

СТАБІЛІЗАЦІЯ НАПРУГИ ВУЗЛА ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ДВООПЕРАЦІЙНИХ ТИРИСТОРІВ

Андрій Чабан¹, д. т. н., Євген Федів², к. т. н., Ольга Сівакова³, к. т. н., Іван Дробот⁴

¹*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: atchaban@gmail.com,*

²*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна,
e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua,*

³*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна,
e-mail: olha.m.sivakova@lpnu.ua,*

⁴*Львівський національний університет природокористування,
вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: dim39.2017@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.101>

Чабан А., Федів Є., Сівакова О., Дробот І. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження за допомогою двоопераційних тиристорів

У статті здійснено аналіз способів стабілізації напруги у вузлі електричного навантаження. Для стабілізації напруги у вузлі можна використати декілька методів: зменшити коефіцієнт трансформації силового трансформатора або збільшити напругу на первинній обмотці трансформатора. Зрозуміло, що згадані методи, з одного боку, збільшують напругу вузла навантаження, а з іншого – збільшують струми в обмотках трансформатора (закон Ома). Існує інший метод збільшення досліджуваної напруги, який полягає в додатковому підключенні паралельно до вузла навантаження додаткової вітки, яку загалом можна подати як активно-смісне навантаження. Такий підхід призводить до зменшення струму у вторинній обмотці трансформатора, а отже – до збільшення напруги вузла електричного навантаження. В усталеному процесі така стабілізація напруги отримала назву – компенсація реактивної потужності. Отже, основним критерієм компенсації реактивної потужності у вузлах електричного навантаження є зменшення струму у вузлі за рахунок впровадження елементів активно-смісного характеру.

Ми пропонуємо такий пристрій, який складається з активного елемента, зашунтованого двома двоопераційними тиристорами, підключеними зустрічно паралельно. Двоопераційні тиристори дають змогу керувати напругою елемента в досить широкому діапазоні. Випрямлячі на основі двоопераційних тиристорів за відповідних законів керування імпульсом можна умовно розглядати як активно-смісні елементи, тобто джерела реактивної потужності.

У статті представлено побудовану математичну модель спрощеного вузла електричного навантаження, який складається з віток активно-індуктивного навантаження та стабілізуючого пристрою мостового типу з двома двоопераційними тиристорами. На цій підставі розглянуто питання стабілізації напруги згаданого вузла. Отримано результати комп'ютерної симуляції електромагнітних процесів у вигляді рисунків і проаналізовано їх.

Ключові слова: вузол електричного навантаження, стабілізація напруги, математична модель, двоопераційні тиристори, комп'ютерна симуляція.

Chaban A., Fediv E., Sivakova O., Drobot I. Stabilization of the voltage of the electrical load unit by using two-operation thyristors

The article analyzes methods of voltage stabilization in the electric load node. Several methods can be used to stabilize the voltage at the node, namely to reduce transformation ratio of the power transformer or increase the voltage of the primary winding of the transformer. It is clear that the mentioned methods, on one hand, increase the voltage of the load node, and on the other hand, they increase the resistances in the transformer windings (Ohm's law). There is another method to increase the tested voltage, which consists in the additional connection of an additional line in parallel to the load node, which in general can be presented as an active-capacitive load. This approach leads to a decrease in the current in the secondary winding of the transformer, which means an increase in the voltage of the electrical load node. In the established process, such voltage stabilization was called reactive power compensation. Therefore, the main criterion for reactive power compensation in electric load nodes is reduction of the current in this node due to introduction of active-capacitive elements.

Authors of the research offer such device, which consists of an active element shunted by two two-operation thyristors connected in opposite parallel. Bi-operational thyristors make it possible to control the voltage of the element in a fairly

wide range. Rectifiers based on two-operation thyristors can be conditionally considered as active-capacitive elements, i.e. sources of reactive power, according to the corresponding pulse control laws.

This article presents a constructed mathematical model of a simplified electrical load node, which consists of circuits of an active-inductive load and a bridge-type stabilizing device with two double-operation thyristors. On this basis, the issue of voltage stabilization of the mentioned node was considered. The obtained results of computer simulation of electromagnetic processes in the form of drawings are analyzed.

Key words: electric load node, voltage stabilization, mathematical model, two-operation thyristors, computer simulation.

