

Чернігівський національний технологічний університет

Автор: Димерець Андрій Віталійович

Керівник: Городній Олексій Миколайович, к.т.н., ст. викладач
кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки

**Програмна система для дослідження електричних та енергетичних
показників імпульсних перетворювачів**

Шифр: *Активатор*

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку електронних перетворювачів електроенергії дуже важливо підвищувати їх енергоефективність та поліпшувати масогабаритні показники. Одним з найкращих шляхів досягнення цих завдань є використання ефективних методів розрахунку та моделювання імпульсних перетворювачів (ІП) з подальшим підтвердженням при проведенні експерименту. Нові типи ІП, такі як квазірезонансні (КРІП) вимагають розрахунків та моделювання їх електромагнітних та енергетичних процесів на кожному інтервалі роботи. Основним інструментом, який зараз використовують – моделювання цих процесів. Складність розрахунків полягає в нелінійності параметрів елементів перетворювачів.

В цій роботі пропонується автоматизація процесу розрахунку електромагнітних та енергетичних процесів з подальшим представленням результатів розрахунків в цифровому та графічному вигляді.

Мета роботи – розробка програмної системи для автоматизації процесу аналітичного розрахунку електромагнітних та енергетичних характеристик ІП різних типів.

Об'єкт дослідження – імпульсні та квазірезонансні перетворювачі електроенергії.

Предметом дослідження є електромагнітні та енергетичні показники імпульсних та квазірезонансних перетворювачів.

Методи дослідження – теорія лінійних та нелінійних кіл; безперервне перетворення Лапласа; узагальнений метод розрахунку комутаційних процесів в імпульсних колах.

Ключові слова: інтервал комутації, транзисторний ключ, електромагнітні та енергетичні показники, імпульсні перетворювачі, квазірезонансні перетворювачі.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТА ПРОГРАМНІ ПАКЕТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В НИХ.....	9
1.1 Призначення та особливості побудови імпульсних перетворювачів постійної напруги.....	9
1.2 Різновиди перетворювачів постійної напруги.....	10
1.3 Порівняння різноманітних програмних пакетів моделювання електронних схем.....	11
1.3.1 PSIM (Powersim Inc.).....	11
1.3.2 OrCAD PSpice/Capture (Cadence Design Systems).....	12
1.3.3 MATLAB Simulink (MathWorks, Inc.).....	13
1.4 Висновки.....	14
2 РОЗРАХУНОК КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮЮЧАХ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО АЛГОРИТМУ.....	15
2.1 Розрахунок комутаційних процесів в паралельному імпульсному перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією.....	15
2.1.1 Розрахунок на інтервалі відкриття транзисторного ключа VT ($t_0 - t_1$).....	16
2.1.2 Розрахунок на інтервалі відкритого стану транзисторного ключа VT ($t_1 - t_2$).....	18
2.1.3 Розрахунок на інтервалі закривання транзисторного ключа VT ($t_2 - t_3$)	19
2.1.4 Розрахунок на інтервалі закритого стану транзисторного ключа VT ($t_3 - t_4$).....	20
2.2 Розрахунок комутаційних процесів в паралельному квазірезонансному перетворювачі, що перемикається при нульовому струмі.....	21
2.3 Висновки.....	22
3 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ В РОЗРОБЛЕНІЙ ПРОГРАМНІЙ СИСТЕМІ ТА ПАКЕТІ MATLAB SIMULINK	22

3.1 Моделювання паралельного імпульсного перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією.....	22
3.2 Моделювання паралельного квазірезонансного перетворювача, що перемикається при нульовому струмі.....	27
3.3 Висновки.....	31
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	33
Додаток А – Акт впровадження.....	36
Додаток Б - Вирази для напруг та струмів в загальному вигляді в часовій області.....	38

ВСТУП

В наш час стрімкого розвитку електронних технологій особливу увагу та вимоги приділяють розробці та удосконаленню мережевих джерел живлення, перетворювачів та стабілізаторів постійної та змінної напруги. Одним із важливих етапів під час проведення таких робіт є моделювання схем за допомогою спеціалізованих програмних пакетів.

Сучасною тенденцією розвитку високочастотних перетворювачів напруги є розробка квазірезонансних імпульсних перетворювачів (КРІП) з частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ), що перемикаються при нульовому струмі (КРІП-ПНС) або нульовій напрузі (КРІП-ПНН). В порівнянні з традиційними імпульсними перетворювачами (ІП) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (далі ІП), основними перевагами КРІП-ПНС та КРІП-ПНН є [1-8]:

- можливість формування наближеної до гармонічної форми напруги та струму, що споживається від мережі, в коректорах коефіцієнта потужності (ККП);
- зниження динамічних втрат у напівпровідникових силових елементах;
- підвищення коефіцієнту корисної дії перетворювачів;
- покращення сумісності корисного навантаження з мережею живлення;
- поліпшення масогабаритних показників;
- значно вищі частоти комутації, що не призводять до збільшення втрат потужності на електронному ключі.

Розробка таких пристроїв пов'язана з моделюванням електромагнітних процесів, що протікають у них, а особливо режимів роботи регулюючого елемента – транзисторного ключа. При цьому виникає проблема визначення і опису електромагнітних процесів у резонансних компонентах та паразитних елементах в структурі напівпровідникового приладу.

Таким чином, проектування КРІП-ПНС неможливе без достовірних моделей напівпровідникових приладів. Це стає особливо актуальним при проектуванні перетворювачів напруги, що працюють на частоті від 0,5 МГц і вище.

Сучасні системи моделювання електромагнітних процесів в електричних колах мають велику кількість переваг: готові бібліотеки моделей радіоелементів; зручний інтерфейс; можливість змінювати параметри та характеристики елементів та ін. Але основним їх недоліком є необхідність придбання сертифікованих дорогих програмних пакетів, велика складність встановлення реальних параметрів радіоелементів та ін.

Для досягнення сформульованої мети даної роботи (яка знаходиться в анотації) необхідно вирішити наступні задачі:

- провести детальний огляд існуючих пакетів моделювання електронних схем;
- розробити спеціалізовану програмну систему (ПС) на основі мови програмування, яка не потребує ліцензування;
- розробити ПС, яка дозволяє моделювати роботу паралельного ІІ та КРІІ з урахуванням паразитних параметрів транзисторних ключів;
- провести моделювання електромагнітних процесів в паралельних ІІ та КРІІ-ПНС за допомогою розробленої ПС;
- провести моделювання електромагнітних процесів в паралельних ІІ та КРІІ-ПНС за допомогою існуючого пакету для моделювання електричних схем;
- порівняти результати роботи розробленої ПС з результатами існуючого пакету для моделювання для цих перетворювачів.

Наукова новизна – розроблено спеціалізовану ПС, яка дозволяє автоматизовано проводити аналітичний розрахунок електромагнітних та енергетичних процесів в ІІ за узагальненим методом розрахунку комутаційних процесів в імпульсних колах.

Практичне значення отриманих результатів:

- 1) розроблена ПС дозволила розраховувати електромагнітні та енергетичні процеси в ІІ та КРІІ різних топологій;
- 2) розроблена ПС пришвидшує створення імпульсних перетворювачів, стабілізаторів напруги або струму та коректорів коефіцієнта потужності;

3) дана ПС може використовуватися в вищих навчальних закладах або наукових лабораторіях при розробці та дослідженні вище вказаних електронних пристроїв;

4) дана ПС впроваджена в початковий процес *Активатор*, що підтверджується відповідним актом (додаток А);

5) дана ПС розроблялася в рамках виконання науково-дослідної роботи «Системи електроприводів з покращеними енергетичними та динамічними характеристиками для спеціальних застосувань» (держ. рег. номер 0119U000421).

Апробація роботи.

1) Перша науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства» (НТСС-2017). 01 грудня 2017, м. Чернігів, *Активатор*.

2) XV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки - 2018» (м. Київ, 4-8 червня 2018 р.).

3) Всеукраїнська науково-практична конференція «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі». 19-20 квітня 2018, м. Чернігів, *Активатор*.

4) Всеукраїнська науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства» (НТСС-2018). 12 грудня 2018, м. Чернігів, *Активатор*.

5) IEEE 39th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO 2019. 16-18 квітня 2019 р. м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації.

1) *Активатор* Розрахунок комутаційних процесів в імпульсних перетворювачах електроенергії. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2017): науково-практична конференція (м. Чернігів, 1 грудня 2017 р.): тези доповідей.- Чернігів: *Активатор*, 2017.- с. 82-85.

2) Смикун А. І. Удосконалене лабораторне джерело живлення з регулюванням вихідної напруги та високочастотним квазірезонансним

імпульсним стабілізатором / А.І. Смикун, *Активатор, Активатор* // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: тези доповіді. — Чернігів, 2018.

3) Денисов Ю.О. Оцінка параметрів і характеристик коректора коефіцієнта потужності на основі імпульсних та квазірезонансних перетворювачів електроенергії / Ю.О.Денисов, *Активатор* , В.В.Гордієнко, Л.В.Вершняк, *Активатор* // Технічна електродинаміка. – 2018.- №6.- с.38-41. (SCOPUS).

4) *Активатор* Розрахунок електромагнітних процесів в широтноімпульсному перетворювачі узагальненим методом вузлових напруг. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2018): науково-практична конференція (м. Чернігів, 12 грудня 2018 р.): тези доповідей.- Чернігів: *Активатор*, 2018.- с. 69-72.

5) *Активатор, Активатор* Transistor switches Quasi-Control in Quasi-Resonant Pulse Converters. Proc. IEEE 39th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO 2019. Kyiv, Ukraine. (SCOPUS).

1 ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТА ПРОГРАМНІ ПАКЕТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В НИХ

1.1 Призначення та особливості побудови імпульсних перетворювачів постійної напруги

В найбільш загальному випадку під перетворювачем розуміють пристрій, що забезпечує перетворення одного виду енергії в інший. При цьому процес такого перетворення супроводжується певними втратами або накопиченням енергії всередині пристрою. Існує багато різноманітних типів перетворювачів, що відрізняються один від одного не тільки за функціональними ознаками, але і за вартістю, надійністю, складністю та економічністю. Будемо розглядати перетворювачі електричної енергії в електричну, що містять представлений на рисунку 1.1 набір компонентів. Топологія схеми перетворювача, а отже і зв'язки між його елементами визначають характер вимог по передачі енергії. Легко бачити, що в зазначений набір компонентів входять дросель, конденсатор, трансформатор і керований ключ. Резистор навмисно виключений з цього набору, оскільки його наявність призвела б до небажаних втрат енергії. Слід зазначити, що ККД є зазвичай найважливішим параметром імпульсних перетворювачів постійної напруги (ППН). Тому цілком природним є прагнення уникати в ППН-схемах резистивних елементів. Однак не можна стверджувати, що для таких схем резистивні компоненти можна не враховувати повністю. Це пов'язано з тим, що схемотехнічні елементи не є ідеальними і характеризуються резистивними втратами. Для отримання високого ККД ППН-схем сумарні резистивні втрати в них прагнуть мінімізувати. І тільки у випадках крайньої необхідності в силові ланцюги ППН-схем вводять резистори [1-10].

У ППН-схемах напівпровідникові керовані ключі, регулюючи процес передачі енергії від джерела живлення до навантаження, характеризуються двома основними станами «замкнено» та «розімкнено». Протягом коротких тимчасових інтервалів керовані ключі по чергово переходять з одного стану в інший.

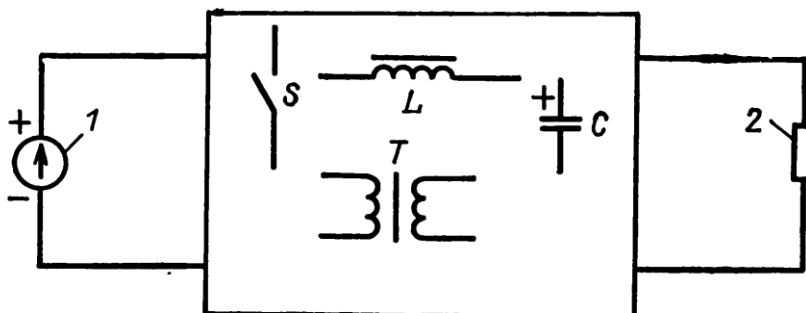


Рисунок 1.1 –Компоненти імпульсних перетворювачів постійної напруги:
1 – джерело живлення; 2 - навантаження

Для напруг всередині перетворювачів характерні імпульси у формі меандру, прямокутні імпульси з регульованою тривалістю, отримані методом ШІМ, а також комбінації таких імпульсів. Імпульси струму є в спрощеному вигляді трикутними або трапецеїдальними.

В якості силових напівпровідникових елементів ППН-схем зазвичай використовуються швидкодіючі діоди, біполярні, польові (МОП) та IGBT транзистори.

1.2 Різновиди перетворювачів постійної напруги

Згідно [3] ППН розподіляються на послідовні (понижуючі), паралельні (підвищуючі) та комбіновані. В послідовних ППН електронний ключ розміщений послідовно з джерелом вхідної напруги та навантаженням (рис. 1.2).

