

К.М. Василів

Метод динамічних параметрів для математичного моделювання комутаційних процесів запирання вентилів напівпровідникових перетворювачів

Розроблено метод математичного моделювання вентильних перетворювачів частоти (ВПЧ) на підставі аналізу природи виникнення і закономірностей протікання інверсного струму вентилів під час їх запирання застосуванням динамічних параметрів вентилів, якими слугують послідовно з'єднані індуктивність та активний опір, що змінюються відповідно до закономірності динаміки концентрації носіїв електричних зарядів в структурах напівпровідників (базах, емітерах та р-п переходах). Врахування наявності інверсного струму напівпровідникових вентилів істотно підвищує рівень адекватності математичного моделювання ВПЧ довільної структури і призначення та в довільних режимах їх роботи включно з несиметричними та аварійними перехідними електромагнітними процесами електротехнічних комплексів з ВПЧ не лише на проміжку часу комутації (запирання) вентилів, але й в продовж всього часу моделювання. Бібл. 21, рис. 9.

Ключові слова: *вентиль, комутація, інверсний струм, рівень адекватності, математична модель, програмний код.*

Вступ. Одним із наукових і практичних напрямків розвитку електротехніки, який отримав назву «Електроніка», дав змогу розробити низку електронних напівпровідникових приладів, на базі яких створено доволі довгий перелік різноманітних вентильних перетворювачів частоти (ВПЧ), які слугують комутаторами регульованих електроприводів на базі електричних машин змінного струму [1], генераторів змінного струму [2], автономних систем електроживлення [3] та навіть у багатообмоткових трансформаторах для одночасного вмикання вторинних його обмоток в коло електроживлення [4]. ВПЧ також використовуються в електротехнічному обладнанні багатьох інших видів, наприклад, в розрядно-імпульсних системах спеціальних технологічних процесів, зокрема, обробки гранульованих струмопровідних середовищ [5] і таке інше. Використання ВПЧ у складі електротехнічного обладнання дало змогу принципово підвищити його функційні можливості.

Створення та вдосконалення вентильної перетворювальної техніки характерне трьома основними напрямками: розробкою схемних рішень, визначенням статичних і динамічних характеристик та вивченням основних енергетичних співвідношень. Перший напрямок характерний розробленням гіпотетичних моделей, які створені на базі аналітичних методів із застосуванням перемикальних функцій. Яскравим виразником цього етапу слугують праці [6, 7], які стосуються безпосередніх перетворювачів частоти, але це відноситься і до інших перетворювачів (випрямлячів, інверторів, перетворювачів частоти з ланкою постійного струму і т.ін.).

Одночасно з розробкою та впровадженням у практику використання ВПЧ виникла необхідність математичного моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в цих перетворювачах з метою вдосконалення як систем, до яких вони входять, так і самих ВПЧ безпосередньо. Принципово важливо зазначити, що гіпотетичні моделі на кшталт [6, 7] не дають змоги моделювати процеси ВПЧ.

Судячи з великої кількості наукових праць, спрямованих на розв'язання задачі математичного моделювання ВПЧ, вона виявилася на стільки складною, що проблема її розв'язання залишилася актуальною до сьогодні, незважаючи на те, що однозначно досягнуто вагомих позитивних результатів.

На сьогодні в практиці математичного моделювання ВПЧ використовується два підходи. Перший передбачає використання готових комплексів і середовищ моделювання. Так широкого застосування набув програмний комплекс MATLAB/Simulink, про що, як приклад, свідчить його використання в працях [8-11]. До цього ж підходу слід віднести використання спеціальних плат, наприклад, у [12] використано плату розробки EPC9035, яка є модулем напівмостового перетворювача, а розроблена вона компанією Power Conversion. Сюди ж логічно віднести програмний комплекс MotorSolve [13]. Важливо зазначити, що в [13] наголошується на тому, що моделі і алгоритми, закладені в програмі MotorSolve, закриті для користувача, що істотно обмежує можливості оцінки рівня адекватності моделей. Ця ж обставина характерна також і для інших програмних комплексів і плат моделювання, в тому числі і для MATLAB/Simulink в контексті недоступності вичерпної інформації стосовно використаних базових математичних, електротехнічних та інших методів моделювання, що підтверджує актуальність потреби розробки методів і математичних моделей вищого рівня адекватності, ніж у наявних для моделювання електротехнічних комплексів, які містять ВПЧ, з врахуванням всіх найважливіших чинників, що впливають на перебіг процесів, серед яких є і комутація вентилів. Особливо необхідно акцентувати увагу на недостатньо коректному моделюванні в MATLAB/Simulink запирання вентилів, в якому не враховується виникнення та протікання інверсних струмів (струми протилежного напрямку, знаку) протягом часу відновлення властивостей вентилів для їх запертого стану, а запираються вентиля (в разі природної комутації) відразу ж в момент часу спадання їх струмів до нуля.

Згадані вище засоби математичного моделювання ВПЧ, серед яких MATLAB/Simulink, характерні високим рівнем досконалості в сенсі їх практичного використання. Адже тут моделювання виконується в режимі конструювання шляхом вибору та об'єднання окремих структурних і функційних елементів в єдину систему, формуванням якої автоматично створюється відповідний програмний код (машинний алгоритм), який також автоматично утворений з використанням математичних, електротехнічних, механічних чи

© К.М. Василів

будь-яких інших методів. Тому такі засоби моделювання часто користувачами сприймаються як абсолют досконалості, що апіорі виключає в них потребу критично аналізувати та оцінювати рівень адекватності отриманих результатів.

Другий підхід характерний особистою розробкою дослідниками математичних моделей та навіть математичних і електротехнічних методів і на їх підставі алгоритмів і програмних кодів. Це вимагає досконалого володіння знаннями всього спектру від математичних методів до фізики процесів і програмування та дає змогу виникнути в сутність моделювання на найглибшому рівні, а значить мати інформацію про вихідні припущення та можливості точніше оцінити рівень адекватності моделювання. Позиція автора цієї статті збігається саме з другим підходом.

Виходячи з викладеного вище, для обґрунтування актуальності проблеми, на вирішення якої спрямована стаття, та для формулювання завдання, яке ставиться в статті, виконаємо короткий аналіз літератури на предмет з'ясування рівня адекватності математичного моделювання ВПЧ з погляду можливостей застосованих математичних і електротехнічних методів включно з вихідними припущеннями, які приймалися під час розробки математичних моделей.

Аналіз літератури. З погляду моделювання ВПЧ як структурного елементу довільної електротехнічної (електроенергетичної, чи електромеханічної) системи найефективнішими є методи двох напрямків, перший з яких передбачає опис електромагнітних процесів диференціальними рівняннями електричного стану зі змінною структурою і постійними параметрами [14], а другий – опис електромагнітних процесів диференціальними рівняннями електричного стану з постійною структурою і змінними параметрами.

До першої групи належать методи, в яких вентилю моделюються ідеальними ключами (S-моделі) [14]. Переконаливою перевагою S-моделей є те, що в них немає потреби оперувати параметрами вентилю для запертого стану, значення яких відрізняється від параметрів для стану провідності на 6-8 порядків. Це дає змогу уникнути розкиду параметрів і, як наслідок, жорсткості системи диференціальних рівнянь та проблематичності отримання результатів загалом. Проте цим методам властиві інші істотні вади, які обмежують застосування S-моделей вентилю в практиці моделювання ВПЧ. Отже, S-моделі передбачають розрив вентильних гілок для запертого стану вентилю, що апіорі означає зміну силового електричного кола ВПЧ, а значить кожному конкретному стану вентилю має відповідати своя схема силового електричного кола і своя відповідна система диференціальних рівнянь (СДР) електричного стану. І тут виникають три проблеми. Перша полягає в необхідності формування великої кількості СДР електричного стану (відповідно до повної комбінації всіх можливих схем силового електричного кола ВПЧ, виходячи з кожного конкретного стану вентилю). Ця проблема тягне за собою другу складну проблему, яка полягає в необхідності формування функцій перетворення, що встановлюють зв'язок двох суміжних в часі граничних значень струмів і напруг реактивних елементів вентиля в момент

його комутації, тобто переходу від попередньої в часі силової електричної схеми ВПЧ до наступної [14]. Процес формування таких функцій є окремою задачею, що не лише істотно ускладнює математичну модель ВПЧ, але й апіорі знижує рівень її адекватності. Третя проблема полягає в коректному визначенні моментів часу комутації вентилю, адже далеко не для всіх ВПЧ, а основне їх режимів роботи це можливо, наприклад, динамічних та несиметричних.

