

## ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.318

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.93.0.34

## ТРАНСФОРМАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАСИВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Шиндерук С. О., Волосюк М. А., Чаплигін Є. О., Білаш І. О.  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Запропоновано найпростішу схему пасивного електронного перетворювача реактивної потужності на активну, що складається з двох індуктивно пов'язаних паралельного і послідовного резонансних контурів. Визначено умови, дотримання яких мінімізує вплив запропонованої схеми на процеси в джерелі реактивної потужності за максимуму струму в навантаженні перетворювача. Розраховані параметри реальної схеми, яка дозволяє здійснити практично без втрат перетворення реактивної потужності на активну за умови мінімального впливу на струм в джерелі.

**Ключові слова:** явище резонансу, паралельний резонансний контур, послідовний резонансний контур, пасивний електронний перетворювач, трансформація реактивної потужності.

**Вступ**

Існують негативні та позитивні наслідки резонансних ефектів. Серед негативних найбільш яскравими проявами можна назвати факти руйнування мостових конструкцій, розрахованих за допомогою статичних моделей. У динаміці за умови найрізноманітніших зовнішніх силових впливів руйнування мостів можна пояснити тільки проявами резонансних явищ природи. У спеціальній технічній літературі подано приклади з негативними наслідками резонансу. Крім того, відома також велика кількість прикладів використання резонансу як корисного явища, зокрема процес створення різноманітних електротехнічних пристроїв різноманітного призначення.

**Аналіз публікацій**

Резонансні перетворювачі в електроенергетиці досліджено в роботі [1], в якій запропоновано резонансне підключення декількох джерел живлення й навантажень для використання в системах комплексного електроживлення. Різноманітні варіанти резонансних перетворювачів енергії сонячних батарей розробляються для систем електроживлення космічних апаратів [2]. Авторами робіт [3, 4] проведені теоретичні дослідження електромагнітних процесів у трансформаторі Тесла – першій технічно реалізованій пропозиції резонансного підсилювача напруги. Отримані результати й чисельні дослідження узгоджуються з якісними висновками винахідника. Регульований генератор з послідовними

та паралельно налаштованими резонансними колами подано авторами роботи [5]. Практичною зацікавленістю до резонансного посилення потужності зумовлена поява патенту [6]. Предметом винаходу є дослідження резонансних систем ударного збудження в електроенергетиці, але може бути застосованим у вторинних джерелах безперебійного живлення, у пристроях ехолокації і передавачах електромагнітних коливань для створення надпотужних зондувальних сигналів. У роботі [6] досліджено теоретичне й експериментальне обґрунтування дієвості резонансного підсилювача електричної потужності. На думку авторів, результатом здійснених досліджень є експериментальний факт отримання реактивної потужності, що приблизно в 33 рази перевищує вхідну потужність джерела.

З точки зору практичного застосування цікавою є трансформація реактивної потужності в активну, яка може використовуватися для здійснення робіт різноманітного призначення.

**Мета і постановка завдання**

Метою роботи є аналіз процесів резонансного перетворення реактивної потужності на активну в запропонованій схемі перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно запропонувати схему перетворювача реактивної потужності на активну; визначити умови, дотримання яких мінімізує вплив цієї схеми на процеси в джерелі реактивної потужності за максимуму струму в наванта-

женні перетворювача; розрахувати параметри реальної схеми, що дозволяє здійснити без втрат перетворення реактивної потужності на активну за умови мінімального впливу на струм в джерелі.

### Виклад основного матеріалу

Практичне вирішення цієї проблеми можна реалізувати за допомогою схеми перетворювача, що складається з двох індуктивно пов'язаних паралельного та послідовного резонансних контурів. Фізичний зміст пропозиції такий: реактивна потужність від джерела подається на вхід паралельного контура, що збуджується в режимі резонансу струмів, коли струми на виході від джерела дорівнюють нулю, тобто не здійснюється вплив на джерело реактивної потужності. Внаслідок індуктивного зв'язку сигнал трансформується в ланцюг послідовного контура, налаштованого на резонанс напруг, що дозволяє максимізувати вихідну електричну потужність вже в активному навантаженні перетворювача.

На рис. 1 подана схема заміщення запропонованого резонансного перетворювача реактивної потужності на активну. Останній складається з двох індуктивно зв'язаних контурів – 1 і 2. Перший збуджується в режимі резонансу струмів, другий – в режимі резонансу напруг [5]. Навантаження перетворювача – активний опір  $R_2$  у другому резонансному контурі. Джерело реактивної потужності – індуктивність  $L_0$  зі струмом  $I_{01}$  і напругою  $U_0$  – живиться струмом  $I_0$ .

