

Таким чином, інформація про положення механізму в цифровому вигляді потрапляє до мікропроцесора і там обробляється.

### Список використаних джерел

1. Солнечная энергосистема. Расчёт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Solarwind.net.ua.
2. Солнечная энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.greenevolution.ru.

УДК 621.316.722

**О.М. Городній**, мол. наук. співроб.

**В.В. Гордієнко**, канд. техн. наук

**Б.І. Чуб**, магістрант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КВАЗІРЕЗОНАНСНИМИ ТА ЗВИЧАЙНИМИ КЛЮЧАМИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

*У середовищі MATLAB Simulink досліджується робота послідовного квазірезонансного імпульсного перетворювача, що перемикається при нульовому струмі (КРІП-ПНС), та імпульсного перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією (ШІП). Визначена величина розсіюваної потужності, що виділяється на транзисторі. Порівняно показники ефективності роботи КРІП-ПНС та класичної схеми імпульсного перетворювача. Результати моделювання порівняно з теоретичними розрахунками. Запропоновано схемотехнічні рекомендації щодо поліпшення електромагнітних процесів у досліджуваних перетворювачах.*

**Ключові слова:** імпульсний перетворювач, потужність, ефективність, MATLAB, м'яке включення, квазірезонансний перетворювач.

*В среде MATLAB Simulink исследуется работа последовательного квазирезонансного импульсного преобразователя, переключаемого при нулевом токе (КРИП-ПНТ), и импульсного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИП). Определена величина рассеиваемой мощности, которая выделяется на транзисторе. Сравнено показатели эффективности работы КРИП-ПНТ и классической схемы импульсного преобразователя. Результаты моделирования сравнено с теоретическими расчётами. Предложены схемотехнические рекомендации по улучшению электромагнитных процессов в исследуемых преобразователях.*

**Ключевые слова:** импульсный преобразователь, мощность, эффективность, MATLAB, мягкое включение, квазирезонансный преобразователь.

*Zero-current-switch quasi-resonant buck converter (ZCS-QR), and PWM converter operation is studied using MATLAB Simulink environment. In this paper, we calculated the power dissipation in the transistor. A comparative effectiveness analysis of ZCS-QR and conventional pulse converter is carried out. The simulation-based results were compared with theoretical calculations. Circuit design recommendations on improving the electromagnetic processes in the studied converters are given.*

**Key words:** pulse converter, power, efficiency, MATLAB, soft switch, quasi-resonant converter.

**Постановка проблеми.** Основні труднощі при дослідженні імпульсних перетворювачів пов'язані з пошуком шляхів підвищення їх енергетичної ефективності, яка залежить від потужності, що розсіюється на силовому транзисторі та від спектра струму живлячої мережі. Аналітична оцінка цих показників у широкому частотному діапазоні регулювання є проблематичною у зв'язку з суттєвою нелінійністю процесів ШІМ та ЧІМ. Особливо це стосується КРІП, де на високих частотах комутації на них значно впливає резонансний контур та паразитні параметри силового транзистора.

Електронне моделювання на основі коректної моделі та відповідного програмного забезпечення дозволяє подолати ці труднощі з допустимою похибкою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивченням квазірезонансних перетворювачів займаються в багатьох країнах світу [1]. Вперше вплив резонансного контуру на роботу електронної схеми було висвітлено у [2]. В [3] досліджена робота широтно-імпульсного перетворювача, а також розрахована інтегральна потужність розсіювання в силових ключах ШІП. В [4] встановлено, що завдяки введенню у схему резонансного контуру можна суттєво підвищити енергетичні показники перетворювача.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попередні результати моделювання схем КРІП-ПНС суттєво відрізнялися від експериментальних даних.

Це пояснюється невдалим вибором моделі або ж алгоритмів числового обчислення, які використовуються у сучасному програмному забезпеченні. Все це не дозволяє дати коректну оцінку енергетичним показникам різноманітним схемним варіаціям імпульсних перетворювачів.

**Мета статті.** Полягає у проведенні дослідження електромагнітних процесів у КРП-ПНС та ІІ, порівнянні потужності розсіювання в електронному ключі у всьому діапазоні робочих частот (від 100 до 1000 кГц) та наданні рекомендацій, що дозволяють зменшити втрати потужності в динамічних режимах.

**Вступ.** Проектування схем за допомогою ЕОМ у теперішній час є одним зі способів підвищення продуктивності та якості інженерної праці і набуває все більшого поширення в радіоелектроніці та обчислювальній техніці. При комп'ютерному моделюванні можна перевірити працездатність схеми, не вдаючись до складних розрахунків. Основними параметрами вибору програмного забезпечення є наявність необхідних бібліотек елементів та відповідність моделей реальному об'єкту.

Особливу увагу необхідно приділяти моделям нелінійних елементів. У випадку КРП-ПНС та ІІ таким елементом є транзистор. Практика показала, що результати моделювання електронного ключа на високих частотах у різноманітних програмних продуктах можуть суттєво відрізнятися від експериментальних даних. Так, у PSIM не враховується вплив паразитних параметрів транзистора. А у OrCAD PSpice та LTspice IV при перемиканні виникають викиди струму великої амплітуди, яких немає у дійсності.