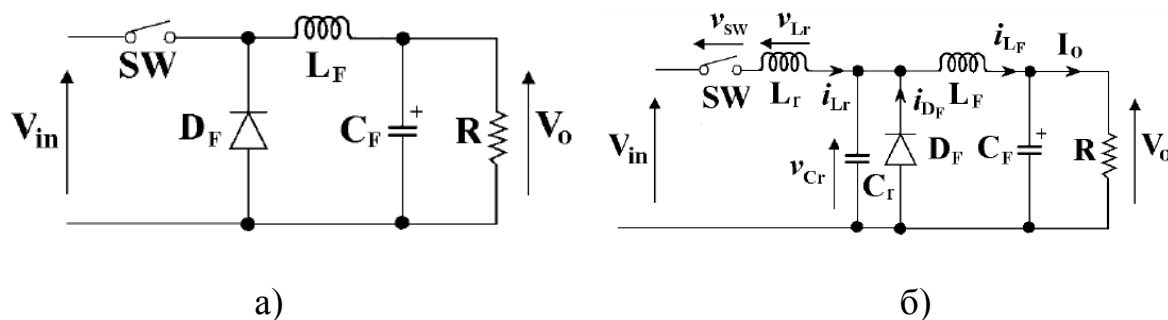


Рис. 1.2. Послідовні ППН: а) ІП з ШІМ; б) КРІП-ПНС; в) КРІП-ПІНН

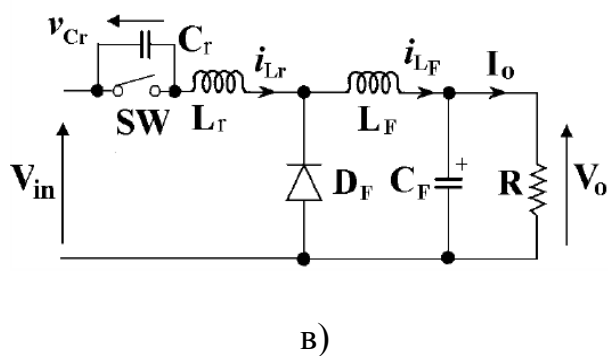


Рис. 1.2. Продовження

В паралельних ППН електронний ключ розміщений паралельно джерелу напруги та навантаженню (рис. 1.3). Основні принципи роботи, опис та розрахунки перелічених ППН знаходяться в [1-10].

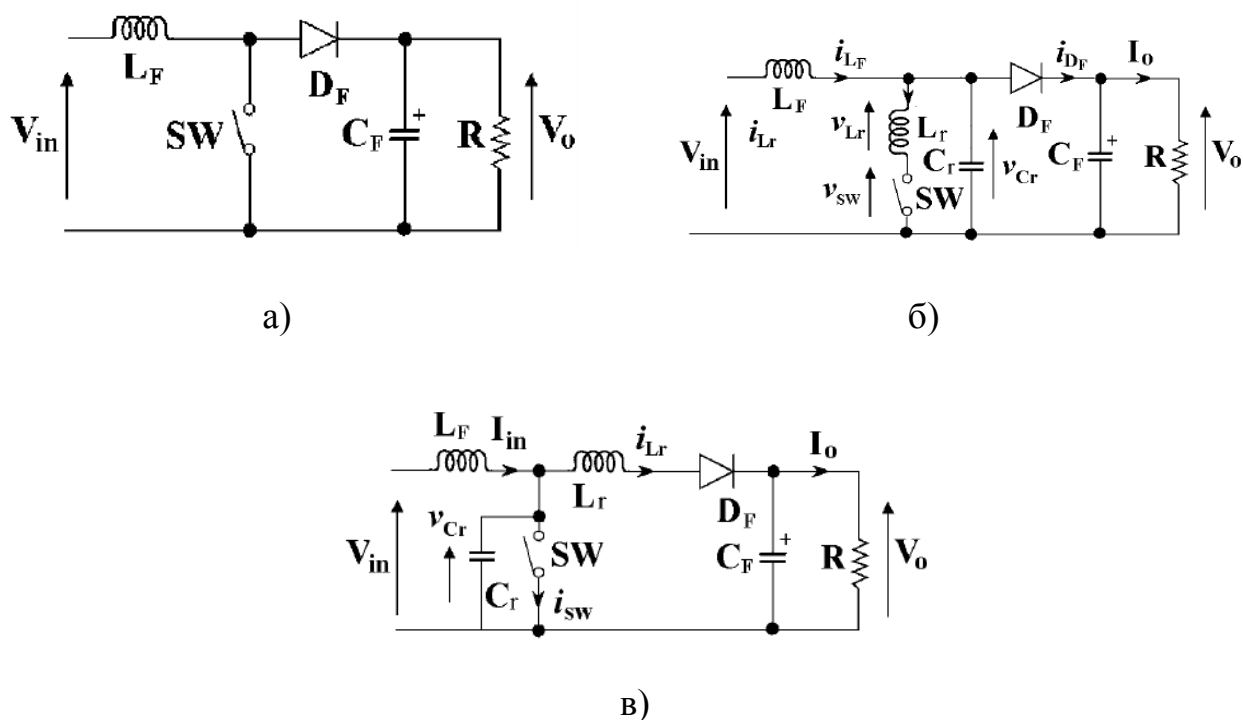


Рис. 1.3. Паралельні ППН: а) ПП з ШІМ; б) КРП-ПНС; в) КРП-ПНН

1.3 Порівняння різноманітних програмних пакетів моделювання електронних схем

1.3.1 PSIM (Powersim Inc.)

PSIM – це програмне забезпечення (ПЗ), призначене для моделювання схем силової електроніки та автоматичного керування для двигунів, що у

Демо-версії не потребує придбання ліцензії, а її можливостей достатньо для дослідження більшості простих електронних схем.

У PSIM використовується симулятор власної розробки, що оснований на методі дискретних моделей. Він відрізняється високою швидкістю, а його принцип роботи полягає у апроксимації диференціальних рівнянь у різнісні, які асоціюються з чисто резистивними схемами заміщення. Таким чином, на кожному кроці розрахунок перехідних процесів зводиться до розрахунку резистивних кіл за постійним струмом, тобто, алгебраїчних рівнянь.

Програмний пакет має вбудований інтерфейс роботи з MATLAB Simulink, тому частина схеми може бути побудована у PSIM. Зазвичай це стосується механічних систем, моделі яких у даному ПЗ більш точні. Тим не менш, при великій точності обчислень або довготривалому інтервалі моделювання файл з даними може займати великий об'єм на жорсткому диску, тому швидкість обробки результатів є досить низькою.

У своєму складі PSIM має декілька додаткових модулів, що можуть суттєво полегшити роботу. Digital Control Module містить вбудований компілятор C, дозволяє реалізувати алгоритм управління програмним кодом, а також додавати у схему такі дискретні елементи, як цифрові фільтри та блоки дискретизації. В свою чергу, Thermal Module є корисним доповненням при аналізі систем силової електроніки – з його допомогою досить легко обчислити втрати на напівпровідникових елементах як у сталому режимі, так і при перемиканні.

1.3.2 OrCAD PSpice/Capture (Cadence Design Systems)

OrCAD PSpice/Capture широко використовується у промисловості, оскільки має одну з кращих бібліотек напівпровідникових елементів, в яких враховано більшість паразитних ефектів. З 13 версії до складу продукту входить модуль SLPS, що дозволяє використовувати можливості MATLAB Simulink для реалізації систем керування, а у OrCAD 15.7 з'явився редактор моделей, де можна корегувати характеристики елементів.

Недоліком PSpice SLPS є те, що вся електронна схема повинна бути зібрана за допомогою даного програмного забезпечення, а у MATLAB користувач може тільки впливати на характеристики джерел енергії, які відіграють роль вхідних даних. Після отримання бажаних результатів симуляції можна згенерувати список з'єднань (netlist) та продовжити роботу над проектом у OrCAD Layout – редакторі топологій друкованих плат.

Програмний пакет підтримує три основні види аналізу:

- AC Sweep, що полягає у розрахунку частотних характеристик та рівнів шуму;

- DC Sweep – розрахунок режиму за постійним струмом при варіації одного або декількох джерел постійної напруги чи струму, температури, параметрів моделей компонентів схеми та глобальних параметрів;

- Time Domain (Transient) – розрахунок перехідних процесів, результатом якого є отримання часових характеристик роботи системи.

Якщо у моделях елементів вказано допуски, то можна виконати аналіз Монте-Карло, що обчислює реакцію схеми на випадкові зміни у величинах параметрів схеми.

Пакет PSpice AD включає передові технології для комплексного моделювання аналогових та змішаних аналого-цифрових схем. Програма відповідає усім вимогам розробників схем більшості електронних пристроїв – від джерел живлення, до високочастотних систем та невеликих мікросхем. Під час симуляції для розв'язання диференціальних рівнянь використовується наступні чисельні методи: трапецій, Гіра другого порядку та неявний метод Ейлера. Метод трапецій встановлений за замовчуванням, а його похибка обчислюється під час вибору максимального кроку моделювання вручну або автоматично в залежності від форми сигналів.

1.3.3 MATLAB Simulink (MathWorks, Inc.)

MATLAB Simulink набув найбільшої популярності у світі при аналізі систем силової електроніки В ньому реалізовано дві бібліотеки для роботи з електронними пристроями – SimPowerSystems та Simscape. До їхнього складу

входять моделі пасивних та активних електротехнічних елементів, джерел енергії, трансформаторів, електродвигунів та іншого обладнання. Комбінуючи їх можливості з іншими блоками 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 MATLAB є те, що складні схеми можна моделювати, поєднуючи методи імітаційного та структурного моделювання [11]. 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 даного математичного пакету суттєво спрощується обробка результатів моделювання.

Оскільки у SimPowerSystems не враховується вплив усіх паразитних ємностей між виводами польового транзистору [11], а керування відбувається логічним сигналом, для побудови моделей КРПІ ПНС та ІІІ використовували бібліотеку SimElectronics.

Simscape призначена, в першу чергу, для дослідження роботи механічних та гідравлічних систем, але також підходить для моделювання електронних схем. Стандартна модель транзистора у бібліотеці враховує вплив паразитних ємностей. У параметрах моделювання (Solver options) обрали метод трапецій з інтерполяцією ode23t, рекомендований до застосування при аналізі електронних схем.

1.4 Висновки

У даному розділі розглянуто призначення та особливості побудови імпульсних перетворювачів постійної напруги. Окремо розглянуто різновиди таких перетворювачів.

Проведено порівняння трьох різних пакетів для моделювання електричних схем. Визначено, що найкращим серед таких пакетів є MATLAB Simulink.

2 РОЗРАХУНОК КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮЧАХ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО АЛГОРИТМУ

Розрахунок електромагнітних та енергетичних процесів в перетворювачах проводився за узагальненим методом розрахунку комутаційних процесів в імпульсних колах, який детально описаний в [12-21].

2.1 Розрахунок комутаційних процесів в паралельному імпульсному перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією

Електрична схема перетворювача наведена на рис. 2.1

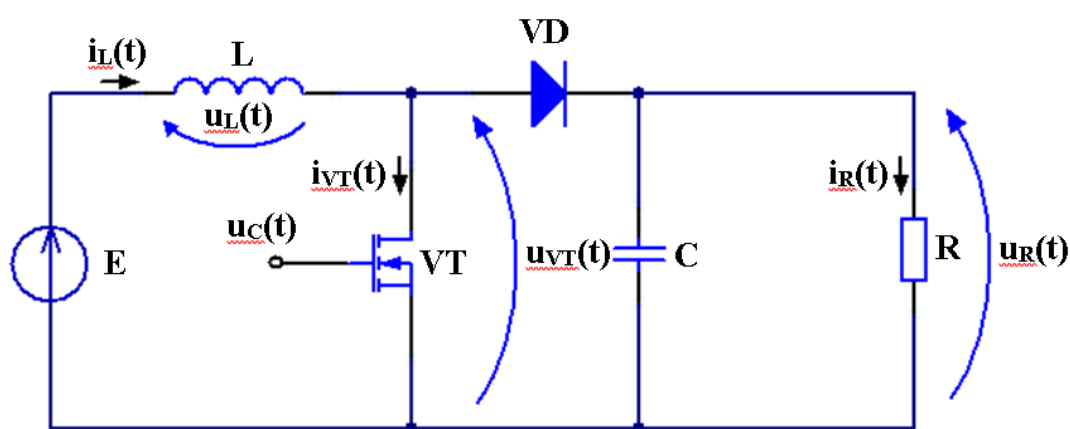


Рис. 2.1. Схема паралельного ІП з ШІМ

Теоретичні часові діаграми роботи транзисторного ключа наведені на рис. 2.2.