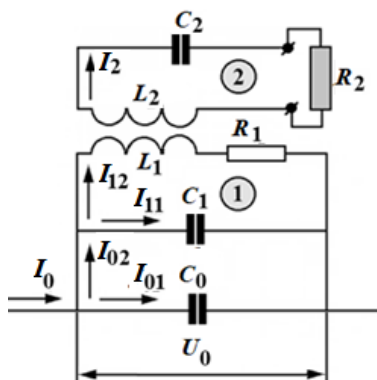


Рис. 1. Принципова схема заміщення резонансного перетворювача реактивної потужності на активну

Таким чином, у робочому стані діє вплив електромагнітних процесів у контурах перетворювача на струм і напругу в джерелі реактивної потужності.

Якщо контур 1 збуджується в режимі резонансу струмів, він не повинен впливати на процеси в індуктивності  $L_0$ . Оскільки струми в вихідних струмопроводах дорівнюють нулю ( $I_{02} = 0$ ), 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 внаслідок 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.

Співвідношення активної потужності на виході до реактивної потужності джерела є кількісним показником трансформації одного виду електромагнітної енергії в інший.

Визначимо електрофізичні особливості запропонованої електричної схеми: перша полягає в застосуванні паралельного контура з резонансом струмів, що дозволяє мінімізувати вплив на процеси в джерелі реактивної потужності; друга – в застосуванні послідовного контура з резонансом напруги, що дозволяє максимізувати вихідну активну потужність в навантаженні перетворювача.

Схема заміщення запропонованого перетворювача потужності складається з двох індуктивно пов'язаних паралельного і послідовного резонансних контурів. Перший контур містить котушку індуктивності  $L_1$ , активний опір її обмотування  $R_1$  і ємність  $C_1$ , підключені паралельно до джерела реактивної потужності – котушки індуктивності  $L_0$  з гармонічними струмом і напругою  $U_0(t) = U_m \sin \omega t$ , де  $U_m$  – амплітуда,  $\omega$  – частота,  $t$  – час. Другий контур містить індуктивність  $L_2$  (активним опором обмотування нехтуємо), ємність  $C_2$  і активний опір навантаження  $R_2$ . Частоти першого і другого контурів дорівнюють одна одній, отже:  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  – резонансна частота перетворювача.

Розрахункові співвідношення для теоретичного обґрунтування дієвості прийнятої схеми ґрунтуються на фізично «прозорих» феноменологічних положеннях і математичному підході з використанням апарата теорії електричних ланцюгів [5].

Розглянемо другий послідовний активно-реактивний контур. Рівняння стану має такий вид [5]:

$$\left( i \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_2 \right) I_2 + i \omega (k_{12} \sqrt{L_1 L_2}) I_{12} = 0, \quad (1)$$

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

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

$$I_2 = -\frac{i\omega(k_{12}\sqrt{L_1 L_2})}{R_2} I_{12}. \quad (2)$$

У першому паралельному активно-реактивному контурі

$$\begin{cases} (i\omega L_1 + R_1) \cdot I_{12} + i\omega k_{12} \cdot \sqrt{L_1 L_2} \cdot I_2 = U_{C_1}, \\ U_{C_1} = \frac{1}{i\omega C_1} \cdot I_{11}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $U_{C_1}$  – напруга на паралельних гілках проаналізованого контура.

З виразів (2) і (3) знаходимо струми в паралельних гілках  $I_{12}$  і  $I_{11}$ :

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

Їхня сума визначає струм в струмопроводі від джерела реактивної потужності до паралельного резонансного контура  $I_{02}$  [5, 6]:

$$I_{02} = I_{11} + I_{12}. \quad (5)$$

Вирази (4) і (5) є розрахунковими співвідношеннями для аналізу та чисельних визначень характеристик електромагнітних процесів, що здійснюються, в запропонованій схемі резонансного перетворювача реактивної потужності на активну.

### Кількісний аналіз

Залежності (4) і (5) запишемо у виді, зручному для подальшого аналізу:

$$\begin{cases} I_{02} = U_{C_1} \cdot \left( i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1 + R_1 \cdot (1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2)} \right), \\ I_2 = -i k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot Q_2 \cdot \frac{U_{C_1}}{i\omega L_1 + R_1 \cdot (1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2)}, \end{cases} \quad (6)$$

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

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.