Оптимальну модель вдалося отримати лише у MATLAB Simulink. Цей математичний пакет набув найбільшої популярності у світі при аналізі систем силової електроніки. В ньому реалізована бібліотека для роботи з електронними пристроями – SimPowerSystems. До її складу входять моделі пасивних та активних електротехнічних елементів, джерел енергії, трансформаторів та іншого обладнання. Комбінуючи їх можливості з іншими блоками, у Simulink користувач може виконувати різноманітні види аналізу: розрахунок сталого режиму роботи, імпедансу, ділянки кола, отримання частотних характеристик, аналіз стійкості, спектрів струмів та напруг.

Однією з найбільших переваг SimPowerSystems є те, що складні схеми можна моделювати, поєднуючи методи імітаційного та структурного моделювання [5]. Так, поряд з схемою пристрою за допомогою звичайних блоків Simulink досить просто реалізувати систему керування, яка відображає лише алгоритм роботи. Це прискорює та збільшує точність аналізу схем силової електроніки. При використанні такого математичного пакету суттєво спрощується обробка результатів моделювання. Виходячи з цього, MATLAB можна вважати одним з найкращих пакетів моделювання електротехнічних пристроїв та систем. Якщо створити точну модель КРП-ПНС, то можна отримати базу для подальшої роботи над вивченням паразитних ефектів та пошуком шляхів щодо зменшення їх негативного впливу на коефіцієнт корисної дії та сумісність з мережею.

У параметрах моделювання (Solver options) необхідно обрати один з двох методів:

- ode23t – метод трапецій з інтерполяцією, найбільш наближений до того, що використовується у SPICE-моделюванні;
- ode15s – багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), що використовує формули числового диференціювання.

### **Моделювання електромагнітних процесів у ІІ.**

Класична схема імпульсного перетворювача зображена на рисунку 1. У стандартній моделі транзистора MOSFET не враховується вплив паразитної ємності між стоком та витокком. Тому її роль виконує зовнішня ємність  $C_p$ . Елементи схеми мають такі параметри:  $L_f = 50$  мкГн;  $C_f = 220$  нФ;  $R_n = 10$  Ом;  $C_p = 100$  пФ,  $U_{вх} = 30$  В. Падіння напруги на діодах у відкритому стані складає 0,7 В.

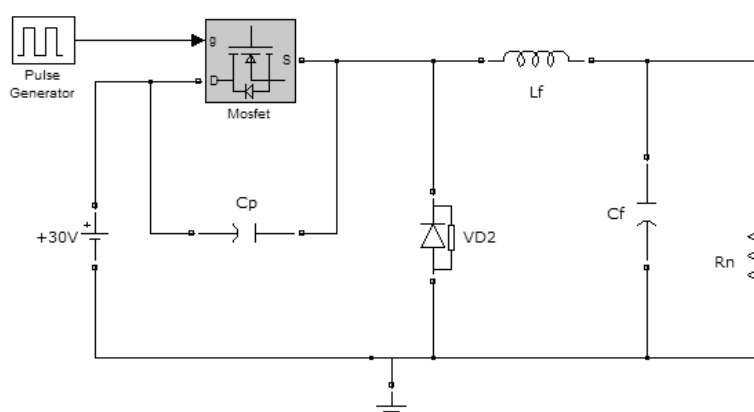


Рис. 1. Досліджувана схема імпульсного перетворювача з ШІМ

Оскільки у ШІМ перемикання ключового елемента відбувається при порівняно великих значеннях напруги та струму, у ці моменти спостерігаються максимуми розсіюваної потужності, що видно і на траєкторії робочої точки транзистора (рис. 2).

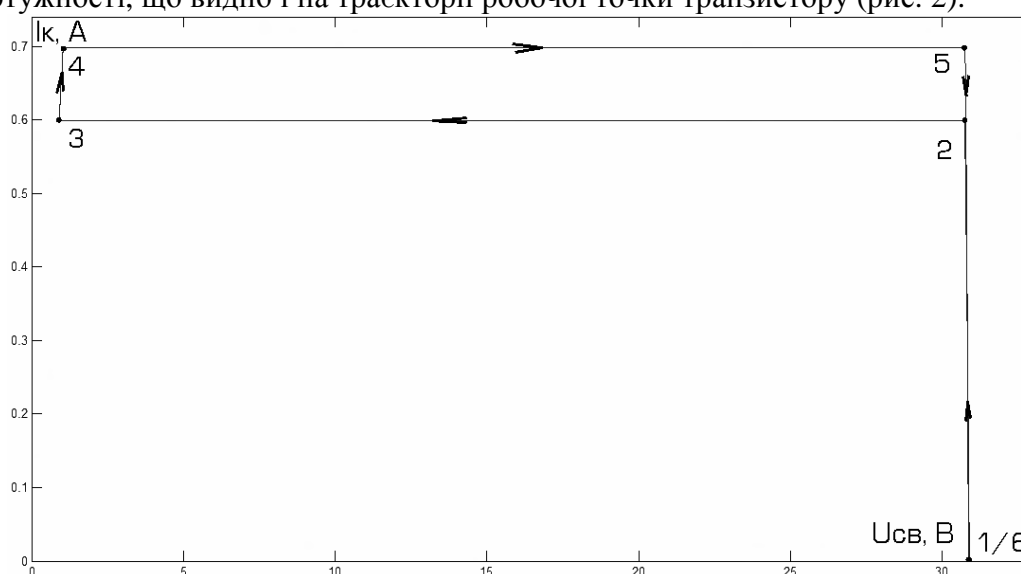


Рис. 2. Траєкторія робочої точки транзистора у ШІМ

Цього недоліку позбавлені схеми з так званим «м'яким перемиканням», коли у моменти комутації струм або напруга дорівнюють нулю.

