

**БАТИГІН ЮРІЙ**Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
<https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>  
e-mail: [yu.v.batygin@gmail.com](mailto:yu.v.batygin@gmail.com)**ЄРЬОМІНА ОЛЕНА**Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
<https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>  
e-mail: [elena.yeryomina@gmail.com](mailto:elena.yeryomina@gmail.com)**ШИНДЕРУК СВІТЛАНА**Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
<https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>  
e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net)**ЧАПЛИГІН ЄВГЕН**Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6091>  
e-mail: [chaplygin.e.a@gmail.com](mailto:chaplygin.e.a@gmail.com)

## СХЕМА ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДІЄВОСТІ РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Запропоновано та теоретично обгрунтовано дієздатність схеми резонансного підсилювача активної електричної потужності. Показано, що у запропонованій схемі підсилювача перший блок посилює реактивну потужність гармонійного сигналу з високим значенням коефіцієнта перетворення, другий – з незначним посиленням конвертує реактивну потужність гармонійного сигналу в активну потужність. Чисельні оцінки основних характеристик запропонованої схеми показали, що при відповідному виборі її параметрів можливі високі значення вихідних характеристик, тому коефіцієнт посилення може досягати значення ~48.

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

BATYGIN YURIY, YERYOMINA OLENA, SHINDERUK SVITLANA, CHAPLYGIN EVGEN  
Kharkiv National Automobile and Highway University

## RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMINATOR

Reliable assessments of the state of modern energy show the relevance of scientific and technical developments aimed at solving its problems. In this regard, the use of resonance phenomena in electrical circuits with active-reactive elements acquires particular significance. Their various combinations open up exceptional opportunities for creating fundamentally new efficient energy sources. This article discusses a resonant active electrical power amplifier containing a sequence of several electrically connected active-reactive circuits, which, depending on the purpose, are excited in the voltage resonance or current resonance mode. An equivalent circuit is proposed for the proposed resonant amplifier of active electrical power, represented by two blocks, each of which consists of a sequence of inductively coupled active-reactive circuits excited at the same frequency. Calculations are presented showing the theoretical justification for the performance of the proposed scheme. 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 resonance phenomena. It is shown that in the proposed amplifier circuit, the first block amplifies the reactive power of the harmonic signal with a high conversion coefficient, the second, with a slight gain, converts the reactive power of the harmonic signal into active power. The results of calculations are presented, illustrating the functional dependence of the integral gain on the main characteristics of the output resonant circuit. Numerical estimates of the main characteristics of the proposed circuit showed that with an appropriate choice of its parameters, high values of the output characteristics are possible, so the gain can reach a value of ~48. The significance of the results obtained for practice lies in their use for formulating recommendations for the creation of real efficient sources of electrical energy, the principle whose actions are based on the use of natural resonance phenomena.

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

### Постановка проблеми

Достовірні оцінки стану сучасної енергетики показують, що зафіксовані темпи споживання традиційних видів палива (нафта, вугілля, газ і деревина у тому числі) промисловими виробництвами розвинених країн та країн, що розвиваються, приведуть у найближчому майбутньому до повного виснаження наявних на Землі природних ресурсів. Відомі альтернативні джерела енергії не виправдовують надій оптимістів. Сонячні, вітрові, гідроелектростанції та ін., з огляду на вибірковий характер їх розміщення, не в змозі забезпечити реальні потреби Людства. Промислово розвинені країни відмовляються від виробництва атомної енергії, оскільки її вироблення, як свідчить наявний практичний досвід, далеко ще не безпечно для всієї нашої планети. Керований термоядерний синтез ще не освоєний, і, як прогнозують фахівці, промислове отримання енергії цього виду може мати місце не раніше, ніж до кінця XXI століття. Але, безспідставно, песимісти і тут побоюються шкідливого впливу на довкілля. Не можна не вказати на величезний обсяг інформації у спеціальних та публічних джерелах про проблеми сучасної енергетики. Зазначені обставини наочно ілюструють актуальність науково-технічних розробок, вкладених у вирішення цих проблем [1].

