

УДК 621.314

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).16](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).16)

STUDY OF BEHAVIOR OF RESONANT-TYPE POWER CONVERTER WITH AUTOGENERATION DURING PHASE-RELAY-REGULATION

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З АВТОГЕНЕРАЦІЄЮ ПРИ ФАЗОВО-РЕЛЕЙНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

Gennadiy V. Pavlov

pavlov.gv.nuk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4937-1828

Andrii V. Obrubov

andrii.obrubov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9667-1703

Irina L. Vinnichenko

i.l.vinnychenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3768-1060

Г. В. Павлов,

докт. техн. наук, професор

А. В. Обрубов,

докт. техн. наук, доцент

І. Л. Вінниченко,

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. Purpose. The purpose of the work is to theoretically determine the dependences of the operating frequency of a resonant power converter with self-generated oscillations and with a phase-relay control method on the circuit parameters and to experimentally study its behavior when changing the parameters of the resonant circuit and the frequency of the phase-shifting feedback filter.

The article presents the results of theoretical and experimental research on a simulation model of electromagnetic processes in a resonant converter with self-generated oscillations in order to determine the permissible limits of the regulating values and optimize the switching conditions of power switches. The results of the research will be useful in the design of converter systems in which the phenomenon of electrical resonance is used and the parameters of resonant circuits or loads are unstable. In the process of self-generated oscillations, the operating frequency can naturally be auto-adjusted to the changing parameters of the resonant circuit. In particular, in ship electrical equipment, promising areas of application of resonant converters with self-generated oscillations are contactless battery charging systems with inductive coupling and demagnetization systems.

Methods. The research used methods of differential and integral calculus, numerical methods for calculating analytical dependencies, methods for simulating processes in schemes of resonant power converters.

Results. The results of research on electromagnetic processes in series resonant converters with self-generation are presented in the form of analytical conditions for self-generation of oscillations and analytical dependences of the operating frequency on the parameters of the circuit and the phase-shifting filter in the positive feedback channel, in particular, this article considers the feedback on the voltage on the resonant capacitance of the converter circuit.

Scientific novelty. The scientific novelty of the research is the first analytical and experimental dependences of the operating frequency of a resonant converter with self-generation on the parameters of the phase-shifting filter, which makes it possible to determine the limits of phase and relay regulation.

Practical significance. The practical significance of the obtained results lies in the construction of simulation models of resonant converters with self-generation based on theoretical calculations and the determination of their behavior under small or large influences from the power supply and from the control sides. This made it possible to find out whether the optimal switching conditions of power switches are violated in the simulated operating modes of resonant converters.

Key words: autogeneration; operating frequency; phase-shift filter; positive feedback; resonant power converter.

Анотація. Мета. Метою роботи є теоретичне визначення залежностей робочої частоти резонансного перетворювача електроенергії з автогенерацією коливань і з фазово-релейним способом регулювання від параметрів схеми та експериментальне дослідження його поведінки при зміні параметрів резонансного контуру та частоти фазозсувного фільтру зворотного зв'язку.

Стаття представляє результати теоретичного та експериментального дослідження на імітаційній моделі електромагнітних процесів в резонансному перетворювачі з автогенерацією коливань з метою визначення припустимих

меж регулюючих величин та оптимізації умов комутації силових ключів. Результати досліджень будуть корисними при проектуванні перетворювальних систем, в яких використовується явище електричного резонансу і параметри резонансних контурів або навантаження є нестабільними. В процесі автогенерації коливань робоча частота природним чином може автопідстроюватися під змінні параметри резонансного контуру. Зокрема в судновому електрообладнанні перспективними напрямками застосування резонансних перетворювачів з автогенерацією є системи безконтактного заряджання акумуляторів з індуктивним зв'язком і системи розмагнічування.

Методика. В дослідженнях використано методи диференціального та інтегрального обчислення, чисельні методи розрахунку аналітичних залежностей, методи імітаційного моделювання процесів у схемах резонансних перетворювачів електроенергії.

Результати досліджень електромагнітних процесів у послідовних резонансних перетворювачах з автогенерацією представлено у вигляді аналітичних умов автогенерації коливань та аналітичних залежностей робочої частоти від параметрів контуру та фазозсуваючого фільтру в каналі позитивного зворотного зв'язку, зокрема в даній статті розглядається зворотний зв'язок по напрузі на резонансній ємності контуру перетворювача.

Наукова новизна. Вперше отримано аналітичні та експериментальні залежності робочої частоти резонансного перетворювача з автогенерацією від параметрів фазозсуваючого фільтру, що дає змогу визначити межі фазового та релейного регулювання.

Практична значимість. Полягає в побудові на основі теоретичних розрахунків імітаційних моделей резонансних перетворювачів з автогенерацією і визначенні їхньої поведінки при малих або великих впливах зі сторони живлення та зі сторони керування. Це дало можливість з'ясувати, чи порушуються оптимальні умови комутації силових ключів в модельованих режимах роботи резонансних перетворювачів.