Нехтуючи складовими  $\left( \frac{R_1}{\omega L_1} \right) \ll 1$  і

$k_{12}^2 \ll 1$ , з формули (6) отримуємо:

$$\begin{cases} I_{02} \approx U_{C_1} \cdot \left( i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1} \right), \\ I_2 \approx -U_{C_1} k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot Q_2 \cdot \frac{1}{\omega L_1}. \end{cases} \quad (7)$$

У режимі резонансу струмів з частотою  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$  вираз (7) можна записати у такий спосіб:

$$\begin{cases} I_{02} \approx 0, \\ I_2 \approx -U_{C_1} k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot Q_2 \cdot \frac{1}{\omega L_1}. \end{cases} \quad (8)$$

З (8) випливає, що струм на виході від джерела реактивної потужності дорівнює нулю, а напруга на гілках паралельного контура дорівнює напрузі на клеммах цього джерела:  $U_{C_1} = U_0$ .

Співвідношення амплітуд вихідної активної і вхідної реактивної потужності як коефіцієнт перетворення запишемо так:

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

Отримана залежність є результатом прийнятої ідеалізації. Згідно з (9), якщо  $k_{12}^2 \cdot \left( \frac{L_0}{L_1} \right) \cdot Q_2 > 1$ , то наявне не просто перетворення, а резонансне посилення електричної потужності.

Для кількісного аналізу необхідно перетворити залежності (6). Після тотожних перетворень отримуємо величини збуджуваних струмів, нормовані на амплітуду струму в

індуктивності джерела реактивної потужності:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{02}^n = \frac{I_{02}}{I_{01}} &= \left( \frac{L_0}{L_1} \right) \cdot \left( \frac{1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 Q_2}{\sqrt{Q_1^2 + (1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 Q_2)^2}} \right); \\ I_2^n = \frac{I_2}{I_{01}} &= \frac{k_{12} \cdot \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} \cdot Q_1 Q_2}{\sqrt{Q_1^2 + (1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 Q_2)^2}}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Розрахункові графічні залежності для експериментальної моделі перетворювача реактивної потужності на активну подані на рис. 2–4.

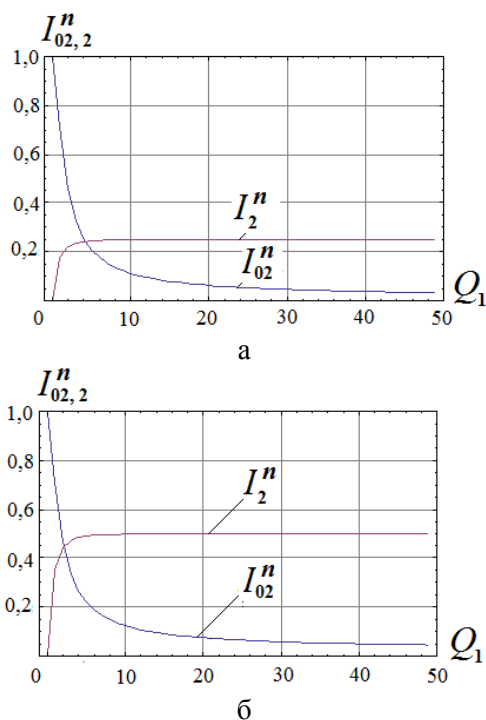


Рис. 2. Залежність збуджуваних струмів від добротності паралельного контура, якщо  $L_0 = L_1 = L_2 = 14,8$  мкГн, а)  $Q_2 = 5$ ;  $k_{12} = 0,05$ ; б)  $Q_2 = 10$ ;  $k_{12} = 0,05$

Здійснені дослідження демонструють, що ефективність перетворювача реактивної потужності на активну визначається такими факторами:

- збільшення добротності паралельного (першого) контура дозволяє знизити його вплив на процеси в джерелі, що визначається збільшенням індуктивного опору контура щодо його активного опору (умова резонансу струмів);

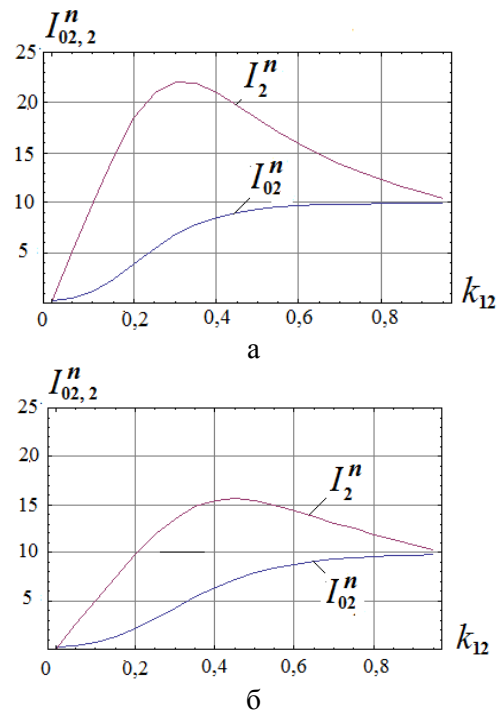


Рис. 3. Залежність збуджуваних струмів від рівня електромагнітного зв'язку між контурами, якщо  $L_0 = L_1 = L_2 = 14,8$  мкГн і  $k_{12} = 0,05$ ; а)  $Q_1 = 50$ ,  $Q_2 = 10$ ; б)  $Q_1 = 50$ ,  $Q_2 = 5$