Вирішення першої проблеми потребує значних затрат навіть для ВПЧ з простою електричною схемою і зовсім важко вирішити таку проблему, коли йдеться про моделювання перехідних електромагнітних процесів, а особливо стосовно моделювання несиметричних аварійних режимів, для яких коректно передбачити всі стани вентилю практично неможливо. Третя проблема вирішується шляхом визначення заздалегідь стану вентилю, що є коректним лише в разі штучної комутації та лише для симетричного усталеного режиму.

Негативно на рівень адекватності ключових S-моделей вентилю впливає також ігнорування наявності зворотних струмів, адже концепція ключових моделей апіорі виключає наявність електричної гілки вентиля в його запертому стані, а з погляду фізики процесів у напівпровідникових електронних приладах такі струми (зворотні) наявні.

Уникнути вад ключових моделей у принципово важливих моментах дають змогу відомі математичні моделі, які ґрунтуються на формуванні системи диференціальних рівнянь електричного стану з постійною структурою і змінними параметрами [15, 16].

Ретельний аналіз наукових літературних джерел, а також досвід практичної роботи в області математичного моделювання ВПЧ вказує на те, що вагомим теоретичним і практичним результатом в контексті математичного моделювання електротехнічних систем (ЕТС) з вентильними перетворювачами частоти (відповідно до концепції їх моделювання СДР з постійною структурою і змінними параметрами) досягнуто поєднанням ідеї моделювання вентилю окремими активно-індуктивними гілками [16] з модульним принципом моделювання електромашинно-вентильних систем (ЕМВС) [15] та інвертуванням СДР [17]. Таке поєднання забезпечило можливість описати електромагнітні і електромеханічні процеси довільної ЕТС (з ВПЧ довільної структури та з довільною системою керування ними) єдиною СДР електричної і механічної рівноваги незалежно від стану вентилю, що, своєю чергою, дає змогу врахувати взаємні впливи структурних елементів ЕМВС, а також комутацію вентилю та роботу системи автоматичного керування для довільних режимів роботи ЕМВС (усталених і динамічних включно з симетричними і несиметричними, нормальними та аварійними).

Проаналізуємо докладніше математичну модель вентиля, в якій вентилю представляється активно-індуктивною електричною гілкою [15-17]. Отже, математична модель вентиля як базового структурного елементу ВПЧ розроблена на підставі таких вихідних припущень:

1) у провідному стані клапан моделюється активно-індуктивною гілкою з малими та максимально наближеними до реальних значень індуктивності і активного опору для провідного стану клапана;

2) у запертому стані клапан моделюється активно-індуктивною електричною гілкою з великою індуктивністю і активним опором, які максимально точно відповідають запертому стану реального клапана;

3) комутація клапанів відбувається миттєво (відкривається клапан за результатами розв'язку логічних рівнянь, які описують роботу системи керування ВПЧ), а замикаються клапани в момент часу переходу через нуль струму клапана, який комутує (в разі природної комутації).

Вибір значень активного опору і індуктивності, якими моделюються клапани, в певному розумінні є довільним, а критерієм вибору слугує якомога вищий рівень адекватності моделі. Виходячи з цього, в практиці моделювання ВПЧ для провідного стану вибираємо такі малі значення індуктивності L ($L=0,1 \cdot 10^{-4}$ Гн) та активного опору R ($R=0,1 \cdot 10^{-3}$ Ом), які найточніше відповідають дійсному значенню реальних клапанів у провідному стані, а для запертого стану значення індуктивності і активного опору клапанної гілки приймаємо такими, що максимально точно відповідають реально наявним індуктивності і активному опору для запертого стану клапана $L=0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн та $R=0,1 \cdot 10^{-4}$ Ом. Критично важливо зазначити, що співвідношення L/R (яке визначає сталу часу) і для провідного, і для запертого станів клапанної гілки має бути таким, щоб було більшим приблизно в 50 разів від кроку інтегрування і водночас було не меншим від мінімальної сталої часу інших ділянок електричного кола, структурним елементом якого є ВПЧ [17].

В момент часу переходу клапана в запертий стан разом з активним опором на 6-8 порядків стрибком збільшується і індуктивність. Наслідком такої зміни індуктивності є поява розриву вже першої похідної струму через раптову (типу зламу) сильну зміну числового значення коефіцієнту L при похідній струму в рівнянні електричного стану клапана, записаного за другим законом Кірхгофа

$$L \cdot p i + R \cdot i + U = 0, \quad (1)$$

де L , i , R , U - індуктивність, струм, активний опір та напруга клапанної гілки відповідно; $p = d/dt$ - оператор диференціювання за часом t .

Проте після комутації клапанів інтегральні криві є гладкими бо перша похідна після комутації є неперервною, що анулює одну з істотних вад моделювання клапанів чисто активним опором. Підтриманням постійної часу для провідного і запертого стану клапанів незмінною забезпечує стійкість числового інтегрування СДР. Через раптову і масштабну зміну параметрів струми запертих клапанів отримуються істотно спотвореними, але значення цих струмів є достатньо малими, що на певному етапі розвитку теорії математичного моделювання ВПЧ, вважалося коректним нехтувати ними [15, 17].

Таким чином, критично важлива перевага математичного моделювання клапана активно-індуктивною гілкою порівняно з моделюванням чисто активним опором, полягає в незмінності постійної

часу клапана для провідного і запертого стану [15-17], що забезпечує числову стійкість інтегрування СДР електричного стану, а це, своєю чергою, дуже важливо в разі інтегрування довготривалих процесів.

Необхідна задача визначення моменту часу переходу струму клапана, який замикається, через нуль на кроці комутації (моменту часу замикавання клапана) визначається простою процедурою інвертування СДР, якою описано процеси (електромагнітні, електромеханічні, механічні та інші), що відбуваються в ЕМВС, до яких входять ВПЧ [17]. Сутність інвертування полягає в інтегруванні всієї СДР на кроці комутації клапана, за його струмом, який стає незалежною змінною, а числове значення кроку інтегрування дорівнює значенню струму клапана, який комутує, на початку кроку комутації. Час інтегрування тут стає інтегральною змінною, яка входить до невідомих та є результатом розв'язку СДР. Отже момент часу замикавання клапана визначається лише за один крок інтегрування під час інвертування СДР.

Варто зазначити, що процедура інвертування слугує незамінним інструментарієм для обходу особливих точок інтегральних змінних, які характерні наявністю вертикальних ділянок інтегральних кривих, в яких похідна дорівнює безмежності [17].

Попри наявність наведених вище доволі ефективних методів математичного моделювання ВПЧ на теперішній час все ще використовується метод, в якому клапани моделюються активними опорами [18].

В контексті аналізу наукових літературних джерел загалом варто зазначити, що до сьогодні використовуються ще й інші відомі методи, наприклад, метод припасовування [19] та метод основної гармоніки [20], характерним для яких є прийняття надто спрощених (загрублених) вихідних припущень з орієнтацією на їх використання для розрахунку симетричних усталених струмів, що априорі не дає можливості адекватно моделювати перебіг електромагнітних процесів, які відбуваються в ЕТС з ВПЧ, в динамічних та несиметричних режимах роботи.

Постановка питання. Багаторічна практика математичного моделювання ЕМВС на базі описаної вище теорії [15-17] давала змогу отримати результати доволі високого рівня адекватності. Але ретельний аналіз вихідних допущень вказує на те, що ще є резерв в сенсі підвищення рівня адекватності математичних моделей ВПЧ.

