

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-35>

УДК 519.876.5; 621.31.33

Лишук Віктор Васильович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8467>

Мороз Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Заблоцький Валентин Юрійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2921-0031>

Євсюк Микола Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2421-1844>

Гриценюк Віталій Віталійович, студент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Лишук В.В., Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Євсюк М.М., Гриценюк В.В. Алгоритми керування автономними інверторами напруги перетворювачів частоти. У статті запропоновано розробку алгоритмів керування автономними інверторами напруги перетворювачів частоти. Ключовими елементами трифазного інвертора є IGBT-транзистори. В порівнянні з іншими електронними ключами вони мають більшу швидкодію та можливість виготовлення модуля з шести транзисторів та діодів. Запропоновані алгоритми перетворювача дадуть змогу розуміти фізичні процеси в перетворювачах, правильно проектувати, діагностувати та експлуатувати такі пристрої. Перетворювач частоти виготовляється на основі новітніх інтегрованих модулів потужності IPM (Intelligent Power Module), що містять 6 IGBT-транзисторів та їх кола керування з системою захисту від коротких замикань і температурним захистом. Керування модуляцією вихідної напруги реалізується програмно за допомогою мікроконтролерів. У ПЧ застосована модифікована модуляція, так званої „орієнтації вектора напруги". Це сприяє повному використуванню можливостей ПЧ. Пристрій може працювати в режимі лінійної або квадратичної характеристики U/f . Ці характеристики дають змогу змінювати швидкість обертання асинхронних двигунів в широкі межі, що важливо для приводу різноманітних механізмів і в кінцевому варіанті покращить економічні та енергетичні показники електроприводу. В даний час основними приладами силової електроніки в області струмів комутованих до 50 А є біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).

Ключові слова: перетворювач частоти, IGBT-транзистор, інвертор, електронний ключ.

Lyshuk V., Moroz S., Zablotskyi V., Yevsiuk M., Hryceniuk V. Algorithms for controlling autonomous voltage inverters of frequency converters. The article proposes the development of control algorithms for autonomous voltage inverters. The key elements of the frequency converter inverter are IGBT transistors. Compared to other electronic keys, they have a higher speed and the possibility of manufacturing a module of six transistors and diodes. The proposed converter algorithms will make it possible to understand physical processes in converters, to correctly design, diagnose and operate such devices. The frequency converter is made on the basis of the latest integrated power modules IPM (Intelligent Power Module), which contain 6 IGBT transistors and their control circuits with a system of protection against short circuits and thermal protection. Output voltage modulation control is implemented programmatically using microcontrollers. The inverter uses a modified modulation, the so-called "voltage vector orientation". This contributes to the full use of the inverter's capabilities. The device can operate in the mode of linear or quadratic U/f characteristics. These characteristics make it possible to vary the rotation speed of asynchronous motors within wide limits, which is important for drive various mechanisms and will ultimately improve the economic and energy performance of the electric drive. Currently, the main power electronics devices in the field of switching currents up to 50 A are insulated gate bipolar transistors (IGBT).

Keywords: mathematical model, frequency converter, IGBT-transistor, inverter, electronic key.

Постановка наукової проблеми. Регулювання частоти напруги електричної мережі є сучасним напрямом в області силової електроніки та електроприводу. Перетворювачі частоти (ПЧ) є інтелектуальними модулями, що автоматизують технологічні процеси на виробництві. Це дає змогу суттєво скоротити витрати на енергоспоживання, оскільки графіки електричних навантажень різко змінні. Наприклад, теплоелектроцентралі, що слугують опаленням для населення, використовують такі перетворювачі і дають змогу регулювати подачу гарячої води в різну пору доби за рахунок зміни швидкості обертання приводних асинхронних двигунів-насосів. Вони можуть під'єднуватись як до однофазної так і трифазної мережі. ПЧ є складним електронним пристроєм, в якому мережна напруга з частотою 50 Гц перетворюється в змінну напругу з регульованими амплітудою і частотою [4].