Ключові слова: автогенерація; позитивний зворотний зв'язок; резонансний перетворювач електроенергії; робоча частота; фазозсувний фільтр.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Резонансні перетворювачі електроенергії (РПЕ) широко застосовуються в промисловості, зокрема у високовольтних плазмових, зварювальних та термо-індуктивних установках [1, 2, 5, 6]. На судах перспективним напрямом використання РПЕ є системи розмагнічування корпусів суден та безконтактні індуктивні зарядні пристрої тягових акумуляторних батарей [3, 4, 12]. Явище резонансу сприяє так званому «м'якому» перемикаю силових ключів, коли комутаційні викиди струмів і напруг а також втрати енергії в силових ключах РПЕ зменшені в порівнянні з нерезонансними перетворювачами. Існують різні типи РПЕ за силовими схемами та за принципом роботи [5, 8, 9], серед яких виділяються високочастотні перетворювачі з автогенерацією коливань [10, 11]. На початку роботи перетворювача з автогенерацією коливань під дією схеми запуску вимушено виникають коливання в силовій схемі. Далі коливання автономно підтримуються позитивним зворотнім зв'язком (ПЗЗ) і резонансний контур виконує роль частотнозадавального елементу. Перевагою РПЕ з автогенерацією коливань і фазовим регулюванням є ефект самоналаштування на резонансну частоту силового контуру при нестабільності його параметрів і параметрів навантаження. Оскільки зазвичай резонансні схеми є більш складними і дорогішими в порівнянні з нерезонансними широтно-імпульсними схемами перетворювачів, при проектуванні систем живлення за результатами досліджень процесів та характеристик перетворювачів електроенергії обґрунтовано приймається рішення про застосування РПЕ або перетворювача іншого типу. Таким чином,

дослідження процесів РПЕ, зокрема РПЕ з автогенерацією коливань, є актуальною науковою задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розповсюджені в техніці РПЕ з незалежною генерацією коливань [5–8] забезпечують стабільність робочої частоти при незмінних керуючих сигналах. У роботах [5, 6] описано РПЕ з пакетним режимом управління – релейним регулюванням, при якому можливе регулювання вихідних величин зі збереженням постійної робочої частоти та оптимальних умов комутації силових транзисторів. Релейне регулювання спричиняє пульсації вихідного струму з кратно нижчими частотами порівняно з робочою частотою і використовується для термообробки або для живлення малодинамічних електроприводів. Частотне регулювання в РПЕ дає можливість регулювати вихідні величини без кратного зниження частоти пульсацій. Характерним прикладом системи управління LLC-резонансного перетворювача з незалежним генератором коливань і частотним регулюванням є мікросхема UCC25600 [7]. Значення робочої частоти РПЕ з подібною системою управління повинні знаходитися відносно резонансних частот не ближче певних запасів по частоті. При суттєво нестабільних параметрах резонансного контуру і при вищезазначених способах регулювання нормальні режими роботи РПЕ можуть порушуватися. Для запобігання цьому корисно реалізувати автоналаштування робочої частоти на параметри резонансного контуру, що природньо реалізується в РПЕ з автогенерацією коливань та фазовим регулюванням [15]. Оскільки

фазове регулювання впливає на робочу частоту, воно за регульовальною характеристикою є подібним до частотного регулювання. Для розширення діапазону регулювання вихідних величин до нуля фазовий або частотний спосіб регулювання доцільно доповнити релейним способом регулювання. Тоді робоча частота обмежується максимальним значенням, при якому вихідний струм резонансного перетворювача знижується до 30–50 % від максимального 100%-значення при робочій частоті, наближеній до резонансної частоти. Подальше зниження поточного середнього значення вихідного струму майже до нуля здійснюється релейним способом – періодичним вмиканням і вимиканням коливань в резонансному контурі. Подібний підхід використаний у [7], де для регулювання потужності двонаправленого РПЕ використовується частотне регулювання, поєднане з перемиканням топології схеми інвертора. Однак ускладнення силової схеми та системи управління не завжди прийнятне з міркувань надійності перетворювача, тому доцільно шукати комбінацію способів регулювання.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Комутаційні умови є важливим аспектом роботи РПЕ. При певних співвідношеннях робочої частоти та резонансної частоти контуру можливо досягти умов м'якої комутації силових ключів з низькими втратами потужності та зростання амплітуди коливань у результаті резонансних явищ у контурі, як це показано у роботах [12, 13]. У [12] м'яка комутація має місце при постійній робочій частоті і змінній кількості імпульсів, а у [13] показано досягнення м'якої комутації з використанням комутаційних ключів. В обох випадках робоча частота залежить від параметрів резонансного контуру. Коли змінюється будь-який параметр контуру, відповідно повинна підлаштуватися і робоча частота. Все це дозволяє стверджувати, що дослідження поведінки РПЕ з автогенерацією та з фазово-релейним регулюванням є необхідним для проєктування судових систем заряджання та розмагнічування, де параметри контуру і навантаження можуть бути нестабільними.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є: теоретичне визначення залежностей робочої частоти РПЕ від параметрів контуру і ланцюгів ПЗЗ, характерних для автогенераторного режиму роботи; експериментальне дослідження поведінки РПЕ з фазово-релейним способом регулювання при зміні частоти фазозсувного фільтру (ФЗФ) та при зміні параметрів контуру.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні використано методи диференціального та інтегрального обчислення, чисельні методи розрахунку аналітичних залежностей, методи імітаційного моделювання процесів у схемах РПЕ.

Об'єкт дослідження – резонансні перетворювачі електроенергії послідовного та послідовно-паралельного типу (*LLC*) з інвертором напруги класу D, діодним випрямлячем і *RC*-навантаженням.

Предмет дослідження – статичні залежності робочої частоти в режимі автогенерації та перехідні процеси при фазово-частотному регулюванні.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Способи генерації коливань у резонансних перетворювачах. Існуючі способи генерації коливань в РПЕ можна класифікувати як: незалежний (рис. 1, а); автогенераторний (рис. 1, б); змішаний (рис. 1, в) та синхронний (рис. 1, г) [15]. На рис. 1, а–г позначено наступне: ЗГ – задавальний генератор; ІН – інвертор напруги; РК – резонансний контур; ВН – випрямляч із навантаженням; ДА – датчик амплітуди коливань у контурі (пунктиром позначено сигнали тимчасової дії); К – комутатор сигналів.