Постановка проблеми. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження є однією з актуальних проблем сучасної електротехніки. Особливо питання набуває чинності в системах великої та середньої потужності. Генезис згаданого питання є відомим, а фізична суть його ґрунтується на так званих зовнішніх характеристиках синхронного генератора (залежність напруги генератора від струму якоря за постійного струму збудження за різних типів електричного навантаження: R-L, R, R-C) [4; 5]. Активно-індуктивне навантаження найбільше «сади́ть» напругу на виводах якоря генератора, а відтак воно «сади́ть» напругу вузла електричного навантаження, оскільки переважна більшість елементів віток вузлів електричного навантаження становить власне навантаження згаданого типу (силові трансформатори, асинхронні електроприводи, реактори тощо) [6]. Для стабілізації напруги у вузлі можна використати декілька методів. Наприклад, зменшити коефіцієнт трансформації силового трансформатора або збільшити напругу на первинній обмотці трансформатора. Зрозуміло, що згадані методи, з одного боку, збільшують напругу вузла навантаження, а з іншого – збільшують струми в обмотках трансформатора (закон Ома). Існує інший метод збільшення досліджуваної напруги, який полягає в додатковому підключенні паралельно до вузла навантаження додаткової вітки, яку загалом можна подати як активно-ємнісне навантаження. Такий підхід призводить до зменшення струму у вторинній обмотці трансформатора, а отже – до збільшення напруги вузла електричного навантаження. В усталеному процесі така стабілізація напруги отримала назву – компенсація реактивної потужності. Отже, основним критерієм компенсації реактивної потужності у вузлах електричного навантаження є зменшення струму у вузлі за рахунок впровадження елементів активно-ємнісного характеру, наприклад, використання компенсаційних батарей, синхронних електроприводів (синхронних компенсаторів) або специфічних пристроїв найрізноманітнішої природи.

У цій праці ми пропонуємо один із таких пристроїв, який складається з активного елемента, зашунтованого двома двоопераційними тиристорами, підключеними зустрічно паралельно. Двоопераційні тиристри – це такий тип напівпровід-

никових елементів, які подібно до звиклого тиристора відкриваються за допомогою керуючого імпульсу, а закриваються не в природний спосіб (при переході струму через нуль), а за допомогою іншого керуючого сигналу. Тобто двоопераційні тиристри дають змогу керувати напругою елемента в досить широкому діапазоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З теорії електропостачання відомо, що використання різноманітних звиклих випрямлячів тиристорного типу в загальному випадку відносно вузла електричного навантаження можна розглядати як специфічні елементи умовно активно-індуктивного типу, тобто споживачами реактивної потужності [7; 8]. Натомість подібні випрямлячі на основі двоопераційних тиристорів за відповідних законів керування імпульсом можна умовно розглядати як активно-ємнісні елементи, тобто джерела реактивної потужності [1–4]. Аналізуючи згадане, ми задалися логічним питанням, який фізичний зміст мають такі твердження, адже в першому випадку немає індуктивності, а в другому – немає ємності. Відповідь на це питання ґрунтується на теорії нелінійних елементів. Оскільки питання щодо компенсації реактивної потужності стосується лише синусоїдальних величин (зрозуміло, в усталених процесах), то, на нашу думку, ставити питання про споживання або генерування реактивної енергії в нелінійних елементах некоректно, оскільки це суперечить самому визначенню поняття *виключно розрахункової величини – реактивної потужності*. Тому надалі ми розглядатимемо проблему лише у фізичній площині, а отже, згадані вище пристрої розглядатимемо як пристрої стабілізації напруги вузла електричного навантаження.

Постановка завдання. Наше завдання – побудувати математичну модель спрощеного вузла електричного навантаження, який складається з віток активно-індуктивного навантаження та стабілізуючого пристрою мостового типу з двома двоопераційними тиристорами (на цій підставі розглянуто питання стабілізації напруги згаданого вузла), а також отримати результати комп'ютерної симуляції у вигляді рисунків і проаналізувати їх.

Виклад основного матеріалу. Математична модель досліджуваного об'єкта. У цій праці ми не ставили питання про використання досліджуваних пристроїв у промислових масштабах, тобто дослідження реальних вузлів електричного навантаження із силовими трансформаторами, асинхронними електроприводами, реакторами тощо. Це питання ми плануємо розглянути в подальших наших працях. Отже, задля спрощення моделі досліджуваного об'єкта ми використовуємо як вітки вузла електричного навантаження звичайні послідовно з'єднані R-L елементи (рис. 1).

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1}(e(t) - V_0 - r_1 i_1); \quad (1)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_2}(-V_0 - r_2 i_2); \quad (2)$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_3}(-V_0 - r_3 i_3); \quad (3)$$

$$V_0 = -v_x - r_4 i_4; \quad (4)$$

$$i_4 = -i_1 - i_2 - i_3, \quad (5)$$

де V_0 – напруга вузла електричного навантаження.

