

УДК 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.01

РЕЗОНАНСНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕРІОДИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ

Ю. В. БАТИГІН, О. Ф. ЄРЬОМІНА*, С. О. ШИНДЕРУК, Є. О. ЧАПЛИГІН

кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: elena.yeryomina@gmail.com

АНОТАЦІЯ Запропоновано еквівалентну схему та теоретично обґрунтовано дієздатність резонансного підсилювача середньої активної електричної потужності періодичних імпульсів струму, що генеруються у навантаженні. Підсилювач складається з двох послідовних активно-реактивних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії. У першому контурі в режимі резонансу напруг здійснюється його заряд, причому зарядна напруга перевищує напругу джерела в число разів, що дорівнює величині добротності контуру. Після закінчення заряду до заданого рівня енергії ємність розряджається через індуктивність на активне навантаження. Періодичність заряду та розряду забезпечується узгодженою роботою комутаторів у контурах схеми із заданою частотою їх синхронного перемикавання. Принципово запропонований підсилювач активної електричної потужності складається з підсилювача реактивної потужності (зарядний контур) і перетворювача реактивної потужності в активну потужність генерованого струму (розрядний контур). Отримані аналітичні співвідношення дозволяють орієнтуватися у величині зарядної напруги на ємності, яка може бути отримана залежно від часу заряду. Так, максимальна напруга, що встановлюється добротністю прийнятого для чисельних оцінок зарядного контуру, вимагає заряду протягом 0,004 с. Однак, вже 50% максимуму напруги досягається за набагато менший час $\sim 0,0005$ с (майже на порядок нижче за протяжність заряду до максимуму). Знайдені вирази для характеристик процесів у розрядному контурі дозволяють здійснити вибір параметрів таким чином, щоб забезпечити найбільший коефіцієнт посилення середньої потужності періодичної послідовності струмових імпульсів, що генеруються в активному навантаженні підсилювача. Показано, що значення середньої електричної потужності в навантаженні повинно залежати від співвідношення часів заряду та розряду, оскільки при заряді ємнісного накопичувача струм навантаження дорівнює нулю. Отримано, що величина посилення може на порядок перевищувати відповідний енергетичний показник джерела потужності.

Ключові слова: послідовний контур; резонанс напруг; періодична послідовність струмових імпульсів; середня активна електрична потужність; багаторазове посилення

RESONANCE ACTIVE ELECTRIC POWER AMPLIFIER OF PERIODIC CURRENT PULSES

Yu. BATYGIN, O. YERYOMINA, S. SHINDERUK, E. CHAPLYGIN

Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An equivalent circuit is proposed and the viability of a resonant amplifier of the average active electric power of periodic current pulses generated in the load is theoretically substantiated. The amplifier consists of two series active-reactive circuits with a common capacitive energy storage. In the primary circuit, in the voltage resonance mode, it is charged, and the charging voltage exceeds the source voltage by a factor equal to the quality factor of the circuit. At the end of the charge to a predetermined energy level, the capacitance is discharged through the inductance to the active load. The periodicity of the charge and discharge is ensured by the coordinated operation of the switches in the circuit circuits with a given frequency of their synchronous switching. In principle, the proposed amplifier of active electric power consists of a reactive power amplifier (charging circuit) and a reactive power converter into active power of the generated current (dis-charge circuit). The obtained analytical relationships allow one to navigate in the magnitude of the charging voltage on the capacitance, which can be obtained depending on the charge time. Thus, the maximum voltage set by the quality factor of the charging circuit adopted for numerical evaluations requires charging for ~ 0.004 s. However, already 50% of the maximum voltage is reached in a much shorter time ~ 0.0005 s (almost an order of magnitude lower than the charge length to the maximum). The expressions found for the characteristics of the processes in the discharge circuit make it possible to select its parameters in such a way as to provide the highest gain coefficient for the average power of a periodic sequence of current pulses generated in the active load of the amplifier. It is shown that the value of the average electrical power in the load should depend on the ratio of the charge and discharge times, since when the capacitive storage is being charged, the current in the load is zero. It was found that the gain value can exceed the corresponding energy indicator of the power source by an order of magnitude.

Keywords: series circuit; voltage resonance; periodic sequence of current pulses; average active electric power; multiple amplification

Вступ

У загальному сенсі цього визначення, енергоефективними електротехнічними системами прийнято називати системи накопичення,

перетворення і розподілу електроенергії з використанням механічних, теплових, випромінюючих конструктивних компонентів та ін. до споживачів. Резонансні перетворювачі електроенергії у встановлених режимах роботи мають

малі втрати та низький рівень перешкод проти перетворювачів інших типів. Вони з успіхом можуть бути використані як компоненти широкого класу енергоефективних електротехнічних систем [1,2].