Перетворювачі з незалежним генеруванням коливань [14] (рис. 1, а) містять автономний задавальний генератор ЗГ, в якому можна задавати робочу частоту і ширину імпульсів. При регулюванні робочої частоти необхідно, враховуючі специфічні регульовальні характеристики, дотримуватися належних умов комутації ключів [12, 13, 18].

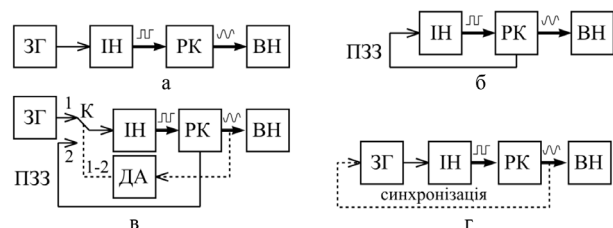


Рис. 1. Структури резонансних перетворювачів з різними способами генерації коливань

В перетворювачах з виключно автогенерацією коливань [10, 11] (рис. 1, б) весь час роботи діє ПЗЗ за коливальною величиною резонансного контуру, наприклад, за струмом або напругою резонансної ємності. Частота коливань зазвичай змінюється зі змінами параметрів контуру. Але автогенераторні схеми більшою мірою застосовні при стабільному навантаженні або при малих його змінах. Причина цього обмеження – можливий зрив автогенерації при зниженні амплітуди коливань нижче за поріг чутливості ПЗЗ і провал напруги на виході.

Змішана генерація коливань (незалежний запуск з виникненням автогенерації на рис. 1, в) дозволяє уникнути можливого зриву автогенерації коливань при скиданні струму навантаження перетворювача або при короткому замиканні виходу. Коливання в контурі запускаються задавальним генератором ЗГ з постійними параметрами сигналу. При зростанні амплітуди коливань до рівня, що реєструється

датчиком-амплітуди ДА, комутатор К перемикається з входу 1 на вхід 2 і починає діяти автогенерація з ПЗЗ, як, наприклад, в [11], де автогенерація запускається за допомогою тиристора.

Синхронна генерація коливань (рис. 1, з) реалізується задавальним генератором ЗГ, який після встановлення номінального режиму роботи перетворювача синхронізується з вільними коливаннями контуру, що є подібним до автогенераторного режиму. Частота коливань стає пов'язаною з параметрами резонансного контуру і умови комутації можуть дотримуватися автоматично при нестабільних параметрах резонансного контуру.

Таким чином, в РПЕ з автогенерацією коливань доцільно використовувати системи управління змішаного генерування та системи із синхронізацією, що дозволяють зберегти самоналаштування інвертора на нестабільні параметри контуру.

Способи реалізації позитивного зворотного зв'язку. Функціональна схема резонансного перетворювача з трьома варіантами ПЗЗ на рис. 2 містить наступні елементи: ІН – інвертор напруги класу D; В – випрямляч; ДС, ДН – датчики струму і напруги; К – комутатор сигналу; РЕ – релейний елемент; РВВ – регулятор вихідних величин; АВ – аналоговий вихід; РВ – релейний вихід.

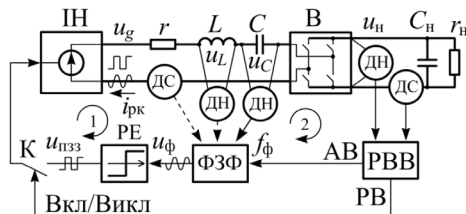


Рис. 2. Функціональна схема резонансного перетворювача з автогенерацією

Перетворювач на рис. 2 має контур ПЗЗ номер 1 за коливаннями струму або напруг і контур негативного зворотного зв'язку номер 2 за вихідною напругою то струмом. Для запуску та автогенерації коливань в ПЗЗ сигнал одного з датчиків (ДС або ДН) подається на ФЗФ, тип якого залежить від задіяного датчика: фільтр високих частот при сигналі від датчика струму ДС резонансного контуру $i_{рк}$; фільтр низьких частот при сигналі від датчика напруги ДН на резонансній індуктивності u_L або смуговий фільтр при сигналі від датчика напруги ДН на резонансній ємності u_C . Тепловий шум датчиків та ФЗФ викликає початкові малі коливання, достатні для перемикання РЕ. Завдяки ПЗЗ коливання посилюються і наростають до стаціонарної величини. Частота автогенерації f_g відрізняється від резонансної частоти контуру $f_0 = (L \cdot C)^{-0.5}/(2 \cdot \pi)$, оскільки ФЗФ створює регульований фазовий зсув сигналів. Фазове регулювання здійснюється шляхом регулювання частоти налаштування ФЗФ f_ϕ від аналогового виходу АВ регулятора вихідних величин

РВВ, що призводить до зміни частоти автогенерації f_g . З виходу ФЗФ сигнал надходять на релейний елемент РЕ, який перетворює сигнали з формою близькою до синусоїди в прямокутний сигнал ПЗЗ $u_{пзз}$, що управляє станами ключів інвертору напруги ІН. Автоматичне регулювання вихідних величин здійснюється за зворотним зв'язком по вихідному струму, якщо він більший за задане значення струму, або за зворотним зв'язком по вихідній напрузі, якщо напруга більша за задану напругу, за допомогою регулятора вихідних величин РВВ з двома виходами АВ і РВ. Аналоговий вихід АВ призначений для керування частотою ФЗФ при вихідному струмі в межах 50–100 % від максимального, а релейний вихід РВ – для керування роботою інвертору напруги ІН через комутатор К при вихідному струмі 0–50 % від максимального. Коли комутатор К включений, прямокутна напруга u_g на виході інвертору по частоті і фазі відповідає напрузі $u_{пзз}$. При виключеному комутаторі К напруга на виході інвертору близька до нуля.

