

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Розробка та дослідження методів підвищення ефективності роботи тягового електроприводу електромобіля з використанням особливостей траєкторії його руху»

КНУ.МР.141.24.778-01

Виконав студент II курсу, групи ЕТЗ-23м /Костянтин ВИЛОБКОВ/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні та електротехнічні комплекси і системи транспортних засобів»
(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Нормоконтролер:

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Владислав ФЕДОТОВ/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ВИЛОБКОВ Костянтин Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка та дослідження методів підвищення ефективності

роботи тягового електроприводу електромобіля з використанням

особливостей траєкторії його руху

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка методів підвищення ефективності роботи тягового електроприводу електромобіля з використанням особливостей траєкторії його руху. Завданням є дослідження методів підвищення ефективності роботи тягового електроприводу електромобіля з використанням особливостей траєкторії його руху.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Перетворювачі електричної енергії; II. Розробка системи керування тяговим перетворювачем; III. Моделювання режимів роботи тягового перетворювача.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Загальний вид тягового електроприводу електромобіля; II. Тяговий інвертор напруги з використанням IGBT модулів; III. Режими роботи тягового електроприводу електромобіля; IV. Модель тягового електроприводу електромобіля; V. Модель системи керування тягового електроприводу електромобіля; VI. Результати моделювання режимів роботи тягового електроприводу електромобіля електромобіля з використанням особливостей траєкторії його руху.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Перетворювачі з постійного у постійний струм	10.09.24
2	Двоквадрантні перетворювачі	12.09.24
3	Чотириквадрантний перетворювач	17.09.24
4	Чотириквадрантний перетворювач у структурі тягового електроприводу	19.10.24
5	Структура перетворювача	26.10.24
6	Частота тактування тягового перетворювача	28.10.24
7	Управління тяговим перетворювачем	30.11.24
8	Моделювання режимів роботи тягового перетворювача	04.12.24
9	Реалізація тягового електроприводу з перетворювачем	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Костянтин ВИЛОБКОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Розробка та дослідження методів підвищення ефективності роботи тягового електроприводу електромобіля з використанням особливостей траєкторії його руху»

64 с., 49 рис., табл.,
12 літературних джерел.

Об'єкт розробки – тяговий електропривод електромобіля.

У першому розділі проаналізовано систему електроприводу електромобіля, розглянуто його структуру та складові, представлено схеми тягових перетворювачів.

У другому розділі досліджено математичну модель тягового перетворювача у структурі тягового електроприводу електромобілю та проведено аналіз електромагнітних процесів відповідно до режимів його роботи.

У третьому розділі обрано комп'ютерну модель щодо визначення показників перетворення електричної енергії у структурі тягового електроприводу, досліджено електромагнітні процеси при його роботі з використанням особливостей траєкторії руху.

ЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ,
ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ.

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Перетворювачі електричної енергії.....	11
1.1. Перетворювачі з постійного у постійний струм	11
1.2. ДвохквADRANTні перетворювачі	12
1.3. ЧотириквADRANTний перетворювач	15
1.4. ЧотириквADRANTний перетворювач у структурі тягового електроприводу	20
Розділ 2. Розробка системи керування тяговим перетворювачем	24
2.1. Структура перетворювача	24
2.2. Частота тактування тягового перетворювача.....	31
2.3. Управління тяговим перетворювачем.....	36
Розділ 3. Моделювання режимів роботи тягового перетворювача.....	41
3.1. ДвоквADRANTний перетворювач	41
3.2. ЧотириквADRANTний перетворювач	43
3.3. Закони керування тяговим перетворювачем	51
3.4. Реалізація тягового електроприводу з перетворювачем	61
Висновки	62
Список використаних джерел	63

Вступ

Для потреб електричного транспорту використовується багато різноманітних елементів, переважна більшість з яких є досягненнями сучасної науки та техніки.

Розвиток промисловості щодо виготовлення новітніх зразків обладнання застосовується для відтворення сучасних систем електричного транспорту що покликані підвищити ефективність використання електричної енергії та комфорт експлуатації.

Новітні технології дуже важливі для такого конкурентного ринку як електромобілі, тому особлива увага приділяється розвитку елементної бази що відповідає найновітнішим розробкам.

Оскільки електромеханічні системи транспорту є автономними платформами, що покликані забезпечити надійне перевезення вантажу або пасажирів, то до обладнання, що використовується на них висуваються додаткові умови щодо ергономічності та компактності розташування обладнання.

Основні елементи транспортних засобів, такі як двигун або перетворювач мають здійснювати ефективне використання та розподіл електричної енергії акумуляторної батареї.

Такий розподіл та перетворення забезпечується за допомогою тягового перетворювача, що виконує функцію реалізації енергоефективного використання заряду акумуляторної батареї.

До самих батарей, як акумуляуючих пристроїв є також ряд специфічних вимог, що мають переглядатись щонайменше одного разу на три чотири роки.

Перетворювальні пристрої це складні силові елементи, що складають структуру каналу передавання електричної енергії від акумулюючого елемента до електричного двигуна.

За структурою тягові перетворювачі, що використовуються на електричному транспорті складаються з силових ключів, що складають схему перетворення електричної енергії та керуючих елементів у вигляді схем них драйверів та каналів керування.

Фільтруючі та з'єднуючі елементи також входять до комплексу електричних перетворювачів, як ключових регулюючих елементів електромеханічних систем електричного транспорту.

Сучасні електричні перетворювальні пристрої виконують не тільки функцію розподілу та перетворення електричних параметрів, але й забезпечують акумулювання та накопичення електричної енергії в залежності від режиму роботи.

Виходячи з параметрів електричного двигуна можна розглядати перетворювачі з постійного у змінний струм а також постійного у постійний струм.

Перетворювальні агрегати що виконують та реалізують програму перетворення електричної енергії зі змінного струму не на стільки поширені на електромобільному транспорті з навантаженням середньої та малої потужності.

Такі системи більш притаманні електричному транспорту залізничного сполучення або великовантажним автомобілям що використовуються у промисловості.

Тому для розгляду більш концентруються на системах що забезпечують перетворення параметрів енергії постійного струму у

відповідні для типу електричної тягової машини параметри електричної енергії.

Дослідження у такій сфері є актуальними, оскільки стосуються усіх типів перетворювачів електричної енергії що використовуються на електричному транспорті, будь якої потужності, та торкаються різноманітних схем перетворення параметрів електричної енергії.

Так системи що мають у своїй структурі джерела електричної енергії змінного струму зазвичай використовують у якості первинного перетворювача некерований випрямляч, який надалі забезпечує живленням керований перетворювач.

Тому розглядаються саме такі структури перетворення електричної енергії у якості джерела живлення для яких використовується електрична енергія постійного струму.

Перетворювачі постійного струму налічують різні схемні рішення що базуються на елементарних складових.

Так припустимо що один або два елементи ключової структури можуть забезпечити комбінацію параметрів з наявністю великого переліку вихідних значень.

Потреби забезпечити роботу електричного транспорту у найбільш оптимальних умовах виходячи з режиму роботи вносять додаткові умови щодо схем та параметрів тягових перетворювачів.

На сам перед необхідність забезпечити двонаправлений рух електричної енергії як від джерела так й до нього, потребує у наявності схемних рішень що забезпечують подібну динаміку виходячи з усіх можливих режимів роботи тягового електричного двигуна електромеханічної системи транспорту.

Таким чином подібні структури дозволяють робити чергування режимів віддаючи та поглинання електричної енергії, що підвищує ефективність використання перетворювального пристрою як елементу систем підвищеної енергоефективності.

Подібні структури необхідно забезпечувати алгоритмами ефективного регулювання параметрів джерела електричної енергії, та можливістю їх зміни.

Такі алгоритми розглядаються у теоретичних засадах забезпечення певної послідовності чергування ключових елементів, що виконують функцію створення надійного каналу керування режимами роботи електричного тягового двигуну, що забезпечує оптимальні режими руху електричного транспорту.

Розглянуті алгоритми функціонування мають забезпечуватись належними схемами що формують канали перетворення та регулювання параметрами напруги живлення.

Можна зазначити що подібні розрахунки є складними функціями що реалізують задану програму роботи перетворювача та потребують додаткової перевірки перед їх впровадженням.

Тому не останнім за значенням є можливість дослідити процеси у структурі перетворювача.

На практиці це зручно робити на основі створення адекватної математичної моделі, що покликана надати характеристику процесам перетворення електричної енергії у системі тягового електроприводу.

Моделювання подібних структур ускладнюється наявністю нелінійних функцій, що описують процеси у тяговому перетворювачі.

Але такий крок є виправданим за можливість перевірити наявні схемо-технічні рішення на предмет можливих помилок щодо вибору та безпосередньої роботи їх елементів у реальних режимах.

Розділ 1. Перетворювачі електричної енергії

1.1. Перетворювачі з постійного у постійний струм

При використанні перетворювачів постійного струму важливим є склад їх елементів.

Тобто важливим є формування такої структури перетворювального пристрою що забезпечить необхідні умови роботи навантаження.

Такі системи можна виконувати за рахунок використання ключових елементів з повністю керованою або напівкерованою структурою.

При цьому для забезпечення стабільної роботи важливо визначитись з розподілом таких функцій та кількістю таких елементів у структурі перетворювача.

Ключові елементи мають забезпечити плавність та швидкість регулювання заданого параметру навантаження.

Такі перетворювачів відповідності до структури та приналежності елементів що її складають можна розділити за класами керованості.

Для потреб сучасних систем електроприводу важливо забезпечити керованість в усіх режимах роботи електричного двигуна з можливістю реалізації енергоефективного регулювання його параметрів.

Такий підхід не можливо забезпечити без можливості циркуляції електричної енергії у структурі перетворювача.

1.2. Двоквадрантні перетворювачі

Розглянемо можливі варіанти структури перетворювача постійного струму.

При використанні двох провідних станів ключових елементів можливе формування режимів роботи при зміні полярності перетворювача.

Такий принцип формування вихідної напруги дозволяє створити умови для роботи системи електроприводу зі зміною напрямку руху.

Це дозволяє забезпечити обраний напрямок обертання електричного двигуна.

Але така структура обмежена щодо її використання для усіх режимів роботи електроприводу, включно з режимами гальмування або зупини при діючому навантаженні з боку технологічного механізму або виробничого обладнання.

Такі перетворювачі використовуються для регулювання параметрів електроприводу щодо виконання нескладних завдань, але не підходять для відповідальних спроможностей.

Тому для забезпечення можливості роботи системи електроприводу в усіх режимах слід застосовувати більш гнучку структуру перетворювача.