В реальних умовах роботи напівпровідникових перетворювачів частоти стан їх клапанів (зокрема, тиристорів) та перебіг електричних процесів, які відбуваються в цих клапанах, визначається концентраціями і градієнтами носіїв додатних (дірок) та від'ємних (електронів) зарядів в окремих структурах клапанів - емітерах, колекторах та на р-п переходах. Саме концентрація і градієнти носіїв зарядів, які змінюються протягом певного проміжку часу (відновлення властивостей тиристора для запертого стану), врешті-решт спричиняють динамічну зміну опору клапанів під час їх комутації (наприклад, замикавання), а значить і стан кожного окремого клапана.

Для відновлення властивостей тиристора для запертого стану необхідно, щоб після проходження

прямого струму частина надлишкових зарядів, накопичених в базах, проходила через зовнішнє коло, що здійснюється зміною полярності напруги (прямої на зворотну) на електродах тиристора під дією якої і виникає інверсний (зворотний) струм, який пришвидшує процес набуття тиристором запертого стану. Отже, стан вентиля під час переходу з провідного до запертого змінюється під дією зворотної напруги та інверсного струму протягом певного проміжку часу, який характерний наявністю відповідних етапів зміни концентрації зарядів в глибинних шарах емітерів, баз та в околі р-п переходів, а значить струм вентиля під час його комутації (інверсний струм) змінюється також протягом певного часу відповідно до зміни концентрації носіїв зарядів.

Виходячи з цього, очевидним є те, що прийняте вихідне припущення, згідно з яким вентиль запирається в момент часу переходу струму вентиля, який комутує через нуль (комутація миттєва), є не достатньо коректним.

Процес зміни концентрації зарядів у шарах тиристора під час його запирання, якщо розглядати тиристор як елемент електричного кола відповідно до теорії електричних кіл, проявляється в зміні (збільшенні) його опору до значення, еквівалентного значенню опору ізолятора.

Час спаду зворотного струму в зовнішньому колі до певного усталеного значення ще не означає повного відновлення запертого стану тиристора, бо в глибинних шарах баз (головно товстій базі) залишаються ще надлишкові електрони і дірки, які продовжують комбінувати між собою. Після спаду зворотного струму до усталеного значення потрібна ще деяка пауза для того, щоб надлишкові заряди зникли в глибинних шарах товстої бази. Повний час відновлення властивостей тиристора для запертого стану t_V , який бере відлік від моменту спаду прямої напруги на тиристорі до нуля до моменту повного набуття тиристором властивостей для запертого стану, дорівнює

$$t_V = t_S + t_P, \quad (2)$$

де t_S – час спаду інверсного струму до усталеного значення; t_P – час зникнення надлишкових зарядів (паузи) в глибинних шарах товстої бази.

Час паузи залежить від геометричних розмірів шарів тиристора, часу життя носіїв зарядів, а також від швидкості спаду зворотної напруги і стрімкості наростання чергової прямої напруги, яка підводиться до тиристора. Час відновлення t_V є одним з основних каталожних параметрів тиристора, адже від нього залежать його частотні властивості. Він вважається відомим.

Виходячи з викладеного вище, **мета статті** полягає в розробці методу математичного моделювання електричних процесів, які відбуваються у вентилях під час їх запирання, з врахуванням відновлення їх властивостей для запертого стану, а також врахуванням виникнення і закономірності перебігу інверсного струму у вентилях. Розробка математичних моделей ВПЧ на базі цього методу істотно підвищить рівень адекватності математичних моделей і ВПЧ, і ЕМВС, до яких входять ВПЧ.

Основні положення. З наведеного вище аналізу процесів, які відбуваються у тиристорі видно, що під час запирання вентиля спочатку під дією від'ємної напруги виникає інверсний струм, а далі внаслідок зміни концентрації зарядів у базах цей струм зменшується, що дає підставу трактувати це як еквівалентне збільшення опору тиристора, якщо розглядати процеси в тиристорі з погляду їх зовнішніх проявів на рівні частини електричного кола анод-катод за законами класичної теорії електричних кіл. Виходячи з останньої наведеної тези, вбачається логічним і коректним розглядати та, відповідно, моделювати комутаційний процес, який відбувається в тиристорі під час його запирання, виходячи з таких положень:

1) індуктивність і активний опір, якими моделюється вентиляльна гілка, динамічно збільшуються за певним законом, наприклад, лінійним, параболічним або якимсь іншим, що забезпечує коректніше ніж в [16] визначення інверсного струму вентиля через плавну зміну індуктивності і активного опору вентиля, а значить плавну зміну першої похідної струму на відміну від стрімкої, як у базовому методі [16];

2) за час початку відліку динамічного збільшення індуктивності і активного опору вентиляльної гілки приймається момент часу, в який струм вентиля, що комутує, дорівнює нулю (переходить з плюса на мінус через нуль, тобто виникає інверсний струм);

3) процедура інвертування СДР виконується лише для визначення моменту часу, який відповідає точці відліку процесу комутації тиристора (виникнення інверсного струму), а не для повного запирання вентиля;

4) час повного відновлення тиристора для запертого стану вважається відомим і таким, що регламентується технічними даними тиристора;

5) присвоєння індуктивності і активному опору вентиляльної гілки значення, яке відповідає запертому стану тиристора (його остаточне запирання), виконується в момент часу закінчення процесу відновлення властивостей вентиля для запертого стану.

Ці положення, разом з прийнятими в [15-17] в частині пунктів 1) і 2) та частково 3) стосовно миттєвого відкривання вентилів та наведені тут вище, становлять теоретичну основу методу динамічних параметрів математичного моделювання вентиляльних перетворювачів частоти, який пропонується тут.

Потреба врахування часу запирання вентилів очевидна не лише з погляду закономірностей перебігу електрофізичних процесів, які відбуваються у вентилях, але й, виходячи з можливості функціонування принципово певного виду електротехнічного обладнання на базі ВПЧ, на чому наголошується в літературних джерелах, зокрема у [4, 10].

В одному з варіантів запропонована тут ідея була реалізована в [21] під час математичного моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в автономній системі електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модуляторним збуджувачем без опису базових теоретичних положень, викладених тут.

Практичну перевірку запропонованого методу виконаємо на прикладі математичного моделювання N_F -фазної системи випрямлення змінного струму

(СВЗС), узагальнена схема силового електричного кола якої зображена на рис. 1, де буквами А, К позначено анодну та катодну N_F -фазні тиристорні групи; буквою М – N_F -фазну мережу змінного струму; буквами Н, D – навантаження (ланку випрямленого струму) та діод, відповідно, які слугують структурними елементами СВЗС. Решта позначення є такими: E, i, R, L, φ – електрорушійна сила, струм, активний опір, індуктивність та електричні потенціали вузлів. Буквами А, К, М, Н, D в нижніх індексах позначено належність координат до відповідних прийнятому позначенню структурних елементів, а літерою Т – до тиристорів. Числами в нижніх індексах позначено порядкові номери координат в межах структурних елементів, а числами в нижніх індексах при потенціалах φ – порядкові номери потенціалів електричної схеми; N_F – кількість фаз, максимальне значення яких в програмному коді обмежено числом 24 ($N_F = 24$).

