

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОВОЗУ

В статті розглянуто способи моделювання статичних перетворювачів за допомогою методів імітаційного моделювання в середовищі MatLab та класичних методів математичного моделювання. Створено імітаційну модель тягової передачі перспективного багатосистемного електровозу для дослідження стаціонарних і перехідних режимів роботи.

В статье рассмотрены способы моделирования статических преобразователей с помощью методов имитационного моделирования в среде MatLab и классических методов математического моделирования. Создана имитационная модель тяговой передачи перспективного многосистемного электровоза для исследования стационарных и переходных режимов работы.

In the article considered ways of modeling static converters with the methods of simulation in MatLab and classical methods of mathematical modeling. Created a simulation model traction transmission prospective multi-system locomotives for the study of stationary and transient modes.

Вступ

Статичні перетворювачі рухомого складу призначені для керування їх тяговими електро-двигунами: регулювання швидкості, переходу від режиму тяги до електричного гальмування та безконтактної зміни напрямку руху –реверса [1]. У даний час статичні перетворювачі виконують на основі напівпровідникових приладів [2].

Головна перевага напівпровідникових статичних перетворювачів полягає в тому, що вони дозволяють змінювати усі основні параметри електричної енергії: частоту, напругу, число фаз і гармонічний склад. При цьому забезпечуються високий ККД, невеликі розміри та висока надійність у зв'язку з відсутністю рухомих частин і механічних контактів.

Тому ці перетворювачі найбільшою мірою задовольняють численні та часто важко здійснювані вимоги, що ставляться до пристроїв керування потоком електричної енергії тягових електроприводів.

Проте статичні перетворювачі мають ряд недоліків:

- 1) оскільки напівпровідникові прилади є відносно новими технічними приладами, деякі з них досить дорогі, а також немає достатнього досвіду застосування їх на тяговому рухомому складі;
- 2) статичні перетворювачі дають підвищений рівень електромагнітних перешкод в тягових мережах, що ускладнює роботу пристроїв зв'язку, сигналізації та систем керування.

У традиційній структурі приводу з двигунами постійного струму перетворювачі використовують на заміну реостатних контролерів, що дозволяє одержати плавність регулювання швидкості, уникнути втрат енергії в реостатах та забезпечити ефективно рекуперативне гальмування з поверненням енергії руху поїзда до джерела живлення.

Переваги перетворювачів реалізуються при цьому лише частково. Більш важливою є можливість створити значно ефективніший привод змінного струму на базі асинхронних двигунів. Це дозволяє приєднати до переваг перетворювачів також переваги дешевшого та надійнішого асинхронного двигуна. Створити такий тяговий привод без статичних перетворювачів не вдавалося через труднощі регулювання швидкості асинхронного двигуна при збереженні високого моменту на валу.

Застосовуючи статичні перетворювачі виникає можливість переходу до гнучких технологічних процесів у системі тягового електропостачання і на ЕРС із застосуванням багатофункціональних програмувальних контролерів і ПЕ-ОМ для досягнення енергоекономічних систем електричної тяги з оптимальним електроспоживанням при забезпеченні заданої пропускної і провзної здібностей на електрифікованих ділянках залізниць, а також на метрополітені та міському електротранспорті.

Щоправда, створення нових статичних перетворювачів для перспективного багатосистемного рухомого складу достатньо складний про-

цес. Складність його обумовлюється великою потужністю перетворювача і виходячою з цього довготривалістю виготовлення, налагодження і випробування макета [3,4].

Дослідження і розробка статичних перетворювачів значно полегшується із застосуванням прийомів математичного моделювання.

Одним із головних напрямків дослідження статичного перетворювача є вивчення перехідних процесів, що мають місце в колах перетворювача.

Мета роботи

Дана робота присвячена створенню математичної моделі тягової електропередачі багатосистемного електровоза, що дозволяє досліджувати будь-які електромагнітні процеси в колах перетворювачів та оцінювати якість перехідних процесів з метою розробки рекомендацій з покращення динамічних властивостей перетворювача.

Матеріал і результати дослідження

Статичні перетворювачі, як правило, будуються за типовою структурною схемою, що наведена на рис. 1.