### Аналіз останніх джерел

Крім перерахованих вище альтернатив, до перспективних пропозицій вирішення завдань

електроенергетики можна додати використання резонансних явищ, яке, як хотілося б, дасть ключ до реальної економії природних ресурсів. Говорячи, насамперед про застосування резонансу в сучасних промислових технологіях, можна звернутися, наприклад, до магнітно-імпульсної обробки металів (Electromagnetic Metals Forming – у західній термінології). Тут одним із ілюстративних прикладів є публікація [2], де описана експериментальна апробація виділення металевих листів зі штабельного укладання за допомогою збуджуючих сил магнітного тиску. Наступним прикладом може бути електромагнітний інструмент відновлення кузовних пошкоджень у сучасних технологіях ремонту автотранспорту. Його принцип дії ґрунтується на силовому магнітно-імпульсному притяганні паралельних провідників з односпрямованими струмами [3]. Спільним для вищезгаданих пристроїв є наявність електричного резонансного контуру, де має місце розряд ємності на індуктивне навантаження. Можна додати, що, як бачиться в перспективі розвиток подібних пристроїв, існують достатні фізичні підстави для введення в схему джерел енергії підсилювачів реактивної потужності, заснованих на відомих явищах резонансу струмів і напруг [4].

Практичним додаткам резонансних електротехнічних систем присвячені також інші досить численні публікації. Серед них можна виділити роботу [5], авторами якої запропоновано електричний резонансний елемент для роботи у схемі конвертора відновлюваної енергії. Далі, у статті [6] описані досягнення в галузі створення високоефективних резонансних перетворювачів із синхронними випрямлячами струму та напруги. Патентом України захищено схему резонансного підсилювача реактивної електричної потужності, що включає послідовний активно-реактивний контур, в якому за відповідних умов збуджується резонанс напруг [7]. Слід зазначити, що обґрунтування працездатності запропонованої схеми викликає багато питань щодо її практичного виконання та відповідності фундаментальним положенням електромагнетизму [8].

Завершуючи огляд літератури, необхідно наголосити, що першим, хто описав можливості резонансу та запатентував безліч відповідних технічних рішень, був Нікола Тесла. Так, його високовольтний перетворювач із розімкнутою вторинною обмоткою забезпечував надзвичайно високий коефіцієнт трансформації напруги – [9]. Розвитку ідей великого винахідника присвячено і процитовану роботу [4], де дано теоретичне та експериментальне обґрунтування дієвості резонансного підсилювача реактивної електричної потужності. На думку авторів, основним результатом виконаних досліджень є експериментальний факт отримання реактивної потужності, що  $\sim 33$  рази перевищує вхідну потужність джерела.

Загалом узагальнення матеріалу сучасних спеціальних публікацій щодо використання резонансних явищ дозволяє відзначити

- обмеженість їх практичних додатків (тільки як окремих конструктивних складових елементної бази електротехнічних пристроїв);
- дуже низькі показники їхньої ефективності;
- відсутність реальних розробок для схем потужних імпульсних джерел енергії у обробних технологіях;
- недоліки, пов'язані з видом вихідної енергії в підсилювачах електричної потужності та ін.

**Метою роботи є:** пропозиція та теоретичне обґрунтування працездатності схеми резонансного підсилювача активної електричної потужності, що містить послідовність з кількох електрично пов'язаних активно-реактивних контурів, які, залежно від призначення, порушуються в режимі резонансу напруги або резонансу струмів.

**Постановка задачі, виведення розрахункових співвідношень**

Електрична схема, принцип дії.

На рис.1. представлена схема заміщення пропонованого резонансного підсилювача активної електричної потужності, представленого двома блоками, кожен із яких складається з послідовності індуктивно пов'язаних активно-реактивних контурів, що збуджуються на одній і тій же частоті.

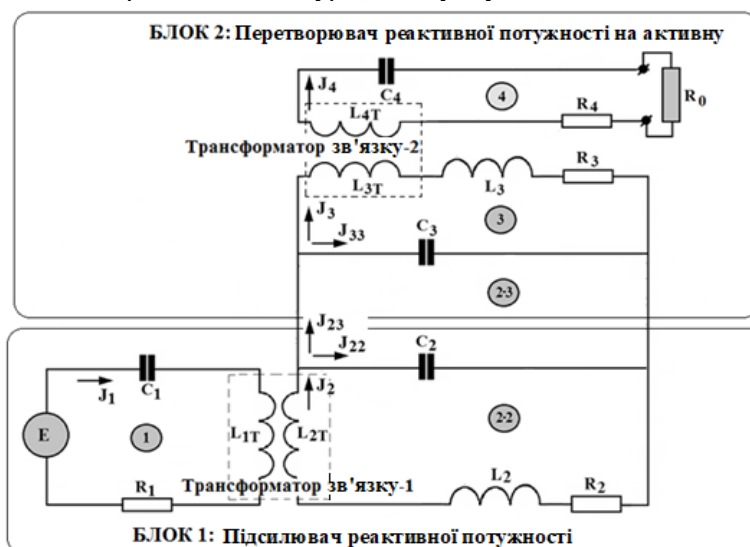


Рис. 1. Резонансний підсилювач електричної потужності

**Блок 1: Підсилювач реактивної потужності.**

Складається із двох послідовних резонансних контурів. Перший – 1 з джерелом гармонійної напруги  $E$  є вхідним. Електричний сигнал, що збуджується, за допомогою трансформатора зв'язку-1 передається в другий послідовний контур – 2-2, в якому реактивна потужність з вихідного елемента – ємності  $C_2$  знімається на вхід перетворювача (вхід контуру 3).