Визначення умов автогенерації та залежностей частоти автогенерації. Умови автогенерації коливань у контурах РПЕ створюються за допомогою ПЗЗ і формально можуть бути визначені як умови нестійкості замкнутої системи з ПЗЗ. Для лінеаризованих динамічних систем використовуються алгебраїчні критерії стійкості (наприклад, Рауса-Гурвіца [17]), виходячи з яких, в даному випадку необхідно забезпечити нестійкість системи перетворювача ПОС. Відповідно до критеріїв Рауса-Гурвіца [17] для нестійкості системи та виникнення автогенерації достатньо мати хоча б один негативний коефіцієнт характеристичного рівняння.

При запуску коливань початкова амплітуда є настільки малою, що можна розглядати контур ПЗЗ як лінійний. Тоді релейний елемент РЕ та інвертор ІН замінюються лінійними передавальними ланками з деякими коефіцієнтами посилення, загальний коефіцієнт яких позначимо як $K_{пзз}$. Загальний вираз передавальної функції розімкнутої системи РПЕ можна записати як добуток

$$H_{пзз}(s) = H_{рк}(s) \cdot H_\phi(s) \cdot K_{пзз}, \quad (1)$$

де: $H_{рк}(s)$ – передавальна функція резонансного контуру; $H_\phi(s)$ – передавальна функція ФЗФ; $K_{пзз}$ – загальний коефіцієнт посилення лінійних безінерційних ланок ПЗЗ. (Тут і далі $s = j \cdot \omega + \sigma$ – оператор Лапласа).

Характеристичне рівняння замкнутої петлі ПЗЗ матиме вигляд

$$1 - H_{пзз}(s) = 0. \quad (2)$$

Для схеми на рис. 2 з ПЗЗ за напругою ємності та зі смуговим ФЗФ маємо наступну передавальну функцію резонансного контуру

$$H_{рк}(s) = u_C(s)/u_g(s) = H_{рк}(s)/(s \cdot C) \quad (3)$$

де: $H_{pk}(s) = i_{pk}(s)/u_g(s) = [s/(\omega_0 \cdot \rho)]/[s^2/\omega_0^2 + s/(Q \cdot \omega_0) + 1]$; $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ – резонансна частота контуру, $\rho = (L/C)^{0.5}$ – хвильовий опір; $Q = \rho/r$ – добротність контуру; r, L, C – активний опір, індуктивність та ємність контуру. Передавальна функція ФЗФ $H_\phi(s) = \tau_1 \cdot s/[(\tau_1 \cdot s + 1)(\tau_2 \cdot s + 1)]$, де $\tau_1 = 1/(2 \cdot \pi \cdot f_{\phi 1})$ та $\tau_2 = 1/(2 \cdot \pi \cdot f_{\phi 2})$ – постійні часу та частоти налаштування $f_{\phi 1}$ і $f_{\phi 2}$ ланок смугового ФЗФ.

Характеристичне рівняння замкнутої по ПЗЗ системи РПЕ має вигляд

$$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\omega_0^2} \cdot s^4 + \left[\left(\frac{\tau_1}{Q \cdot \omega_0} + \frac{1}{\omega_0^2} \right) \tau_2 + \frac{\tau_1}{\omega_0^2} \right] s^3 + \left[\left(\tau_1 + \frac{1}{Q \cdot \omega_0} \right) \tau_2 + \frac{\tau_1}{Q \cdot \omega_0} + \frac{1}{\omega_0^2} \right] s^2 + \left[\tau_1 + \tau_2 + \frac{1}{Q \cdot \omega_0} - K_{пзз} \cdot \tau_1 \right] s + 1 = 0.$$

Умова автогенерації коливань $\tau_1 + \tau_2 + 1/(Q \cdot \omega_0) - K_{пзз} \cdot \tau_1 < 0$, звідки знаходимо вираз для необхідного коефіцієнта посилення в петлі ПЗЗ

$$K_{пзз} > r \cdot C/\tau_1 + \tau_2/\tau_1 + 1 \quad (4)$$

Надалі можна припустити, що частоти налаштування ФЗФ рівні одна одній $f_{\phi 1} = f_{\phi 2} = f_\phi$, тоді умова (4) матиме вигляд $K_{пзз} > 2(\pi \cdot f_\phi \cdot r \cdot + 1)$.