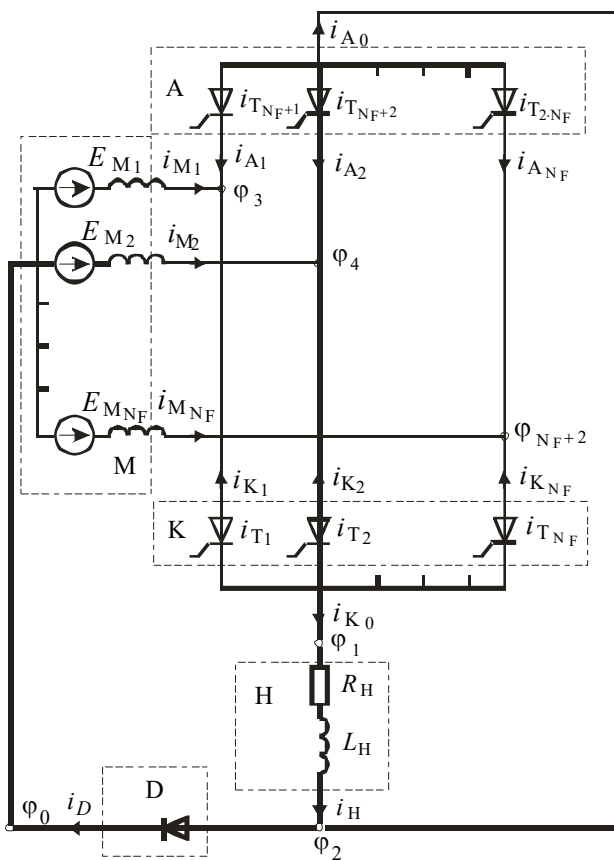


Рис. 1. Схема силового електричного кола N_F -фазної системи випрямлення змінного струму

Важливо зазначити, що на схемі рис. 1 (як і в математичній моделі, так у відповідному програмному коді) передбачена можливість вибору або мостової схеми (коли працюють обидві вентиляльні групи, а діод запертий), або схеми за з'єднанням у зірку (коли анодна група заперта, а діод постійно в провідному стані). Постійно запертий діод або вентиля анодної групи функційно означає розрив їх електричних гілок, що змінює узагальнену схему на вибрану. Вибір одного з зазначених варіантів схеми виконується лише під час роботи програмного коду на рівні числових значень ознак стану тиристорів і діоду вектор (24).

Математичною моделлю N_F -фазної СВЗС є СДР електричного стану та система логічних рівнянь, яка моделює роботу системи керування випрямляча.

Математичну модель N_F -фазної системи випрямлення електричних струмів розробимо на базі теорії математичного моделювання електромашинно-вентильних систем [15], згідно з якою, математичні моделі довільних ЕМВС розробляються за модульним принципом, тобто будуються з готових математичних моделей окремих структурних елементів схеми силового електричного кола. Як видно з рис. 1, тут такими структурними елементами слугують: N_F -фазна електрична мережа, N_F -фазні катодна та анодна тиристорні групи, а також активно-індуктивне навантаження та діод. Розглянемо математичні моделі кожного із структурних елементів.

Математична модель N_F -фазної електричної мережі. Електричну мережу зобразимо $2 \cdot N_F$ -полюсником, а електричну рівновагу опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке має такий вигляд:

$$p i_M + G_M \cdot \varphi_M + T_M = 0, \quad (3)$$

де вектор струмів зовнішніх гілок:

$$i_M = (i_{M_1}, \dots, i_{M_{N_F}}, -i_{M_1}, \dots, -i_{M_{N_F}}); \quad (4)$$

матриця коефіцієнтів:

$$G_M = \begin{bmatrix} G_e & -G_e \\ -G_e & G_e \end{bmatrix}, \quad (5)$$

в якій діагональна матриця обернених індуктивностей фаз мережі:

$$G_e = \text{diag}\left(\frac{1}{L_{M_1}}, \dots, \frac{1}{L_{M_{N_F}}}\right); \quad (6)$$

вектор потенціалів зовнішніх вузлів мережі, в якому $\varphi_{0_j} = \varphi_0 = 0$ ($j = 1, \dots, N_F$):

$$\varphi_M = (\varphi_3, \varphi_4, \dots, \varphi_{N_F+2}, \varphi_{0_1}, \dots, \varphi_{0_{N_F}}); \quad (7)$$

вектор вільних членів:

$$T_M = (T_e, -T_e), \quad (8)$$

в якому

$$T_e = \left(\frac{i_{M_1} \cdot R_{M_1} - e_{M_1}}{L_{M_1}}, \dots, \frac{i_{M_{N_F}} \cdot R_{M_{N_F}} - e_{M_{N_F}}}{L_{M_{N_F}}} \right). \quad (9)$$

У формулах (6), (9) позначено

$L_{M_j}, R_{M_j}, i_{M_j}, e_{M_j}$ – індуктивність, активний опір та миттєві значення струму і електрорушійної сили j -тої фази мережі.

Математична модель N_F -фазної катодної тиристорної групи. Катодну тиристорну групу зобразимо N_F+1 -полюсником, а електричну рівновагу опишемо векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке, згідно з [15] і запропонованим методом, має такий вигляд:

$$p i_K + G_K \cdot \varphi_K + T_K = 0, \quad (10)$$

де вектор струмів зовнішніх гілок:

$$i_K = (i_{K_1}, i_{K_2}, \dots, i_{K_{N_F}}, i_{K_0}) = (-i_{T_1}, -i_{T_2}, \dots, -i_{T_{N_F}}, i_{K_0}), \quad (11)$$

в якому

$$i_{K_0} = i_H = \sum_{j=1}^{N_F} i_{T_j}, \quad (12)$$

де i_{T_j} – струм j -го тиристора ($j = 1, \dots, N_F$);

де матриця коефіцієнтів:

$$G_K = \begin{bmatrix} G_{T_1} & 0 & \dots & 0 & -G_{T_1} \\ 0 & G_{T_2} & \dots & 0 & -G_{T_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & G_{T_{N_F}} & -G_{T_{N_F}} \\ -G_{T_1} & -G_{T_2} & \dots & -G_{T_{N_F}} & \sum_{j=1}^{N_F} G_{T_j} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

вектор зовнішніх потенціалів (полюсів) катодної тиристорної групи:

$$\varphi_K = (\varphi_3, \varphi_4, \dots, \varphi_{2+N_F}, \varphi_1); \quad (14)$$

вектор вільних членів:

$$T_K = \begin{bmatrix} G_{T_1} \cdot R_{T_1} \cdot i_{T_1} \\ G_{T_2} \cdot R_{T_2} \cdot i_{T_2} \\ \vdots \\ G_{T_{N_F}} \cdot R_{T_{N_F}} \cdot i_{T_{N_F}} \\ -\sum_{j=1}^{N_F} G_{T_0} \cdot R_{T_0} \cdot i_{T_0} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Складовими матриці коефіцієнтів G_K та вектора вільних членів T_K слугують: обернена індуктивність:

$$G_{T_j} = 1/L_{T_j}; \quad (16)$$

де L_{T_j} – індуктивність j -го тиристора; R_{T_j}, i_{T_j} – активний опір та струм j -ї тиристорної гілки катодної вентильної групи.

Математична модель N_F -фазної анодної тиристорної групи. Рівняння електричної рівноваги анодної тиристорної групи записано, виходячи з аналогічних міркувань як і для катодної.

Математична модель діоду. Модель діоду представимо двополюсником, а рівняння електричної рівноваги записані, виходячи з аналогічних міркувань, як для тиристорних груп.

Математична модель активно-індуктивного навантаження. Статичне навантаження зобразимо двополюсником, а електричну рівновагу описано векторним рівнянням зовнішніх гілок, яке отримано аналогічно до рівнянь електричної мережі.

Вузлова система рівнянь електричного стану N_F -фазної системи випрямлення струму. Вузлова система рівнянь електричного стану записується в базисі електричних потенціалів незалежних вузлів схеми силового електричного кола (рис. 1) та має такий вигляд:

$$A \cdot \varphi + B = 0, \quad (17)$$

де матриця коефіцієнтів:

$$A = \sum_{j=M}^H \Pi_j \cdot G_j \cdot \Pi_j^t; \quad (18)$$

вектор потенціалів незалежних вузлів схеми:

$$\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N_F+2}); \quad (19)$$

вектор вільних членів:

$$B = \sum_{j=M}^H \Pi_j^t \cdot T_j; \quad (20)$$

а Π_j, G_j, T_j, Π_j^t – матриці інцидентії, матриці коефіцієнтів, вектори вільних членів та матриці, транспоновані до матриць Π_j для j -го структурного елементу схеми ($j = M, K, A, D, H$).