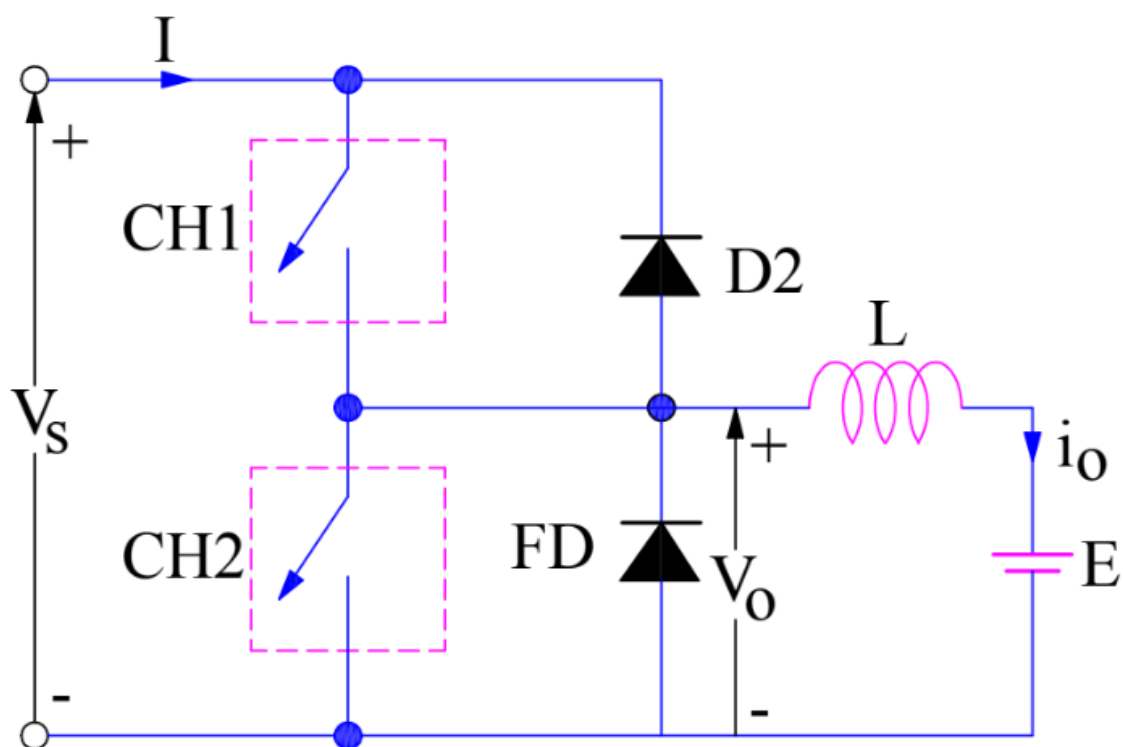


Рис. 1.1 Двоквадрантний перетворювач

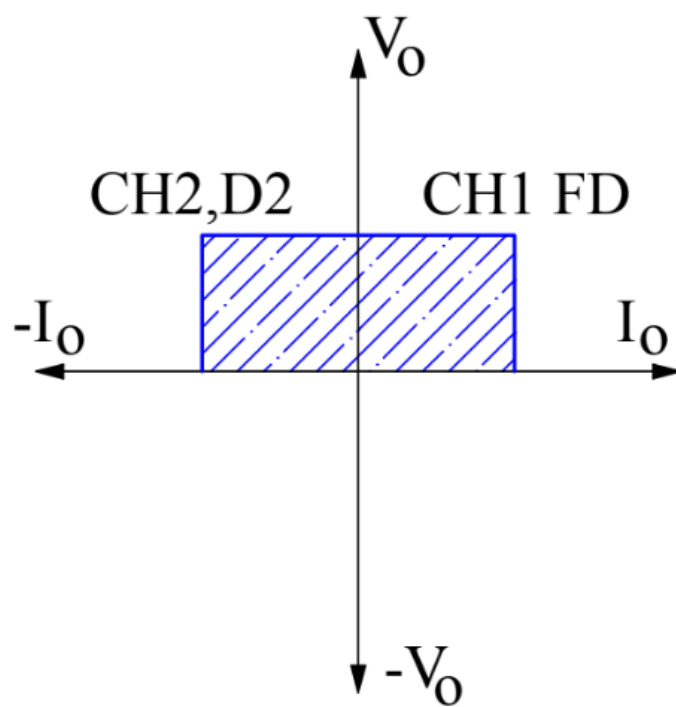


Рис. 1.2 Робочі зони

1.3. ЧотириквADRантний перетворювач

Елементи мостової структури при формуванні перетворювального пристрою дозволяють розширити його функціональні можливості.

Такі структури впроваджують для можливості формування циркулювання електричної енергії у структурі перетворювача з її послідовним виведенням щодо потреб електричного приводу або джерела електричної енергії.

Такі структури зазвичай містять повністю керовані елементи, що забезпечують можливість підтримувати двонаправленість розподілу електричної енергії.

Для формування необхідного напрямку потоку енергії слід застосовувати методи визначення почерговості ввімкнення ключових елементів що складають структуру перетворювача.

При цьому слід розрізняти статичні та динамічні процеси у структурі перетворювача.

Якщо відповідно до програми роботи перетворювача якийсь з його елементів був виключений з алгоритму роботи, він має бути зазначений згідно до приналежності до класу пристрою або його групи.

Таким чином роботу у старіці цього перетворювача може забезпечувати половина від кількості ключових елементів, що складають структуру його ланок.

У динамічних режимах таке відтворення не є можливим, оскільки не може забезпечити належну відповідність формуємої структури до швидкості зміни параметрів енергетичного кола перетворювача.

Отже застосування мостової структури при функціонуванні перетворювача що регулює параметри електроприводу дозволяє використовувати надлишок електричної енергії, що формується у електричній машині та відтворювати усі можливі режими відповідно до потреб технологічного механізму або виробничої установки.

При використанні такого підходу для регулювання параметрів двигуна постійного струму може бути задіяне одночасне керування по двох каналах.

До таких каналів можуть бути віднесені канали струму та напруги або струму та частоти обертання.

Також може бути застосоване одночасне керування за контуром струму якоря та струму збудження.

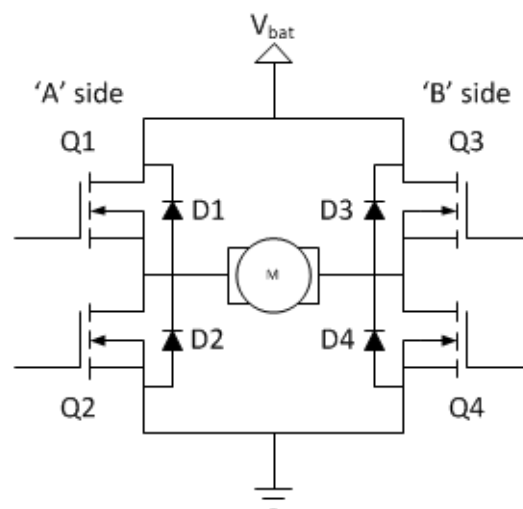


Рис. 1.3 H-схема

Розглянемо режими роботи та функціонування елементів H-подібної схеми.

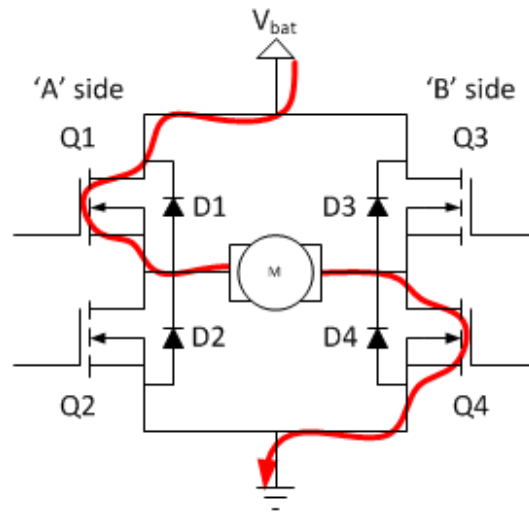


Рис. 1.4

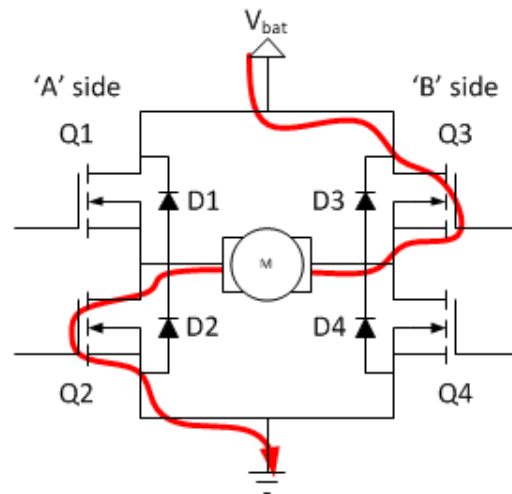


Рис. 1.5

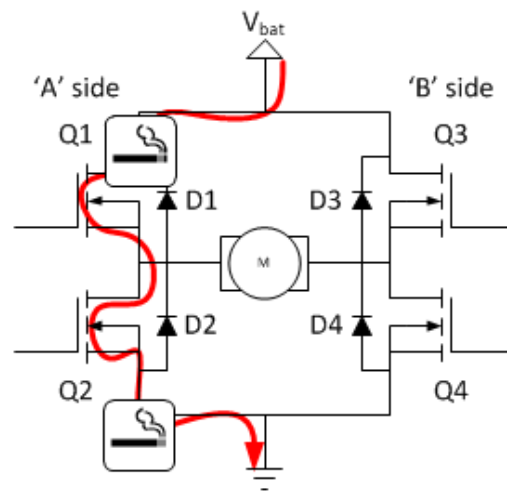


Рис. 1.6

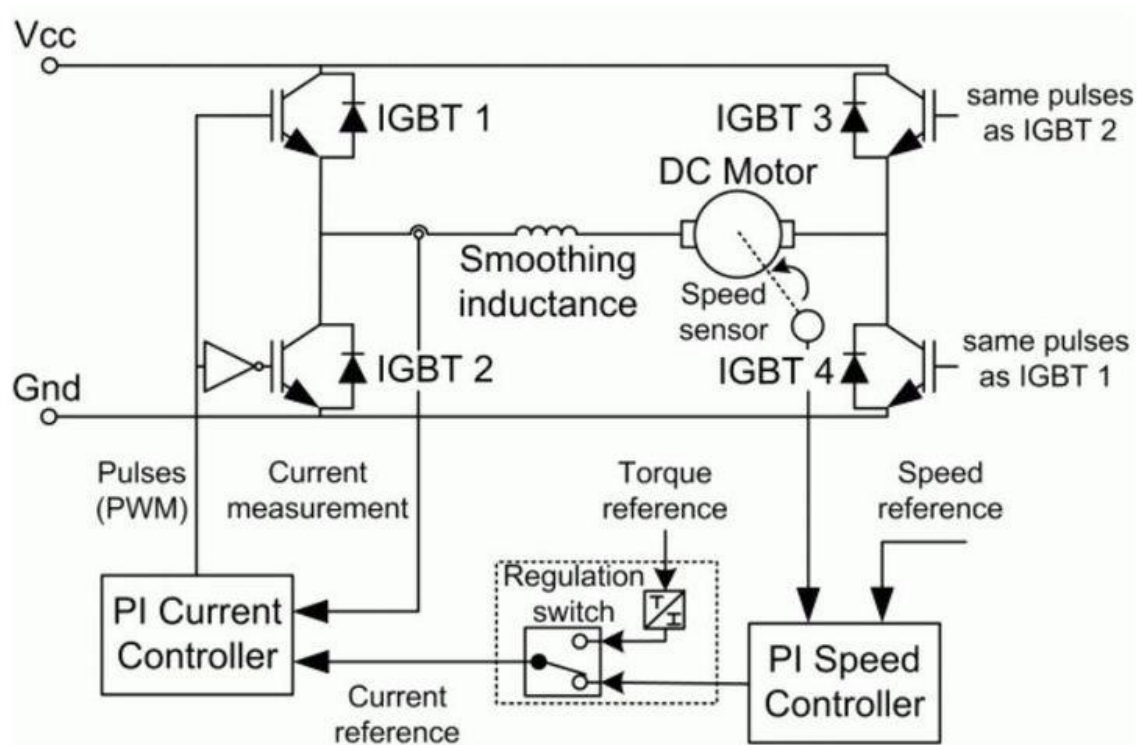


Рис. 1.7 Приклад схеми електроприводу

1.4. ЧотириквADRANTний перетворювач у структурі тягового електроприводу

Для тягових електричних двигунів, які використовуються для електромобілів, можуть бути задіяні структури перетворювачів з мостовою конструкцією.

Це дуже важливо для створення відповідних умов щодо функціонування тягового електроприводу.

Особливо це стосується роботи при русі за рельєфом місцевості з присутністю ділянок руху з гори чи у гору.

Такі режими слід чергувати з можливостями транспорту виконувати пуск або гальмування.

Для формування відповідних режимів може використовуватись можливість накопичувати електричну енергію у елементах схеми.

Це необхідно для можливості реалізовувати її у наступних проміжках часу відповідно до потреб.

У перетворювача з мостовою структурою можна по чергово перемикає функцію віддачі та накопичення електричної енергії у його елементах.

Зазвичай для такої реалізації використовують спроможності ємнісного накопичення електричної енергії, як більш просте щодо її застосування.

Такий підхід до розробки структури перетворювача дозволяє забезпечити ефективне функціонування електроприводу в усіх режимах його роботи.