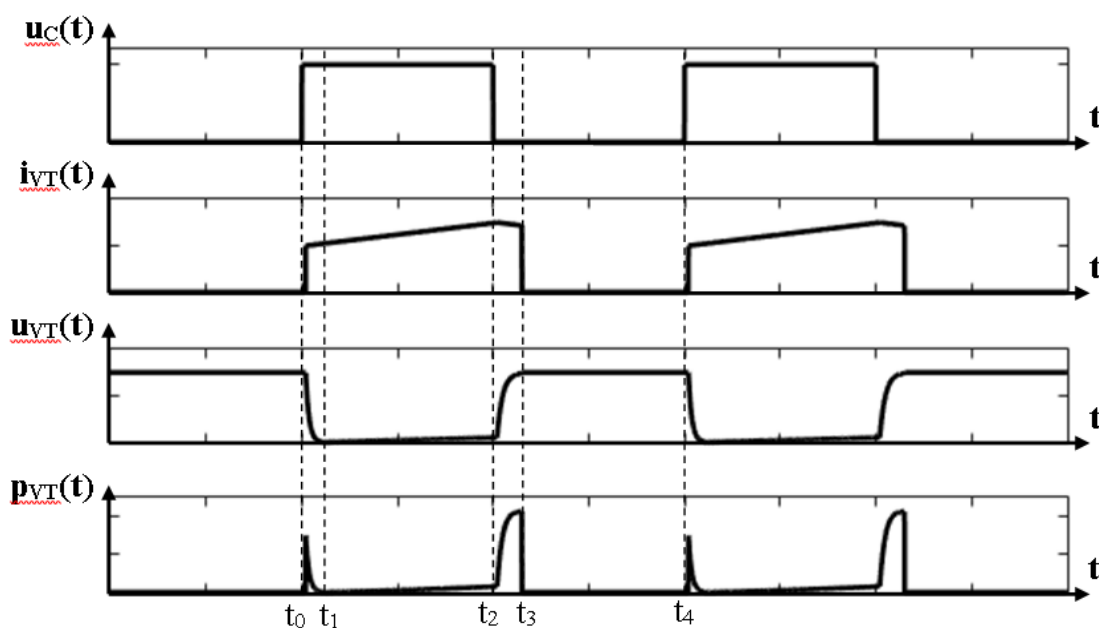


Рис. 2.2. Теоретичні часові діаграми роботи транзисторного ключа в ІП з ШІМ

Згідно узагальненого методу розрахунку комутаційних процесів розбиваємо період роботи перетворювача на інтервали комутації транзисторного ключа VT:

- 1) t_0-t_1 – інтервал відкриття VT;
- 2) t_1-t_2 – інтервал відкритого стану VT;
- 3) t_2-t_3 – інтервал закривання VT;
- 4) t_3-t_4 – інтервал закритого стану VT.

2.1.1 Розрахунок на інтервалі відкриття транзисторного ключа VT

$(t_0 - t_1)$

На рис. 2.3 наведена операторна схема заміщення для інтервалу відкриття VT.

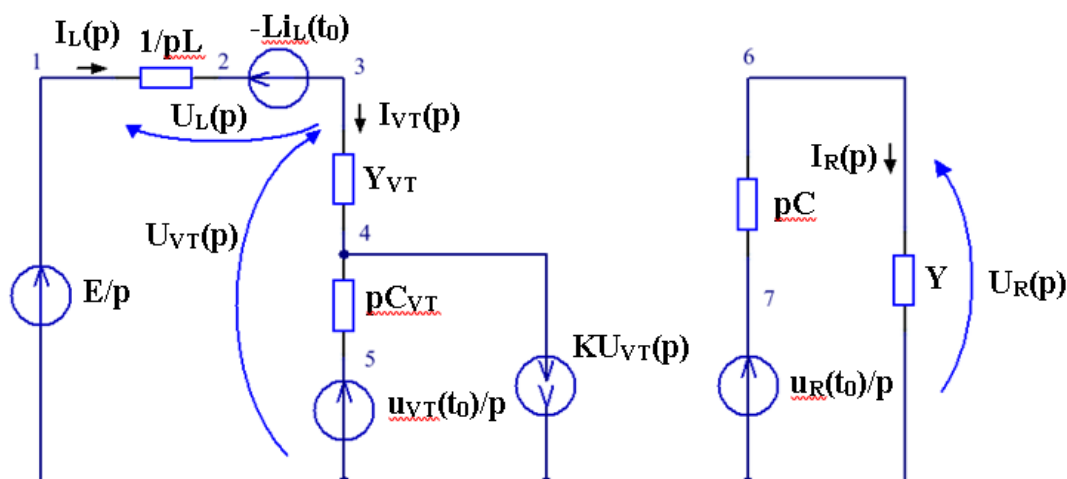


Рис. 2.3. Операторна схема заміщення для інтервалу відкриття VT

Для даної операторної схеми складаємо матрицю провідностей, вектор-стовпець невідомих напруг та вектор-стовпець задаючих струмів.

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{VT} + \frac{1}{pL} & -Y_{VT} & 0 \\ -Y_{VT} + K & pC_{VT} + Y_{VT} & 0 \\ 0 & 0 & pC + Y \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} U3(p) \\ U4(p) \\ U6(p) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{E}{p^2 L} + \frac{i_L(t_0)}{p} \\ u_{VT}(t_0)C_{VT} \\ u_R(t_0)C \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Розв'язавши матричне рівняння відносно невідомих напруг, отримуємо операторні зображення необхідних струмів та напруг перетворювача.

$$U_L(p) = \frac{pLC_{VT}(Y_{VT}(E - u_{VT}(t_0)) - i_L(t_0)) + L(EKY_{VT} - C_{VT}i_L(t_0))}{p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT}}; \quad (4)$$

$$U_{VT}(p) = \frac{p^2LC_{VT}(Y_{VT}u_{VT}(t_0) + i_L(t_0)) + p(LY_{VT}i_L(t_0) + EC_{VT}) + EY_{VT}}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (5)$$

$$U_R(p) = \frac{u_R(t_0)C}{pC + Y}; \quad (6)$$

$$I_L(p) = \frac{Y_{VT}(p^2LC_{VT}i_L(t_0) + p(KLi_L(t_0) + C_{VT}(E - u_{VT}(t_0))) + EK)}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (7)$$

$$I_{VT}(p) = \frac{Y_{VT}(p^2LC_{VT}i_L(t_0) + p(KLi_L(t_0) + C_{VT}(E - u_{VT}(t_0))) + EK)}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (8)$$

$$I_R(p) = \frac{u_R(t_0)CY}{pC + Y}. \quad (9)$$

Застосувавши до отриманих виразів зворотнє перетворення Лапласа, отримуємо аналітичні вирази для струмів та напруг в часовій області в загальному вигляді (додаток Б).

Кінець інтервалу t_1 визначається з умови:

$$\left. \frac{du_{VT}(t)}{dt} \right|_{t=t_1} = 0. \quad (10)$$

2.1.2 Розрахунок на інтервалі відкритого стану транзисторного ключа VT ($t_1 - t_2$)

На рис. 2.4 наведена операторна схема заміщення для інтервалу відкритого стану VT.

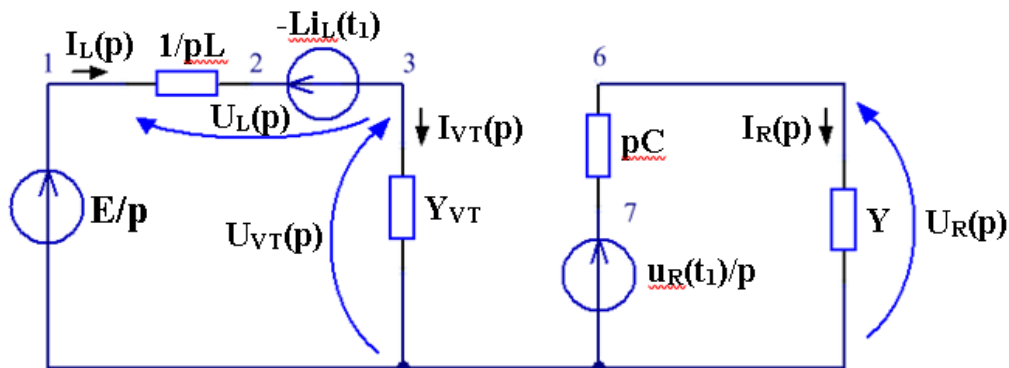


Рис. 2.4. Операторна схема заміщення для інтервалу відкритого стану VT

Розрахунок проводимо аналогічно попередньому інтервалу. Для інтервалу відкритого стану отримуємо операторні вирази напруг та струмів.

$$U_L(p) = \frac{L(EY_{VT} - i_L(t_1))}{pLY_{VT} + 1}; \quad (11)$$

$$U_{VT}(p) = \frac{pLi_L(t_1) + E}{p(pLY_{VT} + 1)}; \quad (12)$$

$$U_R(p) = \frac{u_R(t_1)C}{pC + Y}; \quad (13)$$

$$I_L(p) = \frac{pLY_{VT}i_L(t_1) + EY_{VT}}{p(pLY_{VT} + 1)}; \quad (14)$$

$$I_{VT}(p) = \frac{pLY_{VT}i_L(t_1) + EY_{VT}}{p(pLY_{VT} + 1)}; \quad (15)$$

$$I_R(p) = \frac{u_R(t_1)CY}{pC + Y}. \quad (16)$$

Вирази напруг та струмів в часовій області наведені в додатку Б.

Кінець інтервалу відкритого стану транзисторного ключа t_2 відповідає закінченню імпульсу керування.

2.1.3 Розрахунок на інтервалі закривання транзисторного ключа VT ($t_2 - t_3$)

На рис. 2.5 наведена операторна схема заміщення для інтервалу закривання VT.

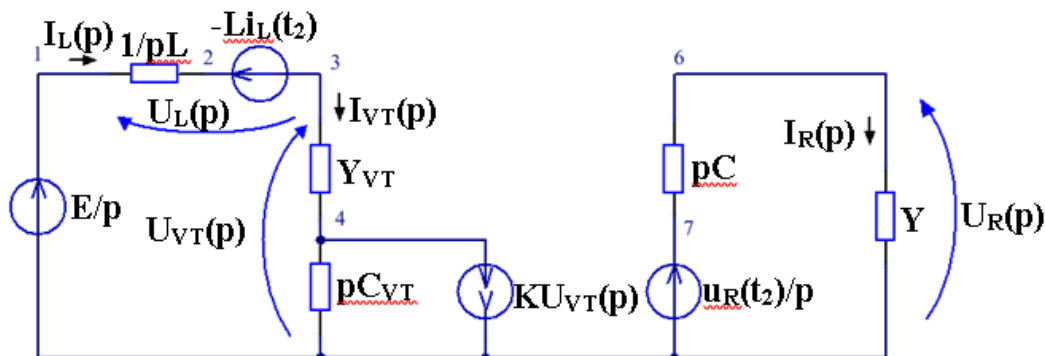


Рис. 2.5. Операторна схема заміщення для інтервалу закривання VT

Розрахунок проводимо аналогічно попереднім інтервалам. Для інтервалу закривання отримуємо операторні вирази напруг та струмів.

$$U_L(p) = \frac{pLC_{VT}(Y_{VT}E - i_L(t_2)) + LY_{VT}(EK - i_L(t_2))}{p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT}}; \quad (17)$$

$$U_{VT}(p) = \frac{p^2LC_{VT}i_L(t_2) + p(LY_{VT}i_L(t_2) + EC_{VT}) + EY_{VT}}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (18)$$

$$U_R(p) = \frac{u_R(t_2)C}{pC + Y}; \quad (19)$$

$$I_L(p) = \frac{Y_{VT}(p^2LC_{VT}i_L(t_2) + p(KLi_L(t_2) + C_{VT}E) + EK)}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (20)$$

$$I_L(p) = \frac{Y_{VT}(p^2LC_{VT}i_L(t_2) + p(KLi_L(t_2) + C_{VT}E) + EK)}{p(p^2LY_{VT}C_{VT} + p(KLY_{VT} + C_{VT}) + Y_{VT})}; \quad (21)$$

$$I_R(p) = \frac{u_R(t_2)CY}{pC + Y}. \quad (22)$$

Вирази напруг та струмів в часовій області наведені в додатку Б.

Кінець інтервалу закривання транзисторного ключа t_3 визначаємо за умовою:

$$u_{VT}(t_3) = u_R(t_3). \quad (23)$$

2.1.4 Розрахунок на інтервалі закритого стану транзисторного ключа VT ($t_3 - t_4$)

На рис. 2.6 наведена операторна схема заміщення для інтервалу закритого стану VT.