Логічні рівняння системи керування N_F -фазним випрямлячем. Роботу системи керування тиристорним випрямлячем опишемо логічними рівняннями, які мають такий вигляд:

$$Z_j = Z_{U_j} \wedge Z_{\alpha_j} \wedge Z_{K_j} = \text{true } j = (1, \dots, 2 \cdot N_F), \quad (21)$$

де Z_j – умова відкриття j -го тиристора (j -й тиристор відкривається за істинного значення Z_j); Z_{U_j} – умова відкриття тиристорів за напругою (Z_{U_j} приймає значення істини за додатної напруги на j -му тиристорі, коли $U_{T_j} \geq 0$); Z_{α_j} – приймає істинне значення, коли поточний кут j -го тиристора перебуває в заданому діапазоні з врахуванням кута запалювання; Z_{K_j} приймає значення істини, коли j -тий тиристор запертий; символом « \wedge » позначено операцію логічного множення (кон'юнкцію).

Для діоду логічне рівняння має такий вигляд

$$Z_D = Z_{D_U} \wedge Z_{D_K}, \quad (22)$$

де Z_{D_U} – умова відкриття діоду за напругою (Z_{D_U} має значення істини за додатної напруги на діоді $Z_{D_U} \geq 0$); Z_{D_K} – має значення істини, коли діод запертий.

Стан діоду залишається постійним (запертим) для мостової схеми і провідним – для схеми зі з'єднанням у зірку, коли всі тиристори анодної вентильної групи заперті, тобто в електричній схемі і системі рівнянь анодна тиристорна група залишається, але вимкнена з роботи (це стосується програмного коду, в якому реалізована математична модель системи випрямлення змінного струму і алгоритм розрахунку електромагнітних процесів).

Для інтегрування СДР в математичній моделі СВЗС використано чисельний метод Рунге-Кутта другого порядку, що вдало поєднує достатній рівень точності з оптимальними затратами машинного часу, а для розв'язання лінійної системи алгебричних рівнянь електричного стану (17) використано метод Гауса.

Алгоритм розрахунку електромагнітних процесів. Вхідні дані для розрахунку електромагнітних процесів системи (рис. 1) поділимо на три групи. До першої з них віднесемо: E_M, L_M, R_M, f_M, N_F – амплітуду електрорушійної сили, індуктивність та активний опір фазних гілок мережі, частоту та кількість фаз мережі; L_W, R_W – індуктивність та активний опір для провідного стану тиристорів та діоду; L_Z, R_Z – індуктивність та активний опір для запертого стану тиристорів та діоду; R_H, L_H – активний опір та індуктивність активно-індуктивного навантаження; t_V – час відновлення властивостей тиристорів для їх запертого стану.

До другої групи вхідних даних віднесемо початкові умови, які об'єднані у вектор інтегрованих змінних V та вектор K_{Π} стану вентилів. Ці вектори мають таку структуру:

$$V = (i_H, i_D, i_{T_1}, \dots, i_{T_{2N_F}}, i_{M_1}, \dots, i_{M_{N_F}}, t), \quad (23)$$

де t – час інтегрування;

$$K_{\Pi} = (K_{T_1}, K_{T_2}, K_{T_3}, \dots, K_{T_{2N_F}}, K_D). \quad (24)$$

Елементи вектора K_{Π} з (24) мають значення:

- 1 – для провідного стану вентилів;
- 0 – для запертого в разі керованих вентилів;
- 2 – для запертих і не керованих.

До третьої групи віднесемо такі вхідні дані, які стосуються безпосередньо роботи програмного коду: t_K – кінцевий час інтегрування; Δt – крок інтегрування СДР в поза комутаційні проміжки часу; Δt_K – крок інтегрування в межах проміжку часу відновлення властивостей тиристорів для їх запертого стану.

Розрахунок електромагнітних процесів, які відбуваються в СВЗС, виконується в такій послідовності.

1. На підставі початкових умов: (вектора V (23)), масиву стану вентилів K_{Π} (24) і вхідних даних першої групи формуються матриці коефіцієнтів та вектори вільних членів структурних елементів системи випрямлення струмів за схемою (рис. 1): електричної мережі – (5), (8); катодної тиристорної групи – (13), (15) та всіх решти структурних елементів.

2. На підставі матриць коефіцієнтів і векторів вільних членів структурних елементів формується матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів системи рівнянь (17) за формулами (18) та (20), відповідно.

3. Розв'язується система рівнянь електричного стану (17) стосовно вектора потенціалів незалежних вузлів φ (19) та формується вектор інтегрування pV , який дорівнює похідній за часом вектора інтегрованих змінних V (23) та має таку структуру:

$$pV = (p i_H, p i_D, p i_{T_1}, \dots, p i_{T_{2N_F}}, p i_{M_1}, \dots, p i_{M_{N_F}}, 1). \quad (25)$$

4. Розв'язується логічні рівняння (21) та визначається стан тиристорів. Якщо стан тиристорів змінився (відкрився хоча б один з них), то вектор інтегрування pV (25) визначається повторно.

5. Одним із явних чисельних методів інтегрується СДР з заданим кроком інтегрування Δt в наслідок чого отримується її розв'язок (нове значення вектора V (23)) на поточному кроці інтегрування.

6. Виконується перевірка на предмет зміни значення на від'ємне струму будь-якого з відкритих тиристорів на поточному кроці інтегрування. Якщо струм довільного відкритого тиристора змінився з додатного значення на від'ємне, то виконується інвертування СДР, яким визначається момент часу, в який струм відкритого тиристора дорівнює нулю (переходить через нуль з плюса на мінус). Починаючи з цього моменту часу, на проміжку часу t_v , і до моменту часу, коли j -й тиристор відновить свої властивості для запертого стану, параметри тиристора (його обернена індуктивність G_{T_j} та активний опір R_{T_j} з (13)

та (15) для катодної та аналогічно для анодної тиристорної групи) змінюється (збільшується опір і зменшується обернена індуктивність) за заданим законом

(лінійним, параболічним, експоненційним, чи довільним іншим). На протязі часу комутації t_v , крок інтегрування Δt_K порівняно із заданим кроком інтегрування Δt для поза комутаційного періоду логічно зменшити хоча б на один або навіть на два порядки ($\Delta t_K = \Delta t / 100$). На першому кроці інтегрування після закінчення комутаційного періоду параметрам тиристора присвоюється значення для запертого стану, ознаці стану K_{T_j} -го тиристора присвоюється значення 0 ($K_{T_j} = 0$), а кроку інтегрування повертається значення, яке відповідає поза комутаційному періоду.

7. З певною кратністю кроків інтегрування виконується вивід результатів розрахунків процесів у файли інформації. Цими результатами слугують всі координати, які входять до вектора інтегрованих змінних V (23) та потенціали незалежних вузлів схеми (рис. 1) (19) і їх різниця в довільній комбінації, а також результати гармонічного аналізу вибраних координат.

8. На кожному кроці інтегрування виконується перевірка на предмет виходу поточного часу інтегрування t за межі заданого його кінцевого значення t_K . Якщо поточне значення часу інтегрування t дорівнює або перевищує задане кінцеве t_K ($t \geq t_K$), то процедура інтегрування СДР припиняється, а в протилежному разі, коли $t < t_K$ – продовжується.

На підставі викладеної вище математичної моделі та відповідної їй алгоритму розроблено програмний код мовою програмування FORTRAN для комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в системі випрямлення N_F -фазного струму (рис. 1). Для перевірки запропонованого методу на предмет коректності його теоретичних положень та придатності до практичного застосування за допомогою розробленого програмного коду виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в СВЗС (рис. 1) за декількома схемами силового електричного кола (за мостовою схемою випрямляча та за схемою випрямляча в зірку) з кількістю фаз $N_F = 1, 2, 3, 6$ та 12 (з 24-х можливих). Нижче наведено результати комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів для трифазної мостової СВЗС.

