

Ю.В. БАТИГІН, Т.В. ГАВРИЛОВА, Є.О. ЧАПЛИГІН, С.О. ШИНДЕРУК

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В роботі обґрунтована принципова дієвість резонансного підсилювача електричної потужності, заснована на висновках узагальненого теоретичного аналізу і експериментах, виконаних для розробленої моделі підсилювача. Результати цієї роботи необхідні для проектування електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами.

Ключові слова: резонанс напруги, індуктивність, трансформатор Тесла, електрична потужність, коефіцієнт трансформації.

Yu. BATYGIN, T. GAVRILOVA, Ye. CHAPLYHIN, S. SHINDERUK

Kharkiv National Automobile and Highway University

### THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF RESONANCE AMPLIFIER OF ELECTRICAL POWER

An urgent task today is the search for opportunities for energy conversion, especially if it is associated with resonance effects, which, for example, can enhance the power of electrical signals. A prospective study consists in considering the processes in a device in which, with a sufficiently small active resistance in the secondary circuit, resonantly connected circuits should have an increase in electrical power. The generalizations of the results of the author's research, including theoretical analysis and experiments aimed at substantiating the fundamental possibility of resonant amplification of the power of harmonic signals in the circuit of two real inductively coupled series active-reactive circuits, where the inductance of the secondary circuit is the "output" element, are presented. A resonant electric power amplifier consisting of input and output RLC circuits using a transformer and characterized by the exact fulfilment of resonance conditions in the circuits is considered. For the theoretical analysis of electromagnetic processes, methods based on the theoretical principles of electrical engineering, in particular the theory of circuits, were used. The obtained theoretical and experimental results illustrate the real possibilities of a multiple increase in power (~ 35 ... 37.8 times) in the adopted scheme of a resonant converter of electromagnetic energy based on the idea of a Tesla transformer. Comparison of the values of theoretical and experimental characteristics of the investigated amplifier showed their very good agreement at the level of 3 ... 9%. On the basis of the conclusions of the generalized theoretical analysis and experiments carried out for the developed amplifier model, the fundamental efficiency of the resonant electric power amplifier is substantiated. The results of this work are necessary for the design of electrical devices with resonant elements.

Keywords: voltage resonance, inductance, Tesla transformer, electrical power, transformation factor.

### Постановка проблеми

Явище резонансу відомо науковій спільноті з давніх часів. Стрімке зростання амплітуди змушених коливань системи, яке настає під час наближення частоти зовнішньої дії до певних значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи, спостерігається в механіці, електроніці, оптиці, акустиці, астрофізиці. Найбільш яскравими негативними проявами явища резонансу є механічні руйнування мостів, наприклад, Бротонського підвісного моста через ріку Ірвелл в Англії у 1831 році, коли по ньому йшов військовий загін; Єгипетського моста через ріку Фонтанку в Петербурзі у 1905 році в результаті проходження кавалерійського ескадрону церемоніальним маршем [1, 2] та інші. Гіркий досвід таких катастроф навчив військовослужбовців у подібних ситуаціях "збивати ногу" і йти не стройовим, а вільним кроком.

Виходячи з причинно-наслідкового зв'язку явищ природи, в першу чергу, виникає питання про причини руйнувань. Так, при збігу частот церемоніального маршу і власних коливань мостових опор динамічна енергія зовнішнього силового впливу різко зростає і суттєво перевищує її статичну величину, обумовлену загальною вагою ескадрону і ударами копит. Не задаючись питанням про фізичне джерело резонансної енергії, яка зруйнувала міст, не можна не відзначити безпрецедентні можливості практичного використання даного явища в різних областях сучасної науки і техніки. На користь такого висновку свідчить і фізичний принцип подібності, що дозволяє зв'язати просторові і часові характеристики процесів різної природи, відволікаючись від їх конкретного змісту [3].

### Аналіз останніх джерел

Найбільш ефективну пропозицію використання резонансної енергії з коефіцієнтом перетворення більш ніж в ~ 1000 разів було запатентовано ще на початку минулого століття і названо по імені його винахідника «трансформатором Тесла» [4]. Останній, принципово, складається з двох резонансних контурів з індуктивним зв'язком і працює виключно як «над» підсилювач напруги (але не електричної потужності). Дослідженням трансформатора Тесла присвячено безліч публікацій. Як приклад, можна назвати роботу [5], відмінною рисою якої є пропозиція відповідної фізико-математичної моделі для теоретичного аналізу процесів, що протікають, спрямованого на підтвердження експериментальних висновків самого Н. Тесла і отримання чисельних оцінок амплітуд вихідної напруги при варіації робочих частот щодо резонансного значення.