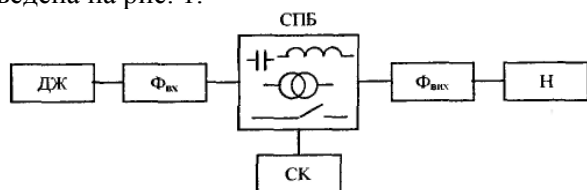


Рис. 1 Структурна схема статичного перетворювача:

ДЖ – джерело живлення, $\Phi_{вх}$ – вхідний фільтр, СПБ – силовий перетворювальний блок, $\Phi_{вих}$ – вихідний фільтр, Н – навантаження, СК – система керування.

Головним вузлом будь-якого напівпровідникового перетворювача є силовий перетворювальний блок, який виконує основну функцію з перетворення параметрів електричної енергії шляхом періодичних перемикань (комутації). Для цього в ньому містяться силові напівпровідникові ключі (СНК) як основні елементи, а також, можливо, трансформатори і фільтри проміжних величин [2].

СНК виконує елементарну функцію періодичного замикання та розмикання електричного кола. Ключі СПБ звичайно поєднуються у комутатори. Конструктивно комутатор може виконуватися як сукупність дискретних СНК, так і у вигляді сигової інтегральної схеми.

Ключовий режим роботи силових напівпровідникових приладів у СНК дозволяє одержати високий ККД, тому що у вимкненому стані на-

ближається до нуля напруга на ключі, а у вимкненому — струм ключа, і тому маємо малу потужність втрат, оскільки вона є добутком цих величин.

Система керування задає тривалість інтервалів часу, коли ключі силового перетворювального блоку ввімкнені та вимкнені. Оскільки ключі комутатора діють шляхом перемикань, то напруги і струми на вході та виході СПБ мають форму імпульсів з великим вмістом гармонічних складових. Тому їх зазвичай послаблюють за допомогою вхідного і вихідного фільтрів.

Блоки верхнього ряду структурної схеми на рис. 1.1 утворюють силову схему перетворювача. Блоки, які примикають до входу СПБ (джерело живлення та вхідний фільтр), створюють вхідне коло. Блоки, які примикають до виходу СПБ (вихідний фільтр та навантаження), створюють вихідне коло.

Статичний перетворювач тягового приводу електровозу складається із мережевого контуру і тягового контуру. Узгодження параметрів мережевого і тягового контурів виконується застосуванням трифазного трансформатора, що працює на підвищеній частоті. До складу мережевого контуру входить випрямляч, і автономний інвертор, система керування якого працює за законами широтно-імпульсної модуляції. Тяговий контур являє собою вихідний перетворювач і тяговий двигун. Під вихідним перетворювачем розуміємо керований випрямляч або пару «керований випрямляч – автономний інвертор». Тип вихідного перетворювача обирається в залежності від типу тягового двигуна. Для тягового двигуна постійного струму застосовують керовані випрямлячі, а для АТД – названу пару.

Випрямлячі призначені для перетворення змінного струму у постійний. У тязі їх використовують при живленні від контактних мереж змінного струму частотою 50 або $16\frac{2}{3}$ Гц на магістральних електровозах та електропоїздах приміського сполучення, а також у системі електричної передачі на транспортних засобах з первинним тепловим двигуном, наприклад тепловозах. В останньому випадку електрична передача містить синхронний генератор змінного струму як джерело живлення випрямляча. В обох випадках випрямляч використовується для перетворення змінного струму у постійний і регулювання вихідної напруги, а при живленні від контактної мережі також для можливого повернення енергії до цієї мережі при рекупративному гальмуванні двигунів [2,4].

Наведемо принципову схему тягового випрямляча на рис.2 як одного із підблоків статичного перетворювача, що розглядається.