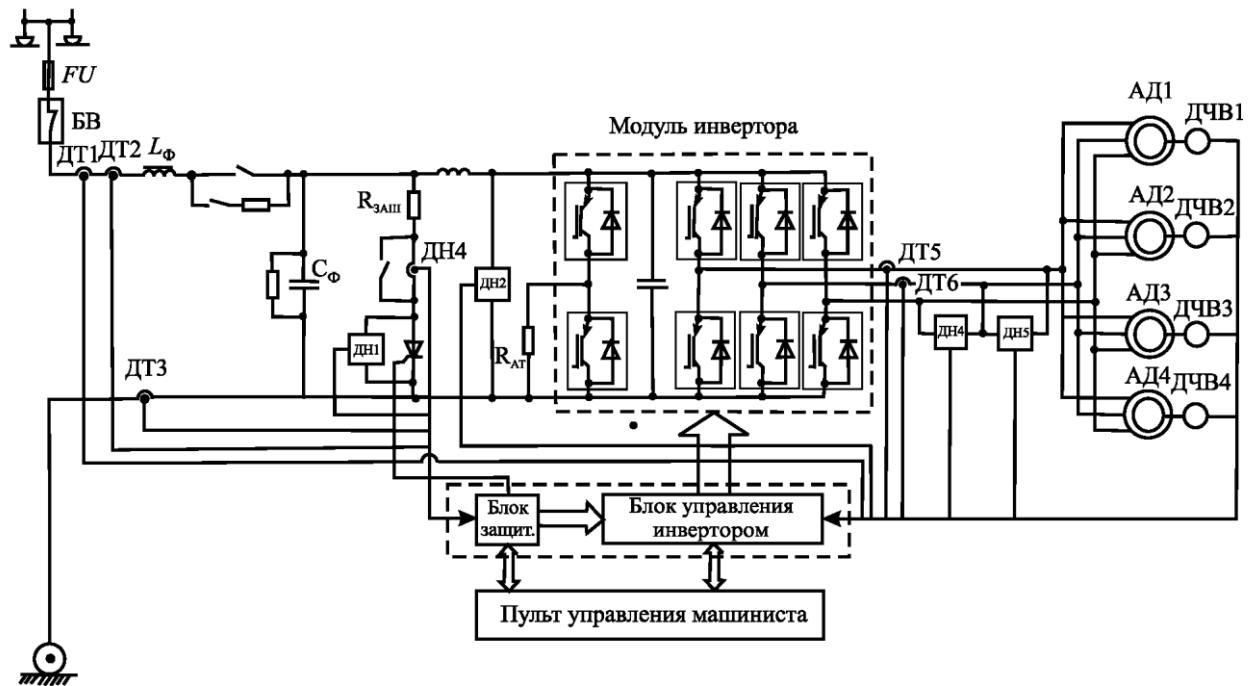


Рис. 1.8 Застосування тягового перетворювача на IGBT модулях

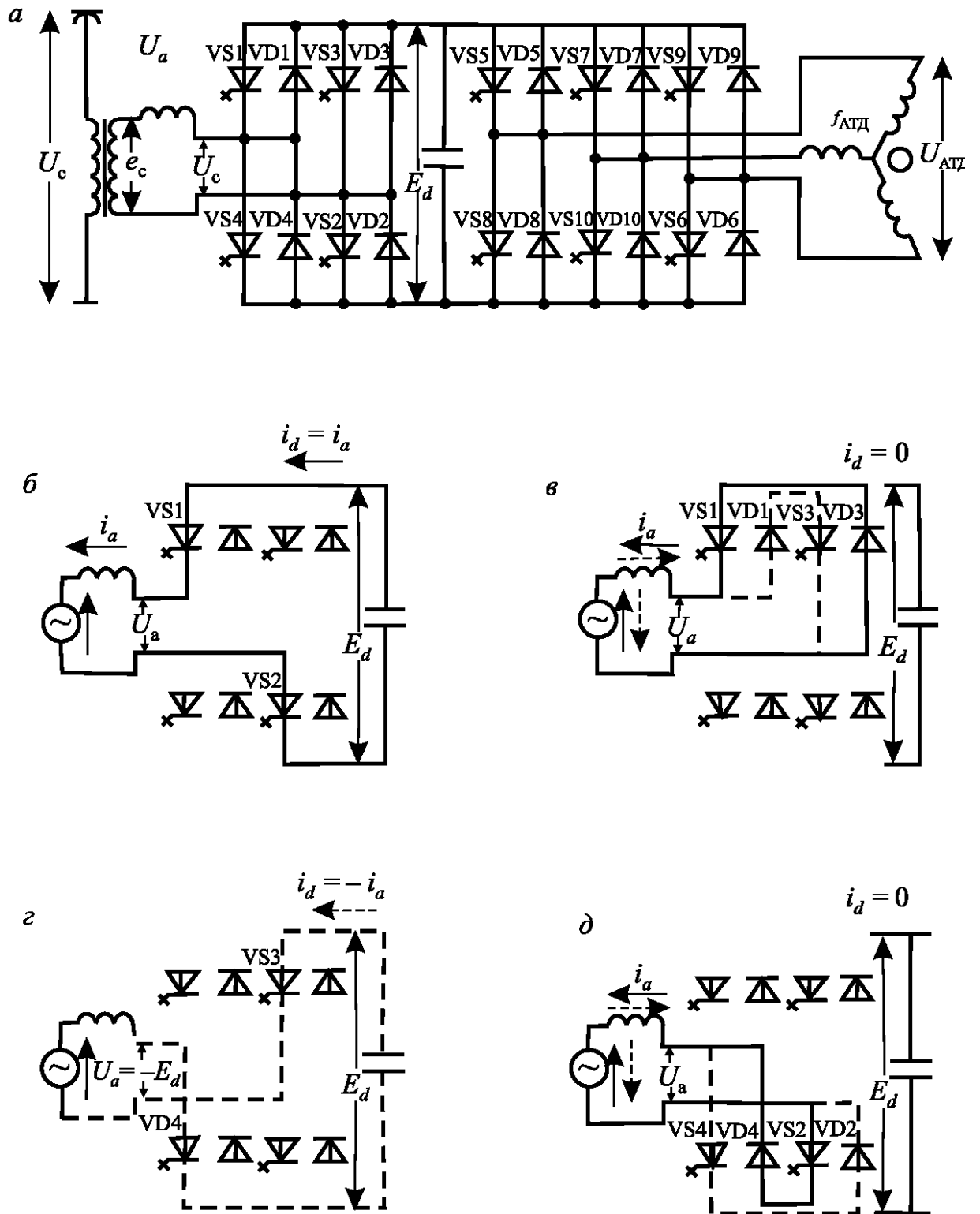


Рис. 1.9 Чотириквadrантний перетворювач

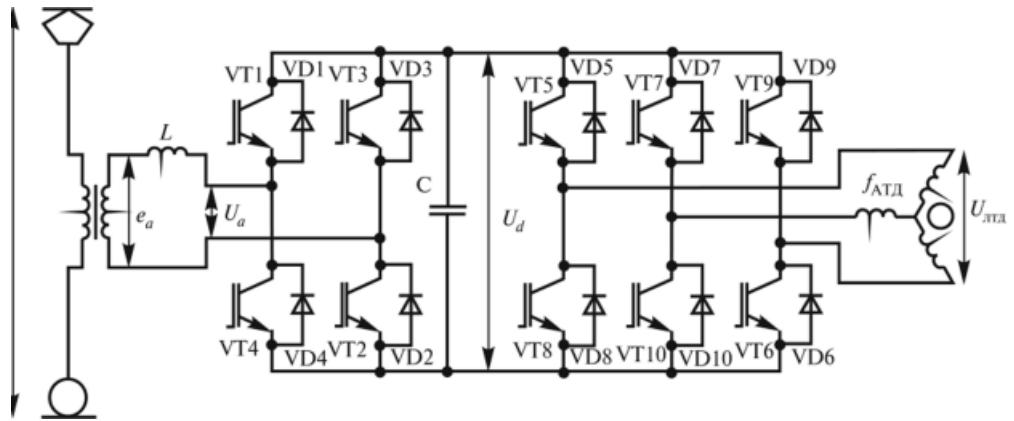


Рис. 1.10 Автономний інвертор напруги

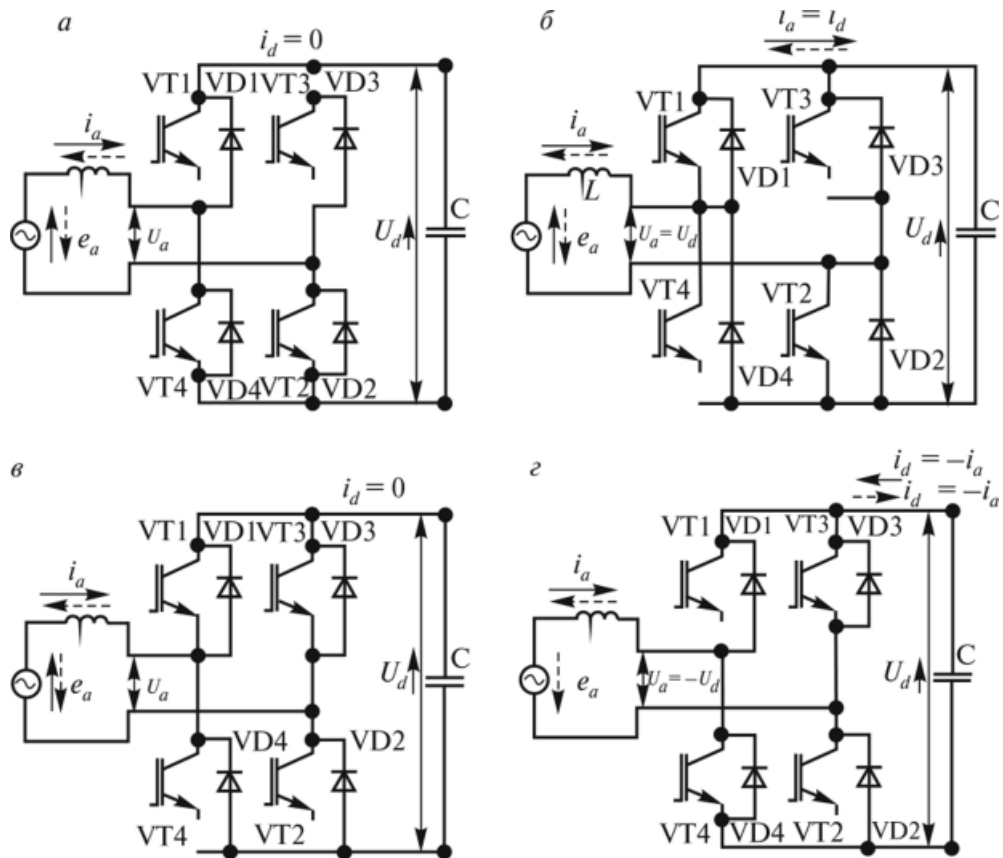


Рис. 1.11 ЧотириквADRANTний перетворювач: *а* — контур тягового двигуна; *б* — контур фільтру; *в* — контур тягового двигуна; *г* — контур фільтру.

Розділ 2. Розробка системи керування тяговим перетворювачем

2.1. Структура перетворювача

При роботі перетворювача з повністю керованою структурою його елементів важливо забезпечити їх безаварійне функціонування.

Таке функціонування можна забезпечити завдяки правильності визначення інтервалів ввімкнення.

