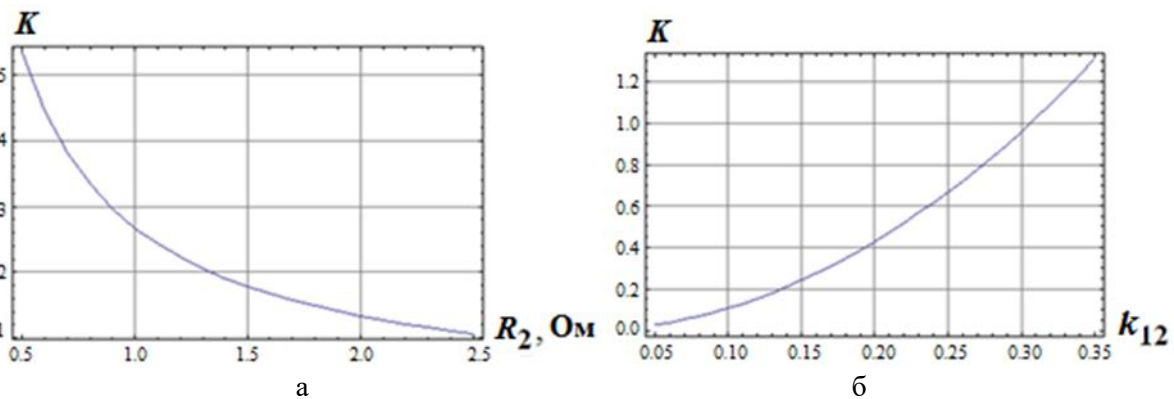


Рис. 5. Коефіцієнт перетворення реактивної потужності в активну експериментальної моделі перетворювача: а – залежність від опору навантаження,  $k_{12} = 0,1$ ; б – залежність від рівня електромагнітного зв'язку між контурами,  $R_2 = 2,5$  Ом

Із залежностей на рис. 5 робимо висновок про можливість роботи перетворювача реактивної потужності в активну в якості підсилювача електричної потужності. З графіка на рис. 5а очевидно, що при досить реальному рівні електромагнітного зв'язку між контурами  $k_{12} = 0,1$  та величині активного навантаження  $R < 1,5$  Ом коефіцієнт трансформації досягає  $K > 1$ . Аналогічний висновок випливає із залежності на рис. 5, б.

При досить низькоомному навантаженні  $R_2 = 2,5$  Ом і рівні електромагнітного зв'язку  $k_{12} > 0,3$  коефіцієнт трансформації

також буде становити  $K > 1$ .

Наведені оцінки в сукупності дозволяють вважати, що запропонована схема перетворювача при належному виборі її параметрів дозволяє отримати збільшену активну потужність на низькоомному навантаженні на виході дослідженого пристрою.

На закінчення відзначимо, що в експериментальній моделі перетворювача необхідну амплітуду напруги стороннього джерела можна визначити, варіюючи її величину до отримання нульового струму у виходах джерела реактивної потужності

### Висновки

1. Запропоновані схеми резонансного перетворювача реактивної потужності на активну об'єднані наявністю двох індуктивно пов'язаних активно реактивних контурів і різні за способами створення резонансних умов в кожній з них.

2. Для схеми, де збудження резонансу здійснюється відповідним вибором її параметрів, визначено умови, виконання яких мінімізує вплив запропонованої схеми на процеси в джерелі реактивної потужності при максимумі струму в навантаженні перетворювача.

3. Розраховані реальні параметри схеми, де за належного вибору її параметрів можна здійснити реальне перетворення потужності (коефіцієнт перетворення  $\sim 1,0$ ) при мінімальному впливі на струм у джерелі реактивної потужності (зниження до  $\sim 8,5\%$ ).

4. Для схеми з додатковим джерелом гармонічної напруги показано, що при відповідному налаштуванні стороннього джерела можна повністю виключити негативний вплив електромагнітних процесів у схемі перетворювача на вихідну напругу і струм джерела реактивної потужності.

5. Чисельні оцінки для експериментальної моделі, виконаної за схемою з додатковим джерелом гармонічної напруги, продемонстрували не тільки її практичну дієвість, а й ефективність процесу перетворення реактивної потужності в активну.

### Література

1. Tesla N., Shedleski Ty., *Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents*. Book Shed, 2014.
2. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers. *Review of Scient. Instruments*. 2002. Vol. 73 (9), P. 3332-3336.
3. Tilbury M. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*, McGraw-Hill. 2008. URL: <http://issuu.com/theresistance> (дата звернення 08.02.2022).
4. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*. 2018. №11-1. P. 72-79.
5. Dole Cole C., Puthoff Harold. Extracting energy and heat from the vacuum. *Phys. Review*. 1993. Evol. 48, № 2. P. 1562-1565.
6. Пат. РФ RU 2227947. Емкостной конвертер тепла окружающего пространства в электрическую. Оpubл. 27.04.2004.
7. Пат. РФ RU 2236723. Метод прямой конверсии тепловой энергии в электрическую.

Оpubл. 20.09.2004.

8. Patent № US 5018180. *Energy Conversion Using High Charge Density*. Оpubл. 21.05.1991.
9. Steigerwald R.I. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies. *IEEE APEC*. 1987 Record, P. 135-144.
10. Daocheng H., Fred C L., Pengju K. High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, № 8. P. 3461-3470.
11. Пат. 103215 України. Резонансный усилитель мощности. Оpubл. 10.12.2015.
12. Атабеков Г.И. *Основы теории цепей*. 2006. 220 с.