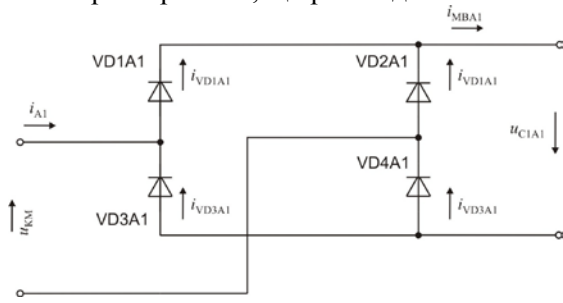


Рис. 2 Принципова схема тягового випрямляча

Робота даної схеми в усталених та перехідних режимах роботи описується диференціальними рівняннями, які складені на підставі законів Кірхгофа [4].

Для даної схеми можливі два варіанти обходу: прямий і зворотній. Для прямого напрямку обходу за II законом Кірхгофа матимемо:

$$u_{KM} = L_{KM} \cdot \frac{di_{A1}}{dt} + R_{KM} \cdot i_{A1} + 2R_{VD1A1} (i_{VD1A1}) \cdot i_{VD1A1} + Z_H \cdot i_{MBA1} \quad (1)$$

Розглянемо зворотній напрямок обходу. Для цього випадку аналогічно матимемо:

$$u_{KM} = L_{KM} \cdot \frac{di_{A1}}{dt} + R_{KM} \cdot i_{A1} + 2R_{VD3A1} (i_{VD3A1}) \cdot i_{VD3A1} + Z_H \cdot i_{MBA1} \quad (2)$$

Розглянемо контур комутації. При прямому напрямку матиме місце рівняння:

$$u_{KM} = L_{KM} \cdot \frac{di_{A1}}{dt} + R_{KM} \cdot i_{A1} + R_{VD1A1} (i_{VD1A1}) \cdot i_{VD1A1} - R_{VD2A1} (i_{VD2A1}) \cdot i_{VD2A1} \quad (3)$$

При зворотньому напрямку матиме місце наступне рівняння:

$$u_{KM} = L_{KM} \cdot \frac{di_{A1}}{dt} + R_{KM} \cdot i_{A1} - R_{VD1A1} (i_{VD1A1}) \cdot i_{VD1A1} + R_{VD2A1} (i_{VD2A1}) \cdot i_{VD2A1} \quad (4)$$

Для всіх вузлів схеми заміщення запишемо рівняння, що складені за першим рівнянням Кірхгофа:

$$i_{A1} + i_{VD3A1} - i_{VD1A1} = 0 \quad (5)$$

$$i_{VD4A1} - i_{VD2A1} - i_{A1} = 0 \quad (6)$$

$$i_{VD1A1} + i_{VD2A1} - i_{MBA1} = 0 \quad (7)$$

$$i_{MBA1} - i_{VD4A1} - i_{VD3A1} = 0 \quad (8)$$

В основу математичної моделі автономного інвертора покладено систему диференціальних рівнянь, що описує його роботу.

Принципову схему автономного інвертора наведено на рис 3.

Користуючись законами Кірхгофа та електромагнітної індукції опишемо електромагнітні процеси в інверторі напруги.

За першим законом Кірхгофа для точки *a* маємо:

$$C_2 \cdot \frac{du_2}{dt} + i_1 - i_n + i_d = 0 \quad (9)$$

Виразимо струм *i_n* через фазні струми двигуна отримаємо:

$$C_2 \cdot \frac{du_2}{dt} + i_1 - i_a (F_2 + F_5) - i_b (F_1 + F_4) - i_c (F_3 + F_6) + i_d = 0 \quad (10)$$

Рис. 3 Принципова схема автономного інвертора.

Для контуру навантаження за другим законом Кірхгофа матимемо:

$$u_{AB} = \frac{di_a}{dt} \cdot L_a + i_a \cdot R_a - \frac{di_b}{dt} \cdot L_b - i_b \cdot R_b \quad (11)$$

$$u_{AC} = \frac{di_a}{dt} \cdot L_a + i_a \cdot R_a + \frac{di_c}{dt} \cdot L_c + i_c \cdot R_c \quad (12)$$

Враховуючи зв'язок лінійних напруг з напругою U_d на виході випрямляча через тиристри прямого мосту:

$$u_{AB} = U_d \cdot (F_1 + F_6 - F_3 - F_4) \quad (13)$$

$$u_{AC} = U_d \cdot (F_2 + F_1 - F_4 - F_5) \quad (14)$$

У цих виразах коефіцієнти F_1, \dots, F_6 - перемикаючі функції, якими описується робота вентильних ключів. Часова діаграма, якою описується стан ключів в інверторі протягом будь-якого моменту часу показана на рис. 4.