Електроніка ПЧ живиться стабілізованими напругами від блоку живлення, підключеного в ланку постійного струму, яка зберігає працездатність при фазній нарузі мережі в межах від 190 до 250 В. Так як електронна частина ПЧ живиться постійним струмом, то тут забезпечується стійка робота системи при коливаннях і короткочасному зникненні напруги мережі. Кола

керування інвертора гальванічно розв'язані від кіл процесора і випростувача. Повна гальванічна роз'язка процесора, як від кіл інвертора, так і від вхідної частини, забезпечує велику завадостійкість мікропроцесора.

ПЧ може керуватися напругою величиною 2-10 В або струмом величиною 4-20 мА. В режимі роботи з «плаваючим нулем» зниження рівня вхідного сигналу до величин нижче 2 В або 4 мА викликає припинення роботи ПЧ. Система забезпечена розширеною системою діагностики, налаштувань і блокувань, що захищають ПЧ і навантаження від пошкоджень.

Перетворювачі з регульованою вихідною частотою застосовуються в електроприводах змінного струму, а перетворювачі зі стабілізованою вихідною частотою – у технологічних установках, джерелах живлення, включаючи і джерела безперебійного живлення [2].

До перетворювачів частоти, призначених для частотного керування електроприводами, висуваються такі основні вимоги:

- незалежне регулювання величини та частоти вихідної напруги;
- можливість двостороннього обміну енергією між навантаженням та мережею живлення;
- стійкість перебігу динамічних режимів частотного керування електроприводу;
- швидкодіючий захист та ефективна діагностика;
- високі коефіцієнт корисної дії та симетрія фазних напруг і струмів;
- відсутність постійних складових та субгармонік у перетворених напругах та струмах;
- мінімальні спотворення напруги мережі живлення, низький рівень радіоперешкод і шуму;
- підтримка з необхідною точністю частоти, напруги (струму) в усталених режимах роботи електроприводу.

За принципом роботи перетворювачі частоти поділяються на перетворювачі частоти з ланкою постійного струму та перетворювачі частоти без ланки постійного струму або перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком кіл навантаження та мережі живлення.

ПЧ із ланкою постійного струму мають у своєму складі випрямляч та інвертор. Випрямляч перетворює електричну енергію змінного струму на електричну енергію постійного струму, а інвертор перетворює електричну енергію постійного струму на електричну енергію змінного струму. Очевидною перевагою ПЧ зі ланкою постійного струму є незалежність частоти вихідної напруги на виході ПЧ від частоти мережі живлення [3]. На рисунку 1 показано структурну схему перетворювача частоти.

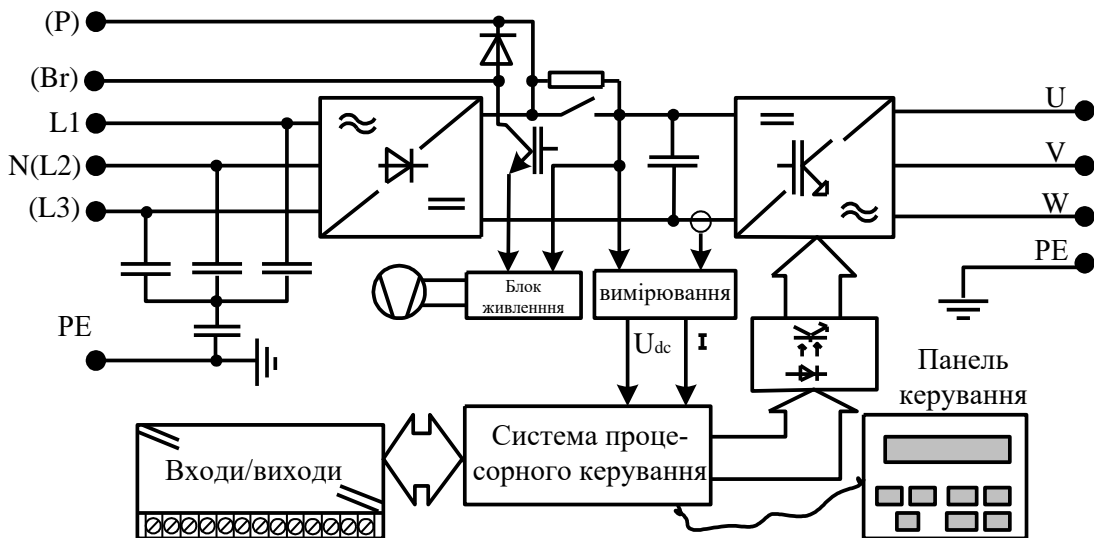


Рис. 1 – ПЧ з керованим випрямлячем та інвертором напруги

На індикаторі панелі керування відображаються наступні аварії:

- коротке замикання або струм, перевищуючий допустимий, на виході ПЧ;
- напруга в колі постійного струму, перевищує допустиму;
- знижена напруга в колі постійного струму;
- температура радіатора вище гранично допустимої;

- термічний захист двигуна;
- відсутність живлячої фази.

Регулювання частоти вихідної напруги ПЧ здійснюється шляхом зміни частоти перемикання напівпровідникових ключів (транзисторів або керованих тиристорів) автономного інвертора. Величина вихідної напруги у цих схемах може регулюватися шляхом регулювання величини вихідної напруги керованого випрямляча (амплітудний спосіб).

Аналіз досліджень. На сьогодні перспективним є застосування широтно-імпульсного методу регулювання вихідної напруги інвертора, що реалізується шляхом застосування відповідного алгоритму керування вентилями автономного інвертора. Розрахункові співвідношення встановлюють зв'язок між напругою кола постійного струму напруги інвертора і напругою змінного струму на виході інвертора [3]. Діюче значення лінійної вихідної напруги ІН із синусоїдною ШІМ визначається з рівняння (1).

$$U_{\text{нр.л}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \mu U_{\text{п}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{п}}$ – середнє значення напруги на вході інвертора;
 μ – коефіцієнт модуляції.

Для електроприводів змінного струму, у яких випадки рекуперації електричної енергії в мережу живлення досить рідкісні, можливе застосування схеми ПЧ, наведеної на рисунку 2. У цій схемі енергія навантаження, що рекуперується в коло постійного струму, розсіюється на баластному опорі R_b при ввімкненні транзистора VT. Транзистор VT, який називають чопером, вмикається сигналом системи керування мікропроцесора в тому випадку, коли напруга на конденсаторі фільтра підвищується вище встановленої межі. Підвищення напруги на конденсаторі відбувається при переході асинхронного двигуна в генераторний режим [2].

При живленні інвертора напруги від джерела постійної напруги з односторонньою провідністю (від випрямляча) виникає необхідність встановлення на вході інвертора компенсуючого конденсатора, який повинен приймати енергію в моменти часу, коли струм спрямований від інвертора до джерела живлення. Ємність компенсуючого конденсатора може бути знайдена за формулою (2).

$$C_0 = \frac{\int_t^{t+\Delta t} i_d dt}{\Delta U_c}, \quad (2)$$

де Δt – інтервал часу, протягом якого струм i_d кола постійного струму напрямлений від інвертора до джерела;

ΔU_c – допустима перенапруга на конденсаторі.

На рисунку 2 показано ПЧ з рекуперацією електричної енергії.

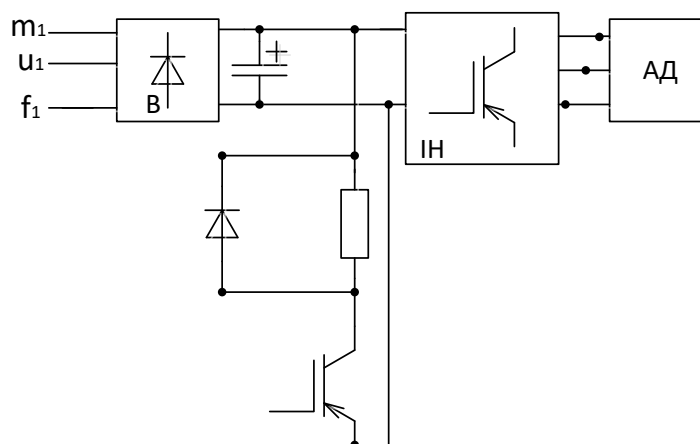


Рис. 2 – Перетворювач частоти з рекуперацією електричної енергії в коло чопера

Вирішуючи рівняння (2), отримаємо формулу для розрахунку величини ємності компенсуючого конденсатора:

$$C_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu I_{нзм}}{f_{нес} \Delta U_c} \sin \frac{\varphi_{нр(1)} - \pi / 6}{2}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт модуляції ($0 < \mu < 1$);

$I_{нзм}$ – амплітудне значення струму навантаження;

$f_{нес}$ – несуча частота ШІМ;

$\varphi_{нр(1)}$ – фазовий кут між першими гармоніками напруги та струму.