**Блок 2: Перетворювач реактивної потужності на активну.**

Складається з паралельного та послідовного резонансних контурів 3 та 4, індуктивно пов'язаних між собою за допомогою трансформатора зв'язку-2. Вихідний елемент контуру – 4 моделюється резистором  $R_4$ , де виділяється посилена активна електрична потужність.

По суті, робота пропонованого підсилювача зводиться до посилення першим блоком реактивної електричної потужності та перетворення її другим блоком на активну потужність гармонійного струму у вихідному елементі підсилювача.

Постановка задачі.

- Послідовний активно-реактивний контур 1 з джерелом гармонійної напруги  $E(t) = E_m \sin(\omega \cdot t)$  ( $E_m$  – амплітуда,  $\omega$  – частота,  $t$  – час) містить індуктивність  $L_{1T}$  (первинна обмотка трансформатора зв'язку-1), ємність  $C_1$ , активний опір  $R_1$  (з'єднувальні елементи та проводи первинної обмотки трансформатора зв'язку - 1).

- Послідовний активно-реактивний контур 2-2 містить індуктивність  $L_{2T}$  (вторинна обмотка трансформатора зв'язку-1), індуктивність  $L_2$ , ємність  $C_2$  (вихідний елемент), активний опір з'єднувальних проводів та обмоток індуктивностей  $R_2$ .

- Паралельний активно-реактивний контур 3 складається з індуктивностей  $L_{3T}$  (первинна обмотка трансформатора зв'язку-2) та  $L_3$ , ємності  $C_3$  та активного опору  $R_3$  (з'єднувальні елементи та дроти первинної обмотки трансформатора зв'язку-2).

- Послідовний активно-реактивний контур 4 містить індуктивність  $L_{4T}$  (вторинна обмотка трансформатора зв'язку-2), ємність  $C_4$ , активні опори  $R_4$  (з'єднувальні елементи та дроти вторинної обмотки трансформатора зв'язку-2) та  $R_0$  (навантаження підсилювача).

- Власні частоти контурів  $\omega_{1,2,3,4}$  однакові та визначаються співвідношеннями:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{1T}C_1}}; \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{(L_{2T}+L_2)C_2}}; \omega_3 = \frac{1}{\sqrt{(L_{3T}+L_3)C_3}}; \omega_4 = \frac{1}{\sqrt{L_{4T}C_4}}$$

- Резонансна частота підсилювача  $\omega$  дорівнює власним частотам контурів,  $\omega = \omega_{1,2,3,4}$ .
- Дієздатність запропонованого підсилювача активної потужності забезпечується відсутністю взаємного впливу виділених блоків на електромагнітні процеси, що протікають у кожному з них (струми в провідниках, що з'єднують блоки  $J_{23} \rightarrow 0$ ).

**Розрахункові співвідношення.**

Оскільки електричні сигнали представлені гармонічними залежностями у часі, можна скористатися символічним методом розрахунку теорії ланцюгів [10].

Для наочності в подальшому розгляді рівняння для збуджуваних струмів і напруг запишемо окремо для кожного з контурів у виділених блоках запропонованого підсилювача [10].

*Блок 1: Підсилювач реактивної потужності*

Контур 1:

$$E = \left( i \left( \omega L_{1T} - \frac{1}{\omega C_1} \right) + R_1 \right) \cdot J_1 + i\omega M_{12} \cdot J_2, \quad (1)$$

Контури 2-2, 2-3:

$$-i\omega M_{12} \cdot J_1 = (i\omega \cdot (L_{2T} + L_2) + R_2) \cdot J_2 - i \frac{1}{\omega C_2} \cdot J_{22}, \quad (2)$$

$$J_2 = J_{23} + J_{22}, \quad (3)$$

$$U_{C_2} = \frac{1}{i\omega C_2} \cdot J_{22}, \quad (4)$$

де  $M_{12} = k_{12} \cdot \sqrt{L_{1T} \cdot L_{2T}}$  – взаємні індуктивність обмоток трансформатора зв'язку-1 між контурами;  $k_{12}$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку;  $J_1$  – струм у елементах контуру 1;  $J_2, J_{22}$  – струми в елементах контуру 2,  $J_{23}$  – струм у провідниках електричного приєднання виходу реактивного підсилювача до входу перетворювача (контур 2-3),  $U_{C_2}$  – напруга на ємності  $C_2$ .