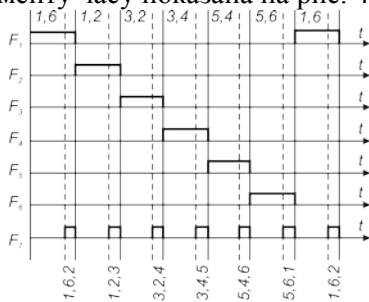


Рис. 4 Часова діаграма перемикаючої функції

Керований випрямляч за своєю конструкцією подібний до некерованого [4]. Він призначений для перетворення змінного струму на постійний і плавного регулювання значення величини напруги для керування тяговим електроприводом постійного струму на базі колекторного двигуна. Принципова електрична схема трифазного керованого випрямляча представлена на рис.5.

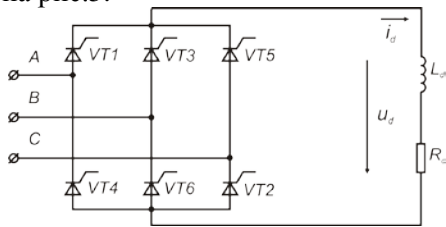


Рис. 5 Принципова схема керованого трифазного випрямляча

Запишемо диференціальні рівняння, що описують роботу перетворювача. По другому закону Кірхгофа для контура джерело – навантаження маємо рівняння.

$$(L_d + 2L_a) \cdot \frac{di_d}{dt} + R_d i_d - F_7 L_a \frac{di_k}{dt} = (F_1 - F_4)u_1 + (F_3 - F_6)u_2 + (F_5 - F_2)u_3 \quad (15)$$

Струм i_k визначається виразом другого закону Кірхгофа для контура комутації.

$$2L_a \frac{di_k}{dt} = \left[(F_5 - F_2)u_1 + (F_1 - F_4)u_2 + (F_3 - F_6)u_3 + L_a \frac{di_d}{dt} \right] \quad (16)$$

В інтервалах комутації враховуємо також е.р.с. самоіндукції, яка наводиться струмом i_k .

$$u_d = (F_1 - F_4)u_1 + (F_3 - F_6)u_2 + (F_5 - F_2)u_3 - 2L_a \frac{di_d}{dt} + F_7 L_a \frac{di_k}{dt} \quad (17)$$

Також вихідна напруга залежить від кута регулювання тиристорів α .

$$u_{d\alpha} = u_{d0} \left(\frac{\cos \alpha}{2} + \frac{1}{2} \left(\cos \alpha - \frac{2i_d \omega L_a}{\sqrt{6} E_2} \right) \right) = u_{d0} \cos \alpha - \frac{3i_d \omega L_a}{\pi} \quad (18)$$

$F_1 - F_7$ - перемикаючі функції. Вони набувають значення «1» та «0», тим самим характеризують стан силового ключа в певний момент часу (див. рис. 4).

Традиційно для дослідження властивостей та визначення параметрів трансформаторів використовуються схеми заміщення. Найбільш поширеною є Т-образна схема заміщення трансформатора. Однофазний трансформатор складається з двох обмоток, які розташовані на магнітопроводі. Первинна обмотка підключається до джерела напруги, а вторинна до навантаження (рис.6) [5,6].

На рис. 6 прийняті наступні позначення: R_1, R_2, L_1, L_2 - активний опір та індуктивність первинної та вторинної обмоток відповідно; M - коефіцієнт взаємної індукції; Z_n - опір навантаження.

За схемою на рис. 6 складемо наступні рівняння [6]:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (19)$$

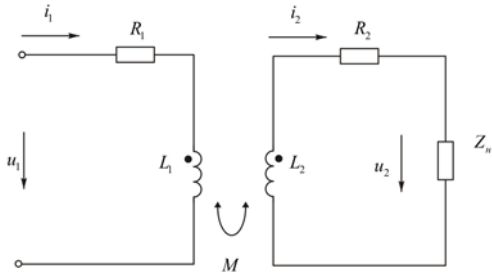


Рис. 6 Схема однофазного двообмоткового трансформатора.