На рисунках 3 та 4 зображені часові діаграми роботи ШІМ, де  $U_y$  – напруга управління,  $U_{cv}$  – напруга між стоком та витком транзистора,  $I_k$  – струм, що протікає через транзистор,  $P$  – миттєва потужність розсіювання. На них можна виділити шість характерних точок та три інтервали роботи транзистора:

- інтервал включення 1-3;
- транзистор знаходиться у відкритому стані 3-4;
- закривання транзистора 4-6.

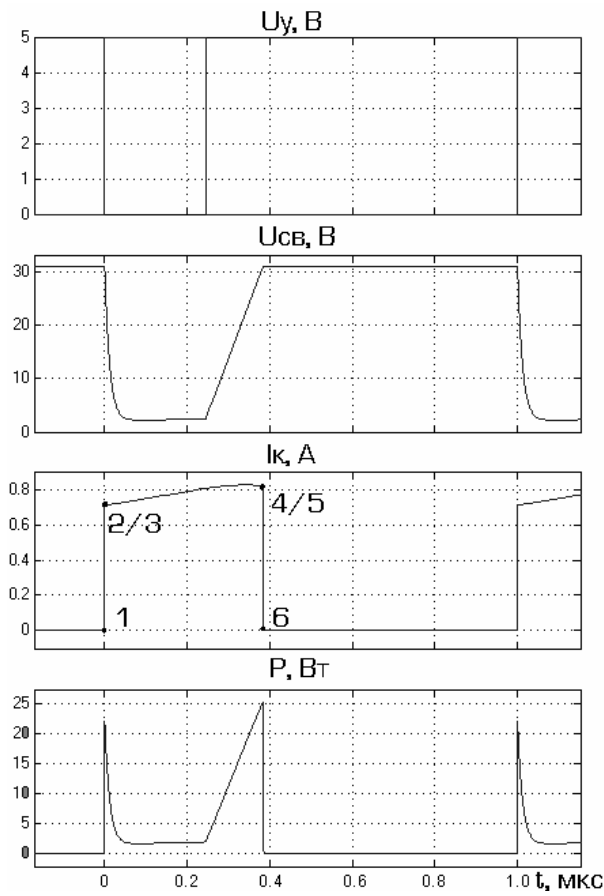


Рис. 3. Часові діаграми роботи III

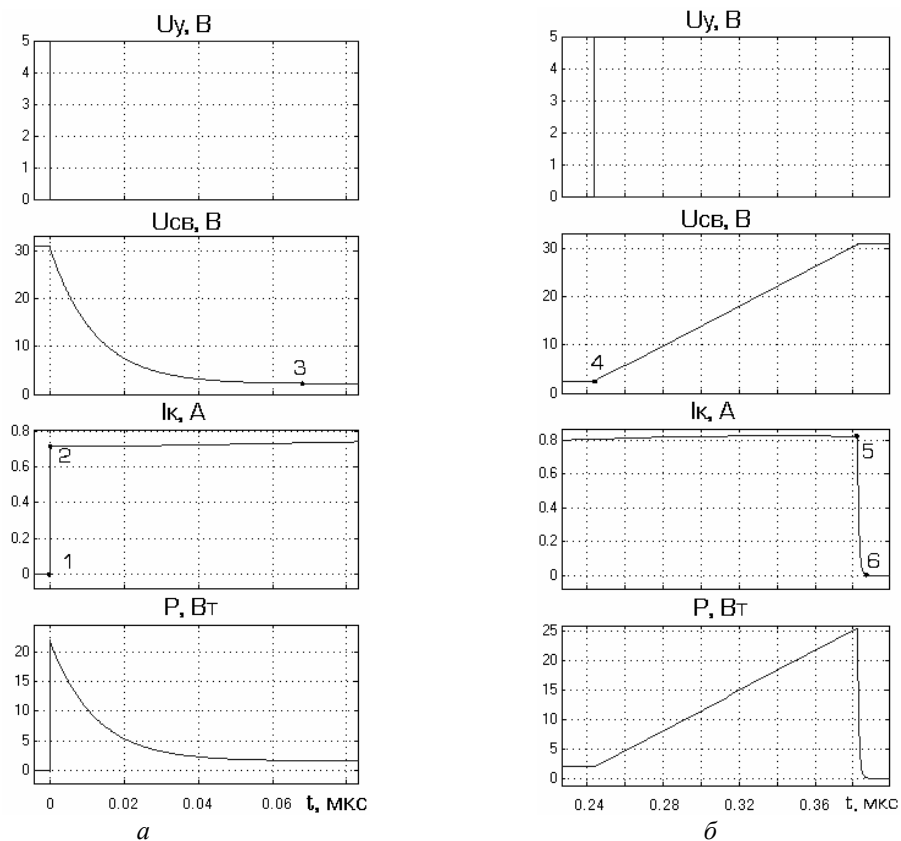


Рис. 4. Часові діаграми роботи III: а – інтервал включення; б – інтервал виключення

### Моделювання електромагнітних процесів у послідовному КРІП-ПНС.

Досліджувана схема перетворювача зображена на рисунку 5. Моделювання відбувалося за таких параметрів схеми:  $C_r = 2$  нФ;  $L_r = 1,1$  мкГн;  $L_f = 50$  мкГн;  $C_f = 220$  нФ;  $R_n = 10$  Ом;  $C_p = 110$  пФ,  $U_{вх} = 30$  В. Падіння напруги на діодах у відкритому стані складає 0,7 В.