*Блок 2: Перетворювач реактивної потужності на активну*

Контури 3, 2-3:

$$(i\omega(L_{3T} + L_3) + R_3) \cdot J_3 + i\omega M_{34} \cdot J_4 = U_{C_3}, \quad (5)$$

$$U_{C_3} = \frac{1}{i\omega C_3} \cdot J_{33}, \quad (6)$$

$$J_{23} = J_{33} + J_3, \quad (7)$$

Контури 3, 2-2, 2-3:

$$U_{C_3} = U_{C_2}, \quad (8)$$

Контур 4:

$$\left( i \cdot \left( \omega(L_{4T} + L_4) - \frac{1}{\omega C_4} \right) + (R_4 + R_0) \right) \cdot J_4 + i\omega M_{34} \cdot J_3 = 0, \quad (9)$$

де  $M_{34} = k_{34} \cdot \sqrt{L_{3T} \cdot L_{4T}}$  – взаємні індуктивність обмоток трансформатора зв'язку-2 між контурами 3 і 4;  $k_{34}$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку;  $J_3, J_{33}$  – струми в елементах контуру 2,  $J_{23}$  – струм у провідниках електричного приєднання виходу реактивного підсилювача до входу перетворювача (контур – 2-3),  $U_{C_3}$  – напруга на ємності  $C_3$ .

Почнемо з виходу запропонованого підсилювача резонансного активної потужності - контуру 4 блоку 2. З рівняння системи(9) можна знайти зв'язок між струмами  $J_3$  і  $J_4$ . При виконанні резонансної умови отримуємо, що

$$J_4 = - \frac{i\omega M_{34}}{(R_4 + R_0)} \cdot J_3. \quad (10)$$

З рівнянь (5), (6) визначаємо зв'язок між струмами в контурі 3 та струмом у провідниках електричного приєднання виділених блоків (контур 2-3). При виконанні умов резонансу після введення електродинамічних характеристик знаходимо що

$$\begin{cases} J_3 = \frac{1}{(-1+i\alpha)} \cdot J_{33} \\ J_{23} = J_{33} \cdot \left( \frac{1}{(-1+i\alpha)} + 1 \right) = J_{33} \cdot \left( \frac{i\alpha}{(-1+i\alpha)} \right) \end{cases} \quad (11)$$

де  $\alpha = \frac{1}{Q_3} \cdot (1 + k_{34}^2 \cdot Q_{3T} \cdot Q_{4T})$ ,  $Q_3 = \frac{\omega(L_{3T}+L_3)}{R_3}$  – добротність паралельного контуру 3,  $Q_{3T} = \frac{\omega L_{3T}}{R_3}$  – умовна добротність первинної обмотки трансформатора 2 (включаючи активний опір  $R_3$  всього контуру 3),  $Q_{4T} = \frac{\omega L_{4T}}{(R_4+R_0)}$  – умовна добротність вторинної обмотки трансформатора 2 (включаючи активний опір  $R_4+R_0$  всього контуру 4).

З рівності (8) отримуємо зв'язок між струмами в ємностях контурів 2-2 та 3

$$\frac{J_{22}}{J_{33}} = \frac{C_2}{C_3}. \quad (12)$$

За допомогою рівнянь (7), (11) та (12) знаходимо співвідношення між струмами в контурі 2-2

$$J_{22} = \frac{-1+i\alpha}{(-1+i\alpha \cdot (1 + \frac{C_3}{C_2}))} \cdot J_2. \quad (13)$$

У виразі (13) виділимо дійсну та уявну частини. Результат підставимо до рівняння (1). Після необхідних тотожних перетворень отримаємо, що

$$- i\omega M_{12} \cdot J_1 = \left( i \left( \omega(L_{2T} + L_2) - \frac{1}{\omega C_2 \cdot \beta} \right) + \left( R_2 + \frac{1}{\omega C_2} \cdot \gamma \right) \right) \cdot J_2, \quad (14)$$

$$\text{де } \beta = \frac{1+\alpha^2 \cdot \left(1 + \frac{C_3}{C_2}\right)^2}{\left(1+\alpha^2 \cdot \left(1 + \frac{C_3}{C_2}\right)\right)}, \quad \gamma = \frac{\alpha \cdot \left(\frac{C_3}{C_2}\right)}{1 + \alpha^2 \cdot \left(1 + \frac{C_3}{C_2}\right)^2}.$$

Перш ніж переходити до подальших обчислень, проаналізуємо отримане рівняння (14), що описує електромагнітні процеси у послідовному вихідному контурі підсилювача реактивної потужності з урахуванням впливу перетворювача реактивної потужності активну.