Для спрощення виконаємо перехід до приведеного трансформатора та представимо рівняння у вигляді:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di_2}{dt} \quad (20)$$

$$0 = n^2 R_2 \frac{i_2}{n^2} + n^2 L_2 \frac{di_2}{dt} - nM \frac{di_1}{dt} + nu_2 \quad (21)$$

де: $n = \frac{w_1}{w_2}$ - коефіцієнт трансформації;

$\frac{i_2}{n} = i'_2$; $u_2 n = u'_2$; $R_2 n^2 = R'_2$; $L_2 n^2 = L'_2$ - параметри трансформатора приведені до первинної обмотки.

Тоді отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di'_2}{dt} \quad (22)$$

$$0 = R'_2 i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{di_1}{dt} + u'_2 \quad (23)$$

Додамо до рівняння (22) добуток $nM \frac{di_1}{dt} - nM \frac{di_1}{dt}$, а до (23) добуток $nM \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{di'_2}{dt}$, отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 - nM) \frac{di_1}{dt} - nM \frac{d}{dt} (i_1 - i'_2) \quad (24)$$

$$0 = R'_2 i'_2 + (L'_2 - nM) \frac{di'_2}{dt} - nM \frac{d}{dt} (i_1 - i'_2) + u'_2 \quad (25)$$

Величина $L_1 - nM = L_{S1}$ має назву індуктивність розсіювання первинної обмотки; $L'_2 - nM = L'_{S2}$ - індуктивність розсіювання приведена до первинної обмотки; $nM = L_1 - L_{S1} = L_{1n}$ - індуктивність первинної обмотки, яка обумовлена основним магнітним потоком. Еквівалентна схема трансформатора (Т- подібна схема заміщення), яка відповідає рівнянням (1.23) та (1.24) представлена на рис. 7.

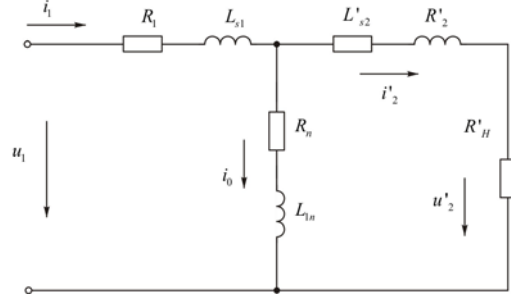


Рис. 7 Т-подібна схема заміщення трансформатора.

На рис. 6 коло $L_{1n} R_n$ враховує явища намагнічування магнітопроводу (складова L_{1n}) та втрати у ньому (складова R_n); $i_0 = i_1 - i'_2$ - струм намагнічування магнітопроводу.

При дослідженні роботи трифазних трансформаторів розглядаємо роботу однієї фази, так як вважаємо, що всі три фази навантажені симетрично. Для кожної з фаз використовується Т-подібна схема заміщення представлена на рис. 7.

Статичний перетворювач тягової електропередачі багатосистемного електровозу представляє собою багатоланкову структуру і є досить складною системою, а тому моделювання роботи цієї системи у номінальних та нестационарних режимах є складною задачею.

Для точного опису фізичних процесів в електромеханічних системах потрібне складання нелінійних диференціальних рівнянь. Навіть невелика відмінність у схемі може привести до того, що моделюватися буде, по суті, новий об'єкт, для якого необхідно вводити нові припущення, наближення тощо.

На практиці при моделюванні статичних перетворювачів необхідно враховувати властивості силових ключів, перетворювачів, їх характеристики. Тому, для моделювання використовують наступні способи, які дозволяють перейти від диференціальних рівнянь, котрі описують фізичні процеси, до їх практичної реалізації: моделювання тиристорних перетворювачів за середніми значеннями випрямленої електроору-

шійної сили; моделювання з врахуванням односторонності вентиляного кола; моделювання тиристорних перетворювачів за миттєвими значеннями випрямленої е.р.с.; моделювання тиристорних перетворювачів методом переключачих функцій; моделювання тиристорних перетворювачів методом змінних опорів.