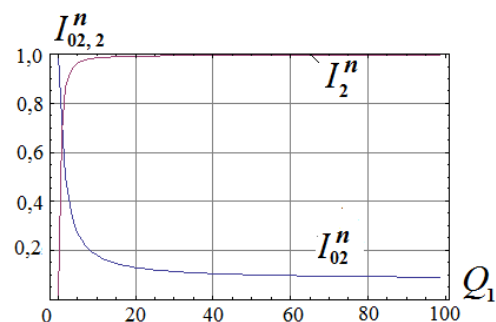


Рис. 4. Ілюстрація характеристик в оптимальному варіанті перетворювача, якщо  $L_0 = L_1 = L_2 = 170$  мкГн,  $Q_2 = 12,5$ ,  $k_{12} = 0,08$ ;  $K = 1,0$

- граничне значення струму на виході від джерела за умови фіксованої величини добротності послідовного (другого) контура визначається співвідношенням

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

- амплітуда струму в навантаженні, починаючи з будь-якого значення добротності паралельного (першого) контура, не залежить від

її величини і в граничному випадку дорівнюватиме  $\lim_{Q_1 \rightarrow \infty} I_2^n = k_{12} \cdot \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} \cdot Q_2$ ;

• збереження балансу між збільшенням вихідного струму та зменшенням струму на виході від джерела вимагає досить малого рівня електромагнітного зв'язку між контурами, що визначається умовою резонансу струмів у паралельному контурі.

Як висновок необхідно зазначити, що ефективна дієвість досліджуваного пристрою визначає максимум струму та потужності в навантаженні за мінімуму впливу на індуктивність джерела реактивної потужності.

Відповідно до розрахунків, оптимальним режимом запропонованого перетворювача реактивної потужності на активну може стати режим, в якому індуктивності контурів однакові:  $L_0 = L_1 = L_2 = 170$  мкГн, добротності резонансних контурів  $Q_1 = 100,0$  і  $Q_2 = 12,5$  за рівня електромагнітного зв'язку між контурами  $k_{12} = 0,08$ . Якщо робоча частота становить  $\sim 25$  кГц, то активний опір паралельного контура  $R_1 \approx 0,27$  Ом, а величина активного навантаження перетворювача  $R_2 \approx 2,14$  Ом (низькоомного). У цьому випадку спотворення струму, тобто показник впливу на джерело, становить  $\sim 8,5\%$ . Струми в джерелі та навантаженні дорівнюють один одному, реактивна потужність джерела без втрат трансформується в активну електричну потужність навантаження.

### Висновки

Запропоновано найпростішу схему перетворювача реактивної потужності на активну, що складається з двох індуктивно пов'язаних паралельного і послідовного резонансних контурів.

Визначено умови, дотримання яких мінімізує вплив запропонованої схеми на процеси в джерелі реактивної потужності за максимуму струму в навантаженні перетворювача.

Розраховані параметри реальної схеми, яка дозволяє здійснити без втрат перетворення реактивної потужності на активну (коєфіцієнт перетворення  $\sim 1,0$ ) за мінімального впливу на струм в джерелі (зниження на  $\sim 8,5\%$ ).

### Література

1. Павлов Г.В., Обрубов А.В. Резонансные преобразователи в энергоэффективных электротехнических системах. *Энергосбережение,*

*энергетика, энергоаудит.* 2014. Спецвыпуск. Т. 1. № 9 (128). С.13–23.

2. Резонансные преобразователи энергии солнечной батареи / Осипов А.В., Шиняков Ю.А., Черная М. М., Ткаченко А. А. *Решетневские чтения.* 2015. Т. 1. №19. С.290–292.
3. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением / Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Шиндерук С. А., Сабокарь О. С. *Вісник НТУ "ХПИ". Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях.* 2017. № 30 (1252). С. 25–31.
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. No.11-1. Pp. 72–79.
5. Регулируемый генератор с последовательными и параллельно настроенными резонансными цепями: пат. RU 2404505 С 2; опубл. 20.11.2010.
6. Резонансный усилитель мощности: пат. 103215 Украины на полезную модель; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.
7. Теоретичні та експериментальні дослідження резонансного підсилювача електричної потужності / Батигін Ю. В., Гаврилова Т. В., Чаплигін Є. О., Шиндерук С. О. *Вісник Хмельницького національного університету. Сер. Технічні науки.* 2020. №5 (289). С. 222–225.
8. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Ленинград, 2006. 220 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва, 1973. 831 с.