Коефіцієнт $K_{пзз}$ прагне до нескінченності при зменшенні до нуля порогів чутливості релейного елементу, тому умови автогенерації в контурі ПЗЗ РПЕ виконуватимуться. Далі слід визначити частоту автогенерації ω_g і її залежності від параметрів ФЗФ. Для цього розглянемо умови автогенерації з погляду фазового балансу та амплітудного критеріїв нестійкості системи:

$$\sum \varphi(j \cdot \omega_g) = 0, \quad |H_{pes}(j \cdot \omega_g)| \geq 1. \quad (5)$$

З першого рівняння балансу (5) можна знайти частоту автогенерації ω_g . Для ПЗЗ за напругою ємності та зі смуговим ФЗФ на рис. 2, рівняння балансу фаз запишеться так $\pi/2 + \varphi_\phi + \varphi_{pk} = 0$, де кут $\pi/2$ враховує випередження по фазі інверсованої (зміщеної на 180°) напруги на ємності відносно струму контуру; $\varphi_\phi = \arctg[(1 - t_1 \cdot t_2 \cdot \omega_g^2)/(w_g \cdot (t_1 + t_2))]$ – фазовий зсув ФЗФ, φ_{pk} – фазовий зсув між напругою інвертора u_g і струмом контуру i_{pk} . Після підстановок з урахуванням співвідношення $\pi/2 + \arctg(a/b) = -\arctg(b/a)$ отримаємо вираз для частоти автогенерації

$$\omega_g = \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot Q}} \sqrt{\frac{2 \cdot \tau \cdot \omega_0 + Q \cdot \omega_0^2 \cdot \tau^2 + Q + \sqrt{(2 \cdot \tau \cdot \omega_0)^2 + 4 \cdot \tau^3 \cdot \omega_0 \cdot Q + 4 \cdot \tau \cdot \omega_0 \cdot Q + \tau^4 \cdot \omega_0^4 \cdot Q^2} - 2 \cdot (\tau \cdot \omega_0 \cdot Q)^2 + Q^2}{2 \cdot (\tau \cdot \omega_0 \cdot Q)^2 + Q^2}}, \quad (6)$$

де $\tau = 1/(2 \cdot \pi \cdot f_\phi)$ – частота налаштування ФЗФ для $\tau_1 = \tau_2$. Вирази частоти автогенерації для різних типів ПЗЗ і постійних часу τ_1 і τ_2 теж отримано, але не наводиться через громіздкість. Постійні часу ФЗФ можна виразити через коефіцієнт ширини смуги k_{usc} : $\tau_1 = \tau_\phi \cdot (k_{usc})^{0.5}$ і $\tau_2 = \tau_\phi / (k_{usc})^{0.5}$, де $k_{usc} \geq 1$.

Залежності відносної частоти автогенерації f_g^* від відносної частоти налаштувань ФЗФ f_ϕ^* на рис. 3 були розраховані чисельними методами для інвертору РПЕ, навантаженого на послідовний резонансний контур з хвильовим опором $\rho = 1$ і добротністю $Q = 2$.

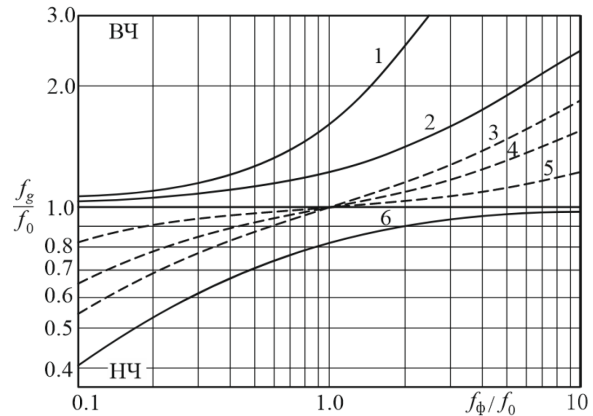


Рис. 3. Залежності відносної частоти автогенерації f_g^* від відносної частоти налаштувань ФЗФ f_ϕ^* (відносно резонансної частоти контуру f_0)

На рис. 3 позначено наступні графіки: 1 – для ПЗЗ по напрузі на ємності зі смуговим фільтром; 2 – для ПЗЗ по струму контуру з фільтром високих частот і для ПЗЗ по напрузі індуктивності з фільтром низьких частот; 3, 4, 5 – для ПЗЗ по струму контуру зі смуговим фільтром при різних коефіцієнтах ширини смуги $k_{usc} = 1, 10, 100$ відповідно; 6 – для ПЗЗ по струму контуру з фільтром низьких частот; НЧ та ВЧ – низькочастотний та високочастотний діапазони робочої частоти відносно резонансної частоти контуру.

Як видно із залежності 1 на рис. 3, частота автогенерації при ПЗЗ по напрузі на ємності і смуговому ФЗФ підтримується завжди вище резонансної частоти контуру $\omega_g > \omega_0$, що сприяє оптимальній комутації силових транзисторних ключів інвертору РПЕ.

Результати експериментів імітаційного моделювання. Для перевірки точності отриманих залежностей було проведено експерименти імітаційного моделювання моделлю РПЕ на рис. 4, яка відповідає схемі РПЕ з ПЗЗ за напругою на ємності на рис. 2 і смуговим ФЗФ з елементами R_ϕ і C_ϕ . Умови проведення експериментів вказано нижче. Параметри резонансного контуру: резонансна частота $f_0 \approx 10\,000$ Гц; добротність контуру $Q = 2$ для $r = 0.795$ Ом та $Q = 10$ для $r = 0.159$ Ом; частота вільних коливань (демпфована частота) становить $f_1 \approx 9688$ Гц для $Q = 2$ та