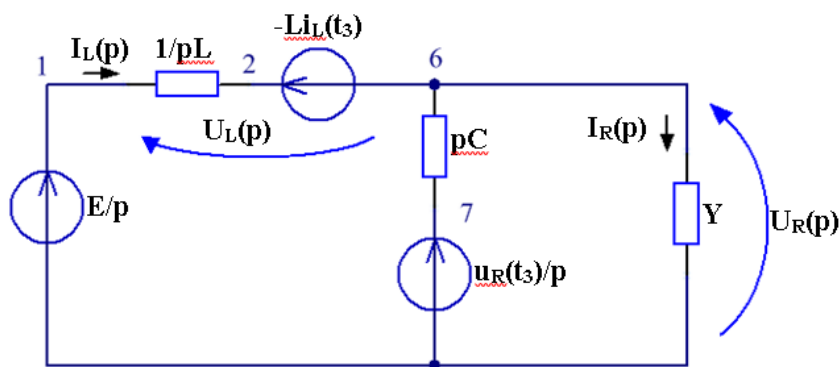


Рис. 2.6. Операторна схема заміщення для інтервалу закритого стану VT

Розрахунок проводимо аналогічно попереднім інтервалам. Для інтервалу закритого стану отримуємо операторні вирази напруг та струмів.

$$U_L(p) = \frac{L(pC(E - u_R(t_3)) + EY - i_L(t_3))}{p^2LC + pLY + 1}; \quad (24)$$

$$U_{VT}(p) = \frac{p^2LCu_R(t_3) + pLi_L(t_3) + E}{p(p^2LC + pLY + 1)}; \quad (25)$$

$$U_R(p) = \frac{p^2LCu_R(t_3) + pLi_L(t_3) + E}{p(p^2LC + pLY + 1)}; \quad (26)$$

$$I_L(p) = \frac{p^2LCi_L(t_3) + p(LYi_L(t_3) + C(E - u_R(t_3))) + EY}{p(p^2LC + pLY + 1)}; \quad (27)$$

$$I_{VT}(p) = 0; \quad (28)$$

$$U_R(p) = \frac{Y(p^2 LC u_R(t_3) + p L i_L(t_3) + E)}{p(p^2 LC + pLY + 1)}; \quad (29)$$

Вирази напруг та струмів в часовій області наведені в додатку Б.

Кінець інтервалу відкритого стану транзисторного ключа t_4 відповідає початку наступного імпульсу керування.

2.2 Розрахунок комутаційних процесів в паралельному квазірезонансному перетворювачі, що перемикається при нульовому струмі

Електрична схема паралельного КРІП-ПНС з паралельним резонансним контуром наведена на рис. 2.7.

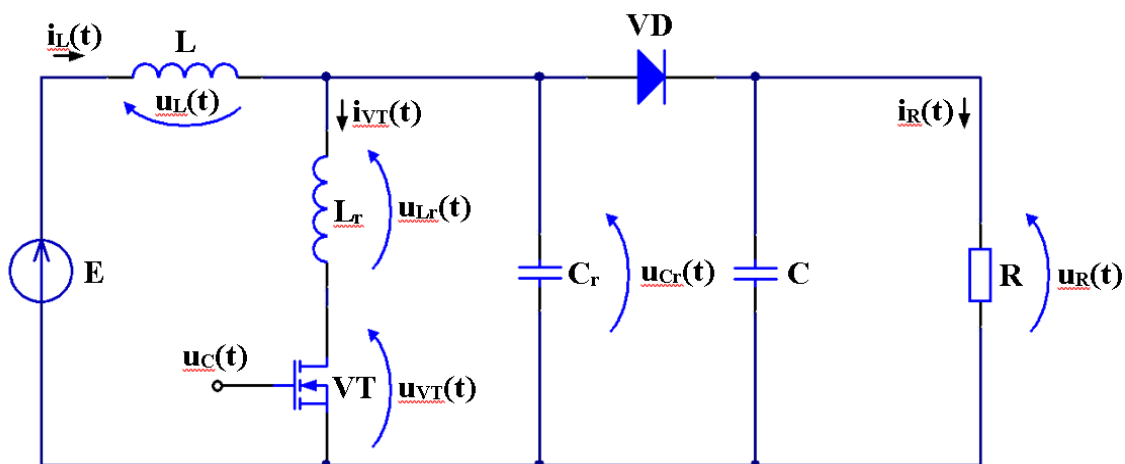


Рис. 2.7. Схема паралельного КРІП-ПНС з паралельним резонансним контуром

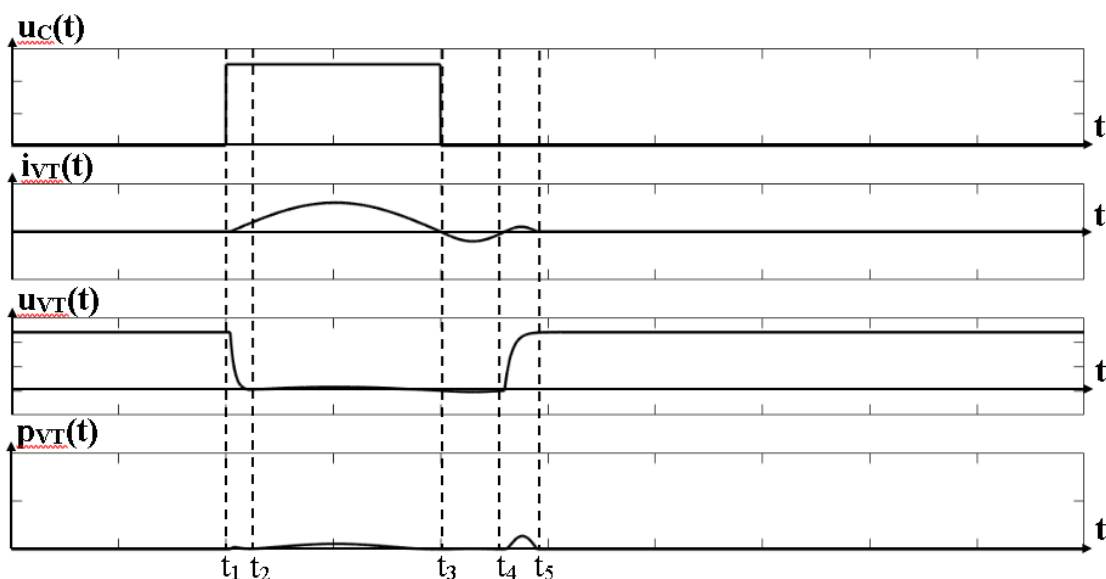


Рис. 2.8. Теоретичні часові діаграми роботи транзисторного ключа в паралельному КРІП-ПНС

Розрахунок електромагнітних процесів в КРПП проводився аналогічно ІІ. В даній роботі він не приводиться в зв'язку з обмеженим обсягом роботи.

2.3 Висновки

У даному розділі було показано процес розрахунку електромагнітних процесів в ІІ та КРПП за узагальненим методом розрахунку комутаційних процесів в імпульсних колах.

Було приведено операторні схеми заміщення, що використовувалися під час розрахунків, відповідні їм матриці та вектори, результати розрахунків у вигляді операторних зображень та виразів в часовій області для напруг та струмів перетворювачів.

3 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ В РОЗРОБЛЕНІЙ ПРОГРАМНІЙ СИСТЕМІ ТА ПАКЕТІ MATLAB SIMULINK

3.1 Моделювання паралельного імпульсного перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією

В таблиці 3.1 наведені параметри паралельного ІІ, які використовувалися для розрахунку, як в розробленій програмній системі, так і в MATLAB моделі.

Таблиця 3.1

Параметри імпульсного перетворювача

Назва параметру	Позначення	Величина	Одиниця виміру
1	2	3	4
Вхідна напруга	E	30	В
Період роботи транзисторного ключа	T	10	мкс
Частота роботи транзисторного ключа	f	100	кГц
Тривалість імпульсу керування	τ	5	мкс
Опір навантаження	R	100	Ом
Фільтруюча ємність	C	1	мкФ

Продовження

1	2	3	4
Накопичувальна індуктивність	L	62.5	мкГн
Опір каналу транзистора	R_{VT}	0.25	Ом
Паразитна ємність «стік-витік»	C_{VT}	$94 \cdot 10^4$	пФ
Коефіцієнт	K	$3 \cdot 10^{-8} \dots 4$	-

На рис. 3.1 наведений вигляд схеми паралельного ІП в розробленій ПС.

На рис. 3.2 наведена модель складена в MATLAB Simulink.

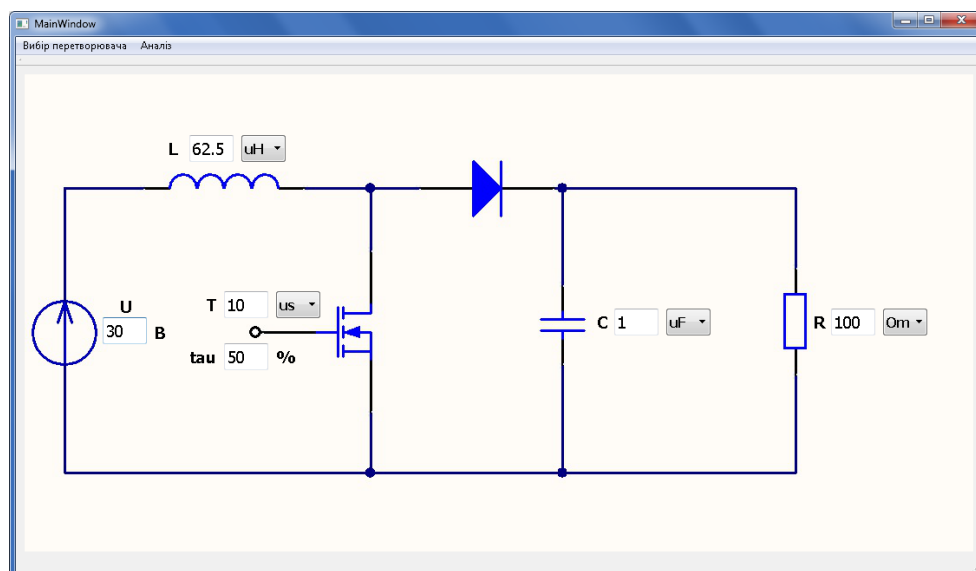


Рис. 3.1. Схема паралельного ІП в розробленій ПС

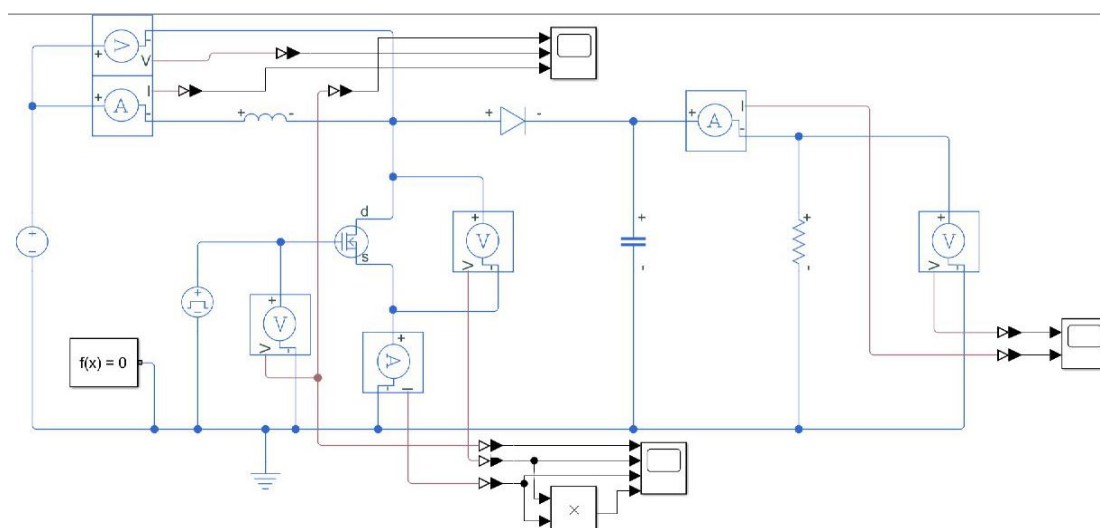
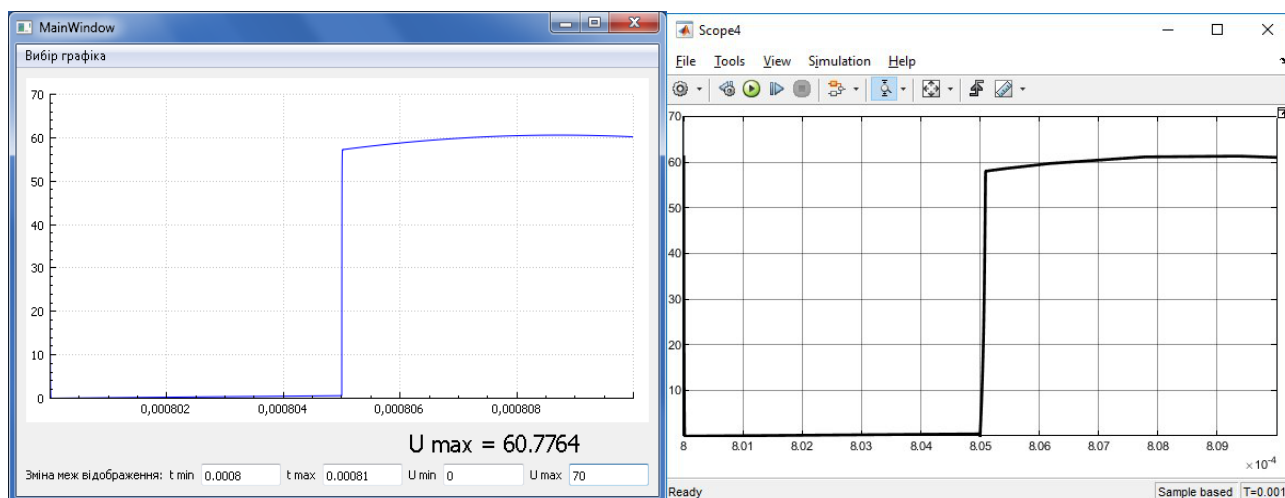