Вираз (3) показує, що ємність компенсуючого конденсатора не залежить від вихідної частоти. Ця обставина дозволяє використовувати інвертори з ШІМ для роботи на низьких частотах. Слід відмітити, що ємність компенсуючого конденсатора обернено пропорційна несучій частоті. Завдяки тому, що несуча частота досить висока, то ємність компенсуючого конденсатора в інверторах напруги з ШІМ завжди менша, ніж у інверторів без ШІМ.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Регулювання вхідної напруги може здійснюватися зміною моменту закривання того ключа, який (які) в даний момент часу відкритий (чи закриті). Структура силової частини інвертора при алгоритмі переключення ключів не змінюється [1].

Розглянемо порядок розробки алгоритмів керування ключами інвертора для трифазної мостової схеми інвертора, при з'єднанні навантаження зіркою, що є характерним при під'єднанні асинхронного двигуна в трифазну мережу (рис.3).

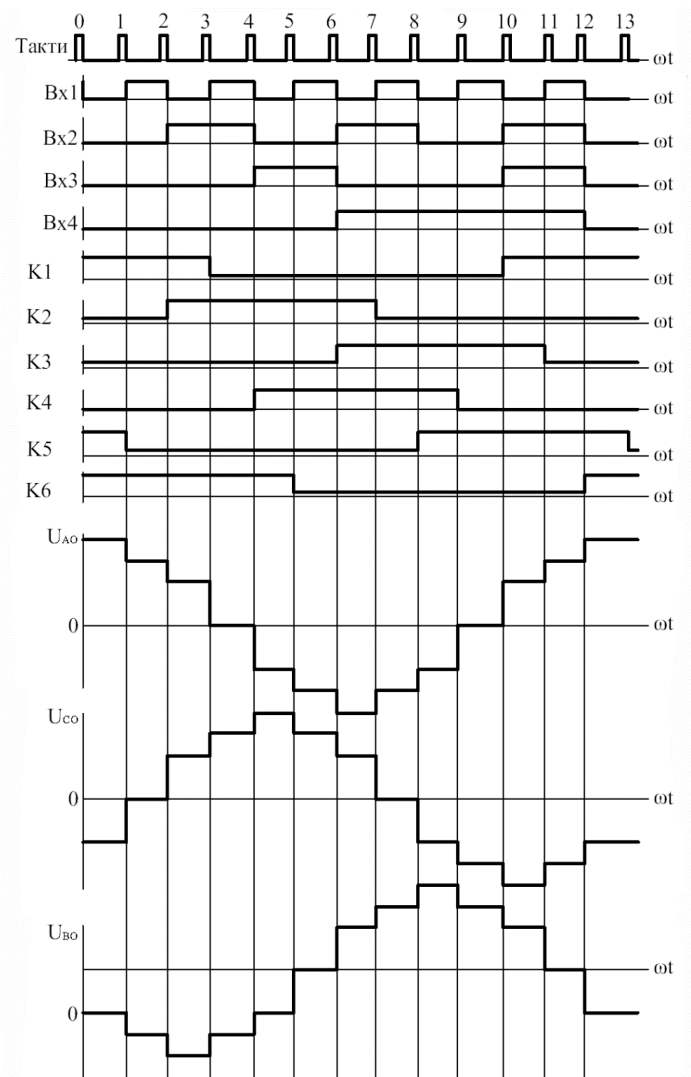


Рис. 3 – Алгоритм переключення ключів у трифазному мостовому інверторі при симетричному навантаженні, з'єднаному зіркою

Регулювання змінної напруги U_{\sim} та f_{\sim} на виході інвертора може здійснюватись або регулюванням вхідної напруги (вхідної напруги випростувача), або регулюванням, як було сказано вище, часу ввімкнення t_i кожного ключа інвертора, при цьому $U_{\sim} = U_d \cdot \gamma$ на кожному інтервалі регулювання.