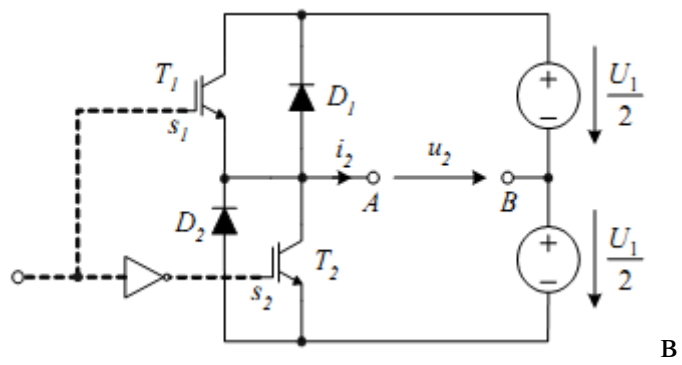
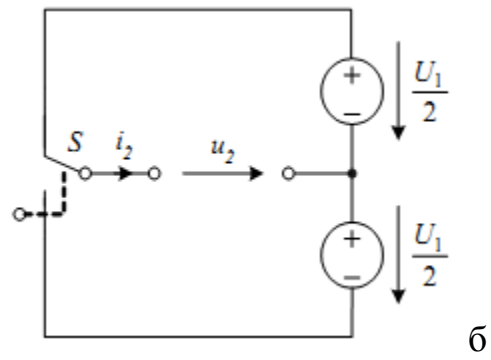
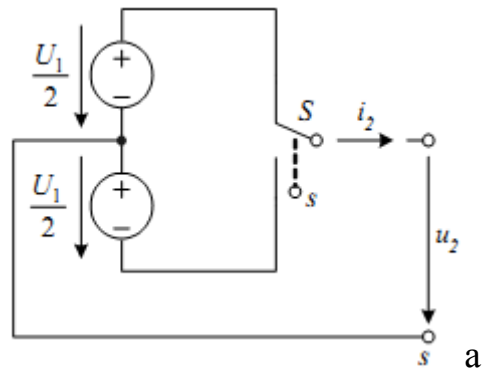
Такі проміжки слід обрати виходячи з умов комутації його ключових елементів.

При цьому слід виконувати завдання щодо усунення можливості перекриття елементів при перехресній структурі реалізації перетворювача.

Кожен з елементів перехресної структури при цьому виконує належне формування щодо вихідних параметрів.

Такі формування мають виконуватись завдяки роботі почергового керування групами елементів.

Керування може реалізовуватись як за струмом так і за напругою відповідно до структури перетворювача.



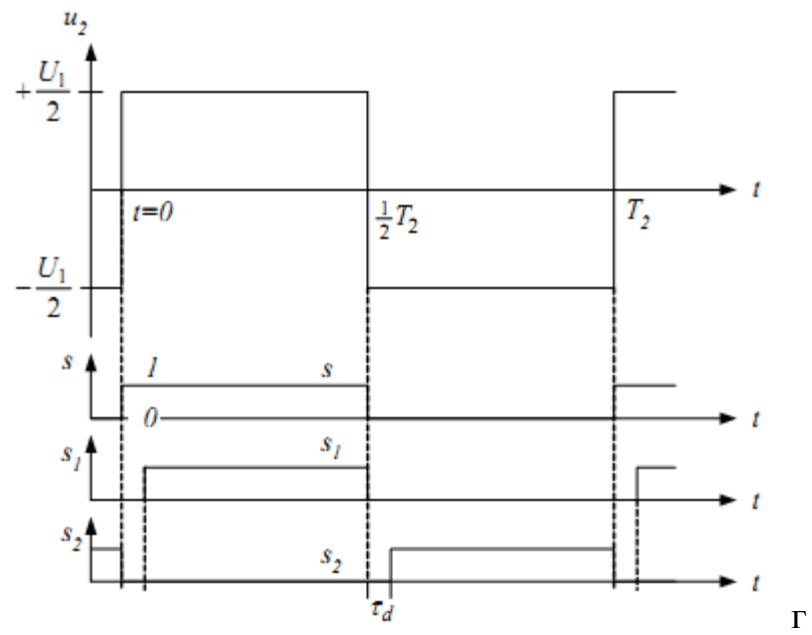
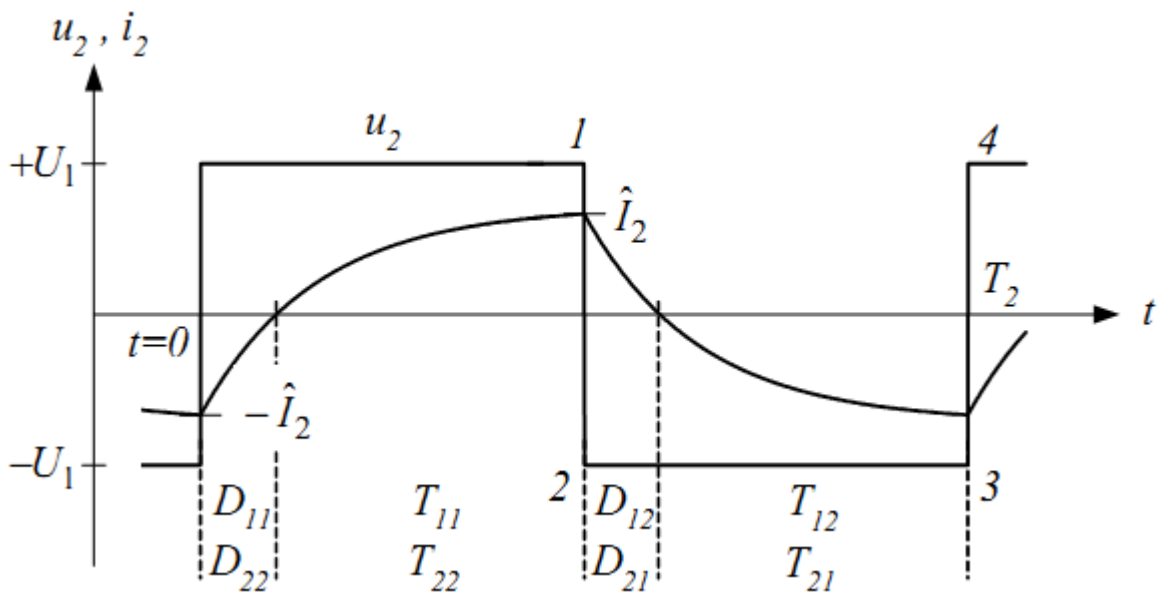
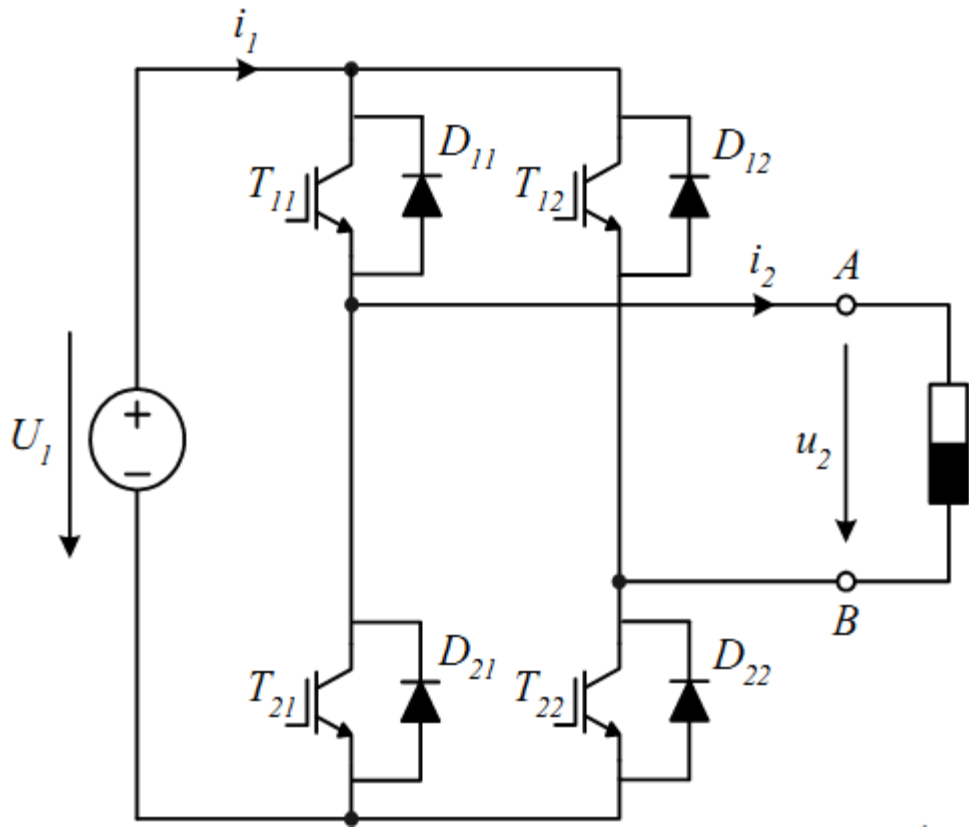


Рис. 2.1 Схема інвертора напруги (а), зображення (б) та реалізація (в); Вихідна напруга u_2 і функція перемикування S (а) і (б) і силових модулів $T1$ і $T2$ (г).



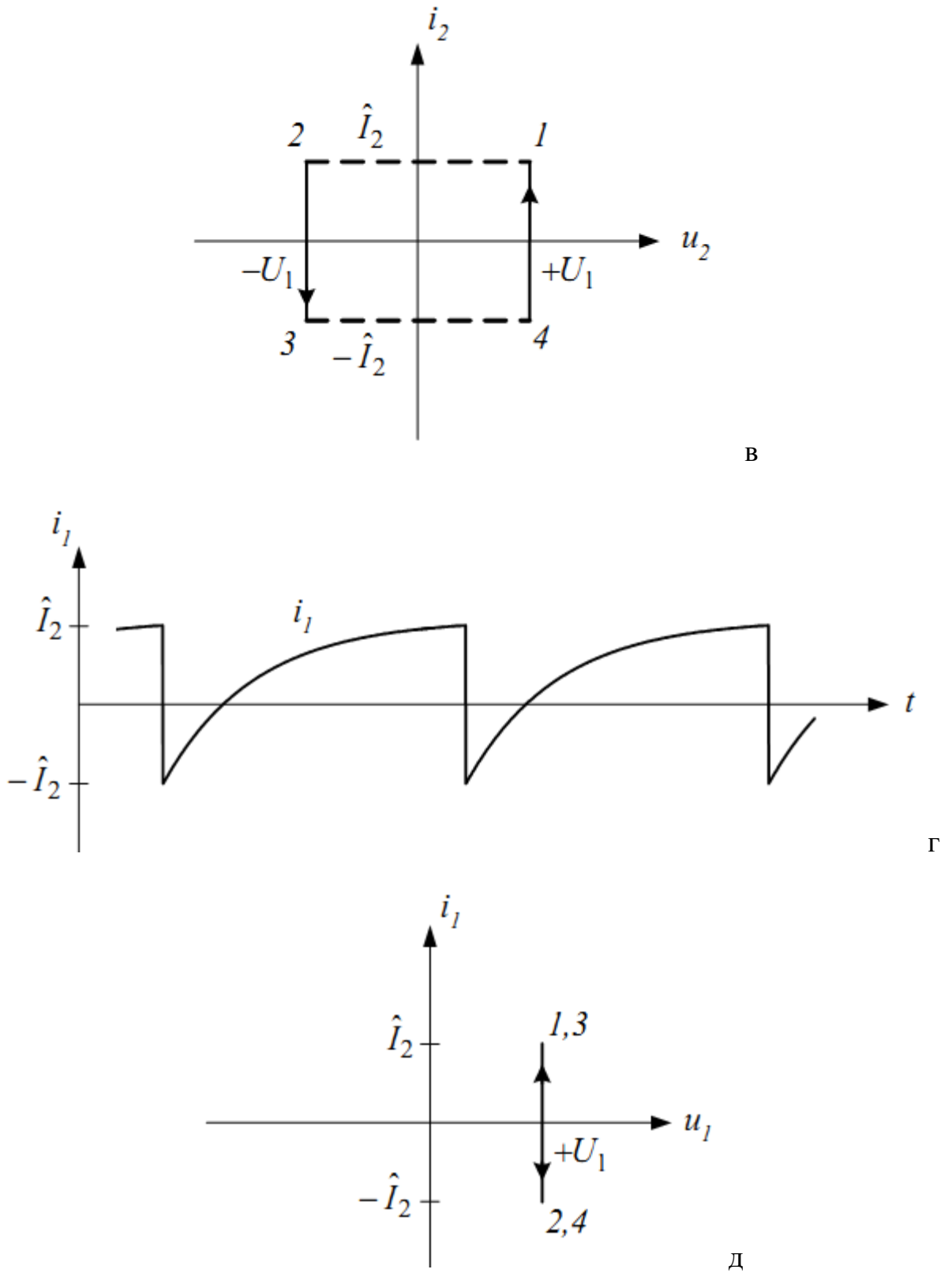


Рис. 2.2: Чотириквadrантний перетворювач (а) та вихідна напруга (б).
Вихідний струм (в), вхідний струм (г) і напруга (д).