Якщо трансформатор Тесла доповнити послідовним включенням зосередженої ємності в ланцюг вторинної обмотки, то отримана схема з двох активно-реактивних контурів з індуктивним зв'язком в режимі «резонансу напруги» може являти собою вже перетворювач з можливостями посилення не тільки по

напрузі, але і по току. Процеси в схемі ідеалізованого варіанту такого пристрою проаналізовані авторами видання [6], де було показано, що при досить малому активному опорі у вторинному контурі повинно мати місце посилення електричної потужності.

Авторами робіт [7–9] запропонована реальна схема резонансного підсилювача електричної потужності без ідеалізації, прийнятих в [6]. Так, в публікації [7] представлені отримані аналітичні залежності для збуджених струмів і напруги. Авторами роботи [8] виконаний аналіз процесів, що протікають. В [9] описані експерименти, спрямовані на обґрунтування практичної дієздатності запропонованого підсилювача електричної потужності. Цитовані роботи висвітлюють окремі сторони проблеми і вимагають свого узагальнення в рамках окремої публікації.

**Метою роботи є:** узагальнення результатів авторських досліджень, що включає теоретичний аналіз і експерименти, спрямовані на обґрунтування принципової можливості резонансного підсилення потужності гармонічних сигналів в схемі з двох реальних індуктивно зв'язаних послідовних активно-реактивних контурів, де «вихідним» елементом є індуктивність вторинного контуру.

#### Виклад основного матеріалу

Виклад матеріалу проведемо в паралельному зіставленні формул і висновків теоретичного аналізу, чисельних оцінок для експериментальної моделі резонансного підсилювача і відповідних результатів вимірювань, детально освітлених в кожній з авторських робіт [7–9]. Принципова схема і експериментальна модель резонансного підсилювача представлена на рис. 1. Наведемо аналітичні залежності для струмів, напруги і потужності в режимі максимального струму в другому контурі і максимуму «вихідної потужності» [7, 8]:

$$\begin{cases} I_{1m} = \frac{E}{2R_1}; U_{L_{1T}m} = E \cdot \frac{Q_1}{2}; P_{1m} = \frac{E^2}{2R_1}; \\ I_{2m} = \frac{E}{2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_1}}; U_{L_2m} = E \cdot \frac{(\omega \cdot L_2)}{2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot R_1}}; P_{2m} = \frac{E^2}{\sqrt{R_2 \cdot R_1}} \cdot \frac{Q_1}{4}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $I_{1m}$ ,  $U_{L_{1T}m}$ ,  $P_{1m}$  – амплітуда струму, напруги на первинній обмотці трансформатора зв'язку та електричної потужності в першому контурі, відповідно;

$I_{2m}$ ,  $U_{L_2m}$ ,  $P_{2m}$  – амплітуда струму, напруги на «вихідній» індуктивності і електричної потужності в другому контурі, відповідно;

$Q_2 = \frac{\omega \cdot L_2}{R_2}$  – добротність другого контуру без урахування індуктивності вторинної обмотки трансформатора зв'язку.

Реалізація даного режиму має місце при коефіцієнті електромагнітного зв'язку –  $k_{12max}$  між обмотками трансформатора зв'язку:

$$k \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot L_{1T}) \cdot (\omega \cdot L_{2T})}}_{12max} \quad (2)$$

Розглянемо елементну базу підсилювача відповідно його експериментальній моделі (рис. 1). Перший «вхідний» контур включає в себе:

джерело гармонічної напруги, яка змінюється за законом

$$E(t) = E \cdot \sin(\omega t),$$

де  $E = 1$  В – амплітуда;  $f = \omega / 2\pi = 25$  кГц – робоча частота;

- активний опір  $R_1 = 0,1$  Ом;

- ємність  $C_1 = 2,763$  мкФ;

- індуктивність первинної обмотки трансформатора зв'язку між контурами  $L_{1T} = 14,8$  мкГн.

Другий «вихідний» контур складається з таких елементів:

- індуктивність вторинної обмотки трансформатора зв'язку між контурами  $L_{2T} = 14,8$  мкГн;

- ємність  $C_2 = 0,22$  мкФ;

- «вихідна» індуктивність  $L_2 = 169,2$  мкГн;

- активний опір  $R_2 = 0,35$  Ом.

Відмітимо, що у прийнятій схемі з достатньою строгістю дотримуються резонансні умови в контурах (відхилення по частотах не перевищують  $\sim 0,8$  %) [9].