В роботі як базові використовуються інвертори, в яких формується як однопульсна, двопульсна так і п'ятипульсна за половину періоду вхідної напруги форма кривої фазних напруг U_A, U_B, U_C .

Алгоритм перемикання ключів VT1-VT6 відповідає закону зміни керуючої напруги, що подається на ці ключі (напрузі база-емітер ключів VT1-VT6) на рисунку 3 полярністю. Період (частота) напруги інвертора змінюється часом вмикання-вимикання керуючих імпульсів на відповідні ключі.

Алгоритм керування автономними інверторами напруги реалізується шляхом програмування мікропроцесорної системи керування, що забезпечує також подачу імпульсів керування відповідної напруги, потужності імпульсів на ключі (транзисторі інвертора).

Керування транзисторами ІН здійснюється мікроконтролером. На мікроконтролер через АЦП надходять два сигнали керування (рис.4):

- керування величиною вихідної напруги інвертора (резистор R32);
- керування частотою вихідної напруги інвертора (резистор R31).

Крім імпульсів керування транзисторів інвертора мікроконтролер виробляє імпульси керування транзистора VT37. Завдання транзистора VT37 полягає у підключенні гальмівного резистора R33 паралельно конденсатору фільтра С31 для запобігання перенапруги на конденсаторі С31 при генераторному режимі роботи двигуна [5].

На рисунку 3 показано схему підключення датчика частоти (R31) в схемі керування інвертора напруги.

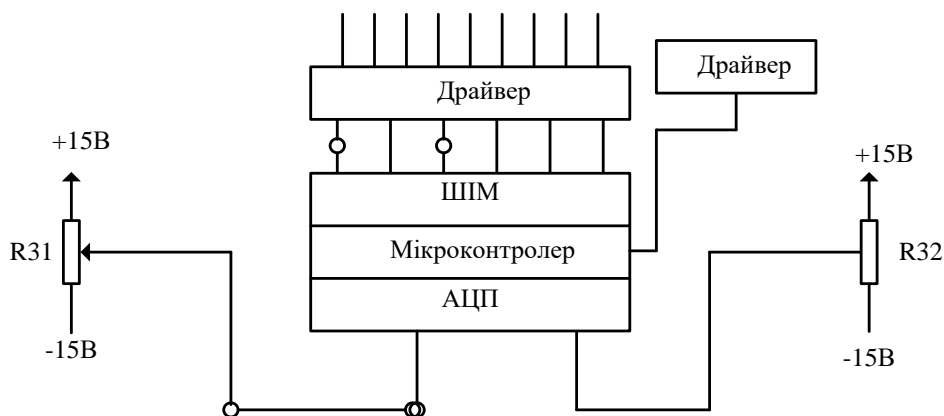


Рис. 4 – Схема підключення датчика частоти (R31) в схемі керування інвертора напруги

Схема підключення драйвера до силових транзисторів одного плеча інвертора напруги наведена на рисунку 5.