Рис. 3.2. Модель паралельного ІП в MATLAB Simulink

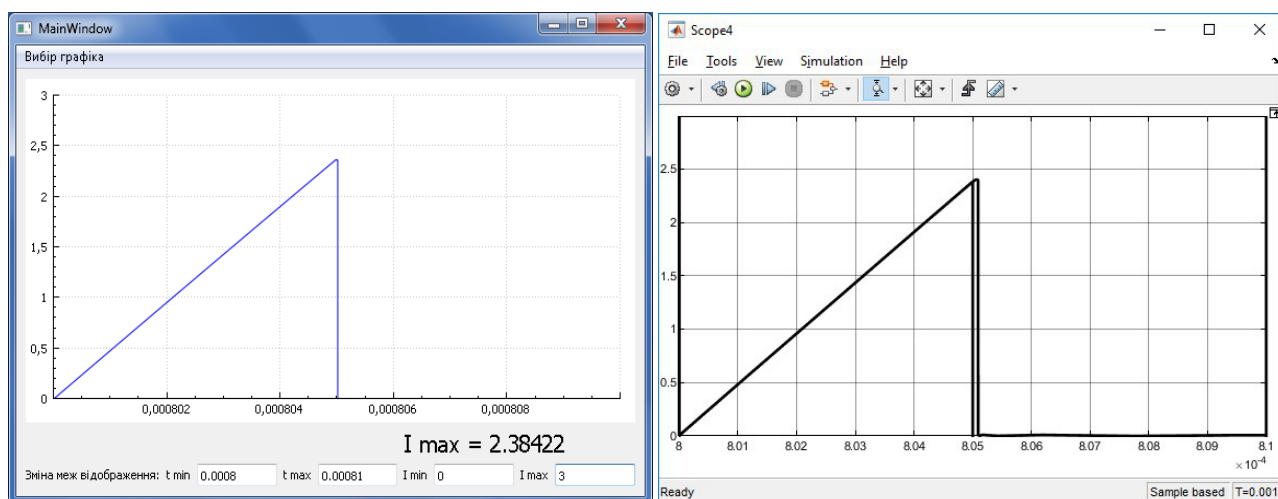
На рис. 3.3-3.4 наведені часові діаграми роботи транзисторного ключа VT в паралельному ПП з ШІМ у встановленому режимі на одному повному періоді.



а)

б)

Рис. 3.3. Напруга на транзисторі: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink



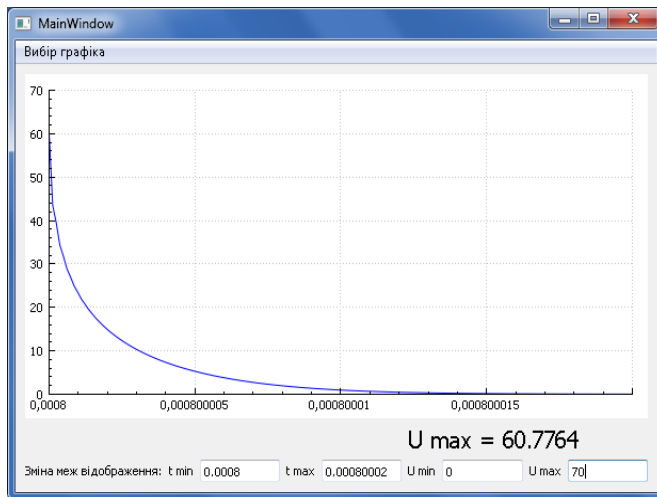
а)

б)

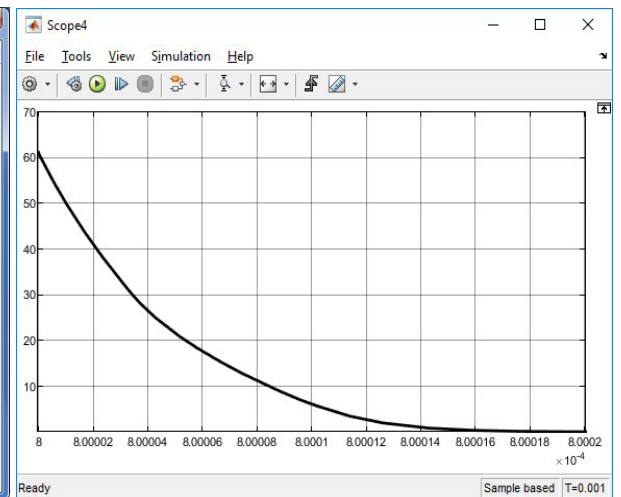
Рис. 3.4. Струм через транзистор: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

Як бачимо, форми та величини часових діаграм напруги на транзисторі та струму через транзистор отримані в розробленій ПС та в MATLAB Simulink дуже близькі. Для більш точного порівняння розглянемо часові діаграми окремо на кожному інтервалі комутації.

На рис. 3.5-3.8 наведені часові діаграми напруги на транзисторі для кожного інтервалу комутації отримані в розробленій ПС та в MATLAB Simulink.

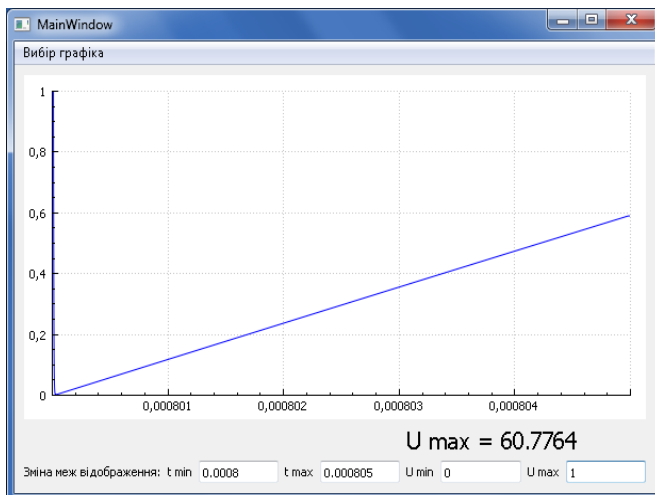


а)

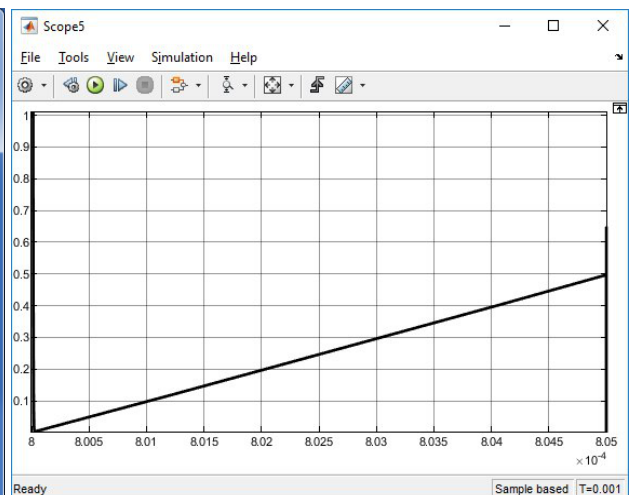


б)

Рис. 3.5. Інтервал відкриття транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink



а)



б)

Рис. 3.6. Інтервал відкритого стану транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

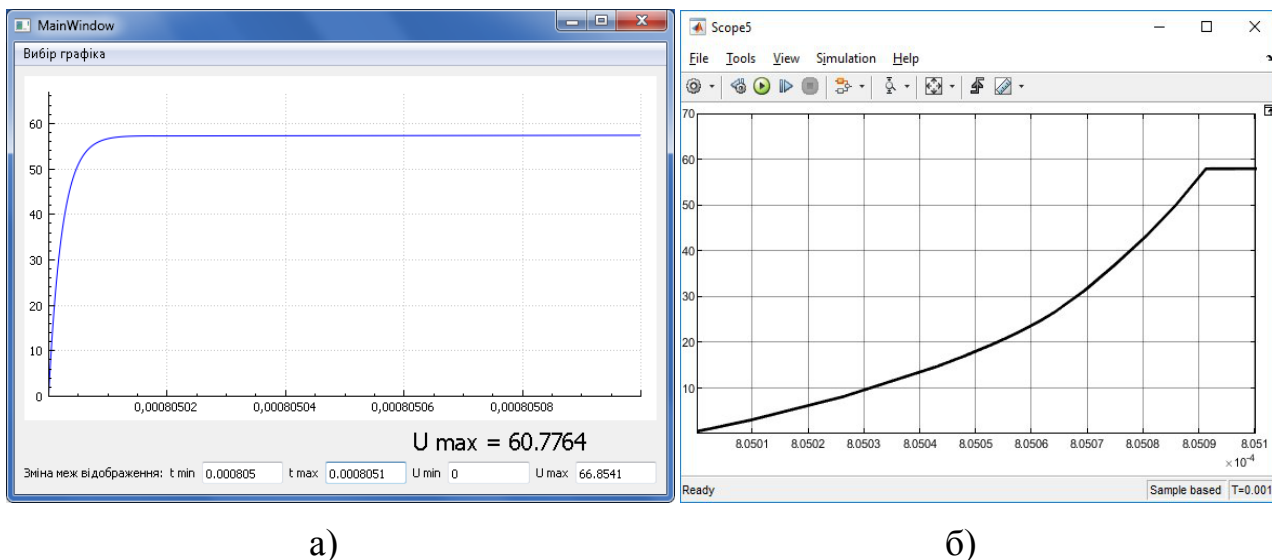


Рис. 3.7. Інтервал закривання транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

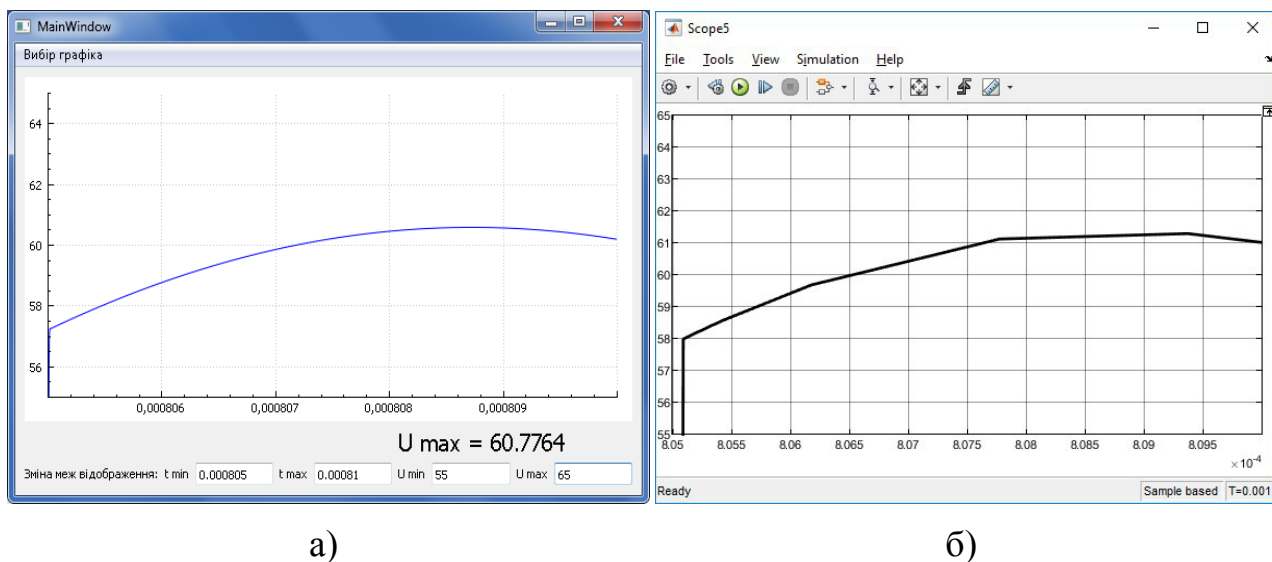


Рис. 3.8. Інтервал закритого стану транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

Як бачимо, загалом результати схожі, але є деякі відмінності. На інтервалі відкривання відрізняється час відкривання транзисторного ключа: приблизно 10 нс в розробленій ПС та приблизно 15 нс в MATLAB Simulink (різниця 50%). На інтервалі відкритого стану відрізняється значення напруги в кінці інтервалу: 0.5 В в розробленій ПС та 0.6 В в MATLAB Simulink (різниця 20%). На інтервалі закривання наявна велика невідповідність форми напруги та часу закривання в MATLAB Simulink, результат розробленої ПС відповідає теорії. На інтервалі закритого стану суттєвої різниці немає. Визначити яка з програм і

на якому інтервалі дає більш точний результат буде можливим лише після проведення експериментальних досліджень.