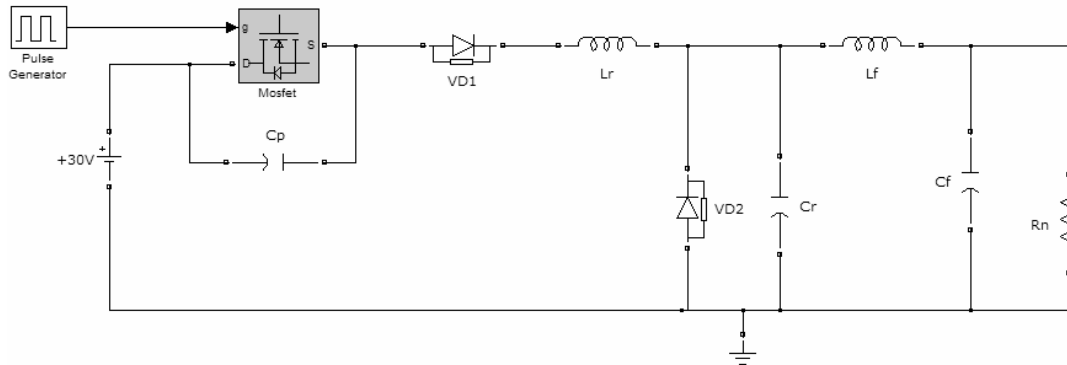


Рис. 5. Досліджувана схема КРІП-ПНС

У результаті отримали часові діаграми роботи перетворювача (рис. 6 та 7), де  $U_{cr}$  – напруга на резонансній ємності. На них можна виділити дев'ять характерних точок та п'ять наступних інтервалів

- інтервал включення транзистора 1-2;
- інтервал наростання струму 2-3;
- ділянка резонансу 3-7;
- інтервал розряду резонансної ємності (виключення) 7-8;
- інтервал провідності діода 8-1.