Однак існують певні труднощі, що перешкоджають впровадженню резонансних перетворювачів у електротехнічні системи. Насамперед, це складність забезпечення бажаної динаміки, точності та стійкості регулювання. Також слід зазначити, що резонансні схеми досить складні у реальній технічній реалізації, що обумовлено застосуванням спеціальних високочастотних конденсаторів, котушок індуктивності, комутаторів, обмотувальних проводів та ін. Вирішення перерахованих вище проблем може бути досягнутим за рахунок вдосконалення відповідних систем управління і схем власне резонансних перетворювачів. Тому тут насамперед необхідні адекватні фізико-математичні моделі, чисельні оцінки, пошуки оптимальних рішень, які дозволять визначити реальні параметри у реальних пристроях з резонансними перетворювачами [3,4].

Огляд літератури

Пропозиціям та застосуванню резонансних перетворювачів електричної енергії у спеціальній літературі присвячено досить велику кількість публікацій. Тут, у першу чергу, слід зазначити статті та винаходи електрофізика Миколи Тесла, який вперше привернув увагу наукової громадськості до резонансних явищ у контурах з активно-реактивними елементами та їх практичному використанню в електроенергетиці [5].

Не зупиняючись на публікаціях, що хронологічно висвітлюють розвиток резонансної електротехніки, коротко прокоментуємо останні найбільш значущі розробки, виконані та опубліковані останнім часом, наприклад [6–13].

Так, авторами винаходу [6] представлений підсилювач магнітного потоку, виконаний у вигляді резонансного коливального контуру з паралельно з'єднаних ємності та котушки індуктивності з трансформаторним сердечником, на якому розміщено також приймач/перетворювач посиленого магнітного потоку. Як зазначено в описі, даний винахід повинен дати істотну економію електроенергії, що споживається.

Резонансний трансформатор, призначений для перетворення однієї системи змінного струму на іншу, запатентований авторами винаходу [7]. Пропонований трансформатор містить магнітопровід, первинна обмотка якого з'єднана паралельно з ємнісним накопичувачем енергії. Цей контур збуджується у режимі резонансу струмів. Вторинна обмотка симетрично досить віддалена від магнітопроводу і разом із первинною обмоткою розташована навколо одного стрижня. На думку авторів, основний очікуваний результат полягає у суттєвому посиленні вхідного гармонічного сигналу.

Винахід [8] – це резонансний підсилювач потужності, який містить вхідний трансформатор, кілька каскадів із силових трансформаторів, з'єднаних між собою за допомогою послідовних резонансних контурів, та пристрій зворотного зв'язку, що забезпечує односпрямований рух електричної енергії від вторинної обмотки останнього силового трансформатора до первинної обмотки трансформаторів. Як вказують автори, технічний результат полягає у збільшенні коефіцієнта посилення до значень $2\div 10$ та стабілізації його величини при зміні навантаження та робочої частоти струму.

Загальним недоліком перерахованих вище пропозицій є недостатнє обґрунтування їх практичної дієвості та відсутність переконливої практичної апробації.

Автором винаходу [9] було запатентовано резонансний підсилювач реактивної потужності, що містить два паралельні контури, включені послідовно в електричне коло джерела збудження. Технічним результатом, на думку автора, є суттєве посилення реактивної потужності гармонічного струму та напруги. Однак, тут слід зазначити неспроможність останнього твердження автора винаходу. Фізично, посилення може бути тому, що резонансні збільшення струмів і напруг у контурах врівноважуються при перетіканні надлишків енергії з контуру в контур. Прагнення рівноваги – це наслідок закону збереження енергії, що відповідає вимогам постійного зростання ентропії [14].

У статті [10] показано проведені експериментальні дослідження та представлено обґрунтування практичної дієвості резонансного підсилювача потужності, який складається з двох індуктивно пов'язаних послідовних активно-реактивних контурів, що збуджуються джерелом гармонічної напруги. Метою роботи [11] стало узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень принципової можливості резонансного посилення реактивної потужності гармонічних сигналів у запропонованій схемі. «Вихідним» елементом підсилювача є котушка індуктивності вторинного контуру, де порівняно з потужністю джерела теоретично та експериментально отримано посилення більш ніж у 35 разів. Істотним недоліком цитованих публікацій є «вихід» реактивної, а не активної енергії, яка може використовуватися практично.

Як впливає з важливих фізичних міркувань, перетворення реактивної на активну потужність можна здійснити або за допомогою електричного, або електромагнітного зв'язку з контуром навантаження. В обох випадках виникає проблема впливу струму в ланцюзі з навантаженням на процеси у «вихідному» контурі підсилювача, що має призвести до спотворення резонансних умов і, зрештою, порушення дієвості всієї схеми підсилювача в цілому.