3.2 Моделювання паралельного квазірезонансного перетворювача, що перемикається при нульовому струмі, з паралельним резонансним контуром

В таблиці 3.3 наведені параметри паралельного КРІП-ПНС, які використовувалися для розрахунку, як в розробленій програмній системі, так і в MATLAB моделі.

Таблиця 3.2

Параметри квазірезонансного перетворювача

Назва параметру	Позначення	Величина	Одиниця виміру
1	2	3	4
Вхідна напруга	E	15	В
Період роботи транзисторного ключа	T	20	мкс
Частота роботи транзисторного ключа	f	50	кГц
Тривалість імпульсу керування	τ	1.35	мкс
Опір навантаження	R	20	Ом
Фільтруюча ємність	C	22	мкФ
Накопичувальна індуктивність	L	1	мГн
Резонансна ємність	C_r	27	нФ
Резонансна індуктивність	L_r	5.2	мкГн
Опір каналу транзистора	R_{VT}	0.25	Ом
Паразитна ємність «стік-витік»	C_{VT}	320	пФ

На рис. 3.9 наведений вигляд схеми паралельного КРІП-ПНС в розробленій ПС. На рис. 3.10 наведена модель складена в MATLAB Simulink.

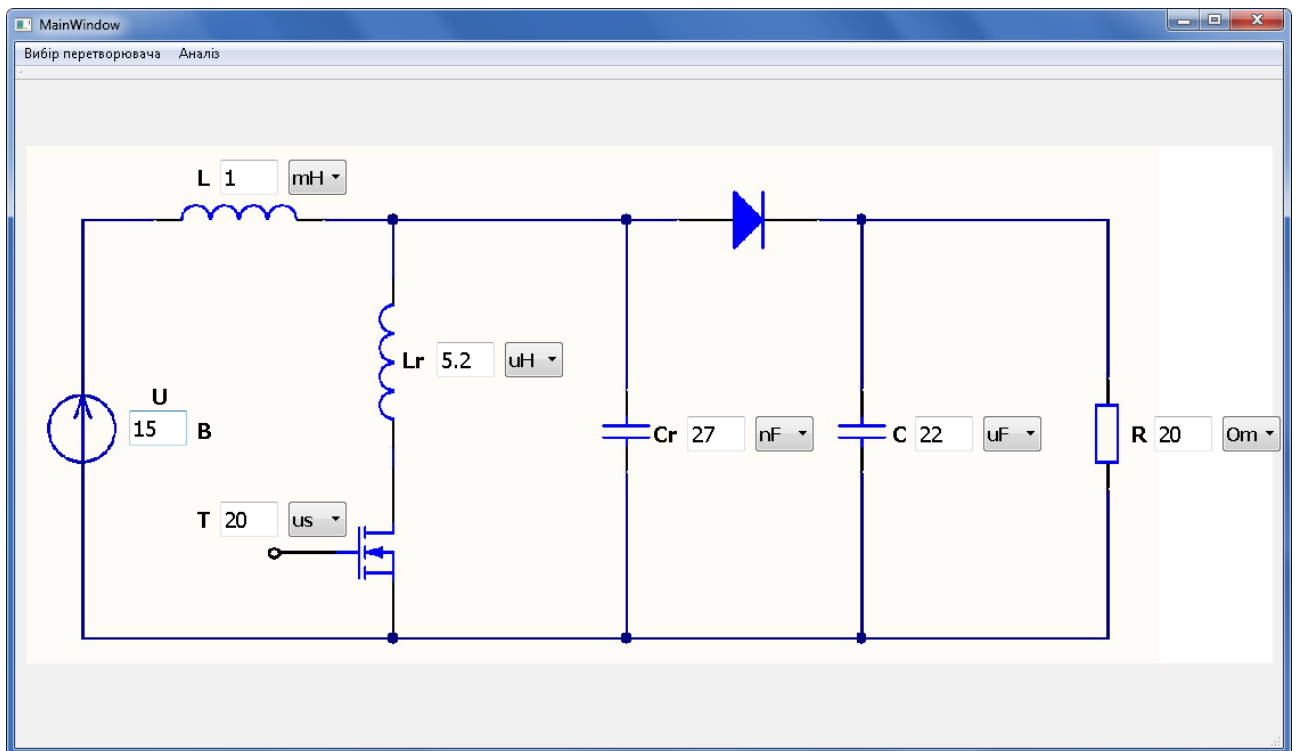


Рис. 3.9. Схема паралельного КРП-ПНС в розробленій ПС

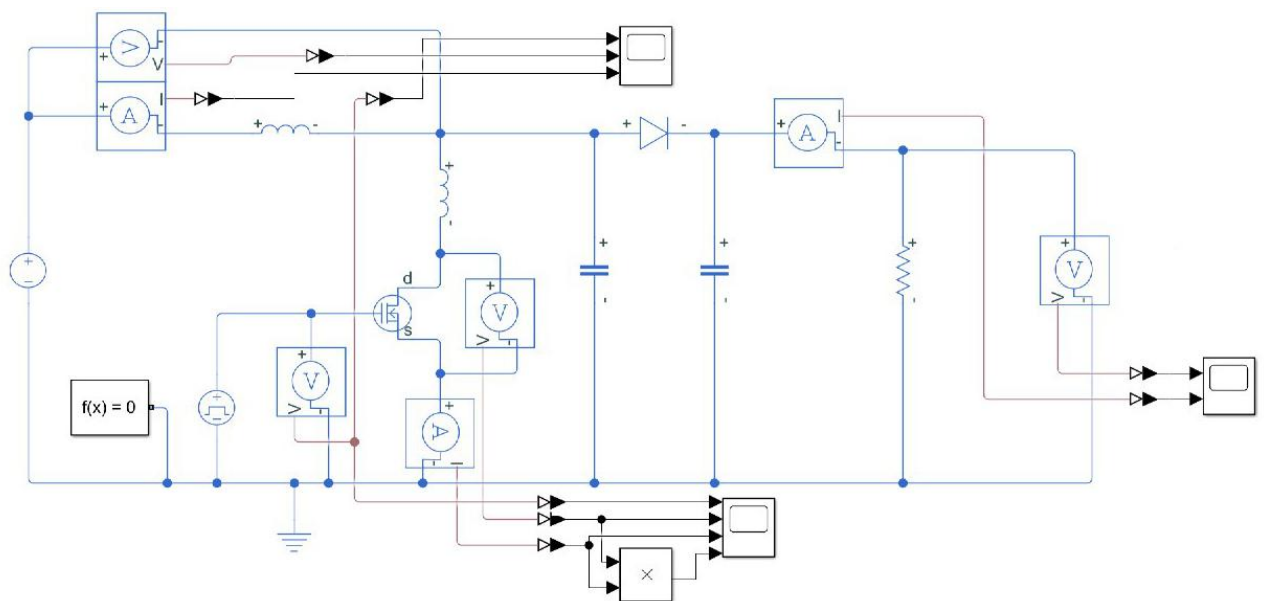


Рис. 3.10. Модель паралельного КРП-ПНС в MATLAB Simulink

На рис. 3.11-3.12 наведені часові діаграми роботи транзисторного ключа VT в КРП-ПНС на одному повному періоді роботи перетворювача.

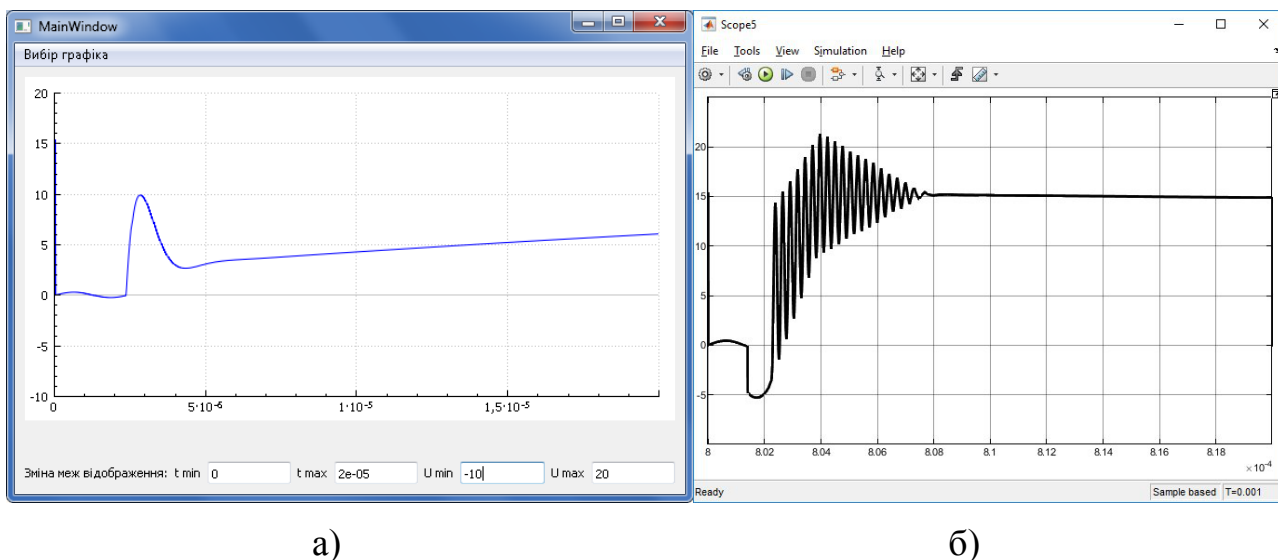


Рис. 3.11. Напруга на транзисторі: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

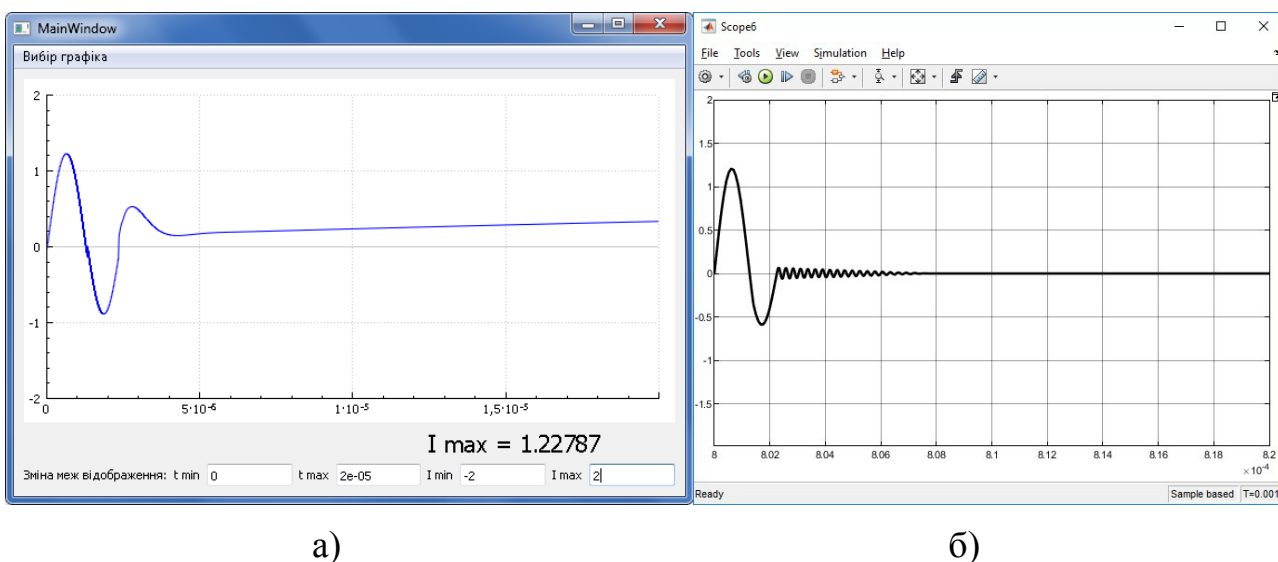
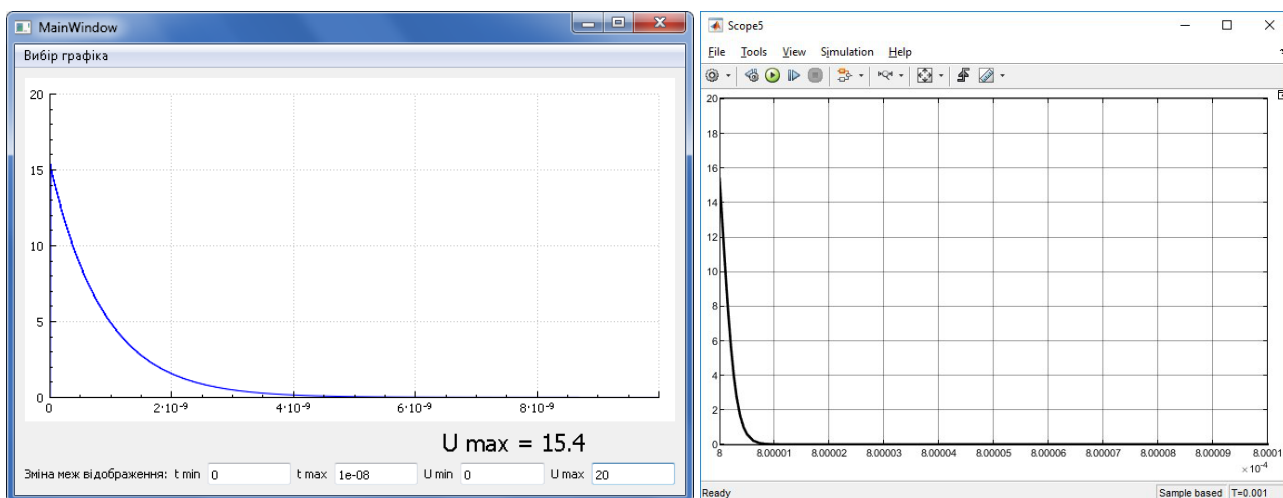


Рис. 3.12. Струм через транзистор: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

Як бачимо, форми часових діаграм напруг та струмів для КРПІ відрізняються більше ніж для ПІ. Найбільша різниця наявна на інтервалі закривання та закритого стану. Це пояснюється тим, що представлена ПС ще знаходиться в процесі розробки. Розрахунок КРПІ ще не налаштований остаточно. Тому виникають помилки на інтервалі закривання та переходу до закритого стану. Це буде виправлено при подальшій роботі. Більше детально розглянемо інтервали, які працюють правильно.