Вхідні дані першої групи вибрані з такими числовими значеннями, щоб за основними координатами, якими слугують випрямлена напруга та струм i_H , u_H корелювалися зі значеннями випрямлених струму і напруги вентиляльної системи збудження турбогенераторів серії ТГВ потужністю 500 та 800 МВт. Отже, основні вхідні дані першої групи мають такі числові значення: для 3-фазної електричної мережі $E_M = 800$ В, $L_M = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_M = 0,1 \cdot 10^{-5}$ Ом, $f = 50$ Гц – амплітуда електрорушійної сили, індуктивність та опір фазних електричних гілок мережі, а також частота її напруги і струму; для випрямляча та діоду: $L_W = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн, $L_Z = 0,1 \cdot 10^3$ Гн – індуктивність тиристорних (і діодної) гілок в провідному і запертому станах, відповідно; $R_W = 0,001$ Ом, $R_Z = 1000$ Ом – активний опір тиристорних (і діодної) гілок в провідному і запертому станах, відповідно; $\alpha_r = 0^\circ$ – кут регулювання тиристорів; для навантаження: $L_H = 0,075$ Гн, $R_H = 1,5$ Ом – індуктивність та активний опір; $\Delta t = 10$ мкс – крок інтегруван-

ня; $\Delta t_k=0,1$ мкс – крок інтегрування на проміжку комутації (запирання) вентилів; $t_k = 0,65$ с – кінцевий час інтегрування; $t_v = 50$ мкс – повний час відновлення властивостей тиристора для запертого стану.

Завдання моделювання полягає в дослідженні закономірностей перебігу електричних процесів, які відбуваються в тиристорах випрямляча з акцентом уваги на вивченні саме комутаційних процесів, які відбуваються під час запирання тиристорів з врахуванням наявності інверсного (зворотного) струму. Вище зазначено, що в запропонованому методі і, відповідно, математичній моделі передбачено можливість вибору закону зміни параметрів тиристорів під час їх комутації. В цьому контексті на першому етапі дослідження розглянемо лінійний закон зміни параметрів тиристорів, які комутують під час їх запирання.

На рис. 2 зображено розрахункові залежності миттєвих фазних струмів катодної тиристорної групи.

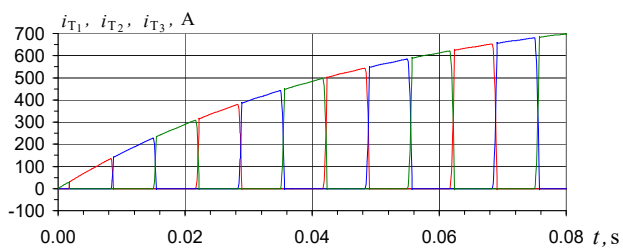


Рис. 2. $i_{T_1}, i_{T_2}, i_{T_3}$ – фазні струми катодної групи

Очевидно, що миттєві струми анодної тиристорної групи мають аналогічний характер до струмів катодної групи, але зсунуті за фазою на 180° .

Важливою координатою з погляду аналізу електромагнітних процесів у СВЗС є випрямлений струм, крива якого зображена на рис. 3.

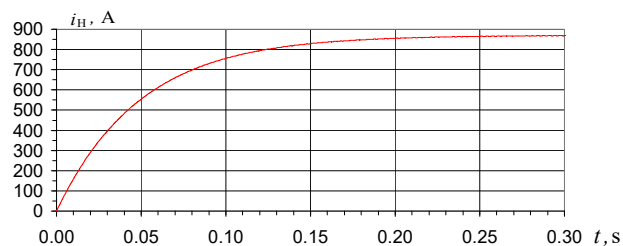


Рис. 3. i_H – випрямлений струм

З рис. 3 видно, що крива випрямленого струму огинає криві вентильних струмів катодної тиристорної групи за верхнім контуром, що відповідає фізиці електромагнітних процесів, які відбуваються у СВЗС. Загалом криві розрахункових залежностей фазних струмів катодної тиристорної групи та випрямленого струму, зображених на рис. 2, 3, відображають перебіг перехідного процесу в СВЗС з нульових початкових умов та надають інформацію про функціонування математичної моделі і відповідного програмного коду на предмет фізики процесів, які відбуваються в цій системі, і, певною мірою, про рівень адекватності реальної фізичній системі на рівні характеру кривих якісно та на рівні їх числових значень кількісно. З рис. 3 видно, що випрямлений струм набуває усталеного значення відповідно до сталої часу, значення якої визначається параметрами навантаження, тобто їх відношенням L_H/R_H .

З погляду задекларованого вище методу принципово важливо отримати інформацію про наявність та закономірність зміни інверсного струму тиристорів, які комутують під час їх запирання, а також про характер зміни параметрів тиристорів на етапі їх запирання (в продовж часу відновлення властивостей тиристорів для запертого стану). Таку інформацію надають криві струму, оберненої індуктивності та активного опору тиристора, який запирається. Для тиристора з номером 1 ці криві зображені на рис. 4–6.

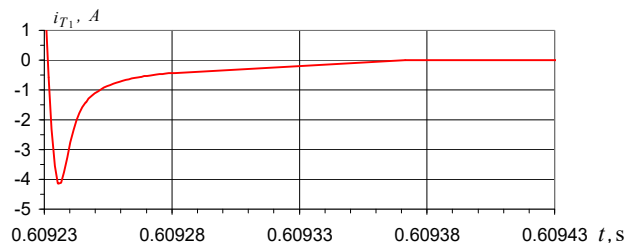


Рис. 4. i_{T_1} – інверсний струм першого тиристора (лінійний закон)

Характер кривої на рис. 4 однозначно вказує не лише на наявність інверсного струму першого тиристора (перехід струму тиристора у від'ємну область), але й на закономірність його зміни, згідно з якою він наростає до певного максимального значення (тут воно дорівнює $i_{T_1} = -4.19$ А), а далі – його спадання до усталеного значення, яке дорівнює $i_{T_1} = -0,2$ А.

Наявність інверсного струму та закономірність його зміни є цілком очікуваними та сприймаються як такі, що загалом відповідають процесу відновлення властивостей тиристорів для запертого стану під час їх комутації. Очевидно, що тут максимальне значення інверсного струму визначається закономірністю зміни параметрів тиристорів, які комутують. Нагадаємо, що в цьому варіанті розрахунків прийнято лінійний закон зміни параметрів тиристорів, які комутують.

Характер кривих оберненої індуктивності (рис. 5) та активного опору (рис. 6) є абсолютно очевидним, адже значення цих координат змінюється за лінійним законом в заданих межах відповідно до вихідних допущень і базових положень запропонованого методу.

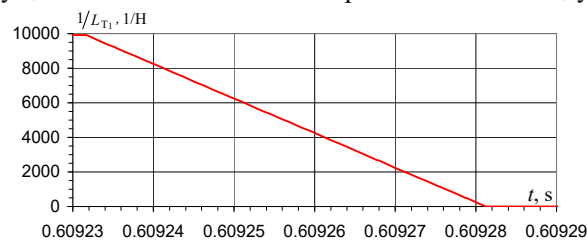


Рис. 5. $1/L_{T_1}$ – обернена індуктивність першого тиристора (лінійний закон)

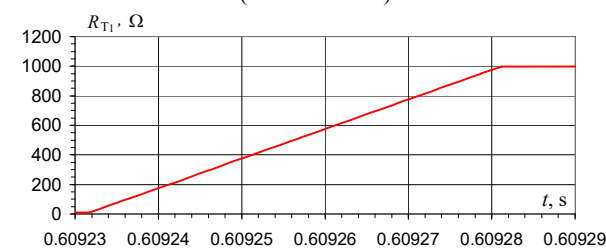


Рис. 6. R_{T_1} – активний опір першого тиристора (лінійний закон)

З метою з'ясування впливу на закономірності зміни інверсного струму тиристорів під час їх запирання розглянемо аналогічні розрахункові залежності, отримані, виходячи з параболічного закону зміни параметрів тиристорів, які комутують. Як і для лінійного закону, на рис. 7–9 зображено розрахункові залежності інверсного струму, оберненої індуктивності та активного опору першого тиристора.