Фізично, максимум збуджуваних струму і потужності можна пояснити мінімально можливим перекачуванням енергії з вторинного контуру в первинний. Причому цей ефект досягається відповідним рівнем електромагнітного зв'язку між контурами згідно з формулою (2).

Зауважимо, що коефіцієнт електромагнітного зв'язку між обмотками має наступні значення: при розрахунках  $k_{12max}$ , при експерименті  $k_{12max}$ .

Розглянемо також інтегральні показники роботи представленого підсилювача. Так, чисельні значення відношення «вихідної» потужності перетворювача до «вихідної» потужності першого контуру  $\frac{U_{L_2m} \cdot I_{2m}}{U_{L_{1T}m} \cdot I_{1m}}$  дорівнюють 3,3 при розрахунках та 3,2 при експерименті. Тобто спостерігаємо розбіжність  $\sim 3$  %.

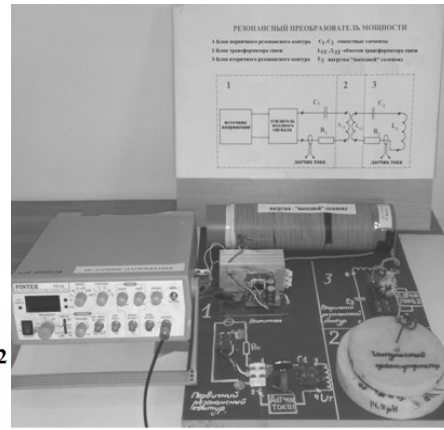
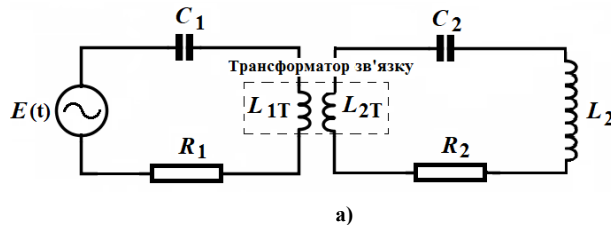


Рис. 1. Резонансний підсилювач електричної потужності  
а) принципова схема; б) експериментальна модель

Відношення «вихідної» потужності перетворювача до «вихідної» потужності джерела – коефіцієнт посилення електричної потужності  $K = \frac{U_{L2m} \cdot I_{L2m}}{E \cdot I_{1m}}$  має значення при розрахунках 37,8, а при експерименті – 35,0, що відповідає розбіжності ~ 9 %.

Порівняльні результати обчислень по наведеним аналітичним залежностям і вимірювань таких параметрів і характеристик першого і другого контурів, як: робоча частота, збуджений струм, напруга і потужність, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати обчислень і вимірювань параметрів і характеристик першого і другого контурів**

Параметри, характеристики		Робоча частота, кГц	Збуджений струм, А	Напруга на обмотці трансформатора зв'язку, В	Потужність джерела, Вт	Напруга на «вихідній» індуктивності, В	«Вихідна» потужність на індуктивності, Вт
Перший контур	Розрахунок	25,0	5,0	11,0	5,0		
	Експеримент	4,89	5,46	11,58	5,46		
Другий контур	Розрахунок	25,0	2,7	6,19		6,19	189,2
	Експеримент	24,93	3,39	5,8		5,8	191,2

Таким чином, порівняння значень теоретичних і експериментальних характеристик досліджуваного підсилювача показало дуже добрий їх збіг на рівні 3...9 %. Незначні відхилення пояснюються розбіжністю реальних і розрахункових робочих частот в контурах і впливом зовнішніх електромагнітних полів, наприклад, вплив поля «вихідного» соленоїда на електромагнітні процеси в трансформаторі зв'язку.

**Висновки**

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження узгоджуються з рекомендаціями Н. Тесла, відповідно до яких резонансне «накачування» вторинного «вихідного» контуру повинно проводитися досить малими електричними впливами з боку первинного «вхідного» контуру на частоті, що дорівнює власним частотам контурів підсилювача. В цілому, отримані результати ілюструють реальні можливості багаторазового посилення потужності (в ~ 35...37,8 разів) за допомогою резонансного перетворювача електромагнітної енергії, розробленого на використанні ідеї «трансформатора Тесла».