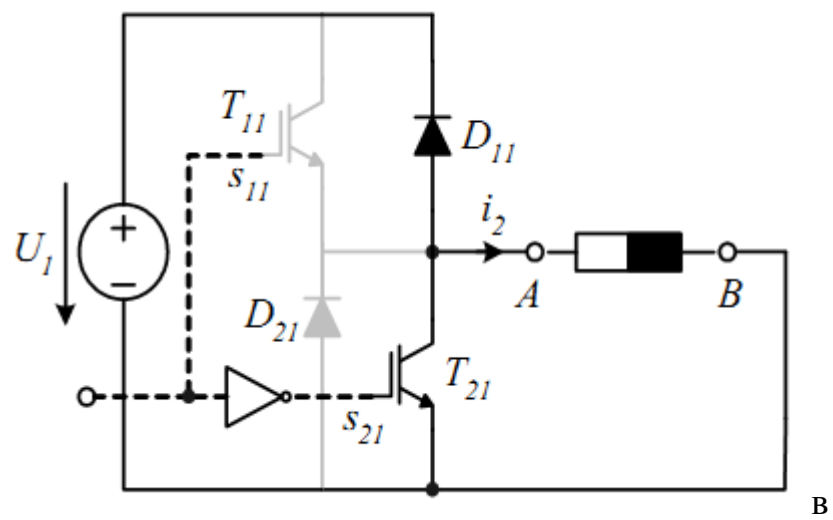
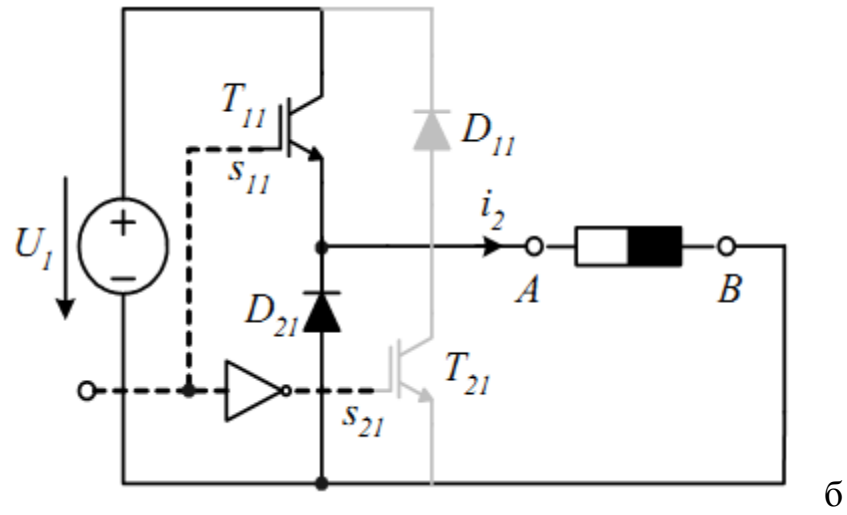
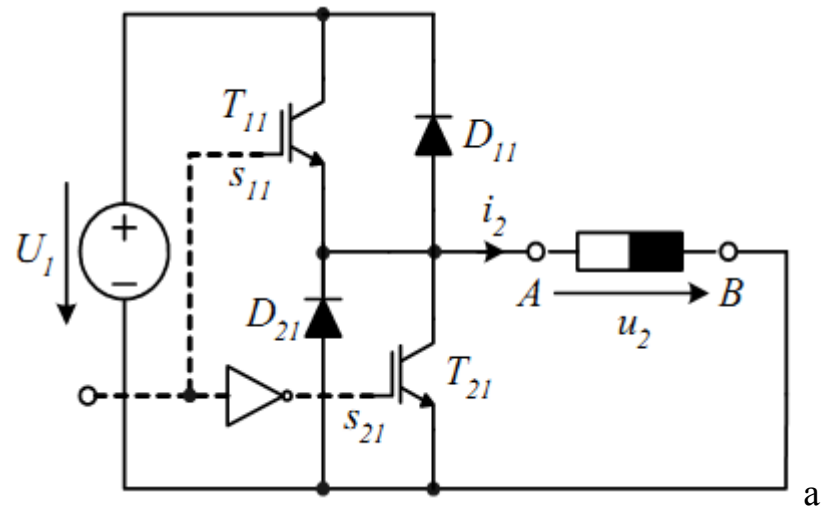


Рис. 2.3: ЧотириквADRANTний перетворювач за рис. 2.2 (а).

2.2. Частота тактування тягового перетворювача

Керування повністю керованим перетворювачем постійного струму є складним завданням.

Для реалізації формування керуючих сигналів використовують зміну тактової комутації елементів.

При цьому форма сигналів за фронтом має бути попередньо визначена завдяки складним розрахункам.

Останнє можливо тільки при застосовуванні методів усунення коливального процесу у структурі перетворювача постійного струму за сигналом завдання та за вихідним сигналом також.

Амплітуді значення у контурі керування не мають перевищувати встановлених значень.

Отже, подібне застосування розв'язку завдань щодо визначення програми керування має враховувати окрім задаючого збуджуючий вплив.

$$\hat{U}_{2,(n)} = \frac{2}{T_2} \int_t^{t+T_2} u_2(t) \sin(n\omega_2 t) dt = \frac{4}{T_2} \int_0^{\frac{T_2}{2}} U_1 \sin(n\omega_2 t) dt = \frac{4}{\pi} U_1 \frac{1}{n} \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots ,$$

$$\hat{U}_{2,(1)} = \frac{4}{\pi} U_1 \approx 1,27 U_1 \quad ,$$

$$u_2 = u_{2,(1)} + u_{2,n} \cdot$$

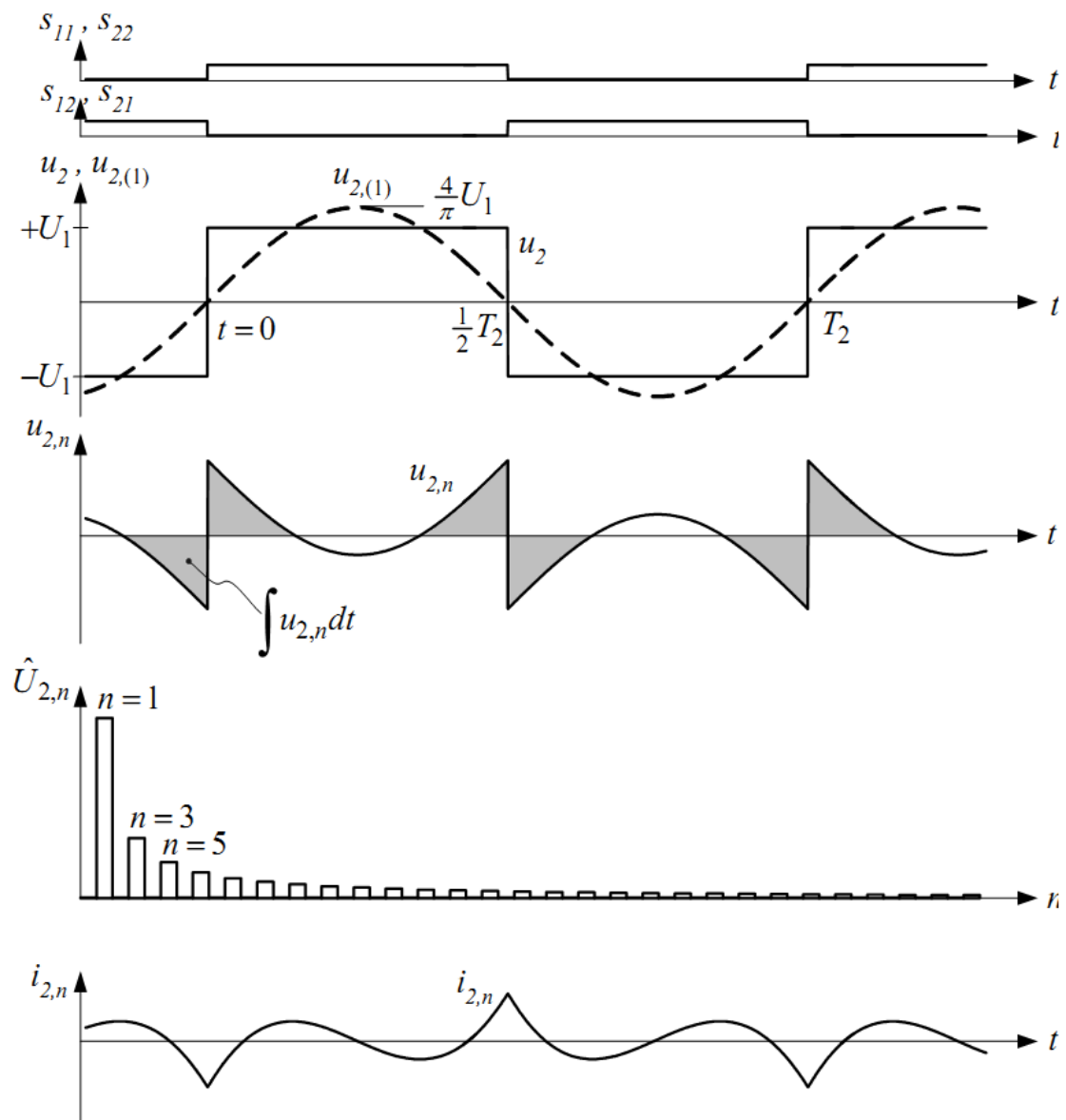
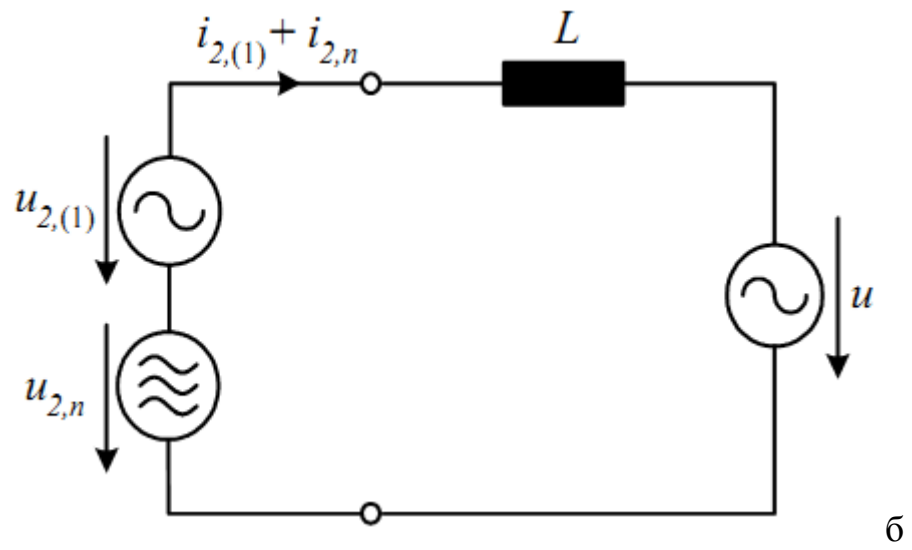
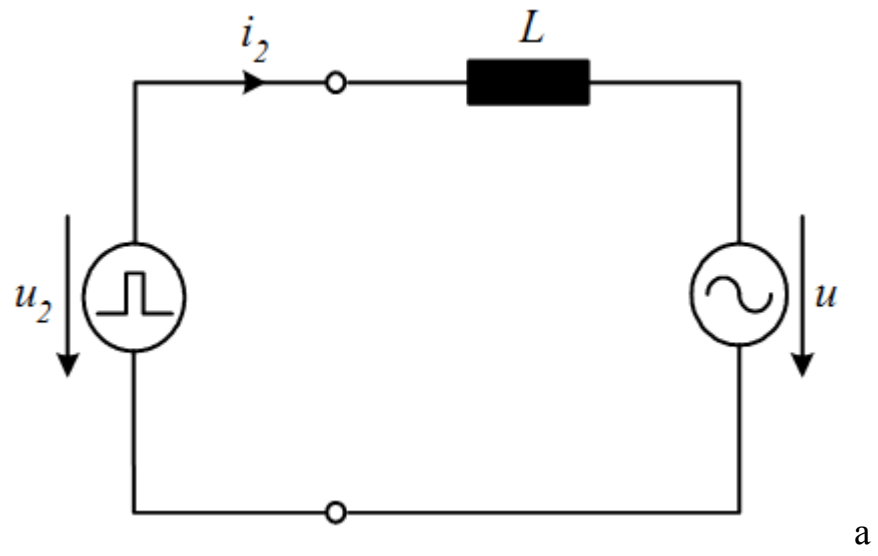