Наприклад, як елементна база електромагнітного перетворювача енергії можуть служити застосовувані в індукторних системах

магнітно-імпульсної обробки металів біфілярні котушки різної геометрії [12,13]. Якщо їхні обмотки замкнуті на активне навантаження та відповідним чином розмістити щодо «вихідної» котушки індуктивності підсилювача реактивної потужності, то очікується, що електромагнітні процеси у біфілярі не впливатимуть на резонансні налаштування у контурах підсилювача. Його показники практичної ефективності будуть збережені.

Говорячи про інші способи перетворення реактивної потужності гармонічних струму і напруги, для кращого розуміння принципової дієвості цієї пропозиції двох контурну схему підсилювача робіт [10,11], можна спростити і зберегти лише один контур із зовнішнім джерелом напруги. До його ємності через додаткову індуктивність приєднується активне навантаження. У схему вводяться два окремих комутатора, за допомогою яких ємність може поперемінно заряджатися від зовнішнього джерела та розряджатися на навантаження. Таким чином, в цілому, отримана схема об'єднує два послідовні активно-реактивні контури із загальним ємнісним накопичувачем енергії, який за допомогою двох синхронно працюючих комутаторів під час заряду підключається до першого контуру і відключається від другого. При досягненні заданого рівня напруги ємнісний накопичувач відключається від першого контуру, підключається до другого та розряджається на активне навантаження. Цикл «заряд-розряд» повторюється періодично. По суті, перший (зарядний) контур у режимі резонансу напруг буде виконувати функції підсилювача реактивної потужності, а другий (розрядний) є реактивним перетворювачем в активну енергію струму і напруги.

Слід зазначити, що запропонована схема підсилювача вже активної (підкреслюємо – не реактивної) потужності принципово повторює схему магнітно-імпульсної обробки металів [12,13], де роль трансформаторного зарядно-випрямного блоку відіграє послідовний резонансний контур, а роль розрядного ланцюга з індуктором – послідовний резонансний контур з активним навантаженням.

Мета роботи

Метою роботи є розробка та обґрунтування дієздатності резонансного підсилювача активної електричної потужності періодичної послідовності струмових імпульсів, що складається з двох активно-реактивних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії, аналіз та чисельні оцінки діючих значень характеристик електромагнітних протікаючих процесів.

Виклад основного матеріалу

Електрична схема пропонованого резонансного підсилювача активної електричної потужності періодичних імпульсів струму, що складається з двох послідовних активно-реактивних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії C , представлена на рис. 1.

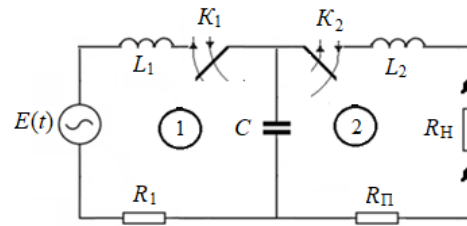


Рис. 1 – Принципова схема резонансного підсилювача активної електричної потужності періодичних імпульсів струму

Періодичність збудження струмових імпульсів у навантаженні забезпечується узгодженою роботою комутаторів – $K_{1,2}$ у контурах схеми із заданою частотою їх синхронного перемикання.

Контур 1 – це послідовний активно-реактивний контур з джерелом гармонічної напруги $E(t)$, індуктивністю L_1 , ємністю C та активним опором струмопроводів R_1 (включаючи обмотку котушки індуктивності L_1), де в режимі резонансу напруг із заданою частотою повторення ємність C заряджається до заданого рівня напруги U_0 . Фактично це контур посилення реактивної потужності гармонічного сигналу.

Контур 2 – це послідовний контур, у якому R_2 сумарний активний опір всіх його елементів (включаючи активний опір сполучних струмопроводів та обмотки індуктивності R_{II} , а також навантаження підсилювача R_N , так що $R_2=R_{II}+R_N$), індуктивністю L_2 та ємність.

У робочому режимі ємність C , що періодично заряджається, з тією ж частотою генерує періодичні імпульси струму в активному навантаженні R_N .

Початкові дані.

• Власні резонансні частоти послідовних першого та другого контурів відповідно:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C}} \quad \text{і} \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C}} .$$

• Величина добротності зарядного контуру 1 повинна бути достатньо великою, щоб забезпечити мінімальні енергетичні втрати та максимально можливу зарядну напругу ємності C , тобто

$$Q_1 = \frac{\omega_1 \cdot L_1}{R_1} \gg 1 .$$

• Схема збуджується гармонічною напругою $E(t)=E_m \sin(\omega_1 t)$ з частотою, яка дорівнює власній частоті першого послідовного контуру ω_1 , і амплітудою E_m (t – час).

• Для простоти і більшої ясності обґрунтування принципової дієвості запропонованої схеми підсилювача цілком достатньо вказати, що опір навантаження є набагато більший за опір інших елементів розрядного контуру, отже, $R_N \gg R_{II}$ і $R_2 \approx R_N$.