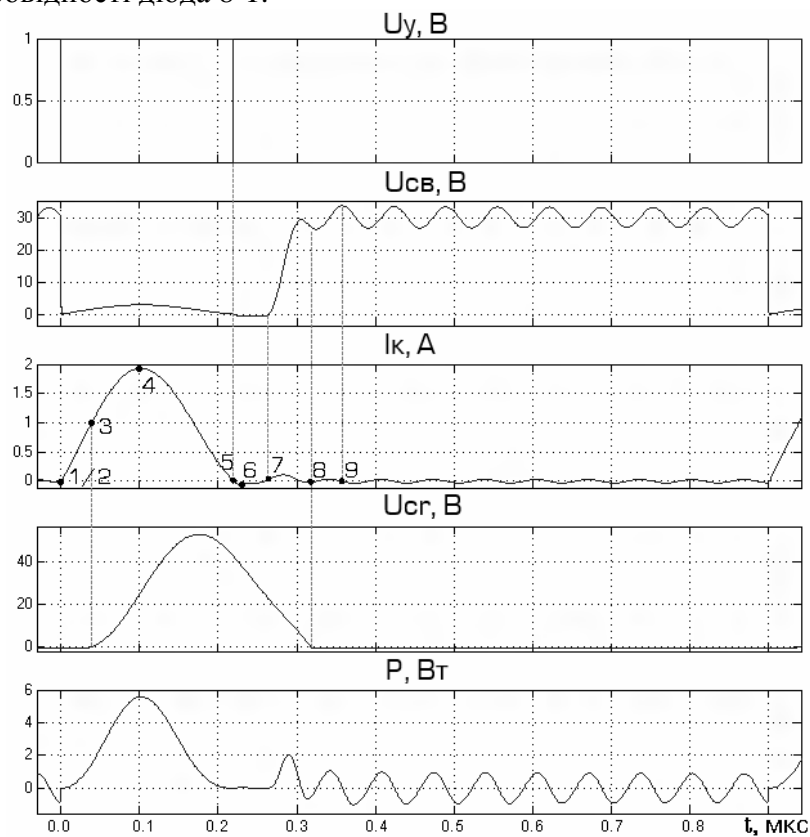


Рис. 6. Часові діаграми роботи КРІП-ПНС

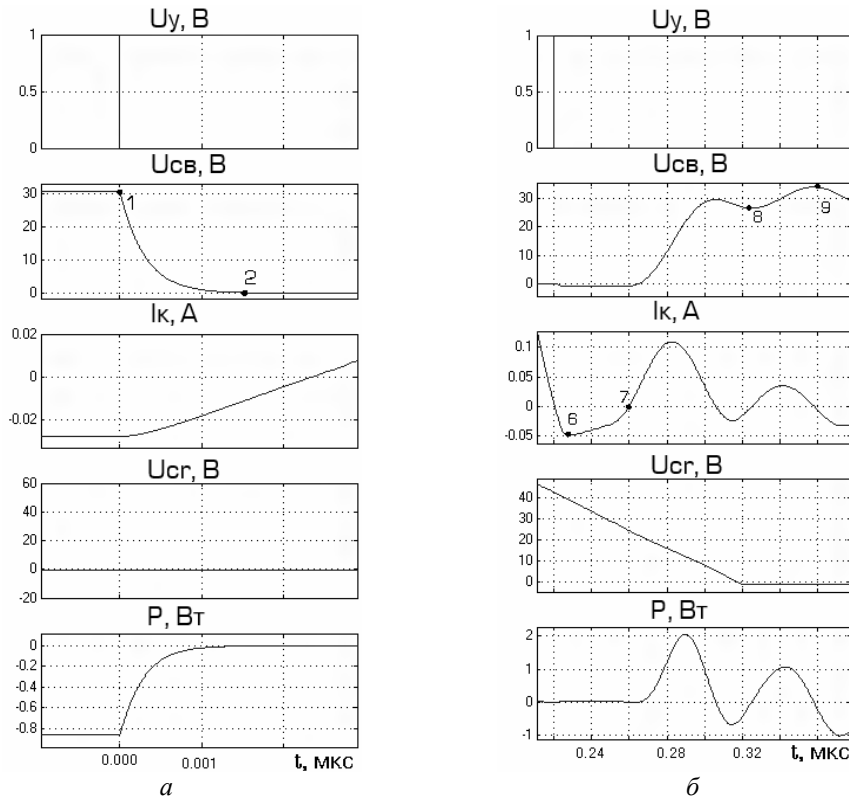


Рис. 7. Часові діаграми роботи послідовного КРІІ-ПНС:  
 а – інтервал включення; б – інтервал виключення

Траекторія робочої точки ключового елемента показана на рисунку 8. За рахунок паразитної ємності у схемі виникають коливання з частотою, більшою за частоту комутації та частоту резонансного контуру. Це явище спостерігалось і в експериментальному дослідженні [4]. Вищі гармоніки призводять до розширення спектру струму, що споживається, і тому необхідно зменшувати їхню амплітуду.

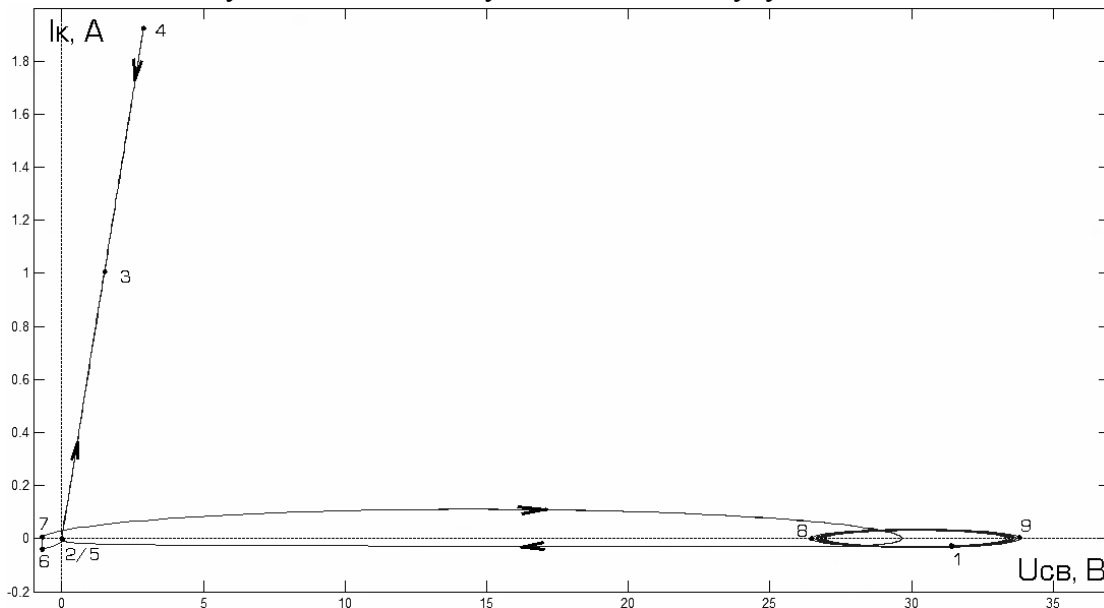


Рис. 8. Траекторія робочої точки транзистора у послідовному КРІІ-ПНС

### Порівняння розсіюваної потужності у КРІІ-ПНС та Ш

Проаналізувати втрати енергії на транзисторі можна за допомогою інтегральної потужності.

$$P_{\text{СТАТ}} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_1} U_{\text{тр}}(t) \cdot i_{\text{мп}}(t) \cdot dt. \quad (1)$$

У MATLAB, де всі дані зберігаються у вигляді матриць, використовується числове інтегрування за методом прямокутників або трапецій. Оскільки останній має значно меншу похибку обчислень, при розрахунках обрано саме його.

Діапазон робочих частот перетворювачів складає 100-1000 кГц. Результати вимірювань занесено до таблиці 1 і зображено на рисунку 9. За рахунок м'якого включення у схемі КРІП-ПНС вдалося зменшити потужність розсіювання більш ніж у 7 разів у всьому діапазоні робочих частот.

Слід зазначити, що значення відповідають теоретично розрахованим [6], розбіжності не перевищують 5 %.