Побудуємо на підставі двох законів Кірхгофа математичну модель вузла електричного навантаження з компенсаційним пристроєм, який побудовано з використанням двох з'єднаних зустрічно-паралельно двоопераційних тиристорів, що шунтують резистивний елемент r_x (див. рис. 1).

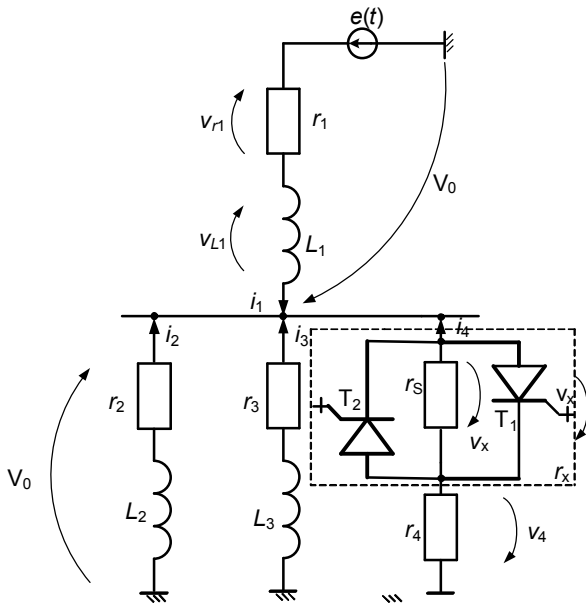


Рис. 1. Принципова електрична схема вузла електричного навантаження
Fig. 1. Schematic electrical diagram of an electrical load unit

Оскільки двоопераційні тиристори дають змогу відкривати та закривати останні в досить широкому діапазоні, то для прикладу використаємо кут керування 90° градусів. У першому випадку розглянемо кут відкриття тиристора $\alpha \in [90^\circ; 180^\circ]$, а в другому – кут закриття $\alpha \in [0^\circ; 90^\circ]$.

1. Перший випадок: $\alpha \in [90^\circ; 180^\circ]$

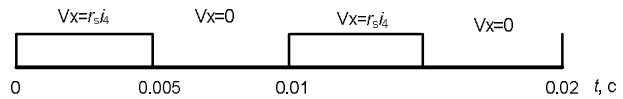


Рис. 2. Часова діаграма роботи нелінійного елемента $r_x \alpha \in [90^\circ; 180^\circ]$

Fig. 2. Time diagram of the operation of a non-linear element $r_x \alpha \in [90^\circ; 180^\circ]$

2. Другий випадок: $\alpha \in [0^\circ; 90^\circ]$

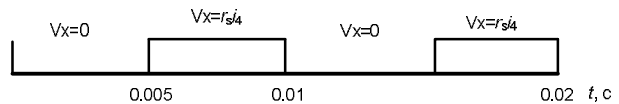


Рис. 3. Часова діаграма роботи нелінійного елемента $r_x \alpha \in [0^\circ; 90^\circ]$

Fig. 3. Time diagram of the operation of a non-linear element $r_x \alpha \in [0^\circ; 90^\circ]$

Результати комп'ютерної симуляції. Як досліджуваний об'єкт використано прототип вузла електричного навантаження, що складається з активно-індуктивних елементів та компенсаційного пристрою (див. рис. 1). Параметри електротехнічної системи такі: $e(t) = -310 \sin 314t$, $r_1 = 0,5$ Ом, $r_2 = 1$ Ом, $r_3 = 1$ Ом, $r_4 = 0,5$ Ом, $r_x = 0,5$ Ом, $L_1 = 0,001$ Гн, $L_2 = 0,01$ Гн, $L_3 = 0,01$ Гн. За таких параметрів сталі часу інтегрування диференціальних рівнянь стану системи (див. рис. 1) є досить малими, що дало змогу менш ніж за п'ять періодів (0,01 с) увійти в усталений процес. Тобто на часовому проміжку $[0,08; 0,1]$ с у вузлі повністю наступив усталений процес. Комп'ютерна симуляція процесів відбувалась у два етапи. На першому етапі аналізували електротехнічну систему для звичкої роботи тиристорів (див. рис. 1, рис. 2), а на другому – у стані керованого замикання тиристорів (рис. 3). На періоді усталеного процесу на двох етапах симуляції обчислювали середньоквадратичне значення напруги вузла електричного навантаження. Ці обчислення проводили за допомогою методу Сімпсона.

1. Приклад для кута $\alpha \in [90^0; 180^0]$ (див. рис. 2).