• Відповідно до принципу дії запропонованої схеми підсилювача активної електричної потужності теоретичний опис електромагнітних процесів, що протікають, допускає розгляд перехідних процесів окремо в кожному з його контурів.

Розрахункові співвідношення.

1. Зарядний контур 1.

Опускаючи тривіальні математичні перетворення, напишемо вирази характеристик електромагнітних процесів у аналізованому контурі [15,16]. Відповідно до прийнятої постановки задачі, отримуємо такі амплітудно-часові залежності [14]:

а) напруга на ємності,

$$U_C(t) \approx -E_m \cdot Q_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}(\omega_1 t)}\right) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \quad (1)$$

б) струм у контурі

$$J_1(t) \approx \frac{E_m}{R_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}(\omega_1 t)}\right) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad (2)$$

2. Розрядний контур 2.

У момент t_1 розмикання контуру заряду та замикання розрядного контуру напруга на ємнісному накопичувачі, як впливає з (1), визначатиметься як

$$U_C(t_1) = -E_m \cdot Q_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}(\omega_1 t_1)}\right) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t_1) \quad (3)$$

Припустимо, що коливальний розряд ємності в режимі резонансу напруг починається безпосередньо по закінченні її заряду. Струм в активному опорі навантаження при $\sqrt{\frac{L_2}{C}} \gg 0,5 \cdot R_2$ з врахуванням виразу (3) буде описуватися наступною експоненційно загасаючою гармонічною часовою залежністю [7,11]:

$$J_2(t) \approx \frac{E_m}{R_2} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1} \omega_1 t_1}\right) \times \cos(\omega_1 \cdot t_1) \cdot e^{-\frac{1}{2Q_2} \omega_2 (t-t_1)} \cdot \sin(\omega_2 \cdot (t-t_1)), t \geq t_1, \quad (4)$$

де t – поточний час, $\omega_2 \approx \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C}}$ і $Q_2 = \frac{\omega_2 \cdot L_2}{R_2} = \frac{1}{(\omega_2 \cdot C) \cdot R_2}$

– власна частота та добротність в уявленнях, що відповідають резонансу напруг у розрядному контурі.

Миттєва потужність сигналу (4) у опорі навантаження – протягом одного циклу «заряд-розряд» визначається відомим співвідношенням [7,12]:

$$P_2(t) = J_2^2(t) \cdot R_2 = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_1]; \\ \frac{E_m^2}{R_2} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}(\omega_1 t_1)}\right)^2 \cos^2(\omega_1 \cdot t_1) \times e^{-\frac{1}{Q_2} \omega_2 (t-t_1)} \sin^2(\omega_2 \cdot (t-t_1)), & t \in [t_1, t_2], \end{cases} \quad (5)$$

де t_2 – час закінчення розряду.

Для якісної ілюстрації та попередніх чисельних оцінок вираз для активної потужності в навантаженні (5) перепишемо з нормуванням на потужність сигналу в ємності в момент закінчення зарядного процесу, тобто до початкового моменту часу її розряду.

$$P_{C0}(t) = \frac{P_2(t)}{\frac{E_m^2}{R_2} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1}(\omega_1 t_1)}\right)^2 \cos^2(\omega_1 t_1)} = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_1], \\ e^{-\frac{1}{Q_2} \omega_2 (t-t_1)} \sin^2(\omega_2 (t-t_1)), & t \in [t_1, t_2] \end{cases} \quad (6)$$

Результати обчислень для $Q_2=10,0$ і $t_2=2t_1=10 \cdot \frac{2\pi}{\omega_1}$ в термінах фазової протяжності циклу «заряд розряд» $\varphi \in [0, 20\pi]$ представлені на рис. 2.

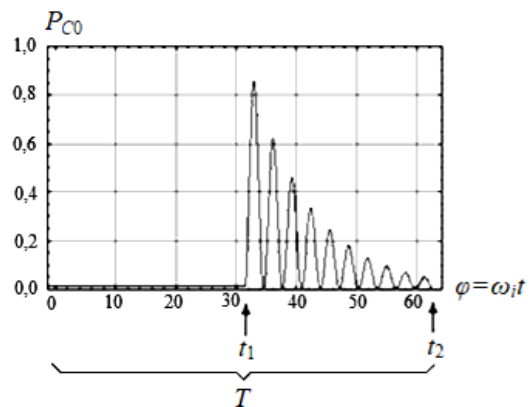


Рис. 2. – Фазова залежність відносної потужності в активному навантаженні підсилювача (нормування на потужність, запасену в ємнісному накопичувачі)

Попередні оцінки показують, що за відповідного вибору параметрів підсилювача справедливі наступні твердження:

- максимум активної енергії в навантаженні прагне величини енергії, запасеної в ємнісному накопичувачі;
- вихідна електрична потужність підсилювача в періодичному режимі повинна оцінюватися як її середня величина на періоді повторення, що дорівнює сумі часів заряду t_1 та розряду ємнісного накопичувача $T=t_1+\Delta t$, де $\Delta t=t_2-t_1$ (див. рис. 2);
- значення середньої електричної потужності в навантаженні повинно залежати від співвідношення часів заряду і розряду $\beta = \frac{\Delta t}{t_1}$, оскільки при заряді ємнісного накопичувача струм у навантаженні дорівнює нулю (див. рис. 2, $t < t_1$)

Спочатку знаходимо середнє значення відносної активної потужності (нормування на потужність,

запасену в ємності) протягом інтервалу з циклу «заряд-розряд». Після необхідних тотожних змін отримуємо відповідну залежність, зручну для чисельних оцінок.

$$\bar{P}_{C0} = \frac{Q_2}{2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \varphi_1 \right) \cdot (1 + \beta) \cdot \left(1 + \left(\frac{1}{2Q_2} \right)^2 \right)} \times \left(1 - e^{-\frac{1}{Q_2} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \cdot \varphi_1 \cdot \beta} \cdot (1 + G(\beta)) \right) \quad (7)$$

$$\text{де } \beta = \frac{\Delta t_2}{t_1}, \quad G(\beta) = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q_2} \right)^2}}{Q_2} \sin \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \varphi_1 \cdot \beta \right) \times \sin \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \varphi_1 \cdot \beta + \arctg(2Q_2) \right).$$

Коефіцієнт посилення активної потужності в періодичному режимі визначається відношенням середньої потужності на періоді повторення T до діючого значення вхідної потужності джерела гармонічної напруги $P_1 = \frac{E_m^2}{2 \cdot R_1}$.

З виразу (7) з урахуванням залежності (6) та величини діючого значення вхідної потужності можна знайти коефіцієнт посилення активної потужності гармонічного сигналу у періодичному режимі роботи запропонованої схеми підсилювача.

$$K = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot F_1 \cdot F_2, \quad (8)$$

$$\text{де } F_1 = \left(1 - e^{-\frac{1}{2Q_1} \cdot \varphi_1} \right)^2 \cdot \cos^2(\varphi_1),$$

$$F_2 = \frac{Q_2}{\varphi_1 \cdot (1 + \beta) \cdot \left(1 + \left(\frac{1}{2Q_2} \right)^2 \right)} \times \left(1 - e^{-\frac{1}{Q_2} \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \cdot \varphi_1 \cdot \beta} \cdot (1 + G(\beta)) \right),$$

$$G(\beta) = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q_2} \right)^2}}{Q_2} \sin \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot \varphi_1 \cdot \beta \right) \times \sin \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot \varphi_1 \cdot \beta + \arctg(2Q_2) \right)$$

Числові оцінки. Обчислення, що ілюструють важливу дієздатність запропонованого резонансного підсилювача активної потужності періодичних імпульсів струму, проведемо на прикладі моделі з розрядом ємності на навантаження через індуктивність з періодичним синхронним включенням-вимкненням комутаторів зарядного та розрядного контурів.

Параметри прийнятої моделі взято з аналогів у роботі [8].

Компоненти схеми.

1. Зарядний контур – 1, контур посилення реактивної потужності гармонічного сигналу в режимі резонансу напруги містить наступні елементи.

1.1. Генератор гармонічної напруги $E(t) = E_m \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$, $E_m \approx 1,0$ В – амплітуда, $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 = 25000$ Гц – робоча частота.

1.2. Індуктивність $L_1 = 172,8$ мкГн, ємність $C_1 = 0,234$ мкФ, власна частота $f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} \approx f_0 = 25000$ Гц.

1.3. Активний опір $R_1 = 0,46$ Ом, добротність $Q_1 = \frac{\omega_1 \cdot L_1}{R_1} \approx 59$.

2. Розрядний контур – 2, контур підключення активного навантаження представлений такими елементами.

2.1. Індуктивність $L_2 = 100L_1 = 17,28$ мГн, ємність $C_2 = C_1 = 0,234$ мкФ, власна частота контуру $f_2 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} \approx 2500$ Гц.

Примітка. Підвищення індуктивності та зниження частоти розрядного контуру призводить до зростання тривалості розрядного процесу, що у свою чергу дозволяє збільшити середню потужність струму в навантаженні на період повторення циклів "заряд-розряд".

2.2. Активний опір сполучних струмопроводів $R_{\Pi} = 0,46$ Ом, активний опір навантаження R_H і згідно з прийнятим припущенням у постановці задачі, сумарний активний опір контуру $R_2 \approx R_H = 10$ Ом, добротність $Q_2 = \frac{\omega_2 \cdot L_2}{R_2} \approx 27$.