Таблиця 1

Значення розсіюваної потужності у досліджуваних схемах

Частота, кГц	Розсіювана потужність у КРІП-ПНС, Вт	Розсіювана потужність у ШІП, Вт
100	0,20	4,02
250	0,56	6,53
500	0,95	10,01
750	1,57	12,32
1000	2,05	14,80

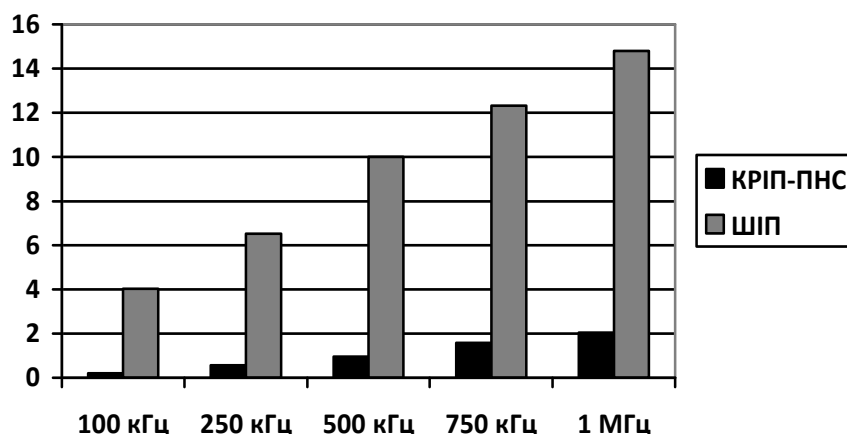


Рис. 9. Порівняння потужностей розсіювання на транзисторі у схемах перетворювачів

### Шляхи поліпшення електромагнітних процесів у КРІП-ПНС

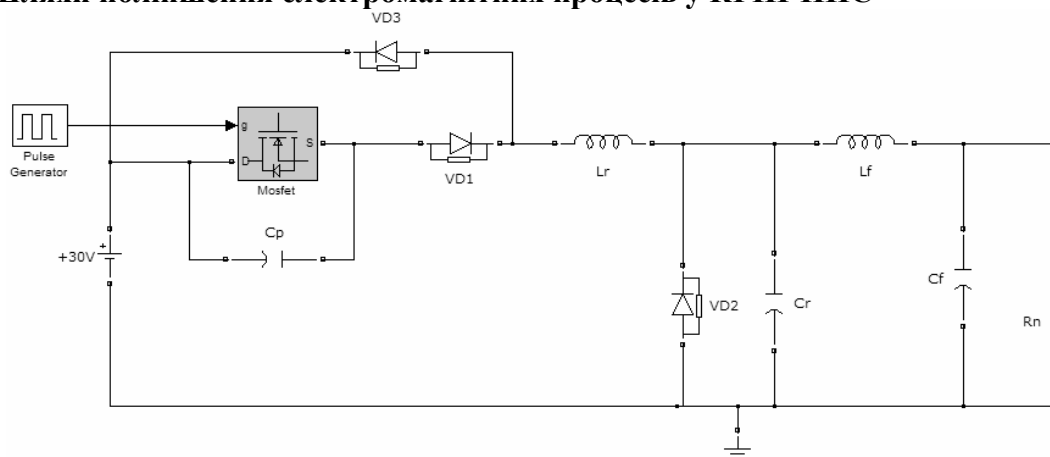


Рис. 10. Поліпшена схема КРІП-ПНС

У послідовному КРП-ПНС при перемиканні спостерігається наступний ефект: за рахунок зворотного відновлення діода збуджується коливальний контур, утворений паразитною ємністю транзистора та резонансною індуктивністю.

Коли транзистор закривається, його диференціальний опір різко збільшується і в паразитному контурі виникають довготривалі коливання. Зменшити час цих коливань та одночасно рекуперувати енергію паразитного контуру в джерело живлення можливо шляхом введення додаткового діода VD3. При цьому в паразитний контур паралельно вводиться дуже малий внутрішній опір джерела живлення і коливання швидко затухають. Всі інші параметри схеми не змінювались.

На часових діаграмах (рис. 11 та 12) помітно п'ять інтервалів роботи транзистору:

- інтервал включення 1-2;
- інтервал наростання струму 2-3;
- інтервал резонансу 3-6;
- ділянка розряду паразитної ємності (виключення) 6-7;
- інтервал провідності діода 7-8.