Як впливає з правої частини рівняння (14), зазначений вплив призводить до еквівалентної зміни ємності та активного опору:

$$\begin{cases} C_{2\beta} = C_2 \cdot \beta, \\ R_{2\gamma} = R_2 + \frac{1}{\omega C_2} \cdot \gamma \end{cases} \quad (15)$$

Зміна ємності означає усунення резонансної частоти в контурі 2-2 від його власної частоти:

$$\begin{cases} \omega_{2\beta} = \frac{1}{\sqrt{(L_{2T}+L_2) \cdot C_{2\beta}}} \neq \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{(L_{2T}+L_2) \cdot C_2}}, \\ \frac{\omega_2}{\omega_{2\beta}} = \sqrt{\beta}. \end{cases} \quad (16)$$

З фізичної точки зору зазначене зміщення резонансної частоти  $\sim \sqrt{\beta}$  разів означає вихід схеми блоку 1 з резонансу, і, в кінцевому підсумку, призводить до різкого падіння вихідної реактивної потужності. Остання обставина, у свою чергу, порушує дієвість блоку 2. Істотно знижуються вихідні характеристики всієї запропонованої схеми. Власне, посилення активної потужності не буде.

Для переходу до режиму резонансу у всіх контурах як блока 1, так і блока 2, необхідно усунути їх взаємний вплив. Як впливає з формул (15) та (16), усунути зазначене явище можна відповідним вибором параметрів активно-реактивних контурів блоку 2.

Так, строго кажучи, при  $\alpha \rightarrow 0$  або  $\frac{C_3}{C_2} \rightarrow 0$  отримуємо, що

$$\begin{cases} \beta \rightarrow 1 \Rightarrow C_{2\alpha} \rightarrow C_2, \\ \gamma \rightarrow 0 \Rightarrow R_{2\alpha} \rightarrow R_2. \end{cases} \quad (17)$$

Значимо, що, як випливає з (11),  $\alpha \rightarrow 0$  означає  $Q_3 \rightarrow \infty$ . Тобто практично при заданій резонансній частоті усунути взаємний вплив виділених блоків можна з  $\alpha \rightarrow 0$  а досить великої індуктивності  $L_{3T} + L_3$  і малого активного опору  $R_3$  паралельного контуру 3. Підкреслимо, що контур 3 є вхідним контуром перетворювача реактивної потужності в активну.

Отже, як випливає з (17), струми у всіх елементах вихідного контуру підсилювача реактивної потужності однакові,  $J_{22} \approx J_2$ . І рівняння (14) набуває вигляду:

$$-i\omega M_{12} \cdot J_1 = \left( i \left( \omega(L_{2T} + L_2) - \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_2 \right) \cdot J_2. \quad (18)$$

В цілому, рівняння, що описують електромагнітні процеси в блоці 1, впливають з (2) та (18).

$$\begin{cases} E = R_1 \cdot J_1 + i\omega M_{12} \cdot J_2 \\ -i\omega M_{12} \cdot J_1 = R_2 \cdot J_2 \end{cases}, \quad (19)$$

З системи (19) можна знайти максимум вихідної реактивної потужності за заданої вхідної потужності гармонійного сигналу. Це завдання вирішено у роботі [12]. Не повторюючи матеріалу цитованої публікації, випишемо вирази для амплітудного значення вхідної потужності  $P_{1m}$  при максимальній величині напруги  $U_{C_2m}$  та потужності  $P_{2m}$  у вихідному елементі підсилювача реактивної потужності (контур 2-2).

$$\begin{cases} P_{1m} = \frac{E^2}{2R_1}, \\ U_{C_2m} = E \cdot \frac{(\omega \cdot L_2)}{2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_1}}, \\ P_{2m} = \frac{E^2}{R_1} \cdot \frac{Q_2}{4}. \end{cases} \quad (20)$$

Далі визначимо вихід активної потужності навантаження запропонованої схеми підсилювача.