Обчислення.

1. Зарядний контур 1, контур посилення реактивної потужності.

Для ілюстрації процесів, що протікають, достатньо обмежитися розрахунками напруг і струму протягом одного з зарядних циклів, що періодично повторюються.

1.1. Зарядна напруга.

Амплітудно-часова залежність зарядної напруги на ємнісному накопичувачі, розрахована за формулою (1), наведена на рис. 3.

Розрахункові криві на рис. 3 дозволяють орієнтуватися у величині зарядної напруги на ємності, яка може бути отримана залежно від часу заряду. Так, максимальна напруга, що встановлюється добротністю прийнятого зарядного контуру, вимагає заряду протягом $\sim 0,004$ с (рис. 3, б), що для прийнятої частоти ~ 25 кГц становить ~ 100 періодів напруги джерела. Однак, 50% максимуму напруги досягається вже за набагато менший час $\sim 0,05$ с, або ~ 12 періодів (майже на порядок нижче протяжності заряду до максимуму).

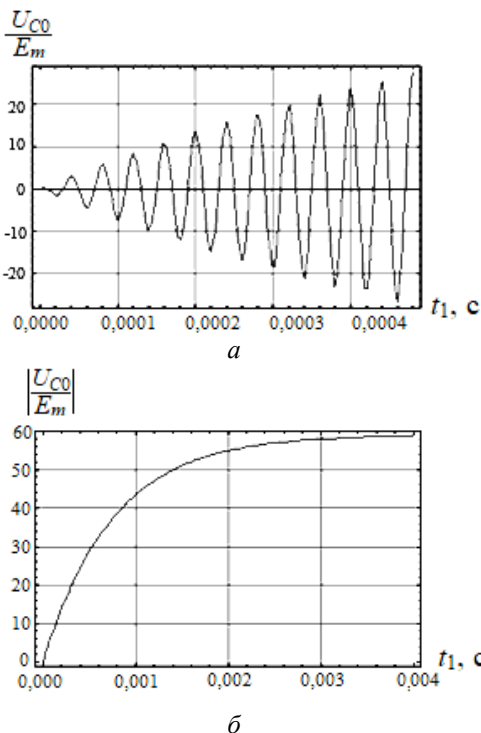


Рис. 3 – Амплітудно-часова залежність зарядної напруги на ємнісному накопичувачі: а – ілюстрація коливального характеру зарядного процесу; б – огинаюча максимумів зарядної напруги в часі

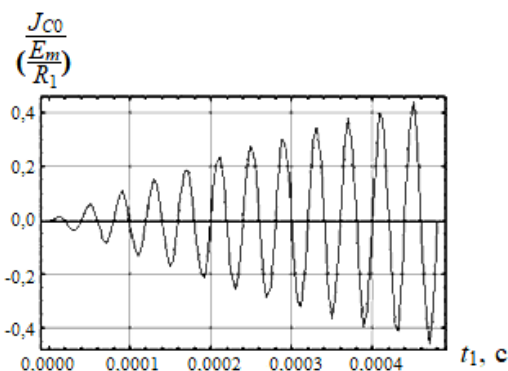


Рис. 4 – Типова амплітудно-часова залежність зарядного струму

1.2. Зарядний струм у ємнісному накопичувачі (формула (2)).

Підкреслимо, що залежності на рис. 3 та рис. 4 ілюструють процеси у кожному з зарядних циклів, що періодично повторюються, в запропонованому підсилювачі активної електричної потужності.

2. Розрядний контур 2, контур підключення до активного навантаження підсилювача.

Виходячи із попередніх розрахунків (рис. 3, б), приймаємо тривалість зарядного процесу $t_1=0,002$ с, протягом якого напруга на ємності сягає $U_{C0} \approx 54,7$ В. Як впливає з формули (8), коефіцієнт посилення активної потужності в навантаженні повинен мати максимум щодо параметра, рівного відношенню тривалостей розрядного і зарядного процесів.

Функціональна залежність коефіцієнта посилення середнього значення активної потужності від параметра β при фіксованій величині співвідношення індуктивностей $\frac{L_2}{L_1} = 100$ наведена на рис. 5 ($\beta = \frac{\Delta t}{t_1}$, Δt і t_1 – тривалість розряду та заряду, відповідно).

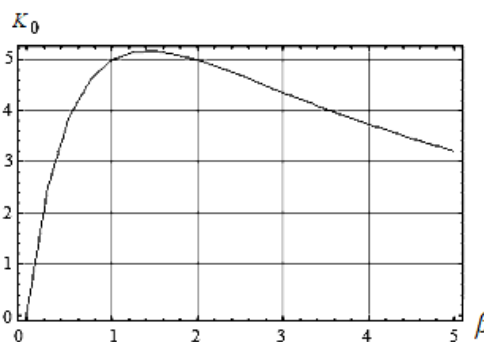


Рис. 5 – Функціональна залежність коефіцієнта посилення середнього значення активної потужності від параметра β

Результати обчислень показують, що при $\beta=1,4$ має місце максимальне посилення активної потужності, усередненої на періоді повторення розрядних імпульсів струму в навантаженні $K_{0\max} \approx 5,3$.