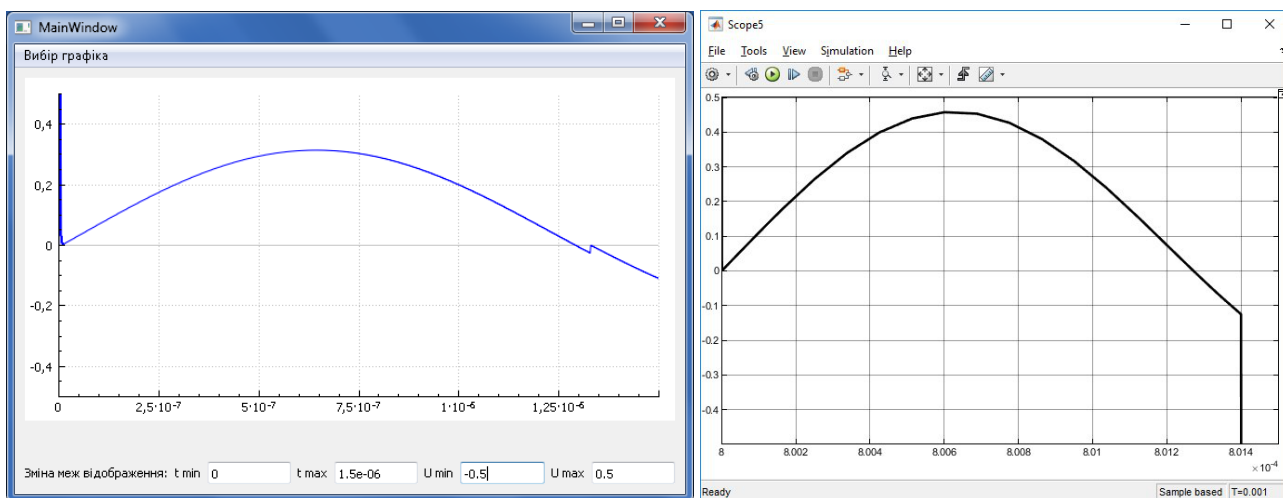
На рис. 3.13-3.15 наведені часові діаграми напруги на транзисторі для кожного інтервалу комутації отримані в розробленій ПС та в MATLAB Simulink.



а)

б)

Рис. 3.13. Інтервал відкриття транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

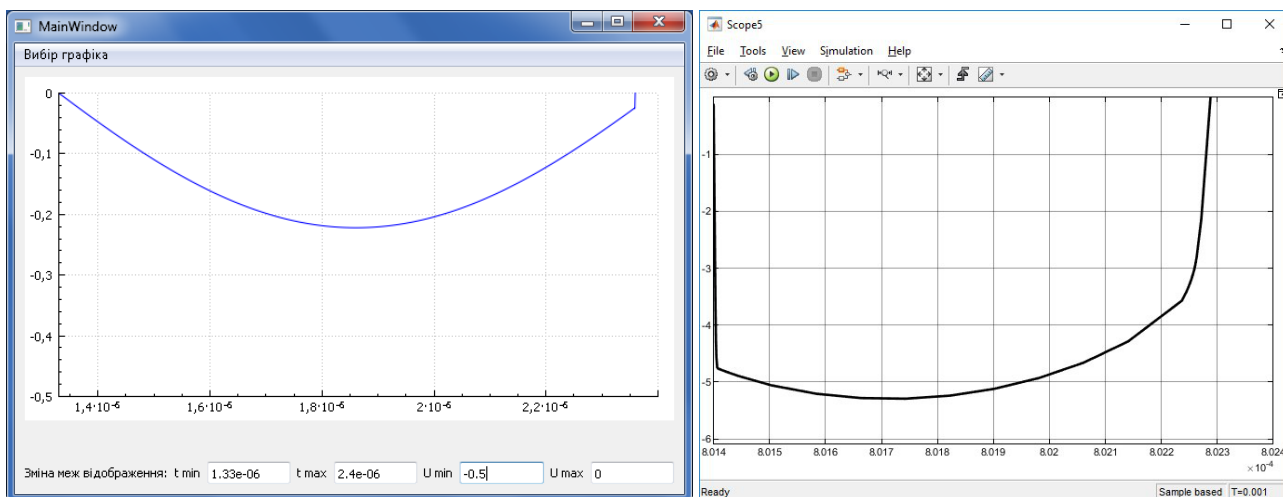


а)

б)

Рис. 3.14. Інтервал відкритого стану транзистора, струм протікає через канал транзистора: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

Як бачимо, на перших двох інтервалах форми та величини напруги близькі. Як і для ІІІ відрізняється час відкриття та величина напруги у відкритому стані.



а)

б)

Рис. 3.15. Інтервал відкритого стану транзистора, струм протікає через зворотній діод: а) в розробленій ПС; б) в MATLAB Simulink

На третьому інтервалі в MATLAB моделі наявний стрибок напруги, відсутній в розробленій ПС. Можливо він виник через вимикання транзистора не при нульовому струмі. Визначити яка з програм дає більш правильний результат стане можливо після проведення експериментальних досліджень.

Розглядати окремо інтервал закривання немає сенсу, адже відмінності на цьому інтервалі добре видно і на загальних часових діаграмах (рис. 3.11).

3.3 Висновки

В даному розділі було проведено моделювання роботи двох перетворювачів (ПІ з ШІМ та КРІП-ПІНС) в розробленій ПС та в MATLAB Simulink. Було отримано часові діаграми роботи цих перетворювачів та проведено їх порівняння.

Здебільшого результати є схожими, що доводить правильність роботи розробленої ПС. Подальша перевірка буде проводитися вже після отримання результатів експериментальних досліджень. Всі помилки розрахунків розробленої ПС будуть виправлені в майбутньому.

ВИСНОВКИ

За результатами роботи зроблені наступні висновки:

- 1) був проведений детальний огляд існуючих пакетів моделювання електронних схем з аналізом їх переваг та недоліків;
- 2) за результатом аналізу пакетів моделювання доведено, що найкращим є MATLAB Simulink;
- 3) розроблено спеціалізоване програмне забезпечення на основі мови програмування C++ за допомогою середовища Qt Creator, яке не потребує ліцензування;
- 4) розроблене програмне забезпечення дозволяє моделювати роботу паралельних імпульсного та квазірезонансного перетворювачів з урахуванням паразитних параметрів транзисторних ключів;
- 5) проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку розробленої програмної системи та моделювання в пакеті MATLAB Simulink та показано, що показало відповідність результатів;
- 6) дане програмне забезпечення впроваджено в початковий процес *Активатор*, що підтверджується відповідним актом (додаток А);
- 7) дане програмне забезпечення розроблялося в рамках виконання науково-дослідної роботи «Системи електроприводів з покращеними енергетичними та динамічними характеристиками для спеціальних застосувань» (держ. рег. номер 0119U000421).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Денисов Ю. А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно–импульсными и частото–импульсными квазирезонансными преобразователями. / Ю. А. Денисов – Киев: Изд. Института электродинамики НАН Украины, 2001. – 146 с.
- 2) Новский В.А., Жарский Б.К., Козлов А.В. и др. Гармонический синтез рядов Фурье для анализа электромагнитных процессов в цепях с полупроводниковыми ключевыми элементами. // Технічна електродинаміка, тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність» – 2012.–Част. 4. – С.193-197.
- 3) Денисов Ю. О. Системы перетворювальної техніки: [навчальний посібник]/ Денисов Ю.О. – Чернигов : Чернігівський національний технологічний університет, 2014. – 171 с.
- 4) Семенов В. Сертификация радиоэлектронной аппаратуры на соответствие требованиям электромагнитной совместимости / В. Семенов // CHIP NEWS Украина. – 2004. – №3. – С. 58–61.
- 5) Семенов В. Сертификация радиоэлектронной аппаратуры на соответствие требованиям электромагнитной совместимости. Часть 2 / В. Семенов // CHIP NEWS Украина.– 2004. – №5. – С. 9–15.
- 6) Семенов В. Сертификация радиоэлектронной аппаратуры на соответствие требованиям электромагнитной совместимости. Часть 3 / В. Семенов // CHIP NEWS Украина.– 2004. – №6. – С. 18–21.
- 7) Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи / Воронин П.А. – М.: Издательский дом «Додека – XXI», 2001. – 384с.
- 8) Терещенко Т. А., Ямненко Ю. С., Пичкалєв Е. С., Ушаков Д. Р. Исследование преобразователя понижающего типа, инвариантного ко входным возмущениям // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №2. – С. 155-158.

9) Смикун А. І. Удосконалене лабораторне джерело живлення з регулюванням вихідної напруги та високочастотним квазірезонансним імпульсним стабілізатором / А.І. Смикун, *Активатор, Активатор* // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: тези доповіді. — Чернігів, 2018.

10) *Активатор, Активатор* Transistor switches Quasi-Control in Quasi-Resonant Pulse Converters. Proc. IEEE 39th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO 2019. Kyiv, Ukraine. (SCOPUS).

11) Денисов Ю. О. Моделирование процессов коммутации в КРИП ПНТ с учетом паразитных параметров / Ю. О. Денисов, *Активатор*, О. В. Савченко // Технічна електродинаміка. — 2008. — Ч. 1. — С. 87-90. Темат. вип.

12) Денисов Ю. О. Розрахунок інтегральної потужності розсіювання в силових ключах ШПП / Ю. О. Денисов, *Активатор*, О. М. Зозуля // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. — 2009. — №40. — С. 213-222.

13) *Активатор* Порівняльна оцінка енергетичної ефективності імпульсних перетворювачів з квазірезонансними та звичайними ключами за результатами моделювання / *Активатор*, В. В. Гордієнко, Б. І. Чуб // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. — 2012. — №4(61). — С. 222-231.

14) Denisov Y. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit / Denisov Y., *Активатор*, Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. // International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE, 2016. – P. 327-332.

15) Denisov Y., Power losses in MOSFET switch of quasi-resonant pulse converter with series resonant circuit / Denisov Y., Gordienko V., *Активатор*, Stepenko S., Yershov R., Prokhorova A., Kostyrieva O. // 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2016. - P. 1-6.

16) Денисов Ю. А. Сравнение потерь мощности в ключах повышающих КРИП с параллельным и последовательным резонансными контурами / Ю. А. Денисов, *Активатор*, В. В. Гордиенко, С. А. Степенко, Р. Д. Ершов, Т. М. Теплая // Технічна електродинаміка. - 2016. - № 4. - С. 44-46.

17) Денисов Ю. А. Энергетические показатели параллельного импульсного квазирезонансного преобразователя с расширенным диапазоном регулирования для источников питания радиоэлектронной аппаратуры / Ю. А. Денисов, *Активатор*, В. В. Гордиенко, С. Н. Бойко, С. А. Степенко // Электроника и связь. — 2016. — Том 21, №5(94). — С. 169-175.

18) *Активатор* Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / *Активатор*, Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. – P. 232-235.

19) *Активатор* Розрахунок комутаційних процесів в імпульсних перетворювачах електроенергії. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2017): науково-практична конференція (м. Чернігів, 1 грудня 2017 р.): тези доповідей.- Чернігів: *Активатор*, 2017.- с. 82-85.

20) Денисов Ю.О. Оцінка параметрів і характеристик коректора коефіцієнта потужності на основі імпульсних та квазірезонансних перетворювачів електроенергії / Ю.О.Денисов, *Активатор*, В.В.Гордієнко, Л.В.Вершняк, *Активатор* // Технічна електродинаміка. – 2018.- №6.- с.38-41. (SCOPUS).

21) *Активатор* Розрахунок електромагнітних процесів в широтноімпульсному перетворювачі узагальненим методом вузлових напруг. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2018): науково-практична конференція (м. Чернігів, 12 грудня 2018 р.): тези доповідей.- Чернігів: *Активатор*, 2018.- с. 69-72.