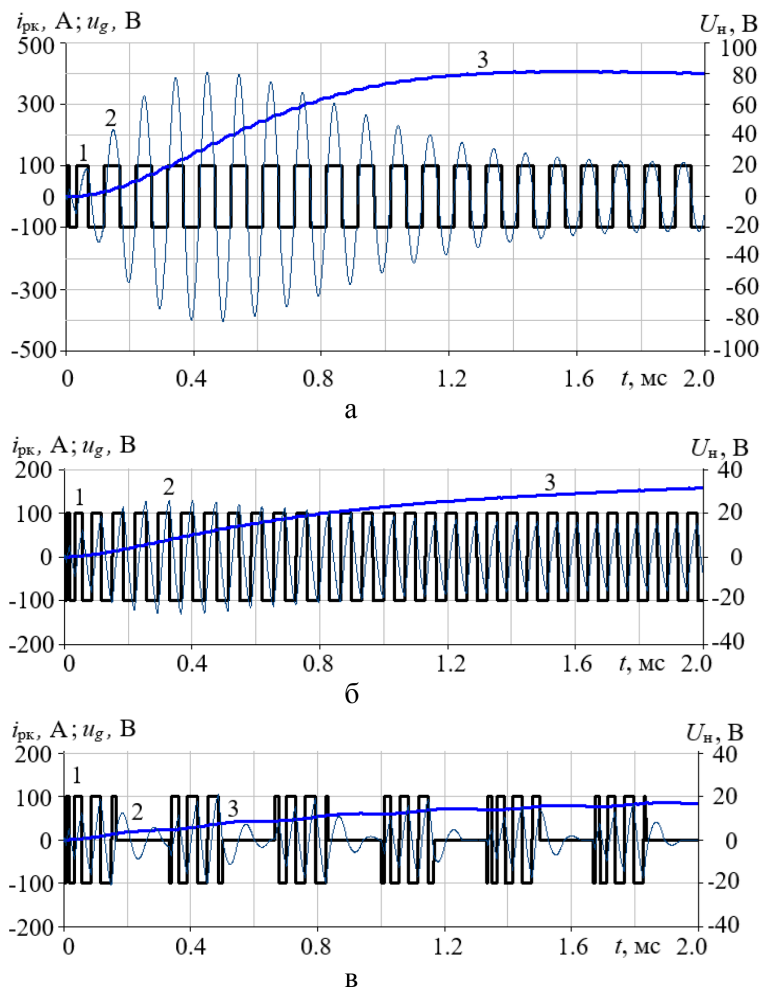


Рис. 5. Графіки вихідної напруги інвертора РПЕ u_g (графіки 1), струму контуру $i_{рк}$ (графіки 2) і вихідної напруги U_n (графіки 3)

відношенню до вихідної напруги ІН, що сприяє зменшенню комутаційних втрат потужності в силових транзисторах [19–21]. Для тиристорного інвертора зі зворотними паралельними діодами можна рекомендувати ПЗЗ по струму контуру з фільтром низьких частот (графік 6 на рис. 3), коли робоча частота завжди менша за резонансну частоту і струм контуру випереджатиме по фазі вихідну напругу ІН, що сприятиме природньому закриванню тиристорів при зворотному струмі [22].

Далі розглянемо часові діаграми на рис. 5. При низькій частоті настройки ФЗФ вихідний струм і напруга РПЕ є максимальними. Перехідний процес запуску РПЕ матиме тим більший викид амплітуди коливальних струму контуру (рис. 5, а), чим більша добротність контуру. При підвищенні частоти настройки ФЗФ знижуються вихідні величини і знижується викид амплітуди струму контуру в перехідному процесі (рис. 5, б) в абсолютному значенні і відносно до сталої амплітуди. При введенні релейного регулювання на рис. 5. в спостерігаються періодичні перехідні процеси, які при розширенні проміжків

генерування можуть накладатися один на одного. Тому можна передбачити, що залежність поточних середніх значень вихідних величин РПЕ при релейному регулюванні не є лінійною, як в нерезонансних широтно-імпульсних перетворювачах. Ця особливість проявляється тим сильніше, чим більша частота

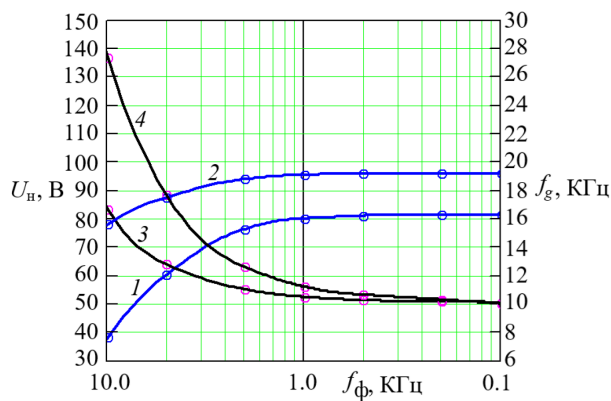


Рис. 6. Експериментальні залежності вихідної напруги U_n і частоти автогенерації f_g від частоти налаштування ФЗФ f_ϕ для $Q = 10$

маніпуляцій вихідною напругою ІН. Але при зниженні частоти маніпуляцій очікувано зростуть пульсації вихідних величин з цією частотою. Тому регулювальні характеристики РПЕ для релейного регулювання потребують додаткового дослідження.

Експериментальні залежності частоти автогенерації на рис. 6 (графік 4) відповідають теоретичним характеристикам на рис. 3 (графік 1), а залежності вихідної напруги на рис. 6 (наприклад, графік 1) відповідають перехідним процесам (наприклад, графіки 3 на рис. 5), що свідчить про адекватність теоретичних розрахунків та імітаційної моделі РПЕ.

ВИСНОВКИ

1. З розглянутих способів генерації коливань в РПЕ з фазово-релейним регулюванням доцільно використовувати змішаний та синхронний способи генерації коливань. Це дозволить скоротити періодичні перехідні процеси запуску при релейному регулюванні вихідних величин з високою шпаруватістю.

2. Для транзисторного інвертора доцільно використовувати ПЗЗ по напрузі на резонансній ємності зі смуговим фільтром, а для тиристорного інвертора – ПЗЗ по струму контуру з фільтром низьких частот.