Далі, при фіксованій величині параметра β виконано розрахунок функціональної залежності коефіцієнта посилення K_0 від співвідношення індуктивностей $\frac{L_2}{L_1}$ розрядного і зарядного контурів. Результати відображені на графіку рис. 6.

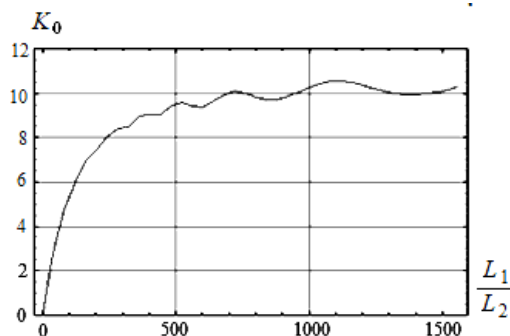


Рис. 6 – Функціональна залежність коефіцієнта посилення K_0 від співвідношення індуктивностей $\frac{L_2}{L_1}$

З кривої на рис. 6 випливає практично монотонне зростання коефіцієнта посилення щодо відношення $\frac{L_2}{L_1}$ до величини $K_0 \approx 10 \div 11$.

Узагальнюючи результати обчислень на рис. 5 та рис. 6, можна зробити висновок, що з відповідним вибором параметрів елементної бази принципово

можливе посилення більш ніж на порядок середньої величини активної потужності на періоді повторення розрядних імпульсів струму.

На закінчення цього розгляду на рис. 7 представлені графічні ілюстрації електромагнітних процесів, що протікають у періодичному режимі роботи запропонованого підсилювача активної електричної потужності відповідно до формули (6).

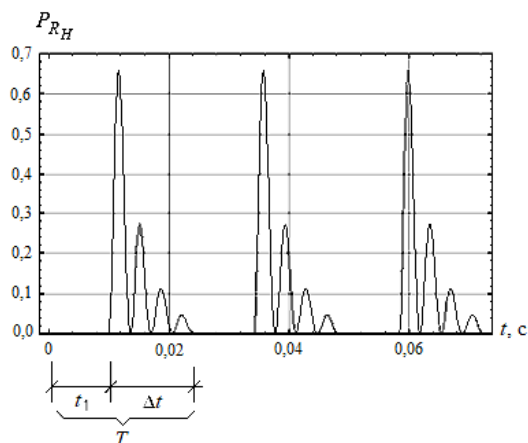


Рис. 7 – Розвиток у часі активної потужності у навантаженні

Висновки

Запропоновано схему резонансного підсилювача активної електричної потужності послідовності струмових імпульсів, що складається з двох активно-реактивних контурів із загальним ємнісним накопичувачем енергії, що періодично заряджається до заданого рівня напруги і розряджається на активне навантаження підсилювача.

Показано, що резонанс напруг дає можливість багаторазово збільшити зарядну напругу на ємності, а відповідний вибір параметрів розрядного контуру дозволяє отримати більш ніж на порядок посилення середньої активної потужності джерела гармонічної напруги.

За допомогою отриманих аналітичних залежностей та проведених обчислень обґрунтовано ефективну дієздатність запропонованого підсилювача активної електричної потужності послідовності періодичних імпульсів струму.

Список літератури

1. Ullmann B., Gasser T. Transformation: nanotechnology-challengers in transistor design and future technologies. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2017. № 7. P. 349–354.
2. Rashid M. H. *Power Electronics Handbook*, 2nd Edition. New York: Academic Press, 2007. 1192 p.
3. Huang Daocheng, Fu Dianbo, Lee Fred C, Kong Pengju, High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, No. 8. P. 3461–3470. doi: 10.1109/TIE.2010.2093474.