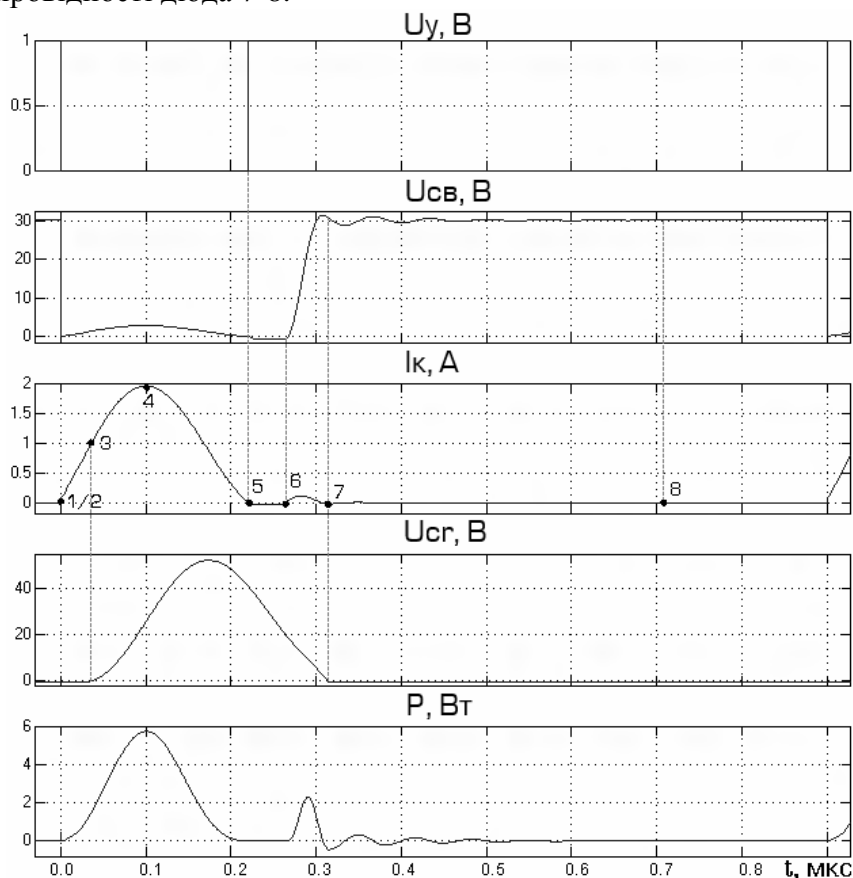


Рис. 11. Часові діаграми роботи оптимізованої схеми КРП-ПНС



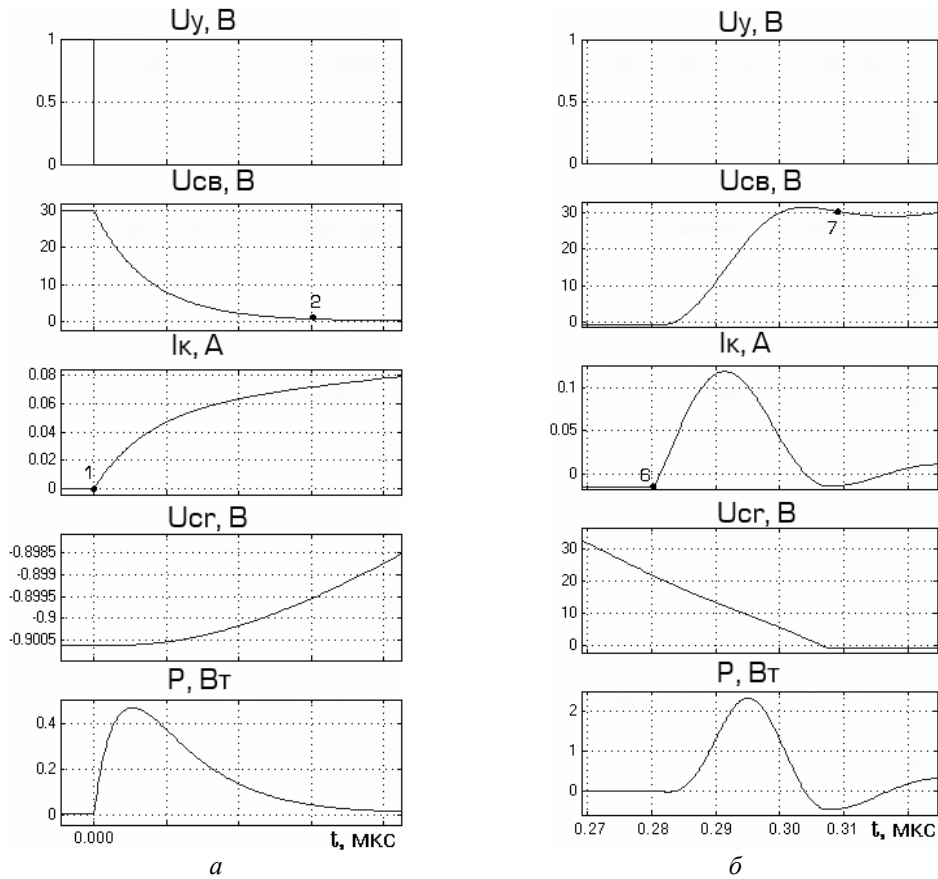


Рис. 12. Часові діаграми роботи поліщеної схеми послідовного КРП-ПНС:  
а – інтервал включення; б – інтервал виключення

Значно менші пульсації напруги та струму помітні і на траєкторії робочої точки (рис. 13).