Рис. 2.4: Частота тактування тягового перетворювача.

$$i_2 = i_{2,(1)} + i_{2,n}.$$



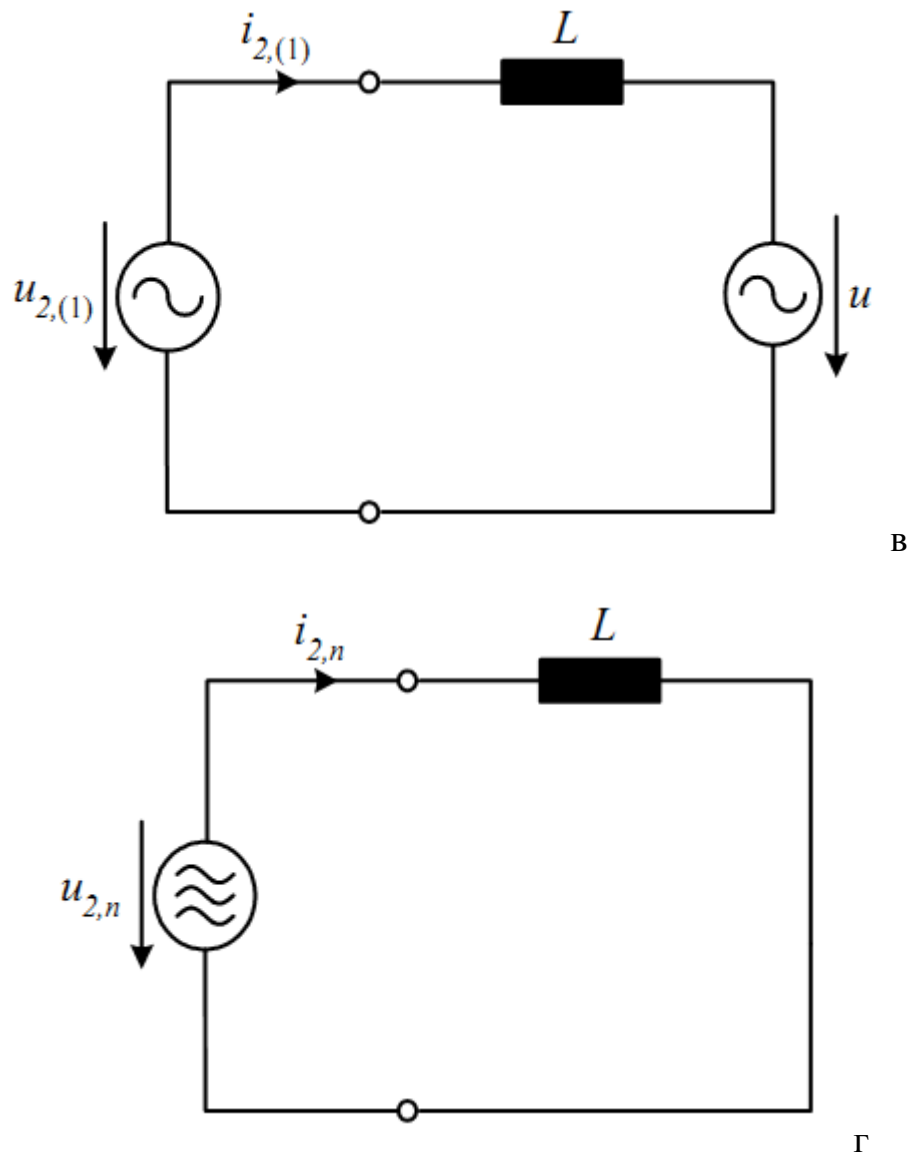


Рис. 2.5: Схеми заміщення (а) на навантаженні, з індуктивним згладжуванням L .

$$i_{2,n} = \frac{1}{L} \int_t u_{2,n} dt + i_{2,n,0}$$

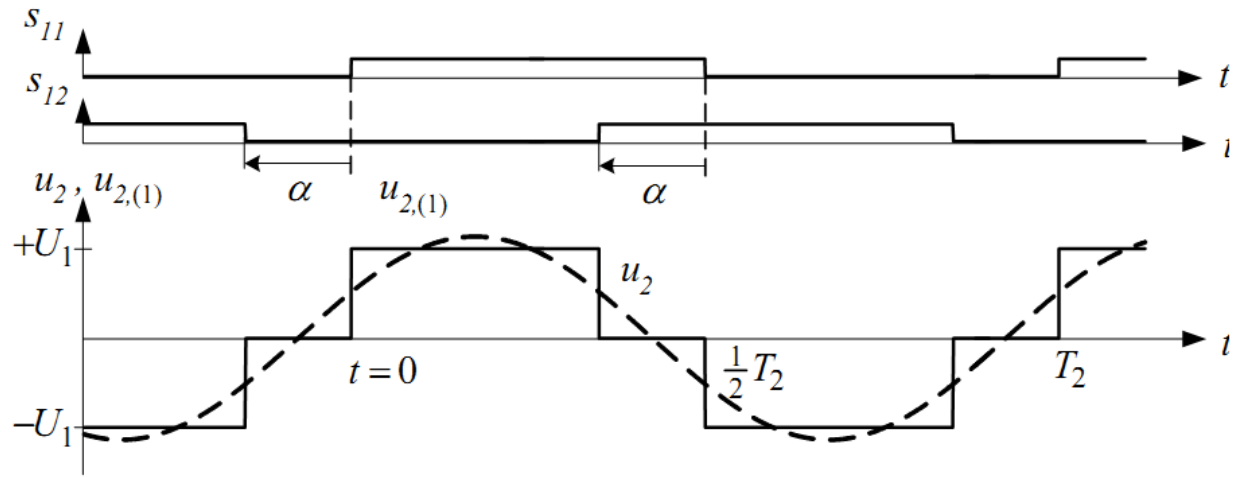


Рис.2.6: Зміна напруги перетворювача при $\alpha = 0$ що показано на рис. 2.4.

2.3. Управління тяговим перетворювачем

Завданням щодо ефективності процесу регулювання параметрів електроприводу з перетворювачем постійного струму є усунення коливального процесу за вихідними параметрами структури перетворення електричної енергії.

Такі процеси контролюються за наявністю відхилення параметрів між вихідними та вхідними завданнями перетворювача.

При низькій тактовності у процесах регулювання параметрів перетворювача важливим є збереження керованості його елементів.

Але такий підхід потребує наявності відповідних програмних застосунків щодо визначення.

При такому програмному регулюванні відсутність коливального процесу між вхідними та вихідними параметрами перетворювача можна виконувати завдяки розрахунку та контролюванні гармонійного складу форми відхилень.

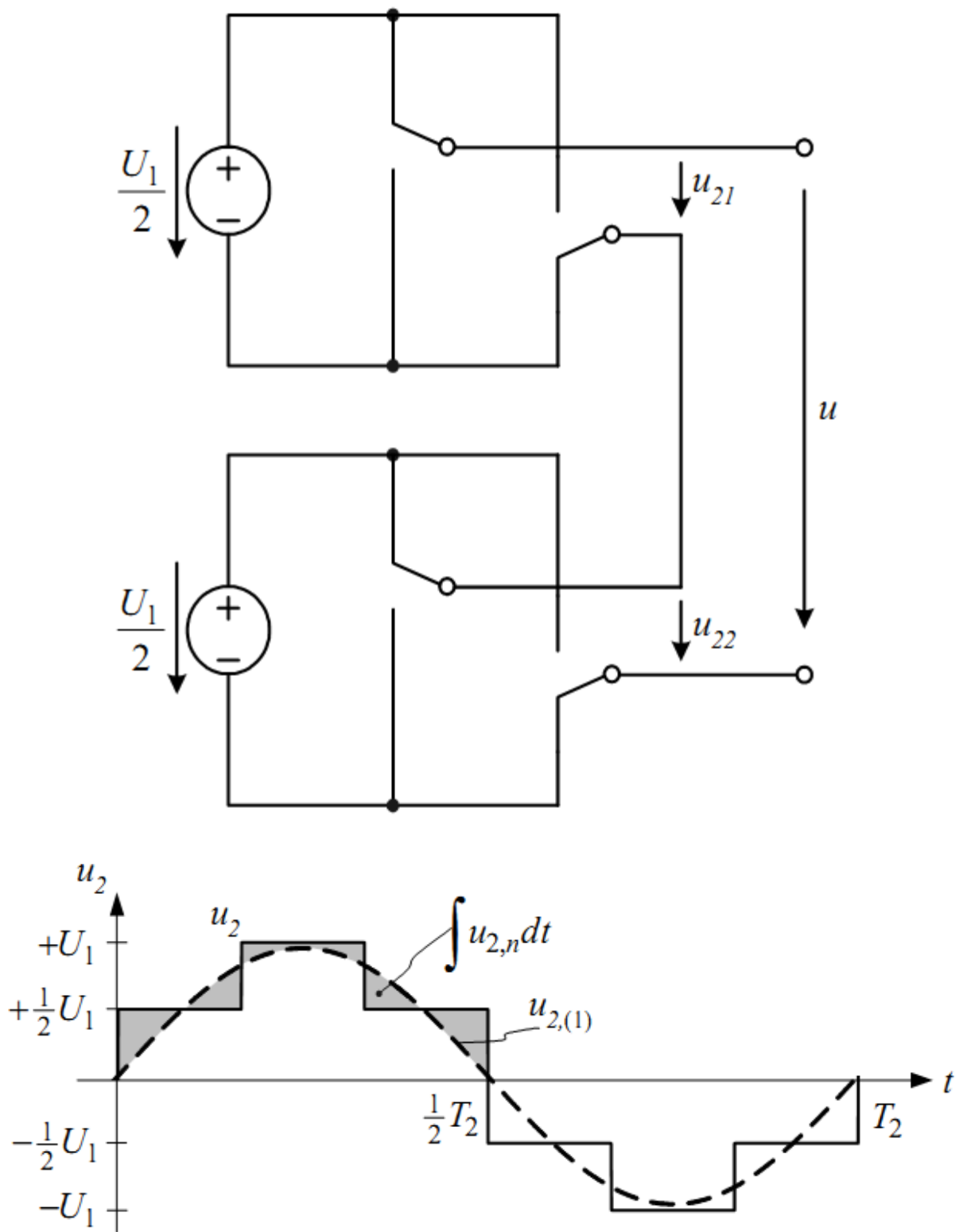


Рис. 2.7: Діаграми при послідовному з'єднанні двох тягових перетворювачів.