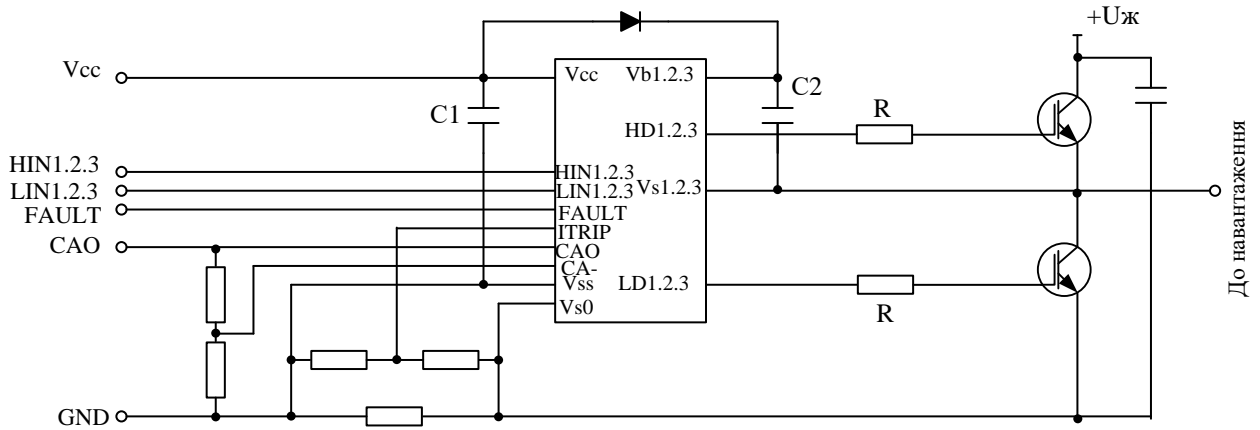


Рис. 5 – Схема підключення драйвера до силових транзисторів одного плеча інвертора

Транзисторний ключ (ТК) на базі IGBT-технології керує процесами перетворення електричної енергії. Специфіка протікання цих електричних процесів вимагає детальнішого розгляду принципів роботи ТК та її елементної бази задля забезпечення надійності ПЧ [4].

Розглянемо класичну схему одного плеча перетворювача. Зауважимо, що ПЧ містить три такі плеча. На рисунку 5 представлена схема такого плеча та показані електромагнітні процеси, що протікають у ньому при включенні та виключенні транзистора. Класична теорія динамічних процесів виділяє чотири комутаційних інтервали при роботі плеча на активно-індуктивне навантаження, два при включенні транзистора і два при вимкненні. При включенні транзистора виділяються етап відновлення діода у фазі високої зворотної провідності (t_1 на рис. 6) та етап встановлення стаціонарного стану силового високовольтного транзистора (t_2 на рис. 6).

В області комутованих струмів до 50 А основними приладами силової електроніки є силові модулі на базі біполярних транзисторів та силові модулі на базі IGBT технології.