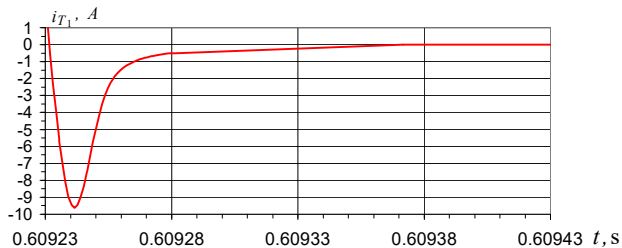


Рис. 7. i_{T_1} – інверсний струм першого тиристора (параболічний закон)

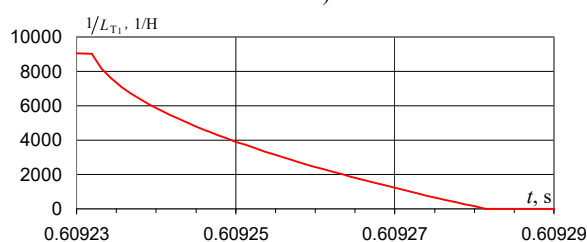


Рис. 8. $1/L_{T_1}$ – обернена індуктивність 1-го тиристора (параболічний закон)

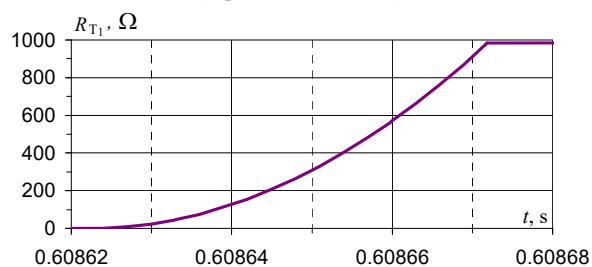


Рис. 9. R_{T_1} – активний опір першого тиристора (параболічний закон)

З рис. 7 видно, що загалом характер струму першого тиристора є подібним до характеру струму на рис. 4, а відрізняються крива струму на рис. 7 від струму на рис. 4 більшим максимальним значенням інверсного струму, яке дорівнює $i_{T_1} = -9.63$ А. Така різниця пояснюється меншим значенням активного опору та індуктивності тиристора на початку проміжку часу відновлення властивостей тиристора для запертого стану, що виразно видно з рис. 8 та 9, на яких відповідні криві мають параболічну форму на етапі зміни параметрів тиристорів.

Факт різних значень максимуму інверсного струму для лінійного і параболічного закону зміни параметрів тиристора (що апріорі є очевидним), який комутує, означає проблему вибору варіанту закону під час комп'ютерного моделювання. З одного боку, лінійний закон за усередненим значенням повинен доволі точно описувати зміну параметрів, але, з другого боку, в реальних умовах такі фізичні процеси практично рідко є лінійними, а тому існують підстави стверджувати, що тут слід застосувати якийсь інший –

нелінійний (наприклад, параболічний) закон. Подібно до того, як час відновлення властивостей тиристорів для запертого стану є різним залежно від розміру і типу тиристорів та їх окремих структур (емітерів та баз), логічно в кожному разі окремо підбирати закон зміни параметрів тиристора. На цьому етапі дослідження йдеться лише про методи врахування інверсного струму на принципово вищому рівні адекватності, а ніж це пропонується іншими відомими на тепер методами і, як наслідок, точнішого врахування комутаційних процесів тиристорів, які відбуваються під час їх запирання.

Таким чином, результати математичного моделювання СВЗС з врахуванням наявності інверсного струму в тиристорах, які комутують під час їх запирання, отримані з використанням запропонованого методу, дають підставу стверджувати, що принципово такий підхід є достатньо аргументованим з погляду прийнятих коректних вихідних припущень і таким, що відповідає реальним процесам, які відбуваються в тиристорі на етапі його запирання та відновлення властивостей для запертого стану, на рівні концентрації носіїв електричних зарядів в реальних тиристорах, що остаточно проявляється в зміні опору тиристора і його функціонуванні як напівпровідника. Адже концентрація зарядів в структурах тиристора і його опір перебувають в причинно-наслідковому зв'язку, а це означає, що, якщо обґрунтовано і раціонально вибрати необхідний закон зміни параметрів тиристора для етапу відновлення властивостей для запертого стану, то такий закон відповідатиме еквівалентно реальним концентраціям електричних зарядів, що аргументує їх врахування.

Висновки та перспектива досліджень.

1. В наявній на тепер великій кількості методів математичного моделювання ВПЧ надто мало предметної уваги виділено врахуванню інверсних струмів, які виникають під час запирання вентилів і, які реально існують в запертих вентилях та мають певний вплив як на перебіг процесів у ВПЧ, так і на їх функціонування загалом. Коректне врахування інверсних струмів вентилів (особливо під час їх запирання) залишається актуальною проблемою, вирішення якої дало б змогу істотно підвищити рівень адекватності математичного моделювання ВПЧ.

2. В деяких методах інверсні струми вентилів не враховуються взагалі, наприклад, в ключових S-моделях [14] або отримуються некоректними через прийняту у вихідних припущеннях миттєву комутацію вентилів та, як наслідок, стрімку раптової зміну першої похідної струму вентиля, який комутує під час його запирання, а тому інверсними струмами ігнорують [15–17] на підставі малості їх значень.

3. Пропонується процес запирання вентилів, з врахуванням відновлення їх властивостей для запертого стану, моделювати зміною (за визначеним законом) параметрів, якими слугують обернена індуктивність і активний опір, протягом відомого часу запирання. Остаточне запирання вентилів виконати після сплину часу відновлення властивостей вентилів для запертого стану. Такий метод, з одного боку, забезпечує плавну зміну параметрів вентилів під час їх запирання та, як

наслідок, коректні значення інверсного струму, а з другого боку, враховує виникнення та динаміку зміни інверсного струму на етапі запирання вентилів під час відновлення їх властивостей для запертого стану, що істотно підвищує рівень адекватності математичного моделювання як самих ВПЧ, так і електротехнічних систем, які містять ВПЧ.

4. Результати комп'ютерного моделювання ВПЧ, отримані із застосуванням в математичній моделі запропонованого методу, дають підстави стверджувати, що наявність та закономірність зміни інверсних струмів відповідає процесам, які відбуваються у ВПЧ, на рівні концентрації носіїв електричних зарядів з погляду її прояву у величині та характері інверсного струму, що, своєю чергою, вказує на підвищення рівня адекватності математичного моделювання ВПЧ.

5. Предметом досліджень на перспективу вбачається визначення законів зміни динамічних параметрів вентилів відповідно до закономірності зміни концентрації носіїв зарядів у їх конструкційних і водночас функційних структурах (базах та емітерах).