4. Feng W., Lee F. C. Optimal Trajectory Control of LLC Resonant Converter for LED PWM Dimming. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. No. 29 (2). P. 979–987. doi: 10.1109/TPEL.2013.2257864.
5. Tesla N. *My Inventions and Other Writing*. Dover Drift Edition. Dover Publication Inc., 2016. 144 p.
6. Гусев В. П., Богослов А. В., Крюковский В. Б., Усилитель магнитного потока и силовые электротехнические устройства на его основе. Патент RU № 2201001C2, 2003.
7. Степанов А. А., Хорьяков В. В., Горожанов М. А., Резонансный трансформатор. Патент RU № 2418333 С1, 2011.
8. Стребков Д. С., Каторгин Р. К., *Резонансный усилитель мощности*. Патент RU № 2517378, 2014.
9. Лиховид Ю. М. Резонансный підсилювач потужності. Патент України № 103215. 2015
10. Батигін Ю. В., Шиндерук С. О., Серіков Г. С., Єрьоміна О. Ф. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования. *Перспективні технології та прилади*. 2018. Вип. 13. С. 18–24.
11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Chaplygin E. A., Gavrilova T. V., Bepalov K. R. The resonant amplifier of the reactive electrical power. Suggestion, calculations, practical approbation. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2020. № 58. Vol. 2. P. 20–27.
12. Батигін Ю. В., Шиндерук С. О., Чаплигін Є. О., Єрьоміна О. Ф. Електромагнітні процеси в плоскій круговій системі з індуктором між тонкими котушками біфіляра. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 19–24.
13. Батигін Ю. В., Шиндерук С. О., Єрьоміна О. Ф., Чаплигін Є. О. Електромагнітні процеси в плоскій прямокутній системі з індуктором між тонкими котушками біфіляра. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 1. С. 3–9.
14. Benenson W., Harris J. W., Stocker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. New York: Springer. 1st ed. 2002. Corr. 2nd printing, 2006. 1248 p.
15. Thomson J. J. *Elements of the mathematical theory of electricity and magnetism*. Wentworth Press. 2016, 424 p.
16. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. New York: Springer, 2016. 526 p.

References(transliterated)

1. Ullmann B., Gasser T. Transformation: nanotechnology-challengers in transistor design and future technologies. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2017, no. 7, pp. 349–354.
2. Rashid M. H. *Power Electronics Handbook*, 2nd Edition. New York: Academic Press, 2007, 1192 p.
3. Huang Daocheng, Fu Dianbo, Lee Fred C, Kong Pengju, High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, Vol. 58, no. 8, pp. 3461–3470, doi: 10.1109/TIE.2010.2093474.
4. Feng W., Lee F. C. Optimal Trajectory Control of LLC Resonant Converter for LED PWM Dimming. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, no. 29 (2), pp. 979–987, doi: 10.1109/TPEL.2013.2257864.
5. Tesla N. *My Inventions and Other Writing*. Dover Drift Edition. Dover Publication Inc. 2016, 144 p.

6. Gusev P. G., Bogoslov A. V., Krukovsky V. B. Magnetic Flux Amplifier and power electrical devices based on it. Patent RU No 2201001C2.2003.
7. Stepanov A. A., Khorjakov V. V., Goroganov M. M. Resonance transformer. Patent RU No 2418333C1, 2011
8. Strebkov D. S., Katorgin R. K. Resonance power amplifier, Patent RU No 2517378.2014.
9. Likhovid Yu. M. The resonant power amplifier. Patent UA No 103215, 2015.
10. Batyhin Yu. V., Shynderuk S. O., Serikov G. S., Yeromina O. F. The resonant amplifier of the electrical power. Experimental studies. *Perspektivni tekhnologii ta priladi*, 2018, Vol. 13, pp. 18–24.
11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Chaplygin E. A., Gavrilova T. V., Bepalov K. R. The resonant amplifier of the reactive electrical power. Suggestion, calculations, practical approbation. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2020, no. 58, Vol. 2, pp. 20–27.
12. Batyhin Yu. V., Shynderuk S. O., Chaplyhin, Ye. O., Yeromina, O. F. Electromagnetic processes in a flat circular system with an inductor between thin bifilar coils. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2020, no 4, pp. 19–24.
13. Batyhin Yu. V., Shynderuk S. O., Yeromina O. F., Chaplygin Ye. O. Electromagnetic processes in a flat rectangular system with an inductor between thin bifilar coils. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021, no. 1, pp. 3–9.
14. Benenson W., Harris J. W., Stocker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. New York: Springer. 1st ed. 2002. Corr. 2nd printing, 2006, 1248 p.
15. Thomson J. J. *Elements of the mathematical theory of electricity and magnetism*. Wentworth Press, 2016, 424 p.
16. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. New York: Springer, 2016, 526 p.

Відомості про авторів(About authors)

Батигін Юрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: : yu.v.batygin@gmail.com.

Batygin Yuriy – Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Єрьоміна Олена Федорівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Yeryomina Olena – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Shinderuk Svitlana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Чапльгін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Chaplygin Evgeniy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Батигін Ю. В., Єрьоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Чапльгін Є. О. Резонансний підсилювач активної електричної потужності періодичних імпульсів струму. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 3-10. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.01.

Please cite this article as:

Batygin Yu., Yeryomina O., Shinderuk S., Chaplygin E. Resonance active electric power amplifier of periodic current pulses. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.01.

Надійшла (received) 29.08.2022