### References

1. Pavlov G. V., Obrubov A. V. Rezonansnye preobrazovateli v energoeffektivnykh elektrotekhnicheskikh sistemah [Resonant converters in energy efficient electrical systems]. *Energoberezhnie, energetika, энергоаудит – Energy saving. Power engineering. Energy audit.* Har'kov, 2014.V.1. No. 9 (128). Pp. 13–23 [in Russian].
2. Rezonansnye preobrazovateli energii solnechnoj batarei [Resonant solar energy converters] / Osipov A. V., Shinyakov Yu. A., Chernaya M. M., Tkachenko A. A. *Reshetnevskie chteniya.* 2015. V. 1. No. 19. Pp. 290–292 [in Russian].
3. Rezonans vo vtorichnom konture transformatora Tesla pri vzbuzhdenii garmonicheskim napryazheniem [Resonance in the secondary circuit of a Tesla transformer when excited by a harmonic voltage] / *Вісник НТУ "ХПИ". Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях.* 2017. V. 30 (1252). Pp. 25–31 [in Russian].
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. No.11-1. Pp. 72–79.
5. *Reguliruyemyy generator s posledovatelynymi i parallelno nastroyennymi rezonansnymi tsepyami [Adjustable generator with series and parallel resonant circuits]:* pat. RU no. 2404505C2, 2010 [in Russian].
  6. *Rezonansnyy usilitel moshchnosti [Resonant power amplifier]:* patent Ukrainy na poleznuuyu model № 103215, 2015 [in Russian].
  7. Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia rezonansnoho pidtyliuvacha elektrychnoi potuzhnosti [Theoretical and experimental / Batyhin Yu. V., Havrylova T. V., Chaplyhin Ye. O., Shynderuk S. O. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*. 2020. No. 5 (289). Pp. 222–225 [in Ukrainian].
  8. Atabekov G. I. *Osnovy teorii cepej [Fundamentals of circuit theory]*. Leningrad: Energiya Publ., 2006. 220 p. [in Russian].
  9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike [Mathematics reference]*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 831 p. [in Russian].

**Шиндерук Світлана Олександрівна**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. фізики, [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net),

**Волосюк Марина Андріївна**<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доц. каф. фізики, [marina\\_volosyuk@ukr.net](mailto:marina_volosyuk@ukr.net),

**Чаплігін Євген Олександрович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц. каф. фізики, [chaplygin.e.a@gmail.com](mailto:chaplygin.e.a@gmail.com),

**Білаш Ігор Олександрович**<sup>1</sup>, студент, [1912zakon1912@gmail.com](mailto:1912zakon1912@gmail.com),

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, Україна.

### Reactive power transformation using a passive electronic transducer

**Abstract. Problem.** Transformation of reactive power into active power, which can be used to perform work for various purposes, is of practical use. **Goal.**

The aim of the work is analysis of the processes of resonant conversion of reactive power into active power in the proposed converter circuit. **Methodology.** A practical solution to this problem can be realized using a converter circuit consisting of two inductively coupled parallel and series resonant circuits. The use of a parallel circuit with resonance currents minimizes the impact on the processes in the reactive power source. The use of a series circuit with a voltage resonance allows maximizing the original active power in the converter load. **Results.** The simplest scheme of a passive electronic converter of reactive power into active power is proposed. The conditions are determined, whose fulfillment minimizes the influence of the proposed scheme on the processes in the reactive power source at the maximum current in the converter load. **Originality.** Efficiency of the device under test means maximum current and power in the load with minimum impact on the inductance of the reactive power source. **Practical value.** The parameters of a real circuit have been calculated, which allows for practically lossless conversion of reactive power into active power with a minimum effect on the current in the source.

**Key words:** resonance phenomenon, parallel resonant circuit, serial resonant circuit, passive electronic converter, reactive power transformation.

**Shinderuk Svitlana**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Physics, [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net),

**Volosyuk Marina**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Physics, [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net),

**Chaplygin Evgen**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Physics, [chaplygin.e.a@gmail.com](mailto:chaplygin.e.a@gmail.com),

**Bilash Igor**<sup>1</sup>, student, [1912zakon1912@gmail.com](mailto:1912zakon1912@gmail.com),

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.