Останній метод отримав найбільш широке застосування у практиці, оскільки ця методика моделювання ґрунтується на описі перехідних процесів нелінійними диференційними рівняннями, в яких вентиля представлені змінними опорами, що змінюють свою величину в залежності від величини і напрямку струму, або тільки від напрямку струму, а це в найбільшій мірі відповідає реальним фізичним процесам.

Отримання рівнянь для дослідження перехідних процесів, що мають місце в силових колах статичного перетворювача багатосистемного електровозу є досить складним, іноді вимагає використання спеціалізованих пакетів прикладних програм для моделювання розробленої системи на персональній обчислювальній машині. Складну задачу обробки таких математичних моделей, на думку автора, найбільш доцільно покласти на потужний обчислювальний процесор такий як MatLab. Для аналізу властивостей електромеханічних та електротехнічних пристроїв широко застосовується складова частина пакету MatLab – програма імітаційного моделювання Simulink із бібліотекою SimPowerSystem, яка дозволяє розглядати роботу різних за своєю будовою і складністю електромеханічних систем.

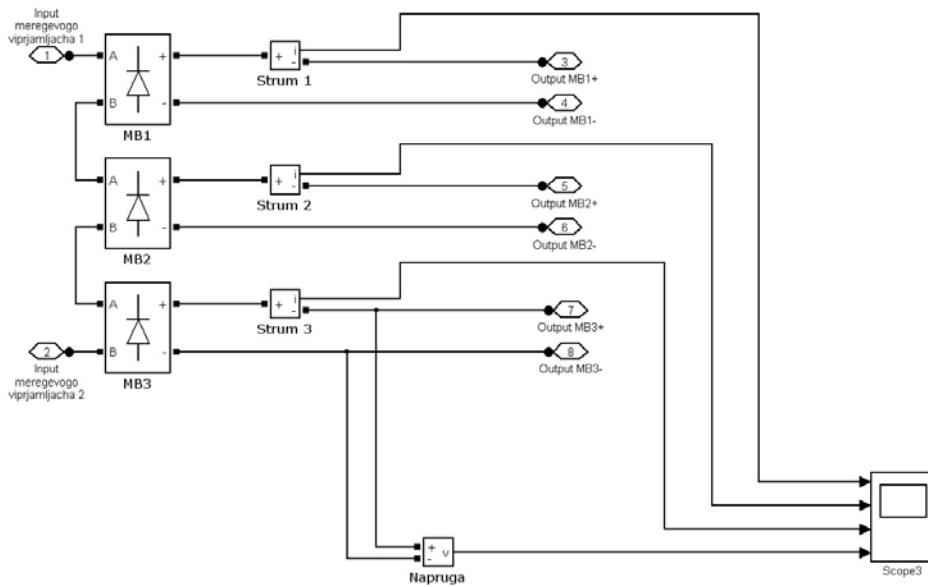


Рис. 8 – Модель мережевого випрямляча

Вихідними даними для розробки та проведення імітаційного (комп'ютерного) моделювання є структура та параметри тягової електропередачі. Для кожного блоку перетворювача були створені імітаційні моделі в середовищі MatLab.

Блок мережевого випрямляча (рис.8) містить три послідовно з'єднаних некерованих мостових однофазних випрямляча MB1, MB2 та MB3, які під'єднуються до контактної мережі. Блоки Strum 1, Strum 2, Strum 3, Napruha призначені для контролю і вимірювання випрямленого струму і напруги всередині блоку.

З метою узгодження значень вихідної напруги високочастотного інвертора та напруги живлення тягового двигуна застосовується тя-

говий трансформатор. На рис. 9 наведена SPS-модель трифазного тягового трансформатора.