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шаповал І.А., Михальський В.М., Дорошенко А.Л. Регулювання швидкості машини подвійного живлення з керуваннями перетворювачами в колах статора і ротора. *Технічна електродинаміка*, 2017, № 6, с. 18-25. doi: <http://doi.org/10.15407/techned2017.06.018>.
2. Мазуренко Л.І., Лищенко А.І. *Асинхронные генераторы с вентиляльным и вентиляльно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок.* – Київ: Наукова думка, 2011. – 272 с.
3. Мазуренко Л.І., Василів К.М., Джура О.В., Коцюруб А.В. Імітаційна модель та алгоритм керування автономною гідровітровою системою електроживлення. *Технічна електродинаміка*, 2020, № 1, с. 17-26. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.017>.
4. Новиков М.А., Панфилов Ж.И., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов в преобразователях с многообмоточными трансформаторами. *Электричество*, 2013, № 6, с. 29-35.
5. Шидловська Н.А., Захарченко С.М. Розвиток напівпровідникових розрядно-імпульсних систем обробки гранульованих струмопровідних середовищ. *Технічна електродинаміка*, 2020, № 3, с. 69-78. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.069>.
6. Джюджи Л., Пелли Б. *Силовые полупроводниковые преобразователи частоты.* – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
7. Жемеров Г.Г. *Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью.* – М.: Энергия, 1977. – 280 с.
8. Zhemerov G.G., Krylov D.S., Mashura A.V. Energy efficiency of the subway electrical supply system with electrical energy recovery at braking. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 25-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.04>.
9. Khlopenko N.J. Calculation and design of a robust speed controller of a frequency-controlled induction electric drive. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 3, pp. 31-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.05>.
10. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 6, с. 62-68. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.
11. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 12-16. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.02>.
12. Onikienko Y.O., Pilinsky V.V., Popovych P.V., Lazebnyi V.S., Smolenska O.I., Baran V.S. Modelling of operation modes and electromagnetic interferences of gan-transistor converters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 3, pp. 37-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.06>.
13. Rymsha V.V., Radimov I.N., Gulyy M.V., Merkulov I.V. Motorsolve software package: verification of parameters and characteristics of the brushless permanent magnet motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 20-24. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.03>.
14. Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я. и др. Вентильные преобразователи переменной структуры. – Киев: Наукова думка, 1989. – 336 с.
15. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Вища школа, 1986. – 164 с.
16. Дижур Д.П. Метод моделирования на ЦВМ вентильных преобразовательных схем. *Известия НИИ постоянного тока*, 1970, № 16, с. 7-9.
17. Филиц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с.
18. Гуцалюк В.Я., Юрченко О.М., Зубков І.С., Пазенко В.П. Послідовне з'єднання резонансних інверторів напруги високо частотних установок індукційного нагріву. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 4, с. 70-73. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.
19. Белов Г.А., Серебрянников А.В., Гаранин С.Г. Расчет и анализ процессов в реверсивных импульсных преобразователях с двусторонней разностной широтно-импульсной модуляцией. *Электричество*, 2013, № 2, с. 42-63.
20. Горякин Д.В., Мыщык Г.С. Исследование режимов работы трехфазной мостовой инверторной схемы. *Электричество*, 2012, № 5, с. 23-31.
21. Мазуренко Л.І., Василів К.М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження автономного асинхронізованого генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 6, с. 46-49. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.046>.

REFERENCES

1. Shapoval I.A., Mykhalskyi V.M., Doroshenko A L. Speed control of the doubly-fed induction machine with controlled converters in the stator and rotor circuits. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 6, pp. 18-25. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.018>.
2. Mazurenko L.I., Lishchenko A.I. *Asinkhronnye generatory s ventil'nyum i ventil'no-emkostnym vozvuzhdeniem dlia avtonomnykh energoustanovok* [Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power plants]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2011. 272 p. (Rus).
3. Mazurenko L.I., Vasylyiv K.M., Dzhura O.V., Kotsiuruba A.V. Simulation model and control algorithm for isolated hydro-wind power system. *Technical Electrodynamics*, 2020, no. 1, pp. 17-26. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.017>.
4. Novikov M.A., Panfilov Zh.I., Remizevich T.V., Rashitov P.A. Analysis of the processes of simultaneous switching of thyristor bridges in converters with multi-winding transformers. *Elektrichestvo*, 2013, no. 6, pp. 29-35. (Rus).
5. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M. Progress of semiconductor discharge-pulse systems for processing granular conduc-

tive media. *Technical Electrodynamics*, 2020, no. 3, pp. 69-78. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.069>.

6. Dzhindzhi L., Pelli B. *Silovyye poluprovodnikovyye preobrazovatelyi chastoty* [Power semiconductor frequency converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 400 p. (Rus).

7. Zhemerov G.G. *Tiristornyye preobrazovatelyi chastoty s neposredstvennoy svyaz'iu* [Thyristor frequency converters with direct connection]. Moscow, Energiia Publ., 1977. 280 p. (Rus).

8. Zhemerov G.G., Krylov D.S., Mashura A.V. Energy efficiency of the subway electrical supply system with electrical energy recovery at braking. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 25-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.04>.

9. Khlopenko N.J. Calculation and design of a robust speed controller of a frequency-controlled induction electric drive. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 3, pp. 31-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.05>.

10. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the facts upon an electrical network's mode during direct start-up of an asynchronous machine in the complex load's composition. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 6, pp. 62-68. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.

11. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 4, pp. 12-16. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.02>.

12. Onikienko Y.O., Pilinsky V.V., Popovych P.V., Lazebnyi V.S., Smolenska O.I., Baran V.S. Modelling of operation modes and electromagnetic interferences of gan-transistor converters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 3, pp. 37-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.06>.

13. Rymsha V.V., Radimov I.N., Gulyy M.V., Merkulov I.V. Motorsolve software package: verification of parameters and characteristics of the brushless permanent magnet motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 20-24. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.03>.

14. Tonkal' V.E., Rudenko V.S., Zhuikov V.Ia. *Ventil'nye preobrazovatelyi peremennoi struktury* [Valve converters of variable structure]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1989. 336 p. (Rus).

15. Plakhtyna E.G. *Matematicheskoe modelirovanie elektromashinno-ventil'nykh system* [Mathematical modeling of electromachine-valve systems]. Lvov, Vishcha Shkola Publ., 1986. 164 p. (Rus).

16. Dizhur D.P. Method of simulation on a digital computer of valve converter circuits. *Izvestia of the Research Institute of Direct Current*, 1970, no. 16, pp. 7-9. (Rus).

17. Fil'ts R.V. *Matematicheskie osnovy teorii elektromekhanicheskikh preobrazovatelyi* [Mathematical foundations of the theory of electromechanical converters]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1979. 208 p. (Rus).

How to cite this article:

Vasylyv K.M. Method of dynamic parameters for mathematical modelling of switching processes of valves closing of semiconductor converters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 28-38. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.05>

18. Hutsaliuk V.Y., Yurchenko O.M., Zubkov I.S., Pazenko V.P. Serial connecting of resonant voltage inverters for high-frequency induction heating equipment. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 4, pp. 70-73. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.

19. Belov G.A., Serebriannikov A.V., Garanin S.G. Calculation and analysis of processes in reversible pulse converters with two-way differential pulse-width modulation. *Elektrichestvo*, 2013, no. 2, pp. 42-63. (Rus).

20. Goriakin D.V., Mytsyk G.S. Study of the operating modes of a three-phase bridge inverter circuit. *Elektrichestvo*, 2012, no. 5, pp. 23-31. (Rus).

21. Mazurenko L.I., Vasylyv K.M. The law of the electric magnetic processes of the security exercise systems of the autonomous asynchronous generator on the case of the cascade three-phase three-flexible voltage modulator. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 6, pp. 46-49. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.046>.

Надійшла (Received) 03.02.2022
 Прийнята (Accepted) 25.03.2022
 Опублікована (Published) 01.06.2022

Василів Карл Миколайович ¹, д.т.н., проф.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
 79013, Львів, вул. Степана Бандери, 12,
 e-mail: karl.vasylyv@gmail.com (Corresponding author)

K.M. Vasylyv ¹
¹ Lviv Polytechnic National University,
 12, Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Method of dynamic parameters for mathematical modelling of switching processes of valves closing of semiconductor converters.

A method has been developed for mathematical modeling of valve frequency converters (VFC) based on an analysis of the nature of the occurrence and patterns of the flow of inverse current of valves when they are locked using the dynamic parameters of valves, which are series-connected inductance and active resistance, changing in accordance with the pattern of concentration dynamics charges in semiconductor structures (bases, emitters and p-n junctions. Taking into account the presence of the inverse current of semiconductor valves significantly increases the level of adequacy of mathematical modeling of VFCs of arbitrary structure and purpose and in arbitrary modes of their operation, including asymmetric and emergency transient electromagnetic processes of electrotechnical complexes with VFCs, not only during the time interval of switching (closing) of valves, but throughout the entire time modeling. References 21, figures 9.

Key words: valve, switching, inverse current, adequacy level, mathematical model, software code.