Спочатку, за допомогою співвідношень (5), (8) та (10) визначаємо струм  $J_4$ . Опускаючи досить громіздкі математичні перетворення, записуємо, що

$$J_4 = -iU_{C_2} \cdot \frac{(R_4 + R_0)}{\omega M_{34}} \cdot \frac{1}{R_3(iQ_3 + (1 + k_{34}Q_{3T} \cdot Q_{4T}))}. \quad (21)$$

З виразу (21) з урахуванням залежності для  $U_{C_2m}$  (20) знаходимо квадрат модуля струму в активному навантаженні розглянутого підсилювача. Помножуючи отриманий результат на опір  $R_0$ , отримуємо визначальну потужність  $P_{4m}$ .

$$P_{4m} = E^2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \left( \frac{Q_2}{2Q_3} \right)^2 \cdot \frac{R_0 \cdot (R_4 + R_0)}{R_3^3} \cdot \frac{1}{(\alpha Q_3 - 1) \cdot (1 + \alpha^2)}. \quad (22)$$

Обчислюючи відношення амплітуди вихідної потужності  $P_{4m}$  до амплітуди вхідної потужності  $P_{1m}$  знаходимо інтегральний коефіцієнт посилення активної потужності у запропонованій схемі підсилювача.

$$K_{1-4} = \frac{P_{4m}}{P_{1m}} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Q_2}{Q_3} \right)^2 \cdot \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot (R_4 + R_0)}{R_3^3} \cdot \frac{1}{(\alpha Q_3 - 1) \cdot (1 + \alpha^2)}. \quad (23)$$

Отриманий результат можна доповнити коефіцієнтом трансформації потужності у схемі перетворювача реактивної потужності на активну  $K_{2-4}$ .

За допомогою виразів (20) та (22) знаходимо, що

$$K_{2-4} = \frac{P_{4m}}{P_{2m}} = \frac{Q_2}{Q_3^2} \cdot \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot (R_4 + R_0)}{R_3^3} \cdot \frac{1}{(\alpha Q_3 - 1) \cdot (1 + \alpha^2)}. \quad (24)$$

При коефіцієнті перетворення підсилювачем реактивної потужності  $K_{1-2} = Q_2/2$  з [12] з урахуванням виразів (23) та (24) отримуємо, що

$$K_{1-4} = K_{1-2} \cdot K_{2-4}. \quad (25)$$

Добуток у (25) узгоджується з відомою залежністю для послідовності пов'язаних електричних контурів [10], що підтверджує достовірність результатів вирішення поставленого завдання.

#### Числові оцінювання

Як вихідні дані візьмемо параметри теоретично дослідженої та експериментально апробованого підсилювача реактивної потужності гармонійного сигналу [4,12].

Запишемо характеристики елементної бази згідно зі схемою на рис.1.

Початкові дані.

Джерело гармонійної напруги із частотою  $f=25$  кГц.

#### Блок 1: Підсилювач реактивної потужності.

1. Контур 1:

1.1. власна частота  $f=25$  кГц;

1.2. індуктивність (первинна обмотка трансформатора зв'язку 1)  $L_{1T} \approx 14,8$  мкГн;

1.3. коефіцієнт електромагнітного зв'язку обмоток трансформатора зв'язку 1  $k_{12}=0,1$ ;

1.4. конденсатор ємністю  $C_1=2,763$  мкФ;

1.5. сумарний активний опір джерела потужності, з'єднувальних проводів та первинної обмотки трансформатора зв'язку  $R_1=1,0$  Ом;

2. Контур 2-2:

- 2.1. власна частота  $f=25$  кГц;
- 2.2. індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку  $L_{2T}=14,8$  мкГн;
- 2.3. індуктивність соленоїда  $L_2=169,2$  мкГн;
- 2.4. конденсатор ємністю  $C_1=0,22$  мкФ;
- 2.5. активний опір сполучних проводів, вторинної обмотки трансформатора зв'язку 1 та обмотки соленоїда  $R_2=0,35$  Ом;

**Блок 2: Перетворювач реактивної потужності в активну.**

3. Контур - 3:
  - 3.1. власна частота  $f=25$  кГц;
  - 3.2. індуктивність первинної обмотки трансформатора зв'язку  $L_{3T}=L_{2T}=14,8$  мкГн;
  - 3.3. коефіцієнт електромагнітного зв'язку обмоток трансформатора зв'язку 2  $k_{34}=0,1$ ;
  - 3.4. індуктивність соленоїда  $L_3=L_2=169,2$  мкГн;
  - 3.5. конденсатор ємністю  $C_2=0,22$  мкФ;
  - 3.6. активний опір сполучних проводів, вторинної обмотки трансформатора зв'язку 2 та обмотки соленоїда  $R_2=0,35$  Ом.
4. Контур - 4:
  - 4.1. власна частота  $f=25$  кГц;
  - 4.2. індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку 2  $L_{4T}=L_{3T}=L_{2T}=14,8$  мкГн;
  - 4.3. конденсатор ємністю  $C_2=C_1=0,22$  мкФ;
  - 4.4. активний опір сполучних проводів, вторинної обмотки трансформатора зв'язку-2 та обмотки соленоїда  $R_2=0,35$  Ом;
  - 4.5. Активний опір навантаження  $R_0=1,0$  Ом.