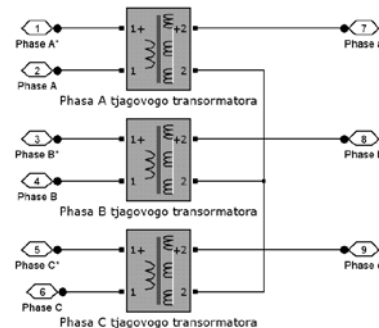


Рис. 9 Simulink-модель тягового трансформатора.

На рис. 10 наведено Simulink-модель для дослідження роботи автономного інвертора.

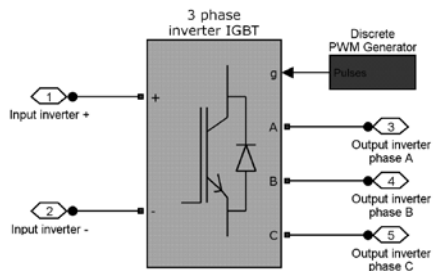


Рис. 10 Simulink-модель однофазного ШІМ інвертора

Блок 3 phase inverter IGBT це трифазний міст на IGBT-транзисторах, яким керує Discrete PWM Generator – дискретний ШІМ-генератор.

Створені імітаційні моделі структурних складових тягової електропередачі дозволяють розглянути перехідні процеси, які мають місце в статичному перетворювачі при різних режимах його роботи. Розглядаються перехідні процеси, виникаючі при пуску статичного перетворювача із постійним навантаженням, а також стаціонарні режими роботи складових частин і перетворювача в цілому.

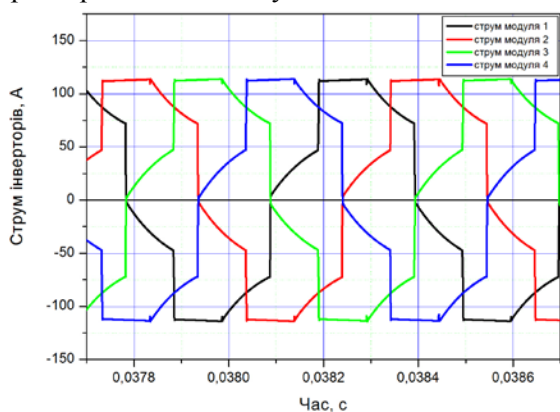


Рис. 11 – Часова діаграма струмів

Структура тягової електропередачі передбачає застосування принципів багатофазності. Це дозволить в складі перетворювача утворити декілька еквівалентних фаз, кут зсуву між якими обернено пропорційний їх кількості. Використання еквівалентних фаз дозволяє зменшити рівень завад, які виникають при роботі перетворювача, поліпшити енергетичні показники та підвищити якість динамічних характеристик пристрою.

В структурних схемах із чотирма тяговими плечима зсув між еквівалентними фазами складає 90° . На рис. 11 наведено часову діаграму струмів еквівалентних фаз отриману для таких структур.

В структурах, де є лише два тягових модуля зсув між еквівалентними фазами приймається рівним 180° . На рис. 12 наведено часову діаг-

раму струмів еквівалентних фаз для таких структур.

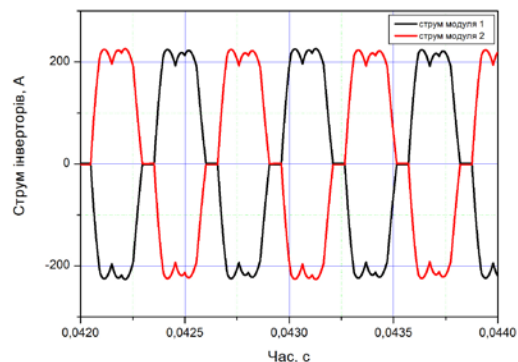


Рис. 12 – Часова діаграма струмів.

В структурних схемах перетворювача із шістьма тяговими плечима величина фазового зсуву між силовими модулями складає 60° .