$$\bar{u}_2 = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} u_2 dt$$

$$\alpha = \frac{1+m(t)}{2}.$$

$$\bar{u}_2 = \frac{2}{T_P} \left(\alpha \frac{T_P}{2} U_1 - (1-\alpha) \frac{T_P}{2} U_1 \right) = (2\alpha - 1) U_1.$$

$$\bar{u}_2 = m(t) U_1,$$

$$u_{2,(1)} = \hat{U}_{2,(1)} \sin(\omega_2 t + \delta)$$

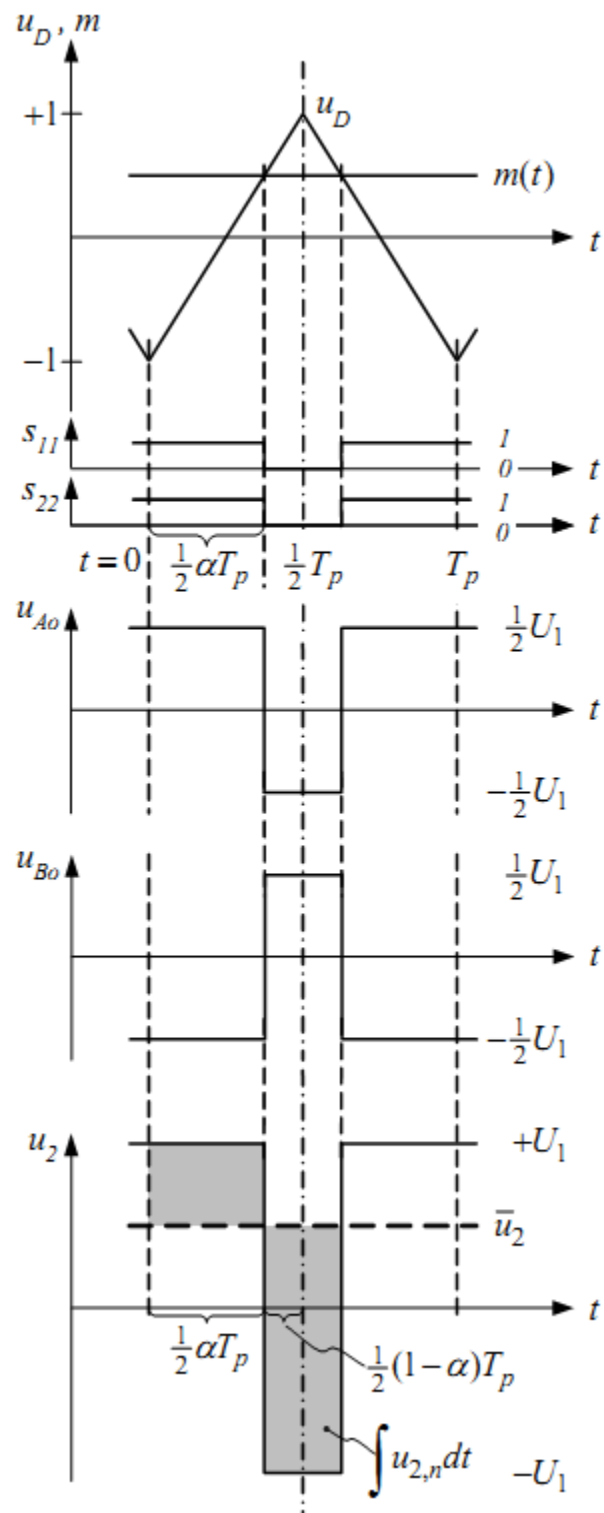
$$\bar{u}_2 = u_{2,(1)}$$

$$m(t) = \frac{\bar{u}_2}{U_1} = \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{U_1} \sin(\omega_2 t + \delta)$$

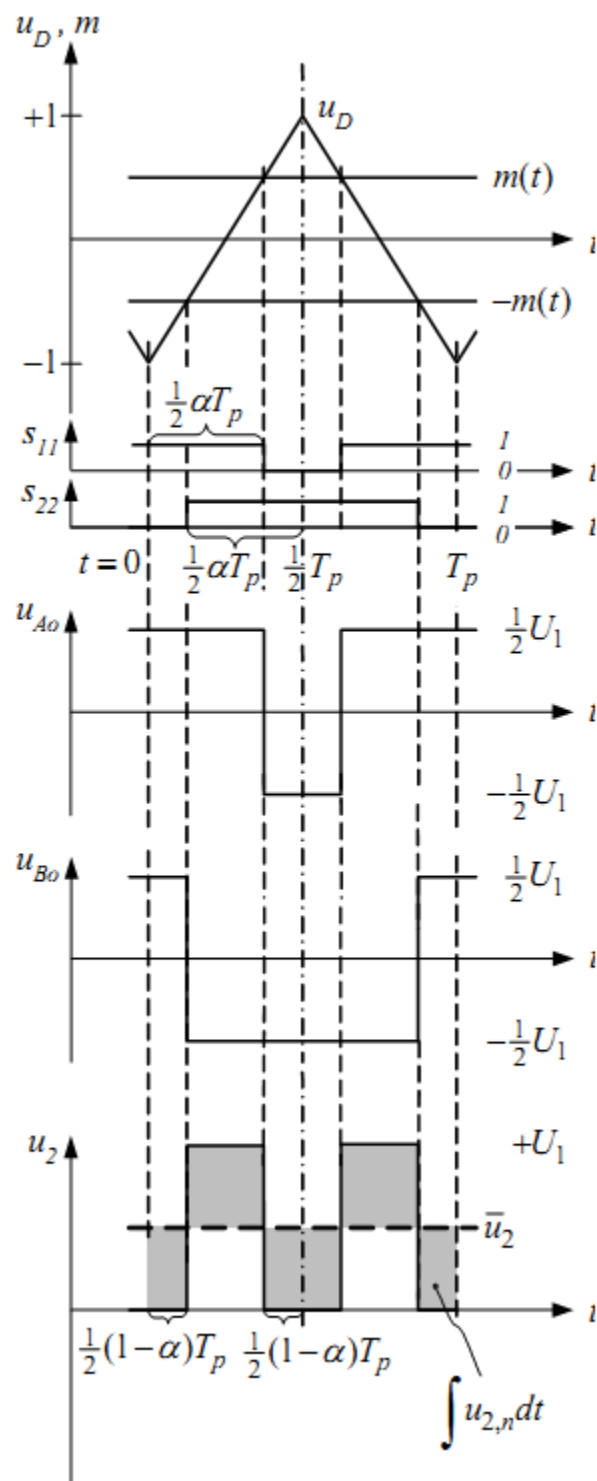
$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{2U_1} \sin(\omega_2 t + \delta),$$

$$M = \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{U_1};$$

$$m(t) = M \sin(\omega_2 t + \delta).$$



a



б

Рис. 2.8: Керуючі сигнали s_{ij} силових модулів $T_{ij,j} = 11,12,21,22$, тягового перетворювача.

Розділ 3. Моделювання режимів роботи тягового перетворювача

3.1. Двоквадрантний перетворювач

При дослідженні перехідних процесів у однопровідній структурі перетворювача можна скористатись відомими математичними виразами щодо представлення ключових елементів.

Такий підхід складно реалізується на практиці, але може бути досліджено програмними методами.

За результатами розрахунків за допомогою програмних методів можна визначити яку кількість енергії буде втрачено завдяки обмеженою можливостей системи керування.

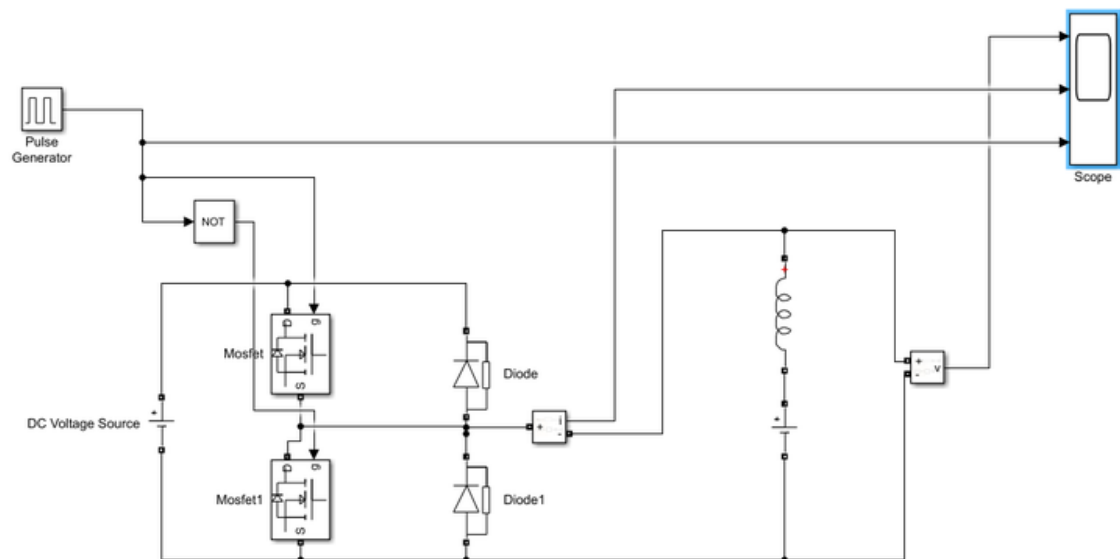


Рис. 3.1 Модель двоквадрантного перетворювача.

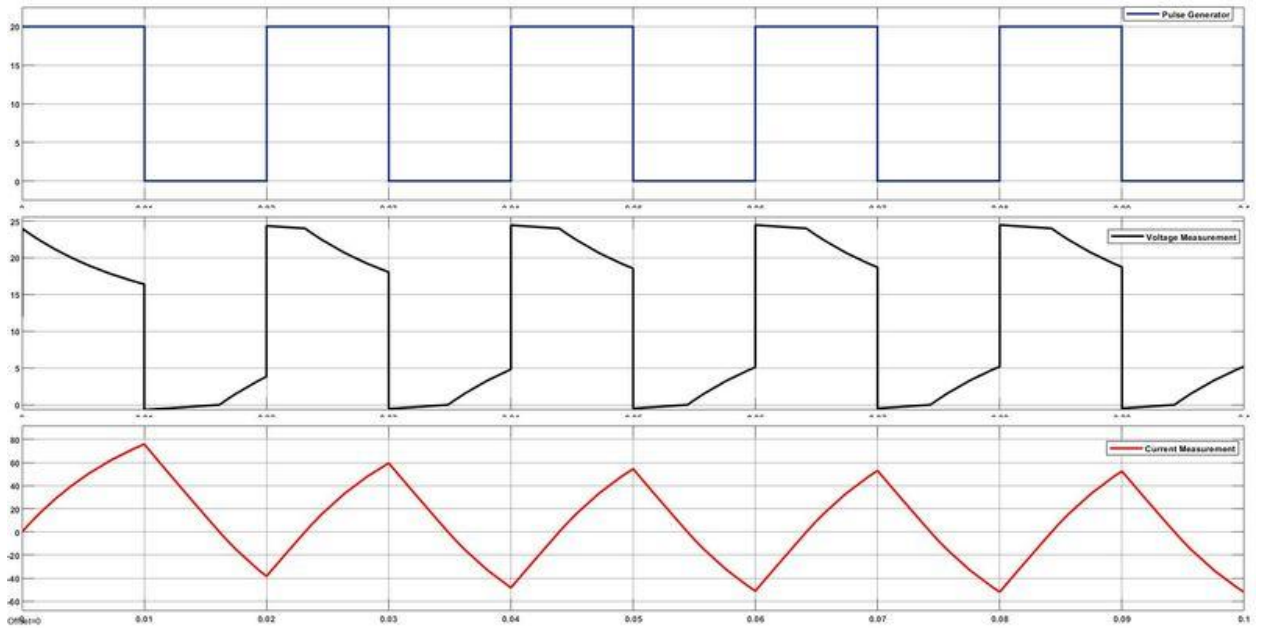


Рис. 3.2 Результати дослідження перехідних процесів

3.2. ЧотириквADRANTНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

При мостовій структурі перетворювача стає можливим поєднати дві однонаправлені потоки електричної енергії та у залежності від потреби створювати можливість її циркулювання у структурі перетворювача або підсилювати процеси у структурі електричного приводу.

Отже, таке застосування може створювати двонаправлені потоки циркулювання струму відносно напруги або почергове керування цими процесами.