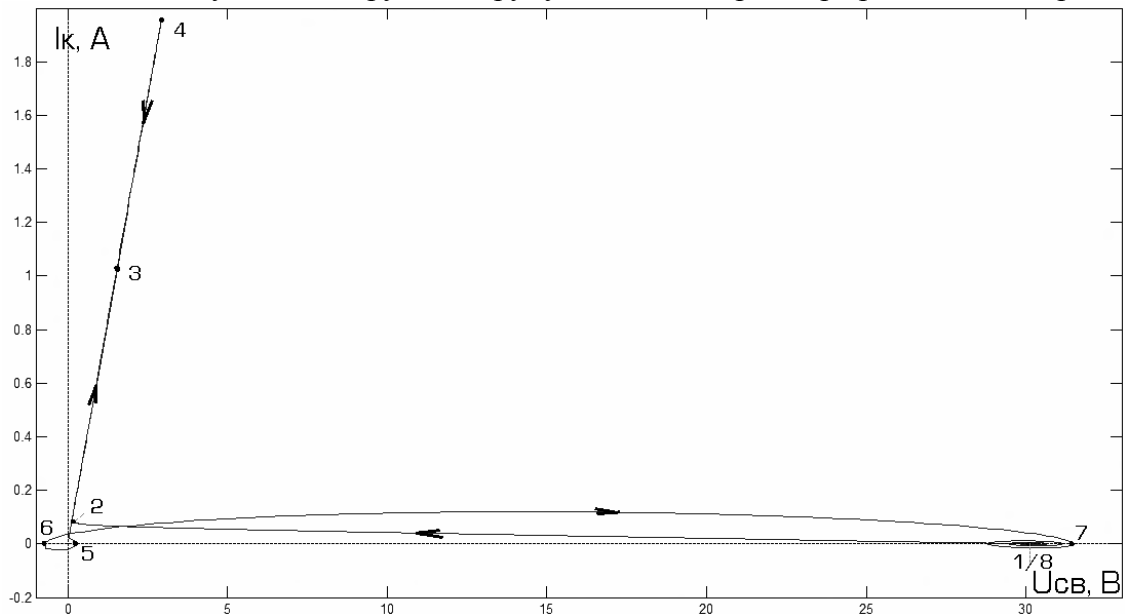


Рис. 13. Траєкторія робочої точки транзистора у поліщеному КРП-ПНС

**Висновки і пропозиції.** 1. Доведено, що моделювання електронних процесів у КРП-ПНС та ПІ доцільно виконувати у MATLAB Simulink.

2. Показано, що втрати потужності на силовому транзисторі КРП-ПНС майже в сім разів менше, ніж у ПІ.

3. Для демпфування високочастотних коливань, що виникають у контурі, утвореному паразитною ємністю транзистора та резонансною індуктивністю, доцільно шунтувати транзистор зворотнім діодом.

#### Список використаних джерел

1. Tomioka S. A zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application / S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama, T. Ninomiya, E. Firmansyah // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE, February 6. – P. 5.
2. Ли Ф. К. Высококачественные квазирезонансные преобразователи. ТИИЭР / Ф. К. Ли // Энергетическая электроника / под ред. В. А. Лабунцова. – М.: Мир, 1988. – № 4. – Т. 76. – С. 83-97.
3. Денисов Ю. О. Розрахунок інтегральної потужності розсіювання в силових ключах ПП / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. М. Зозуля // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”: наук. зб. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 40. – С. 388.
4. Денисов Ю. О. Моделирование процессов коммутации в КРИП ПНТ с учетом паразитных параметров / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. В. Савченко // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 1. – С. 87-90.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
6. Денисов Ю. О. Особливості роботи та статичні характеристики КРП-ПНС паралельного типу / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. А. Купко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”: наук. зб. – Чернігів: ЧДТУ, 2012. – № 1 (55). – С. 247-253.

УДК 004.852:681.516.77

**К.К. Кадомский**, мл. науч. сотруд.

Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина

**А.Л. Красников**, инж. I кат.

Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк, Украина

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНКРЕМЕНТНЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ ВЫДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ЭНЕРГОБЛОКА СКД

*Рассматривается задача синтеза регулятора охлаждающих впрысков в пароводяной тракт энергоблока СКД. Предложен алгоритм синтеза ПИ-регулятора впрыска для отдельных режимов функционирования. Рассмотрена задача нечеткой кластеризации, предложен инкрементный алгоритм, на основе которого выделены отдельные режимы функционирования энергоблока в реальном времени. Предложен и реализован алгоритм настройки параметров ПИ-регулятора на основе данных измерений мощности, давления и расхода пара. Выполнен численный эксперимент на основе данных измерений энергоблока СКД 300 МВт при нагрузке 150-300 МВт.*

**Ключевые слова:** энергоблок СКД, билинейная система, настройка регулятора, нечеткая кластеризация, расстояние Махаланобиса.

*Розглядається задача синтезу регулятора охолоджуючих впорсків у пароводяний тракт енергоблоку НКТ. Запропоновано алгоритм синтезу ПІ-регулятора впорску для окремих режимів функціонування. Розглянуто завдання нечіткої кластеризації, запропоновано інкрементний алгоритм, на основі якого можна виділити окремі режими функціонування енергоблоку в реальному часі. Запропоновано та реалізовано алгоритм настроювання параметрів ПІ-регулятора на основі даних вимірювань потужності, тиску і витрати пару. Виконано чисельний експеримент на основі даних вимірювань енергоблоку НКТ 300 МВт при навантаженні 150-300 МВт.*

**Ключові слова:** енергоблок НКТ, білінійна система, настроювання регулятора, нечітка кластеризація, відстань Махаланобіса.

*The problem of synthesis of spray attemperation controller in water-steam circuit of supercritical pressure power plant was reviewed. An algorithm for the synthesis of PI-controller of spray attemperation for separate operation mode is proposed. The problem of fuzzy clustering is reviewed incremental algorithm which can be used in real-time operational conditions separation is proposed. An algorithm of gain scheduling of the PI-controller based on power, pressure and steam flow measurements is proposed and implemented. The numerical experiment with measurement data of supercritical pressure power plant at a load of 150-300 MW is carried.*

**Key words:** supercritical pressure power plant, bilinear system, gain scheduling, fuzzy clustering, Mahalanobis distance.

**Введение.** Котел энергоблока сверхкритического давления (СКД) 300 МВт в основных режимах работы имеет паропроизводительность до 1000 т/ч острого пара темпера-