Наукова новизна цієї роботи полягає у всебічному обґрунтуванні принципової дієвості резонансного підсилювача електричної потужності, заснованому на висновках узагальненого теоретичного аналізу і експериментах, виконаних для експериментальної моделі підсилювача. Результати цієї роботи необхідні для проектування електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами, наприклад, для живлення низькоомного навантаження підвищеною напругою, в пристроях індукційного нагріву та при розробці енергозберігаючих технологій для вирішення нагальних проблем сучасного автотранспорту [10, 11]. Вельми перспективним в напрямку проведених досліджень бачаться подальші розглядання процесів в системі з двох індуктивно-пов'язаних послідовних резонансних контурів, збуджуваних часовою послідовністю ангармонічних сигналів.

## Література

1. Резонанс – друг і ворог [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://kpi.ua/resonance>.
2. Почему обрушился Египетский мост в Санкт-Петербурге? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://petrogazeta.ru/history/246>.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М. : Оникс, 2006. – 1056 с.
4. Тесла Н. Тесла и его подлинные взгляды. Лучшие работы разных лет / Н. Тесла ; [пер. с англ.]. – М. : Эксмо, 2010. – 320 с.
5. Batygin Yu. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer / Yu. Batygin, S. Shinderuk, S. Serikov // Danish Scientific Journal. – 2018. – No. 11. – P. 72–79.
6. Теоретические основы электротехники / [К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин]. – 4-е издание. Том 1. – СПб : Питер, 2003. – С. 317–318.
7. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель электрической мощности. Основные расчётные соотношения / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2018. – № 32(1308). – С. 59–63. – DOI : 10.20998/2079-3944.2018.32.11.
8. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 2. – С. 34–42. – DOI : 10.15588/1607-6761-2019-2-3.
9. Батыгин Ю.В. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, С.А. Шиндерук, Г.С. Сериков, Е.Ф. Еремина // Перспективні технології та прилади. – 2018.– № 13. – С. 18–24.
10. Батигін Ю.В. Особливості збудження електромагнітних сил при магнітно-імпульсній обробці листових феромагнетиків / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 71–77.
11. Hnatov A. Energy saving technologies for urban bus transport / A. Hnatov, Shch. Arhun, S. Ponikarovska // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2017. – V. 14. – no.4. – P. 4649–4664.

## References

1. Rezonans – druh i voroh [Elektronny resurs]. – Rezhym dostupu : <https://kpi.ua/resonance>.
2. Почему обрушился Египетский мост в Санкт-Петербурге? [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://petrogazeta.ru/history/246>.
3. Yavorskij B.M. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov VUZov / B.M. Yavorskij, A.A. Detlaf, A.K. Lebedev. – 8-e izd., pererab. i ispr. – M. : Oniks, 2006. – 1056 s.
4. Tesla N. Tesla i ego podlinnye vzglyady. Luchshie raboty raznyh let / N. Tesla ; [per. s angl.]. – M. : Eksmo, 2010. – 320 s.
5. Batygin Yu. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer / Yu. Batygin, S. Shinderuk, S. Serikov // Danish Scientific Journal. – 2018. – No. 11. – P. 72–79.
6. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki / [K.S. Demirchyan, L.R.Nejman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin]. – 4-e izdanie. Tom 1. – SPb : Piter, 2003. – S. 317–318.
7. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel elektricheskoy moshnosti. Osnovnye raschyotnye sootnosheniya / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Seriya: Problemi udoskonalenniya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika. – 2018. – № 32(1308). – С. 59–63. – DOI : 10.20998/2079-3944.2018.32.11.
8. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel reaktivnoj elektricheskoy moshnosti. Analiz elektromagnitnyh processov / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk // Elektrotehnika ta elektroenergetika. – 2019. – № 2. – S. 34–42. – DOI : 10.15588/1607-6761-2019-2-3.
9. Batygin Yu.V. Rezonansnyj usilitel elektricheskoy moshnosti. Eksperimentalnye issledovaniya / Yu.V. Batygin, G.S. Serikov, S.A. Shinderuk, E.F. Eremina // Perspektivni tehnologiyi ta priladi. – 2018.– № 13. – S. 18–24.
10. Batyhyn Yu.V. Osoblyvosti zbudzhennia elektromahnitnykh syl pry mahnitno-impulsnij obrobtsi lystovykh feromahnetyktiv / Yu.V. Batihyn, A.V. Hnatov // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – № 1. – S. 71–77.
11. Hnatov A. Energy saving technologies for urban bus transport / A. Hnatov, Shch. Arhun, S. Ponikarovska // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2017. – V. 14. – no.4. – P. 4649–4664.

Надійшла / Paper received : 28.10.2020

Надрукована/Printed :27.11.2020