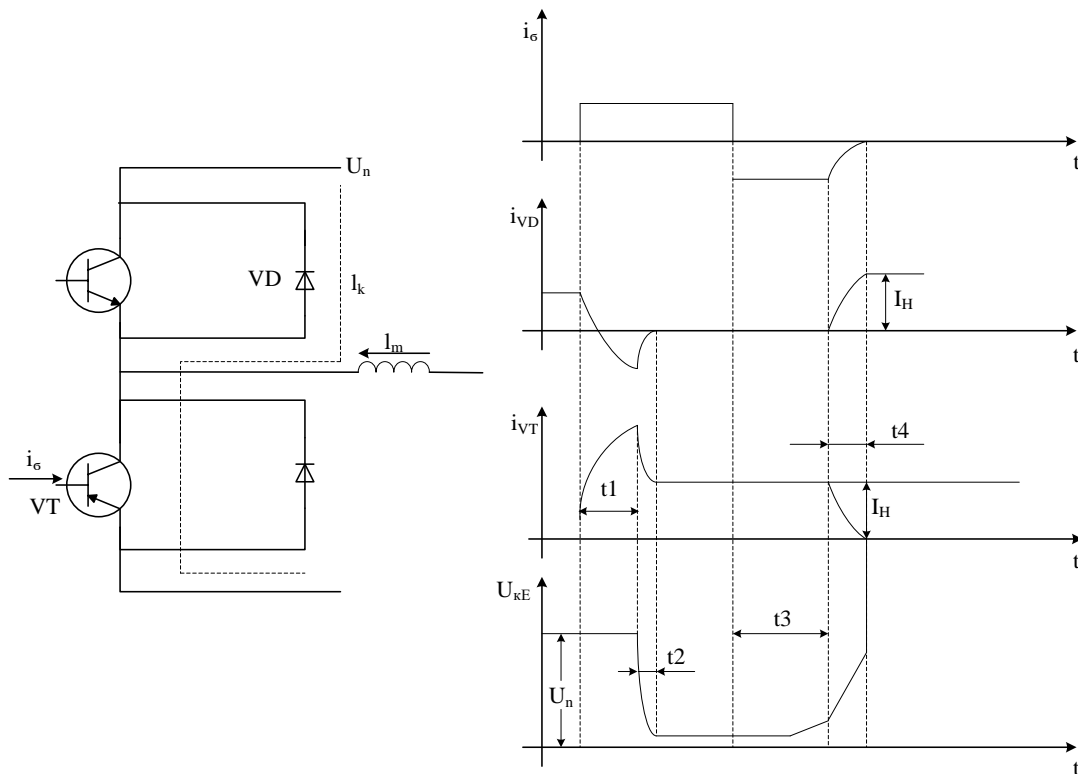


Рис. 6 – Динамічні процеси при перемиканні силового транзисторного ключа

На першому із зазначених етапів кола «транзистор-діод» протікає значний струм, який може перевищити номінальний у кілька разів. При цьому напруга на транзисторі залишається рівною напрузі живлення. Цей етап є найнебезпечнішим для транзистора. На другому етапі струм зменшується до номінального при одночасному зменшенні напруги на транзисторі. При вимкненні транзистора виділяються етап розсмоктування неосновних носіїв заряду в колекторі силового високовольтного транзистора (t_4 на рис. 6) та етап спаду струму колектора силового транзистора та включення діода (t_4 на рис. 6). На всіх зазначених інтервалах комутації у транзисторі та діоді виділяється значна потужність [1].

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Перетворювачі частоти, побудовані на трифазних інверторах, є одними з перспективних напівпровідникових перетворювачів енергії з безпосереднім зв'язком джерела напруги і навантаження, дають змогу реалізовувати робочі режими електро-приводу так і режими рекуперативного гальмування. Їх переваги полягають в тому, що вони реалізують двосторонній обмін між джерелом і навантаженням, можливість формування струму синусоїдної форми, мають високі ККД та електромагнітну сумісність. Використання повністю керованих транзисторних ключів з високими динамічними характеристиками та двосторонньою симетричною провідністю дає змогу забезпечити досить широкий діапазон зміни частоти напруги мережі.

Список бібліографічного опису

1. Жуйков В.Я. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами / В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк. – К.: Текст, 2010. – 264 с.
2. Кириленко О.В. Системи силової електроніки та методи їх аналізу / О.В. Кириленко, В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна. – К.: Текст, 2006. – 488 с.
3. Лишук В. В., Мороз С. А., Погинець А. Я., Кмитко Н. О., Барташук Р. І. Математична модель інвертора перетворювача частоти. Науковий журнал Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Луцьк, 2023. Випуск № 52. с.140-146.
4. Махно О.О. Автономні перетворювачі. Навч. посібник / О.О. Махно, В.В. Семенов, О.В. Будьонний, Н.А. Омелчук. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 126 с.
5. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка: навч. посібник / О.О. Шавьолкін. – К.: КНУТД, 2017. – 396 с.

Referenses

1. Zhujkov V.Ya. Energetichni procesi v elektrichnih kolah z klyuchovimi elementami / V.Ya. Zhujkov, S.P. Denisyuk. – K.: Tekst, 2010. – 264 s.
2. Kirilenko O.V. Sistemi silovoyi elektroniki ta metodi yih analizu / O.V. Kirilenko, V.Ya. Zhujkov, S.P. Denisyuk, O.B. Ribina. – K.: Tekst, 2006. – 488 s.
3. Lyshuk V. V., Moroz S. A., Pohynets A. Ya., Kmytko N. O., Bartashchuk R. I. Matematychna model invertora peretvoriuvacha chastoty. Naukovyi zhurnal Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. Lutsk, 2023. Vypusk № 52. s.140-146.
3. Mahno O.O. Avtonomni peretvoryuvachi. Navch. posibnik / O.O. Mahno, V.V. Semenov, O.V. Budonnij, N.A. Omelchuk. – Zapo-rizhzhya: ZDIA, 2009. – 126 s.
4. Shavolkin O. O. Energetichna elektronika: navch. posibnik / O.O. Shavolkin. – K.: KNU TD, 2017. – 396 s.