Додаток А – Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор

**Активатор**

Новомлинцев Олег Олександрович

« 16 » 01 2019

АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи студента 1-го курсу магістратури [REDACTED] **Активатор**

[REDACTED] «Програмна система для дослідження електричних та енергетичних показників імпульсних перетворювачів».

Комісія в складі співробітників [REDACTED]

[REDACTED] начальника навчального відділу Базилевич Людмили Володимирівни, завідуючого кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки» [REDACTED] д.т.н., проф. Денисова Юрія Олександровича, завідуючого кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики» [REDACTED] к.т.н., доцент Приступи Анатолія Леонідовича, доцента кафедри «Електричні системи і мережі» [REDACTED] к.т.н., доцент Красножона Андрія Васильовича та старшого викладача кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки» [REDACTED] к.т.н.

[REDACTED] (наукового керівника цієї роботи) склала цей акт про впровадження у навчальний процес результатів науково-дослідної роботи [REDACTED] «Програмна система для дослідження електричних та енергетичних показників імпульсних перетворювачів» та встановила наступне:

- розроблена унікальна програмна система дозволяє розраховувати та відображати електричні та енергетичні параметри та характеристики імпульсних перетворювачів електроенергії;
- унікальність даної системи в тому, що вона основана на новому узагальненому методі розрахунку електричних та енергетичних

Додаток А - Продовження

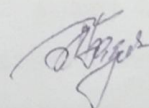
параметрів високочастотних імпульсних перетворювачів електроенергії з урахуванням паразитних параметрів елементів цих перетворювачів;

- крім того унікальністю даної системи є те, що вона написана мовою С++, завдяки чому її можна вільно використовувати в навчальних та наукових закладах;
- створений графічний інтерфейс дозволяє отримувати результати розрахунку в зручному числовому та графічному вигляді, крім того він дозволяє легко змінювати всі параметри перетворювача при дослідженні;
- ця програмна система використовується в навчальному процесі для бакалаврів та магістрів в дисциплінах «Перетворювальна техніка», «Енергетична електроніка» та «Системи перетворювальної техніки» на кафедрі електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки [REDACTED]

Комісія рекомендує використовувати дану програмну систему при проведенні навчальних занять серед студентів та аспірантів за напрямком «Електроніка» у вищих навчальних закладах.

Члени комісії:

Начальник навчального відділу



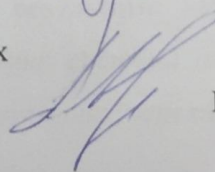
Базилевич Л.В.

Завідувач кафедри “Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки”, д.т.н., професор



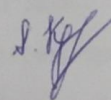
Денисов Ю. О.

Завідувач кафедри “Інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики”, к.т.н., доцент



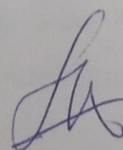
Пристапа А.Л.

Доцент кафедри “Електричні системи і мережі”
к.т.н., доцент



Красножон А.В.

Старший викладач кафедри “Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки” к.т.н.



[REDACTED]

Додаток Б – Вирази для напруг та струмів в загальному вигляді в часовій області

На інтервалі відкривання

$$i['L'](t) = i_{-l}(t)[1, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_L(t) = EK + & \left(((2C_{VT}(E - U_L(t_0)) + (-EK + i_L(t_0))KL)Y_{VT} - C_{VT}(EK \right. \\
 & \left. + i_L(t_0))) \right. \\
 & e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) \\
 & \left. \left/ \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} + (-EK \right. \right. \\
 & \left. \left. + i_L(t_0)) \right. \right. \\
 & \left. \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$i['VT'](t) = i_{-vt}(t)[1, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_{VT}(t) = EK + & \left(((2C_{VT}(E - U_L(t_0)) + (-EK + i_L(t_0))KL)Y_{VT} - C_{VT}(EK \right. \\
 & \left. + i_L(t_0))) \right. \\
 & e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) \\
 & \left. \left/ \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} + (-EK \right. \right. \\
 & \left. \left. + i_L(t_0)) \right. \right. \\
 & \left. \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$i['R'](t) = i_{-n}(t)[1, 1]$$

$$i_R(t) = U_n(t_0) Y_n e^{-\frac{tY_n}{C}} \tag{3}$$

Додаток Б - Продовження

$$u['L'](t) = u_l(t)[1, 1]$$

$$u_L(t)$$

$$= e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \left(\left(\sinh \left(\frac{1}{2} \frac{1}{LC_{VT}Y_{VT}} \left(t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} \right) \right) \right) (i_L(t_0) (KLY_{VT} - 2LY_{VT}^2 \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}) + C_{VT}) + Y_{VT}((-E + U_L(t_0)) C_{VT} + KLY_{VT}(E + U_L(t_0)))) \right) / \left(Y_{VT} \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} \right) + \frac{1}{Y_{VT}} \left((-i_L(t_0) + Y_{VT}(E - U_L(t_0))) \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) \right)$$

$$u['VT'](t) = u_{vt}(t)[1, 1];$$

$$u_{VT}(t) = E + \left(\left((-KLY_{VT} + 2LY_{VT}^2 - C_{VT}) i_L(t_0) + (C_{VT}(E - U_L(t_0)) - KLY_{VT}(E + U_L(t_0))) Y_{VT} \right) \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \right) / \left(\sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} Y_{VT} \right) + \frac{1}{Y_{VT}} \left((i_L(t_0) + (-E + U_L(t_0)) Y_{VT}) \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \right)$$

$$u['R'](t) = u_n(t)[1, 1];$$

Додаток Б - Продовження

$$u_R(t) = U_n(t_0) e^{-\frac{t Y_n}{C}} \quad (6)$$

На інтервалі відкритого стану

$$i['L'](t) = i_{-l}(t)[2, 1]$$

$$i_L(t) = E Y_{VT} + (-E Y_{VT} + i_L(t_1)) e^{-\frac{t}{L Y_{VT}}} \quad (7)$$

$$i['VT'](t) = i_{-vt}(t)[2, 1]$$

$$i_{VT}(t) = E Y_{VT} + (-E Y_{VT} + i_L(t_1)) e^{-\frac{t}{L Y_{VT}}} \quad (8)$$

$$i['R'](t) = i_{-n}(t)[2, 1]$$

$$i_R(t) = U_n(t_1) Y_n e^{-\frac{t Y_n}{C}} \quad (9)$$

$$u['L'](t) = u_{-l}(t)[2, 1]$$

$$u_L(t) = \frac{(E Y_{VT} - i_L(t_1)) e^{-\frac{t}{L Y_{VT}}}}{Y_{VT}} \quad (10)$$

$$u['VT'](t) = u_{-vt}(t)[2, 1];$$

$$u_{VT}(t) = E + \frac{(-E Y_{VT} + i_L(t_1)) e^{-\frac{t}{L Y_{VT}}}}{Y_{VT}} \quad (11)$$

$$u['R'](t) = u_{-n}(t)[2, 1];$$

$$u_R(t) = U_n(t_1) e^{-\frac{t Y_n}{C}} \quad (12)$$

На інтервалі закривання

$$i['L'](t) = i_{-l}(t)[3, 1]$$

Додаток Б - Продовження

$$\begin{aligned}
 i_L(t) = EK + \left(\left((-K^2 L Y_{VT} - K C_{VT} + 2 C_{VT} Y_{VT}) E + i_L(t_2) (K L Y_{VT} \right. \right. \\
 \left. \left. - C_{VT}) \right) \right. \\
 \left. e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{L Y_{VT}}} \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{L C_{VT} Y_{VT}} \right) \right) \\
 \left/ \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} + (-EK \right. \\
 \left. + i_L(t_2)) \right. \\
 \left. \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{L C_{VT} Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{L Y_{VT}}} \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$i['VT'](t) = i_{vt}(t)[3, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_{VT}(t) = EK + \left(\left((-K^2 L Y_{VT} - K C_{VT} + 2 C_{VT} Y_{VT}) E + i_L(t_2) (K L Y_{VT} \right. \right. \\
 \left. \left. - C_{VT}) \right) \right) \\
 \left. e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{L Y_{VT}}} \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{L C_{VT} Y_{VT}} \right) \right) \\
 \left/ \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} + (-EK \right. \\
 \left. + i_L(t_2)) \right. \\
 \left. \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2 K L C_{VT} Y_{VT} - 4 L C_{VT} Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{L C_{VT} Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{L Y_{VT}}} \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$i['R'](t) = i_n(t)[3, 1]$$

$$i_R(t) = U_n(t_1) Y_n e^{-\frac{tY_n}{C}} \tag{15}$$

$$u['L'](t) = u_l(t)[3, 1]$$

Додаток Б - Продовження

$$\begin{aligned}
 & u_L(t) \\
 & = e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \left(\sinh \left(\frac{1}{2} \frac{1}{LC_{VT}Y_{VT}} \left(t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} \right) \right) \right. \\
 & \quad \left. \left(EY_{VT}(KLY_{VT} - C_{VT}) + i_L(t_2)(KLY_{VT} - 2LY_{VT}^2 + C_{VT}) \right) \right) / \\
 & \quad \left(Y_{VT} \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} \right) \\
 & \quad + \frac{(EY_{VT} - i_L(t_2)) \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right)}{Y_{VT}} \right)
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$u['VT'](t) = u_{vt}(t)[3, 1];$$

$$\begin{aligned}
 & u_{vt}(t) = E + \left(\left((-KLY_{VT} + C_{VT}) Y_{VT} E + (-KLY_{VT} + 2LY_{VT}^2 - C_{VT}) i_L(t_2) \right) \right. \\
 & \quad \left. \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2}}{LC_{VT}Y_{VT}} \right) e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \right) / \\
 & \quad \left(\sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} Y_{VT} \right) \\
 & \quad + \frac{1}{Y_{VT}} \left(e^{-\frac{1}{2} \frac{tK}{C_{VT}} - \frac{1}{2} \frac{t}{LY_{VT}}} \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{1}{LC_{VT}Y_{VT}} \left(t \sqrt{K^2 L^2 Y_{VT}^2 + 2KLC_{VT}Y_{VT} - 4LC_{VT}Y_{VT}^2 + C_{VT}^2} \right) \right) \right. \\
 & \quad \left. \left(-EY_{VT} + i_L(t_2) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$u['R'](t) = u_n(t)[3, 1];$$

$$u_R(t) = U_n(t_1) e^{-\frac{tY_n}{C}} \tag{18}$$

Додаток Б - Продовження

На інтервалі закритого стану

$$i['L'](t) = i_{-l}(t)[4, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_L(t) = & E Y_n \\
 & + \frac{1}{\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}} \left(\sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (2C(E - U_n(t_3)) + (-E Y_n + i_L(t_3)) Y_n L) e^{-\frac{1}{2} \frac{t Y_n}{C}} \right. \\
 & \left. + \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (-E Y_n + i_L(t_3)) e^{-\frac{1}{2} \frac{t Y_n}{C}} \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$i['VT'](t) = i_{-vt}(t)[4, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_{VT}(t) = & Y_{VT} \left(E + \frac{1}{-LY_n^2 + 4C} \left(e^{-\frac{1}{2} \frac{t Y_n}{C}} \left(\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L} (-2i_L(t_3) + Y_n (E + U_n(t_3))) \right) \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (-E + U_n(t_3)) (-LY_n^2 + 4C) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$i['R'](t) = i_{-n}(t)[4, 1]$$

$$\begin{aligned}
 i_R(t) = & \frac{1}{-LY_n^2 + 4C} \left(Y_n \left(E (-LY_n^2 + 4C) + e^{-\frac{1}{2} \frac{t Y_n}{C}} \left(\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L} (-2i_L(t_3) + Y_n (E + U_n(t_3))) \right) \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (-E + U_n(t_3)) (-LY_n^2 + 4C) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$u['L'](t) = u_{-l}(t)[4, 1]$$

$$\begin{aligned}
 u_L(t) = & e^{-\frac{1}{2} \frac{t Y_n}{C}} \left((E - U_n(t_3)) \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{\sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (2i_L(t_3) - Y_n (E + U_n(t_3))) \sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{-LY_n^2 + 4C} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Додаток Б - Продовження

$$u['VT'](t) = u_{vt}(t)[4, 1];$$

$$\begin{aligned}
 u_{VT}(t) = E + \frac{1}{-LY_n^2 + 4C} & \left(e^{-\frac{1}{2} \frac{tY_n}{C}} \left(\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L} (-2i_L(t_3) + Y_n (E \right. \right. \\
 & \left. \left. + U_n(t_3))) \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) + \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (-E \right. \right. \\
 & \left. \left. + U_n(t_3)) (-LY_n^2 + 4C) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$u['R'](t) = u_n(t)[4, 1];$$

$$\begin{aligned}
 u_R(t) = E + \frac{1}{-LY_n^2 + 4C} & \left(e^{-\frac{1}{2} \frac{tY_n}{C}} \left(\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L} (-2i_L(t_3) + Y_n (E \right. \right. \\
 & \left. \left. + U_n(t_3))) \sinh \left(\frac{1}{2} \frac{t\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) + \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{t\sqrt{(LY_n^2 - 4C)L}}{CL} \right) (-E \right. \right. \\
 & \left. \left. + U_n(t_3)) (-LY_n^2 + 4C) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{24}$$