На рис. 4–6 показано перехідні: напругу вузла електричного навантаження, спад напруги на нелінійному елементі та спад напруги на додатковому опорі r_4 у вітці з тиристорним пристроєм, відповідно на першому етапі комп'ютерної симуляції. Тиристорний міст працює у звичайний спосіб, тобто в стані імпульсного відкриття елемента і природного його закриття (див. рис. 2). Форма напруги на нелінійному елементі представлена на

рис. 5, що відповідає часовій діаграмі роботи керуванних вентилів (див. рис. 2). Очевидно, що у відкритому стані тиристор шунтує опір r_s . А це означає, що спад напруги на згаданому опорі є нульовим. Відповідно в закритому стані струм протікає через цей опір, що, власне, й спричинює спад напруги на ньому. Такі процеси у вітці керування призводять до нелінійного перебігу напруги вузла навантаження (див. рис. 4). Ця напруга обчислюється як сума спадів напруг на нелінійному елементі та допоміжному опорі r_4 , див. вираз (4).

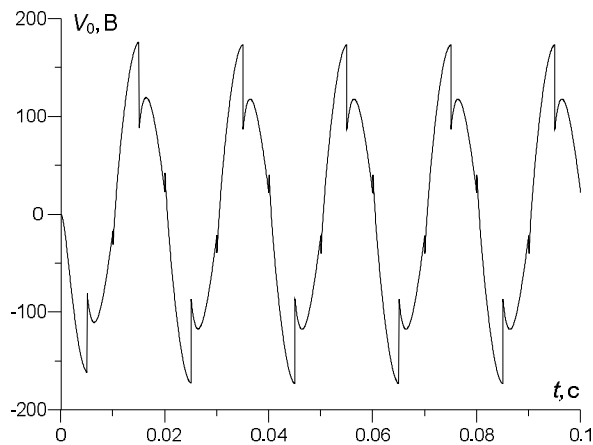


Рис. 4. Перехідна напруга вузла V_0 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 4. Node transient voltage V_0 at the first stage of the computer simulation

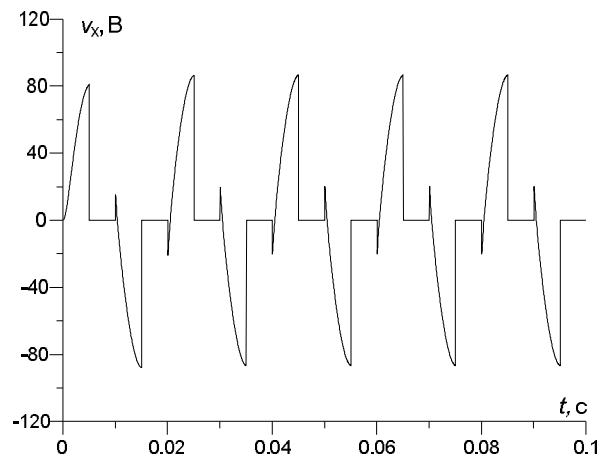


Рис. 5. Перехідна напруга на нелінійному елементі v_x на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 5. Transient voltage on the non-linear element v_x in the first stage of the computer simulation

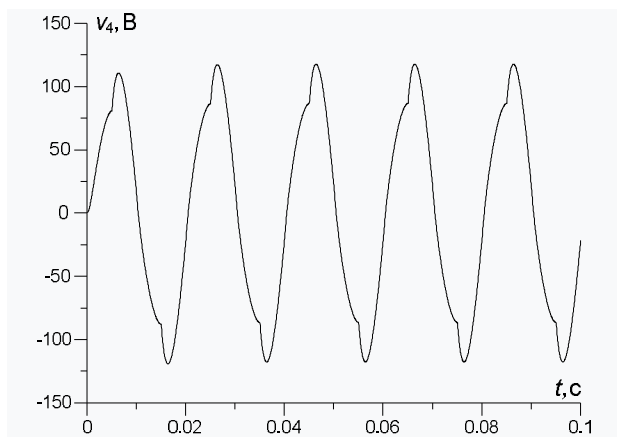


Рис. 6. Перехідна напруга вузла v_4 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 6. Transient voltage of the node v_4 in the first stage of the computer simulation