3. Регулювання вихідних величин фазовим способом доцільно здійснювати в діапазоні 50-100% від максимумів, відповідно обираючи максимальну частоту налаштування ФЗФ на порядок більшу за номінальне значення, при якому вихідні величини не менші 95 % від максимальних. Релейне регулювання доцільне в діапазоні нижче 50 % максимальних значень при максимальній частоті налаштування ФЗФ.

В подальшому доцільно дослідити поведінку РПЕ не тільки при фазово-релейному регулюванні і стабільних параметрах елементів, а і при повільній і при швидкій зміні параметрів резонансних контурів. Також слід порівняти особливості поведінки РПЕ при: частотно-релейному регулюванні; фазово-релейному регулюванні; параметричному регулюванні. Окремий інтерес в розвитку досліджень представляє синтез регуляторів з суміщенням, зокрема фазово-релейним регулюванням вихідних величин.

Роботу виконано в рамках державної бюджетної НДР: «Розробка енергоефективних засобів генерації та перетворення електроенергії для систем розмагнічування малих кораблів»

REFERENCES

- [1] Pollock, H., & Flower, J. O. (1996). Series-parallel load-resonant converter for controlled-current arc welding power supply. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 143(3), 211–218. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19960257>
- [2] Wang, Zhenmin & Fan, Wenyan & Xie, Fangxiang & Ye, Chunxian. (2019). An 8kW LLC resonant converter in plasma power supply based on SiC power devices for efficiency improvement. Circuit World. ahead-of-print. 10.1108/CW-07-2018-0058
- [3] Abou Houran, M., Yang, X., & Chen, W. (2018). Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics. Electronics, 7(11), 296. <https://doi.org/10.3390/electronics7110296>
- [4] Huang, C., Liu, S., Li, Z., Liu, Z. (2022). Improved Degaussing Power Supply Applied to Ship Degaussing System. In: Yang, Q., Liang, X., Li, Y., He, J. (eds) The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 889. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1528-4_112
- [5] Yeon, J. -E., Cho, K. -M., & Kim, H.-J. (2015). A 3.6kW single-ended resonant inverter for induction heating applications. Proc. of 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 1-7, doi: 10.1109/EPE.2015.7309110
- [6] Kumar, A., Sadhu, P. K., Raman, R., & Singh, J. (2018). Design analysis of full-bridge parallel resonant inverter for induction heating application using pulse density modulation technique. Proc. of 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 398-402, doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665571
- [7] 'UCC25600 8-Pin High-Performance Resonant Mode Controller : technical documentation. SLUS846D. Retrieved from: <https://www.ti.com/lit/ds/slus846d/slus846d.pdf?ts=1752633230436> (дата звернення: 01.07.2025).
- [8] Lin B.-R. (2021). Implementation of a resonant converter with topology morphing to achieve bidirectional power flow. Energies, 14(5186). <https://doi.org/10.3390/en14165186>
- [9] Kazimierczuk, M. K., & Czarkowski, D. (2011). Resonant Power Converters (Vol. 2, ISBN 1118585860, 9781118585863). Wiley. Retrieved from: <https://books.google.com.ua/books?id=MqZPnv47IagC> (дата звернення: 01.07.2025).
- [10] Xu, L., Ke, G., Chen, Q., Ren, X., & Zhang, Z. (2020). A self-oscillating resonant converter with precise output voltage control. Proc. of IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), 2946-2951, doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367684
- [11] Cortés-Rodríguez, J., & Ponce-Silva, M. (2012). Self-oscillating DC-DC resonant converter. Proc. of IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 300-304, doi: 10.1109/CERMA.2012.56. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/4417366>
- [12] Pavlov, G., Pokrovskiy, M., & Vinnichenko, I. (2018). Load characteristics of the serial-to-serial resonant converter with pulse-number regulation for contactless inductive energy transfer. Proc. of IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 133-138, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559590
- [13] Engelkemeir, F., Gattozzi, A., Hallock, G., and Hebner, R. (2019). An improved topology for high power soft-switched power converters. Int. J. Electr. Power Energ. Syst. 104, 575–582, doi:10.1016/j.ijepes.2018.07.049

- [14] Pavlov G. V., Vinnichenko I. L., & Obrubov A. V. (2016). Frequency converter with the reduced THD of the output voltage. *Tekhnichna elektrodynamika*, 5, 14-16, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.014>
- [15] Pavlov G., Obrubov A., Vinnichenko I. Optimizing the operation of charging self-generating resonant inverters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1. No. 5(115). Pp. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252148>
- [16] Resonant Circuits and Soft Switching (LLC Resonant Converter and Resonant Inverter) : Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2019-11-12. Application Note. Retrieved from: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=68571> (дата звернення: 01.07.2025).
- [17] Nakra, B. C. (2005). Theory and applications of automatic controls (Vol. 2). New Age International (P) Ltd., Publishers. 321 pp. ISBN 8122416861, 9788122416862
- [18] Pavlov, G., Obrubov, A. & Vinnychenko, I. (2021). Design procedure of static characteristics of the resonant convertre. Proc. of IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 401-406, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575698
- [19] Oeder, C., Barwig, M., & Duerbaum, T. (2016). "Estimation of switching losses in resonant converters based on datasheet information", 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, pp. 1–9, doi: 10.1109/EPE.2016.7695275
- [20] Oeder, C., Barwig, M., & Duerbaum, T. (2016). "Novel Method for the Estimation of Switching Losses in Resonant Converters", PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, pp. 1–6.
- [21] Escudero, Manuel & Kutschak, Matteo-Alessandro & Pulsinelli, Francesco & Rodriguez, Noel & Morales, Diego. (2021). On the Practical Evaluation of the Switching Loss in the Secondary Side Rectifiers of LLC Converters. *Energies*. 14. 5915. 10.3390/en14185915
- [22] Hubert Piquet, Yvon Chéron, Patrick Kuo-Peng. A complete modelling of the series-resonant converter in ZCS mode. 5th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'93, Sep 1993, Brighton, United Kingdom. hal-02523148