При проведенні чисельних оцінок скористаємося залежностями (11), формулами (23), (24), (26) і співвідношеннями (14), (17), визначальними незалежність електромагнітних процесів у блоках запропонованої схеми підсилювача активної електричної потужності.

Результати обчислень показали, що  $\alpha=0,013$ ,  $\beta=1,00036$ ,  $\sqrt{\beta}=1,00018$ ,  $\gamma=0,0135$ . Тобто, фактично,  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow 1$ ,  $\sqrt{\beta} \rightarrow 1$ ,  $\gamma \rightarrow 0$ , що свідчить про відсутність взаємного впливу підсилювача і перетворювача реактивної потужності (блок 1 і 2).

Коефіцієнти трансформації енергії між виділеними блоками становлять:  $K_{1,2}=41,24$ ,  $K_{2,4}=1,17$ ,  $K_{1,4}=48,16$ . Коментуючи виконані розрахунки, можна відзначити, що в запропонованій схемі перший блок посилює реактивну потужність гармонійного сигналу з високим значенням коефіцієнта перетворення, другий - з незначним посиленням конвертує реактивну в активну потужність гармонійного сигналу.

Наприкінці наведемо результати обчислень, що ілюструють функціональні залежності інтегрального коефіцієнта посилення основних характеристик вихідного резонансного контуру. Зауважимо, що такими, внаслідок рівності нулю реактивного опору (умова резонансу напруг) є активні опори проводів вторинної обмотки трансформатора зв'язку-2, з'єднувальних провідників, навантаження підсилювача і коефіцієнт рівня електромагнітного зв'язку між обмотками трансформатора зв'язку 2.

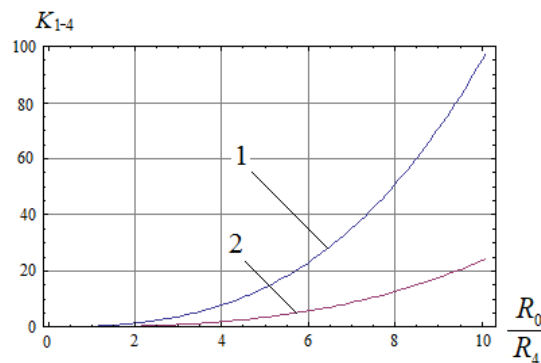


Рис. 2. Інтегральний коефіцієнт посилення у запропонованій схемі підсилювача активної потужності, 1 –  $K_{3-4}=0,1$ ; 2 –  $K_{3-4}=0,2$

Коментуючи виконані розрахунки, можна відзначити, що у запропонованій схемі перший блок посилює реактивну потужність гармонійного сигналу з високим значенням коефіцієнта перетворення, другий – з незначним посиленням конвертує реактивну потужність активну потужність гармонійного сигналу.

Криві на рис.2 показують, що ефективне посилення можливе за досить малого рівня електромагнітного зв'язку між обмотками трансформатора зв'язку між резонансними контурами у вихідному блоці, що здійснює конверсію реактивної потужності активну. Цей результат узгоджується з рекомендацією М.Тесла про «накачування» резонансної системи досить малими порціями енергії [9].

**Висновки**

Запропоновано та теоретично обґрунтовано дієздатність схеми резонансного підсилювача активної електричної потужності, що містить послідовність з кількох електрично пов'язаних активно-реактивних

контурів, які, залежно від призначення, порушуються в режимі резонансу напруги або резонансу струмів.

Показано, що у запропонованій схемі підсилювача перший блок посилює реактивну потужність гармонійного сигналу з високим значенням коефіцієнта перетворення, другий – з незначним посиленням конвертує реактивну активну потужність гармонійного сигналу.

Числові оцінки основних характеристик запропонованої схеми показали, що з відповідному виборі її параметрів можливі високі значення вихідних характеристик, тому коефіцієнт посилення може досягати значення ~ 48.