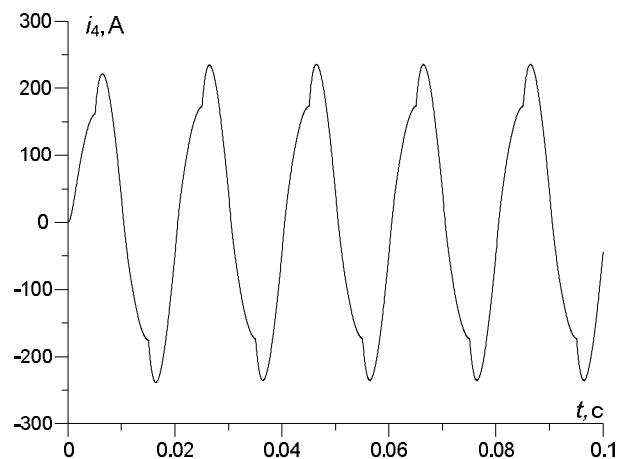


Рис. 7. Перехідний струм i_4 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 7. Transient current i_4 at the first stage of the computer simulation

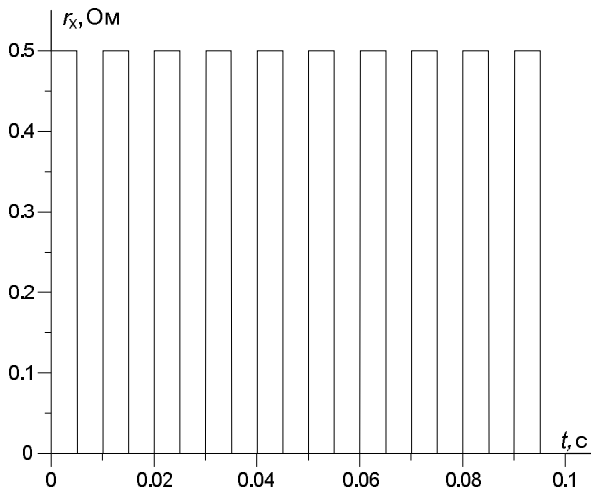


Рис. 8. Значення опору r_x нелінійного елемента як функції часу на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 8. Value of the resistance r_x of the nonlinear element as a function of time at the first stage of the computer simulation

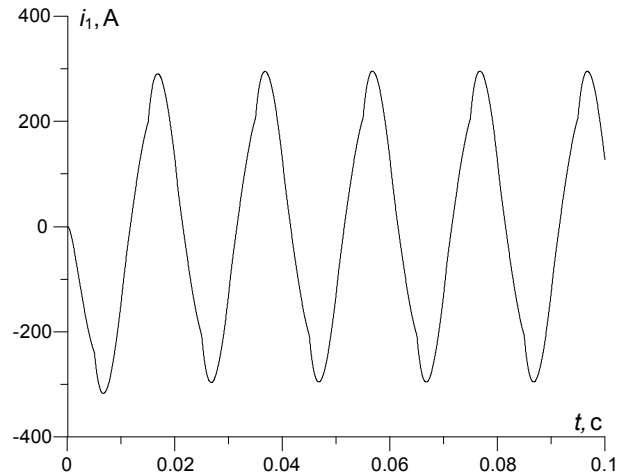


Рис. 9. Перехідний струм i_1 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 9. Transient current i_1 at the first stage of the computer simulation

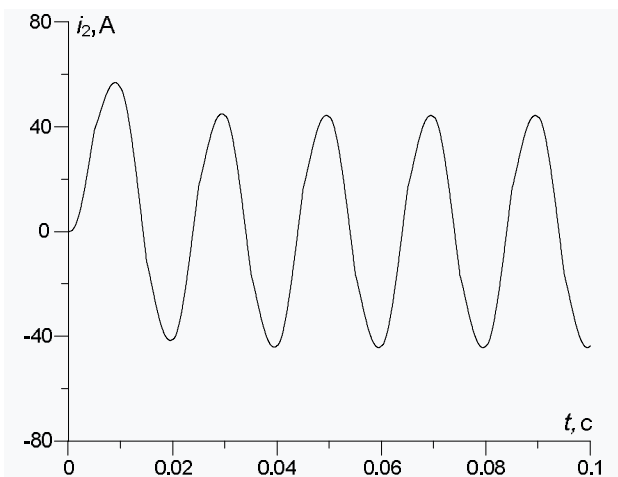


Рис. 10. Перехідний струм i_2 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 10. Transient current i_2 at the first stage of the computer simulation

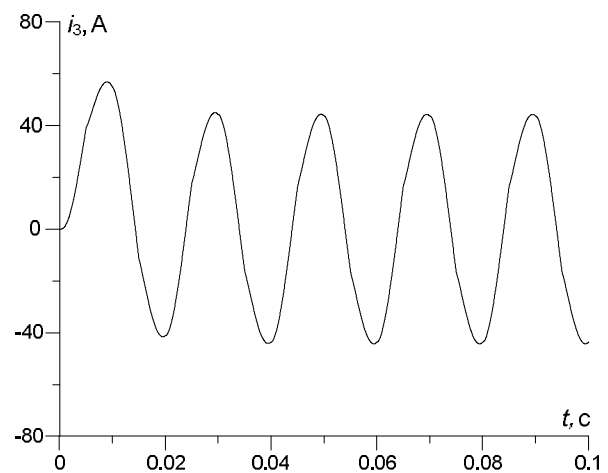


Рис. 11. Перехідний струм i_3 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 11. Transient current i_3 at the first stage of the computer simulation