### References

1. Tesla N., Shedleski Ty. *Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents*. Book Shed, 2014.
2. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers. *Review of Scient. Instruments*, 2002, Vol. 73 (9), pp.3332-3336.
3. Tilbury M. (2008) *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*, McGraw-Hill. Available at: <http://issuu.com/theresistance> (accessed: 08 February 2022).
4. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*, 2018, № 11-1, pp. 72-79.
5. Dole Cole C., Puthoff H. Extracting energy and heat from the vacuum. *Phys. Review*, 1993, Evol. 48, № 2, pp. 1562-1565.
6. Zaev N.E.. *Emkostnoj konverter tepla okruzhajushhego prostranstva v jelektricheskiju jenergiju* [Capacitive converter of ambient heat into electrical energy]. Patent RU, no. 2227947, 2004.
7. Danieljan M.I., Anisimov V.E., Churilin V.V. i dr. *Metod prjamoj konversii teplovoj jenergii v jelektricheskiju* [The method of direct conversion of thermal energy into electrical energy.]. Patent RU, no. 2236723, 2004.
8. Shoulders K. R. *Energy Conversion Using High Charge Density*. Patent US, no. 5018180, 1991.
9. Steigerwald R. I. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies. *IEEE APEC*, 1987, pp. 135-144.
10. Daocheng H., Fred C L., Pengju K. High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, Vol. 58, № 8, pp. 3461-3470.
11. Lihovid Ju. M. *Rezonansnyj usilitel' moshhnosti* [Resonant Power Amplifier]. Patent UA, no. 103215, 2015.
12. Atabekov G. I. *Osnovy teorii cepej* [Fundamentals of the theory of circuits]. L: Jenergija, 2006. 220 p.



**Батигін Юрій Вікторович**, д.т.н., проф., зав. каф. фізики, [yu.v.batygin@gmail.com](mailto:yu.v.batygin@gmail.com), тел. +38 050-909-29-32,

**Гаврилова Тетяна Володимирівна**, к. ф.-м. н., доц. каф. фізики, [gavrilova.tatyana@i.ua](mailto:gavrilova.tatyana@i.ua); тел. +38 050-958-91-98,

**Шиндерук Світлана Олександрівна**, к. т. н, доц. каф. фізики, [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net); тел. +38 066-553-25-67,

**Чаплигін Євген Олександрович**, к. т. н, доц. каф. фізики, [chaplygin.e.a@gmail.com](mailto:chaplygin.e.a@gmail.com); тел. +38 050-955-95-60.

**Мірошніченко Денис Васильович**, студент, [denismiron0503@gmail.com](mailto:denismiron0503@gmail.com); тел. +38 098-707-45-64.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Electrical Schemes of Resonant Conversion of Reactive Power to Active

**Abstract. Problem.** Today, it is extremely important to solve the problems of efficient conversion of various types of energy (solar, wind, thermal, etc.) into electricity, which is a non-alternative factor in the comfort of the existence and development of all mankind. In this regard, the undoubted interest in practically accessible technical developments aimed at solving the above problems of the modern electric power industry should be highlighted. So, for example, the transformation of reactive power into active power, which can be used to perform work for various purposes, is of interest. **Goal.** The purpose of this work is to propose and theoretically substantiate the effectiveness of possible schemes for a resonant reactive power to active power converter, combined by the presence of two inductively coupled active-reactive circuits and different ways of creating resonant conditions in each of them. **Methodology.** The calculated ratios for the theoretical substantiation of the effectiveness of the considered converter circuits are based on physically clear phenomenological provisions and a rigorous mathematical approach using the apparatus of the theory of electrical circuits. **Results.** For a circuit where resonance excitation is carried out by an appropriate choice of its parameters, the conditions are determined, the fulfillment of which minimizes the influence of the proposed circuit

on the processes in the reactive power source at the maximum current in the converter load. The real parameters of the circuit are calculated, where, with the proper choice of its parameters, it is possible to carry out a real conversion of the input power (conversion coefficient  $\sim 1.0$ ) with a minimal effect on the current in the reactive power source (decrease to  $\sim 8,5\%$ ). For a circuit with an additional source of harmonic voltage, it is shown that with an appropriate setting of a third-party source, it is possible to completely eliminate the negative effect of electromagnetic processes in the converter circuit on the output voltage and current of the reactive power source. **Originality.** The scientific novelty of this work lies in the proposal and analysis of possible schemes of the resonant converter of reactive power into active power, combined by the presence of two inductively coupled active-reactive circuits and different ways of creating resonant conditions in each of them. **Practical value.** The theory and numerical assessments of the characteristics of the processes occurring in the proposed circuits of the resonant reactive power converter are important for further experimental studies, as well as for formulating recommendations for the manufacture of various options for operating devices for the appropriate purpose.

**Key words:** energy, resonant transformation, reactive power, active power, electric circuits.

**Batygin Yuriy**, Professor, Doct. of Science, Head of the Chair of Physics, [yu.v.batygin@gmail.com](mailto:yu.v.batygin@gmail.com), тел. +38 050-909-29-32,

**Gavrilova Tatyana**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor of the Chair of Physics, [gavrilova.tatyana@i.ua](mailto:gavrilova.tatyana@i.ua); тел. +38 050-958-91-98,

**Shinderuk Svitlana**, Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Physics, [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net); тел. +38 066-553-25-67,

**Chaplygin Evgen**, Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Physics, [chaplygin.e.a@gmail.com](mailto:chaplygin.e.a@gmail.com), тел. +38 050-955-95-60,

**Miroshnichenko Denys**, student, [denismiron0503@gmail.com](mailto:denismiron0503@gmail.com), тел. +38 098-707-45-64.

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.