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pollock, H., & Flower, J. O. (1996). Series-parallel load-resonant converter for controlled-current arc welding power supply. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 143(3), 211–218. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19960257>
- [2] Wang, Zhenmin & Fan, Wenyan & Xie, Fangxiang & Ye, Chunxian. (2019). An 8kW LLC resonant converter in plasma power supply based on SiC power devices for efficiency improvement. *Circuit World*. ahead-of-print. 10.1108/CW-07-2018-0058
- [3] Abou Houran, M., Yang, X., & Chen, W. (2018). Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics. *Electronics*, 7(11), 296. <https://doi.org/10.3390/electronics7110296>
- [4] Huang, C., Liu, S., Li, Z., Liu, Z. (2022). Improved Degaussing Power Supply Applied to Ship Degaussing System. In: Yang, Q., Liang, X., Li, Y., He, J. (eds) The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 889. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1528-4_112
- [5] Yeon, J. -E., Cho, K. -M., & Kim, H.-J. (2015). A 3.6kW single-ended resonant inverter for induction heating applications. Proc. of 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 1–7, doi: 10.1109/EPE.2015.7309110
- [6] Kumar, A., Sadhu, P. K., Raman, R., & Singh, J.(2018). Design analysis of full-bridge parallel resonant inverter for induction heating application using pulse density modulation technique. Proc. of 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 398-402, doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665571
- [7] UCC25600 8-Pin High-Performance Resonant Mode Controller : technical documentation. SLUS846D. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/slus846d/slus846d.pdf?ts=1752633230436> (дата звернення: 01.07.2025).
- [8] Lin B.-R. (2021). Implementation of a resonant converter with topology morphing to achieve bidirectional power flow. *Energies*, 14(5186). <https://doi.org/10.3390/en14165186>
- [9] Kazimierczuk, M. K., & Czarkowski, D. (2011). Resonant Power Converters (Vol. 2, ISBN 1118585860, 9781118585863). Wiley. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=MqZPnv47IagC> (дата звернення: 01.07.2025).
- [10] Xu, L., Ke, G., Chen, Q., Ren, X., & Zhang, Z. (2020). A self-oscillating resonant converter with precise output voltage control. Proc. of IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), 2946–2951, doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367684
- [11] Cortés-Rodríguez, J., & Ponce-Silva, M. (2012). Self-oscillating DC-DC resonant converter. Proc. of IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 300-304, doi: 10.1109/CERMA.2012.56. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4417366>
- [12] Pavlov, G., Pokrovskiy, M., & Vinnichenko, I. (2018). Load characteristics of the serial-to-serial resonant converter with pulse-number regulation for contactless inductive energy transfer. Proc. of IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 133-138, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559590
- [13] Engelkemeir, F., Gattozzi, A., Hallock, G., and Hebner, R. (2019). An improved topology for high power soft-switched power converters. *Int. J. Electr. Power Energ. Syst.* 104, 575–582, doi:10.1016/j.ijepes.2018.07.049
- [14] Pavlov G. V., Vinnichenko I. L., & Obrubov A. V. (2016). Frequency converter with the reduced THD of the output voltage. *Tekhnichna elektrodynamika*, 5, 14–16, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.014>

- [15] Pavlov G., Obrubov A., Vinnichenko I. Optimizing the operation of charging self-generating resonant inverters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1. No. 5(115). Pp. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252148>
- [16] Resonant Circuits and Soft Switching (LLC Resonant Converter and Resonant Inverter) : Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2019-11-12. Application Note. URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=68571> (дата звернення: 01.07.2025).
- [17] Nakra, B. C. (2005). *Theory and applications of automatic controls* (Vol. 2). New Age International (P) Ltd., Publishers. 321 pp. ISBN 8122416861, 9788122416862
- [18] Pavlov, G., Obrubov, A. & Vinnychenko, I. (2021). Design procedure of static characteristics of the resonant convertre. *Proc. of IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 401-406, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575698
- [19] Oeder, C., Barwig, M., & Duerbaum, T. (2016). “Estimation of switching losses in resonant converters based on datasheet information”, 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, pp. 1–9, doi: 10.1109/EPE.2016.7695275
- [20] Oeder, C., Barwig, M., & Duerbaum, T. (2016). “Novel Method for the Estimation of Switching Losses in Resonant Converters”, *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, pp. 1–6.
- [21] Escudero, Manuel & Kutschak, Matteo-Alessandro & Pulsinelli, Francesco & Rodriguez, Noel & Morales, Diego. (2021). On the Practical Evaluation of the Switching Loss in the Secondary Side Rectifiers of LLC Converters. *Energies*. 14. 5915. 10.3390/en14185915
- [22] Hubert Piquet, Yvon Chéron, Patrick Kuo-Peng. A complete modelling of the series-resonant converter in ZCS mode. 5th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'93, Sep 1993, Brighton, United Kingdom. hal-02523148.

© Павлов Г. В., Обрубов А. В., Вінниченко І. Л.
Дата надходження статті до редакції: 18.07.2025
Дата затвердження статті до друку: 06.08.2025
Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0