### Література

1. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. (Second Edition) OECD/IEA. Paris, 2008. 650 p.
2. Batygin Yu. Magnetic-Pulsed Separation of Sheet Metals / Yu. Batygin, S. Shinderuk, E. Chaplygin, N. Rudenko, O. Yeryomina, // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 – Conference Proceedings, 2022 – pp. 1– 7. DOI: [10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916322](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916322)
3. Батигін Ю.В. Числові оцінки струмів і сил в лінійних інструментах магнітно-імпульсного притягання. Частина 1: Метали з низькою електропровідністю / Ю. В. Батигін, С.О. Чаплигін, С.О Шиндерук, В.А Стрельнікова. // Електротехніка і Електромеханіка – 2019. – № 5. – С. 40–44.
4. Батигін Ю.В. Резонансний підсилювач електричної потужності. Експериментальні дослідження / Ю.В. Батигін, С.О. Шиндерук, Г.С. Серіков, О.Ф. Єрьоміна // Перспективні технології та прилади – 2018. – № 13 – С. 18–25.
5. Boström C. Electric resonance-rectifier circuit for renewable energy conversion / C. Boström, B. Ekegård, M. Leijon // Applied Physics Letters – 100,043512 – January 2012. <https://doi.org/10.1063/1.3680097>.
6. Huang D. High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers / D. Huang, F. Lee, P. Kong // IEEE Transactions on Industrial Electronics, – 2011. – Vol. 58 – No. 8 – pp. 3461-3470.
7. Патент України UA №103215 Резонансний підсилювач потужності / Лиховид Ю.М. – заявка № u2015 04915 на патент України від 20.05.2015р., опубліковано 10.12.2015. – 5 с.
8. Pursell E.N. Electricity and Magnetism. 3rd Edition / E.N. Pursell, D. J. Morin. – Cambridge University Press, 2013 – 853 p.
9. Tesla N. Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents. / N. Tesla, Ty. Shedleski – Book Shed, 2014. – 610 p.
10. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. 4th Edition. Cambridge University Press. United Kingdom, 2017 – 623 p.
11. Kantorovich L. Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics. Springer Nature Switzerland AG, 2018. – 526 p.
12. Батигін Ю.В. Резонансний підсилювач реактивної електричної потужності. Аналіз електромагнітних процесів / Ю.В. Батигін, Г.С. Серіков, С.О. Шиндерук, В.А. Стрельнікова, Е.Р. Усмонов // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – №2. – С. 34 – 42.

### References

1. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. (Second Edition) OECD/IEA. – Paris, 2008. – 650 p.
2. Batygin Yu. Magnetic-Pulsed Separation of Sheet Metals / Yu. Batygin, S. Shinderuk, E. Chaplygin, N. Rudenko, O. Yeryomina, // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 – Conference Proceedings, 2022 – pp. 1– 7. DOI: [10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916322](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916322)
3. Batygin Yu.V. Chyslovi otsinky strumiv i syl v liniynykh instrumentakh mahnitno-impul'snoho prytyahannya. Chastyna 1: Metaly z nyz'koyu elektroprovodnistyu / Yu. V. Batygin, Chaplyhin YE.O., Shynderuk S.O., Strel'nikova V.A. // Elektrotehnika i Elektromekhanika – 2019. – № 5. – С. 40–44.
4. Batygin Yu.V. Rezonansnyy pidsilyuvach elektrychnoyi potuzhnosti. Eksperymental'ni doslidzhennya / Yu.V. Batygin, S.O. Shynderuk, H.S. Syerikov, O.F. Yeryomina // Perspektivni tekhnolohiyi ta prylady – 2018. – № 13 – С. 18–25.
5. Boström C. Electric resonance-rectifier circuit for renewable energy conversion / C. Boström, B. Ekegård, M. Leijon // Applied Physics Letters – 100,043512 – January 2012. <https://doi.org/10.1063/1.3680097>
6. Huang D. High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers / D. Huang, F. Lee, P. Kong // IEEE Transactions on Industrial Electronics, – 2011. – Vol. 58 – No. 8 – pp. 3461-3470.
7. Patent Ukrainy UA №103215 Rezonansnyy pidsilyuvach potuzhnosti / Lykhovyd Yu.M. – zayavka № u2015 04915 na patent Ukrainy vid 20.05.2015r., opublikovano 10.12.2015. – 5 s.
8. Pursell E.N. Electricity and Magnetism. 3rd Edition / E.N. Pursell, D. J. Morin. – Cambridge University Press, 2013 – 853 p.
9. Tesla N. Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents. / N. Tesla, Ty. Shedleski – Book Shed, 2014. – 610 p.
10. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. 4th Edition. / David J. Griffiths – Cambridge University Press. United Kingdom, 2017 – 623 p.
11. Kantorovich L. Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics / L. Kantorovich – Springer Nature Switzerland AG, 2018. – 526 p.
12. Batygin Yu.V. Rezonansnyy pidsilyuvach reaktyvnoyi elektrychnoyi potuzhnosti. Analiz elektromahnitnykh protsesiv / Yu.V. Batygin, H.S. Syerikov, S.O. Shynderuk, V.A. Strel'nikova, E.R. Usmonov // Elektrotehnika ta elektroenerhetyka. – 2019. – №2. – С. 34 – 42.