На рис. 7 показано перехідний струм i_4 на першому етапі комп'ютерної симуляції. Зрозуміло, що форма цього струму ідентична формі спаду напруги на опорі r_4 (див. рис. 6). Натомість щодо нелінійного елемента r_s , то тут форми струму й напруги кардинально різняться (див. рис. 5).

На рис. 8 показано значення опору r_x нелінійного елемента як функції часу на першому етапі комп'ютерної симуляції. Згаданий рисунок доцільно розглядати в парі з рис. 2, який репрезентує часову діаграму роботи нелінійного елемента. Від 0 до 90 градусів обидва тиристори закриті, а

отже, спад напруги на опорі r_s є максимальним. Від 90 до 180 градусів відкритий перший тиристор, який шунтує опір r_s . Далі, від 180 до 270 обидва тиристори закриті, що спричинює знову максимальний спад напруги на опорі, і від 270 до 360 градусів відкритим є другий тиристор, який знову ж таки шунтує опір r_s , чим створює нульовий спад напруги. І далі цикл повторюється.

На рис. 9 показано перехідний струм i_1 на першому етапі комп'ютерної симуляції. Нелінійність цього струму пов'язана з роботою напівпровідникового елемента в четвертій вітці вузла навантаження.

На рис. 10 і 11 показано перехідні струми i_2 та i_3 на першому етапі комп'ютерної симуляції. Вони є однакові (див. параметри схеми).

Середньоквадратичне значення напруги V_0 на часовому інтервалі $[0,08; 0,1]$ с $U_0=106,51$ В.

2. Приклад для кута $\alpha \in [0^0; 90^0]$ (див. рис. 3).

На рис. 12–14 показано ті самі напруги, що й на першому етапі симуляції, але тепер на другому

етапі. Порівняно з рис. 4–6 тепер ситуація кардинально відрізняється навіть візуально, що безперечно пов'язано з часовою діаграмою праці двоопераційних тиристорів. На перший погляд, симетричність сигналів для роботи мостового пристрою не повинна вплинути на напруги вузла та спади напруг на його елементах, натомість форми згаданих функцій показують протилежне.

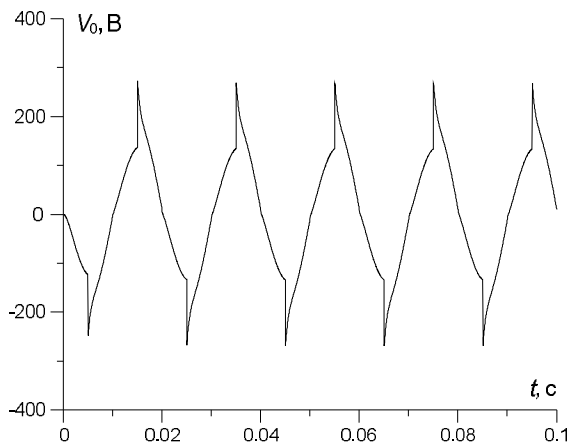


Рис. 12. Перехідна напруга вузла V_0 на другому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 12. Transient voltage of the node V_0 at the second stage of the computer simulation

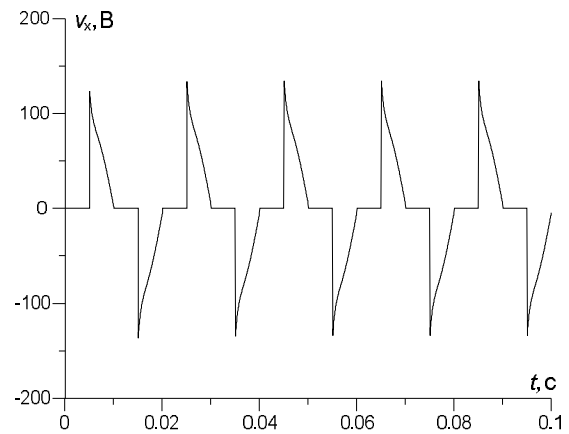


Рис. 13. Перехідна напруга на нелінійному елементі v_x на другому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 13. Transient voltage on the non-linear element v_x in the second stage of the computer simulation