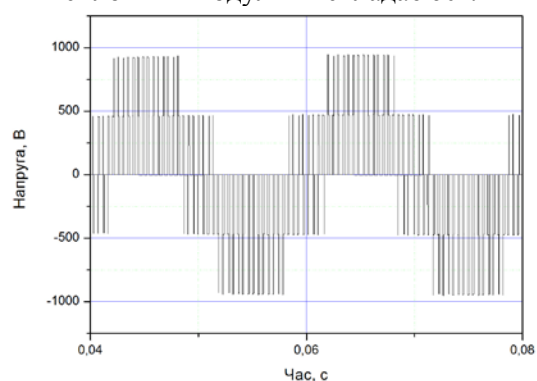


Рис. 13 – Модульована напруга на виході автономного інвертора.

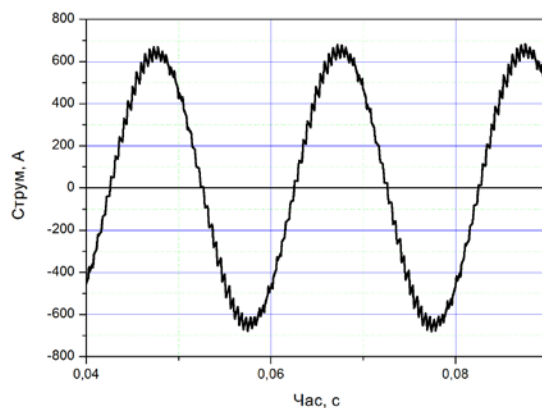


Рис. 14 – Струм однієї фази обмотки статора асинхронного тягового двигуна.

Вторинними перетворювачами для тягових двигунів виступають:

керований випрямляч – для двигуна постійного (пульсуючого) струму;

некерований випрямляч із автономним ШІМ-інвертором – для асинхронного тягового двигуна.

ШІМ інвертор перетворює постійну напругу з виходу некерованого випрямляча в синусоїдальну і може одночасно керувати як величиною її амплітуди, так і її частотою (рис.3.5).

В обмотках статора асинхронного двигуна протікає майже синусоїдальний струм, форма якого достатньо серйозно поліпшується за рахунок значної індуктивності фаз обмоток.

На рис. 14. наведено часову діаграму струму однієї фази статора асинхронного двигуна, яку було отримано в результаті моделювання.

Загальні висновки

В проведеній роботі було визначено якості перехідних процесів в силових колах статичного перетворювача перспективного багатосистемного електровозу. З цією метою на основі схем перетворювальних структур і математичних описів основних складових частин перетворювача було створено ряд імітаційних моделей в середовищі Matlab Simulink із використанням бібліотеки SimPowerSystem. Застосування названого програмного забезпечення дозволило провести моделювання роботи перетворювальних структур в різних режимах роботи, включаючи роботу під навантаженням а також пуск перетворювача.

Результати моделювання показали, що розглянуті структури перетворювачів є достатньо стійкими системами із відносно нетривалими перехідними процесами. Застосування принципів еквівалентних фаз дозволяє зменшити рівень завад, що виникають в тяговій мережі від роботи високочастотних трансформаторів, які знаходяться всередині перетворювача і виступають джерелами вищих гармонічних складових тягового струму.

При моделюванні пуску перетворювача із активним навантаженням були виявлені короточасні струмові перевантаження, які обумовлені процесом заряду ємнісних фільтрів-накопичувачів і подільників напруги. Для зменшення шкідливого впливу високих значень струму на контактну мережу, струмоприймачі і сам перетворювач пропонується застосовувати на вході мережевого випрямляча 4-q-s-перетворювач, який працює в режимі активного фільтру. Таке конструктивне рішення дозволить регулювати швидкість і плавність заряду конденсаторів, що містяться в структурі статичного перетворювача, зменшуючи величину перевантаження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст]: учебн. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков– М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
2. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст]. / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
3. Бедфорд, Б. Теория автономных инверторов [Текст] / Б. Бедфорд, Р. Хофт ; пер. с англ. И. В. Антика. – М.: Энергия, 1969. - 280 с.
4. Богрый В. С. Математическое моделирование тиристорных преобразователей [Текст] / В. С. Богрый, А. А. Русских. – М.: Энергия, 1972. – 184 с.
5. Дубинець Л.В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини [Текст]: навчальний посібник / Л.В. Дубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
6. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов [Текст] / С. С. Вдовин – Л.: Энергия, 1971. – 148 с.