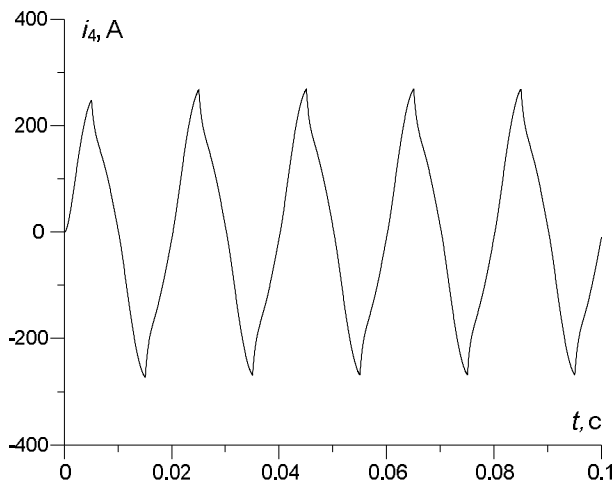


Рис. 14. Перехідна напруга вузла v_4 на першому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 14. Transient voltage of the node v_4 at the first stage of the computer simulation

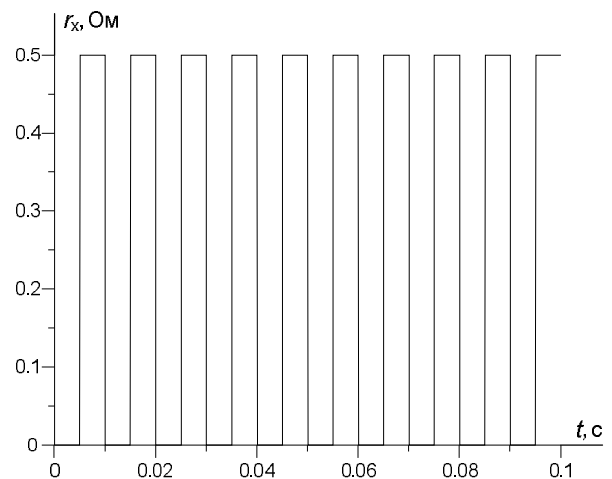


Рис. 15. Значення опору r_x нелінійного елемента як функції часу на другому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 15. Value of resistance r_x of a non-linear element as a function of time in the second stage of the computer simulation

На рис. 15 показано значення опору r_x нелінійного елемента як функції часу на другому етапі комп'ютерної симуляції. Тепер згаданий рисунок

доцільно розглядати в парі з рис. 3, який репрезентує часову діаграму роботи нелінійного елемента. Від 0 до 90 градусів відкритий перший тиристор,

який шунтує опір r_s . Спад напруги на нелінійному елементі дорівнює нулю. Від 90 до 180 градусів обидва тиристри закриті, а отже, спад напруги на опорі r_s є максимальним. Від 180 до 270 градусів тепер відкритим є другий тиристор, який знову ж таки шунтує опір r_s , чим створює нульовий спад напруги. І, кінцево, від 270 до 360 градусів обидва тиристри закриті, що спричинює знову максимальний спад напруги на опорі. І далі цикл повторюється. Порівняно з рис. 7 робота мостового елемента є зсунутою в часі на 180 ел. градусів.

На рис. 16 і 17 показано перехідні струми в першій та другій вітках вузла електричного навантаження на другому етапі комп'ютерної симуляції. Знову ж таки, порівняно з першим етапом симуляції тепер ситуація є іншою, особливо це стосується струму в першій вітці (див. рис. 9). Форма струмів відрізняється, що, зрозуміло, пов'язане з роботою мостового напівпровідникового елемента. Щодо рис. 17, то візуальна форма перебігу струму дещо

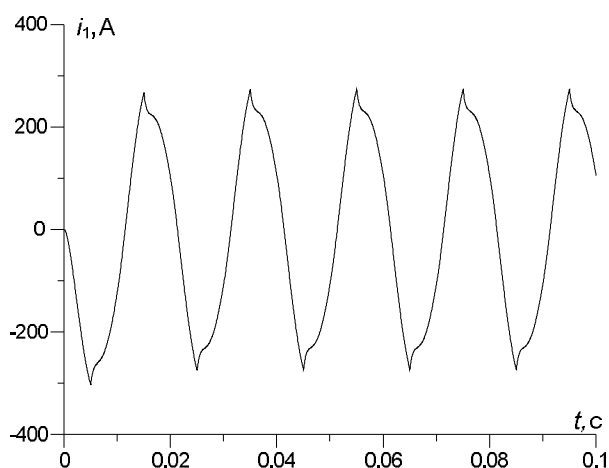


Рис. 16. Перехідний струм i_1 на другому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 16. Transient current i_1 at the second stage of the computer simulation

Зауважимо цікавий результат, який був нами отриманий. Якщо в електричній схемі (див. рис. 1) відкинути всі індуктивності, тобто закласти: $L_1=0$ Гн, $L_2=0$ Гн, $L_3=0$ Гн, то результати аналізу згаданої схеми будуть такими. Форми досліджуваних функцій для обох етапів комп'ютерної симуляції будуть відрізнятися, натомість середньоквадратичні значення напруги вузла електричного навантаження будуть *незмінними!* Це дає нам підстави стверджувати, що стабілізуючий ефект двоопераційного елемента мостового типу проявлятиме стабілізуючий ефект для напруги вузла лише в разі наявності у вітках цього вузла реактивних (тут індуктивностей) елементів.

подібна до першого етапу (див. рис. 10). Різниця проглядається в амплітудах досліджуваних функцій. На другому етапі значення амплітуд функції струму майже на 10 % є більшими порівняно з першим етапом.

Середньоквадратичне значення напруги V_0 на інтервалі $[0,08; 0,1]$ с $U_0=119,31$ В.

Порівнюючи середньоквадратичні значення напруг вузла електричного навантаження, можемо явно стверджувати про стабілізуючий ефект мостового елемента в стані керуванням закриттям тиристорами відносно напруги вузла електричного навантаження (другий етап симуляції). Натомість у звичному стані праці тиристорів ситуація протилежна – ефект зниження напруги вузла навантаження. Таким чином, можна зробити висновок, що стосовно вузла навантаження перша схема роботи елемента *формально* може розглядатись як активно-індуктивне навантаження, а друга схема – як активно-ємнісне.

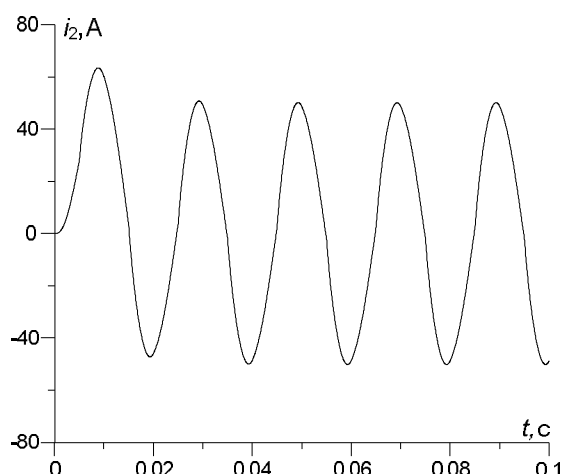


Рис. 17. Перехідний струм i_2 на другому етапі комп'ютерної симуляції

Fig. 17. Transient current i_2 at the second stage of the computer simulation

Висновки. 1. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження є можливою в разі використання не тільки звичких компенсуючих пристроїв, наприклад, компенсаційних батарей, синхронних компенсаторів, але й у разі використання специфічних пристроїв, зокрема двоопераційних тиристорів.

2. Використання двоопераційних тиристорів у вузлах електричного навантаження спричинює глибоку нелінійність досліджуваних функціональних залежностей: напруг, струмів, потужностей.

3. Для стабілізації напруги вузла електричного навантаження необхідна обов'язкова наяв-

ність віток з реактивними елементами, зокрема з індуктивностями. У протилежному випадку стабілізація напруги є неможливою.

Бібліографічний список

1. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами / М. В. Хворост та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 4. С. 67-72.
2. Перетворювальна техніка. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров та ін. Харків: Фоліо, 2000. 360 с.
3. Сівакова О., Федів Є. Особливості фазового тиристорного регулювання статичних джерел реактивної потужності. *Технічні вісті*. 2010. 1(31), 2(32). С. 48-50.
4. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
5. Chaban A., Lis M., Szafraniec A. Voltage Stabilisation of a Drive System Including a Power Transformer and Asynchronous and Synchronous Motors of Susceptible Motion Transmission. *Energies*. 2022. 15. P. 811.
6. Chaban A., Perzynski T., Popenda A. et al. Mathematical Modeling of Transient Processes in the Susceptible Motion Transmission in a Ship Propulsion System Containing a Shaft Synchronous Generator. *Energies*. 2022. 15. P. 3266.
7. Fediv Ye., Sivakova O., Korchak M. Model of Virtual Source of Reactive Power for Smart Electrical Supply Systems. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2019. P. 1-4.
8. Fediv Ye., Sivakova O., Korchak M. Multi operated virtual power plant in smart grid. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. 5(6). P. 256-260.

Стаття надійшла 31.08.2022