Безаварійність такого керування забезпечується почерговістю ввімкнень та їх тривалістю відносно кожного з каналів регулювання.

Таким чином унеможлиблюється одночасність провідності ключових елементів у прямому та зворотному напрямку.

Така почерговістю порядку ввімкнень створюється завдяки визначенню необхідної тактовності керування.

При цьому забезпечується відповідна полярність керування груп елементів.

Такий процес стає можливим завдяки правильному вибору опорного сигналу.

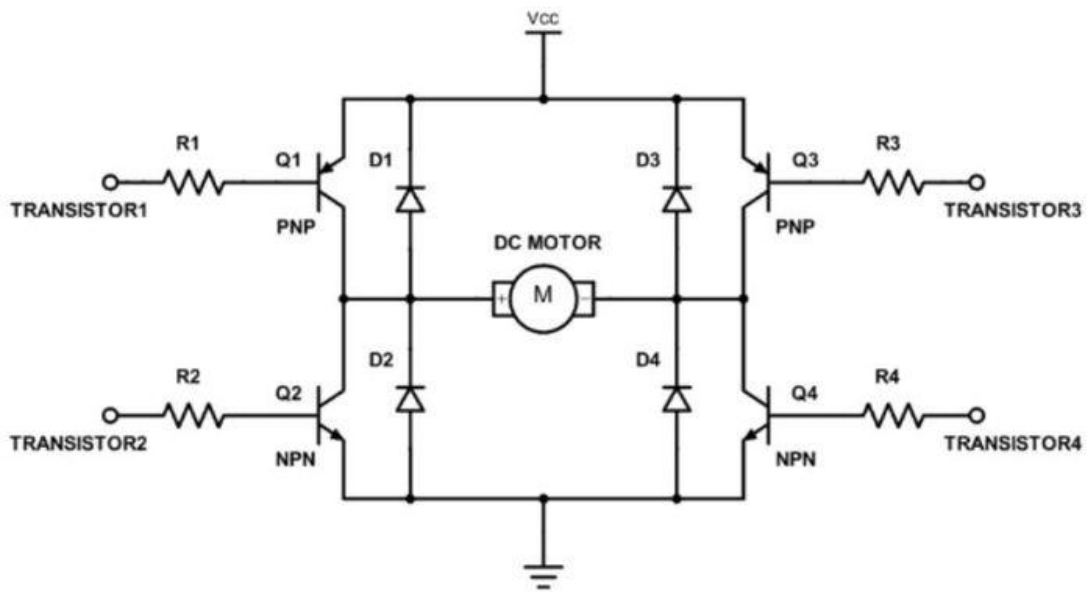


Рис. 3.3: Схема чотириквADRантного перетворювача з модулями для керування тяговим електричним двигуном постійного струму.

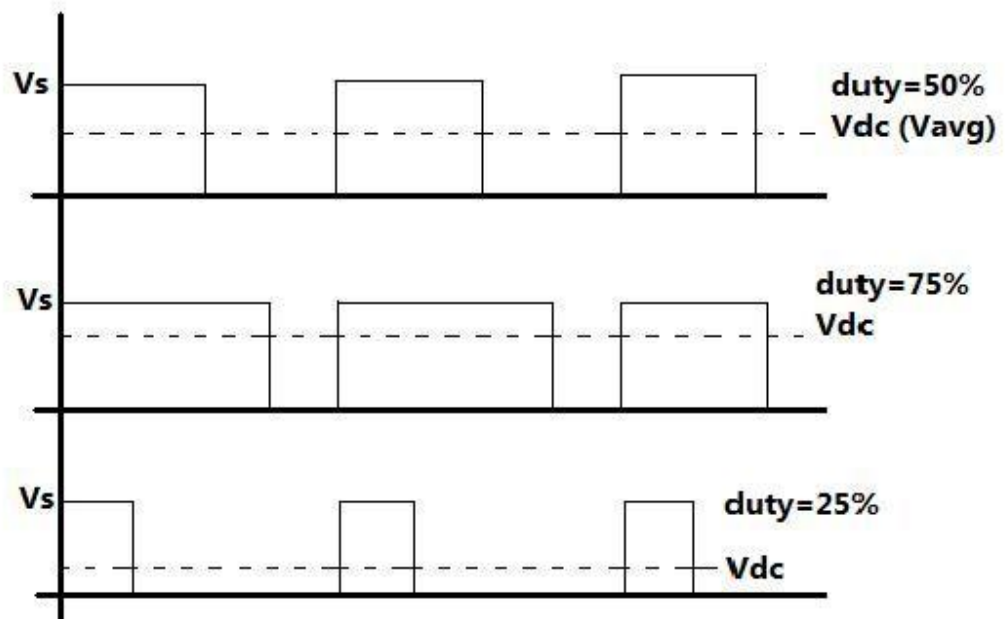


Рис. 3.4: Графіки широтно-імпульсної модуляції керованого сигналу для двигуна постійного струму.

$$V_{dc} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} V_s \quad V_{dc} = \delta V_s,$$

де δ – цикл роботи.

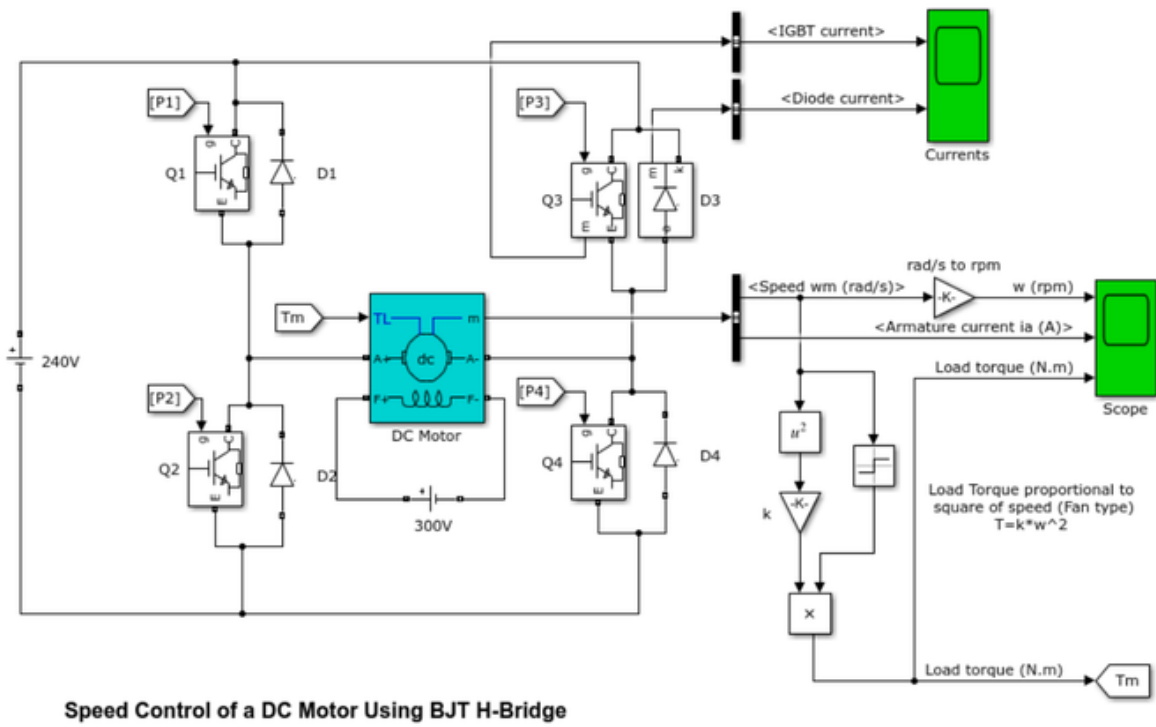


Рис. 3.5 Модель системи керування тяговим перетворювачем

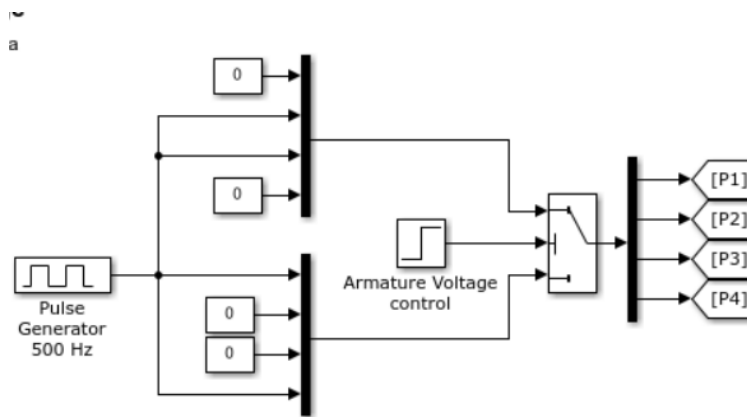


Рис. 3.6 Силовий модуль

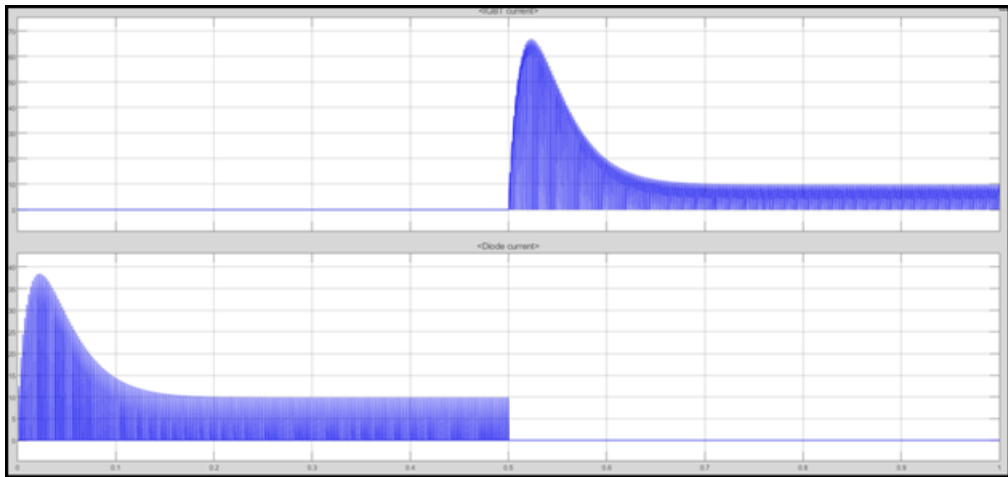


Рис. 3.7 Результати дослідження перехідних процесів

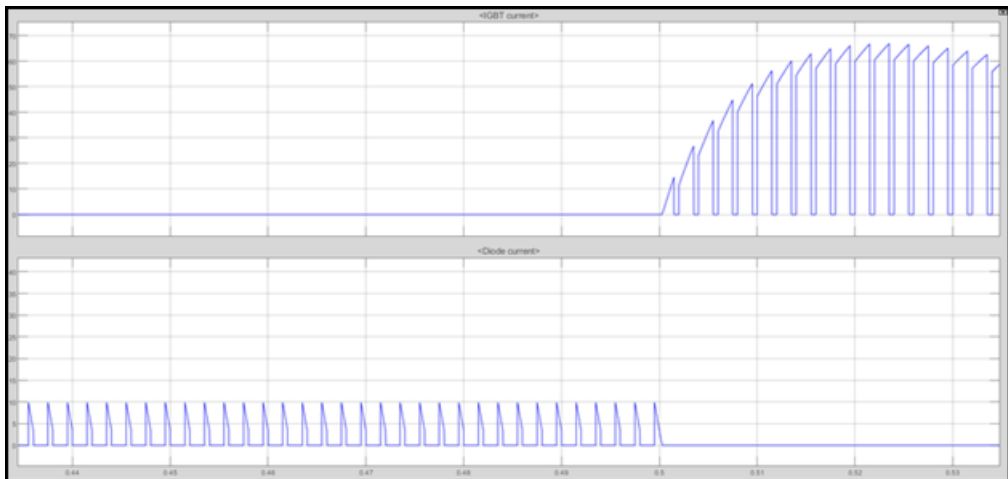


Рис. 3.8 Результати дослідження перехідних процесів

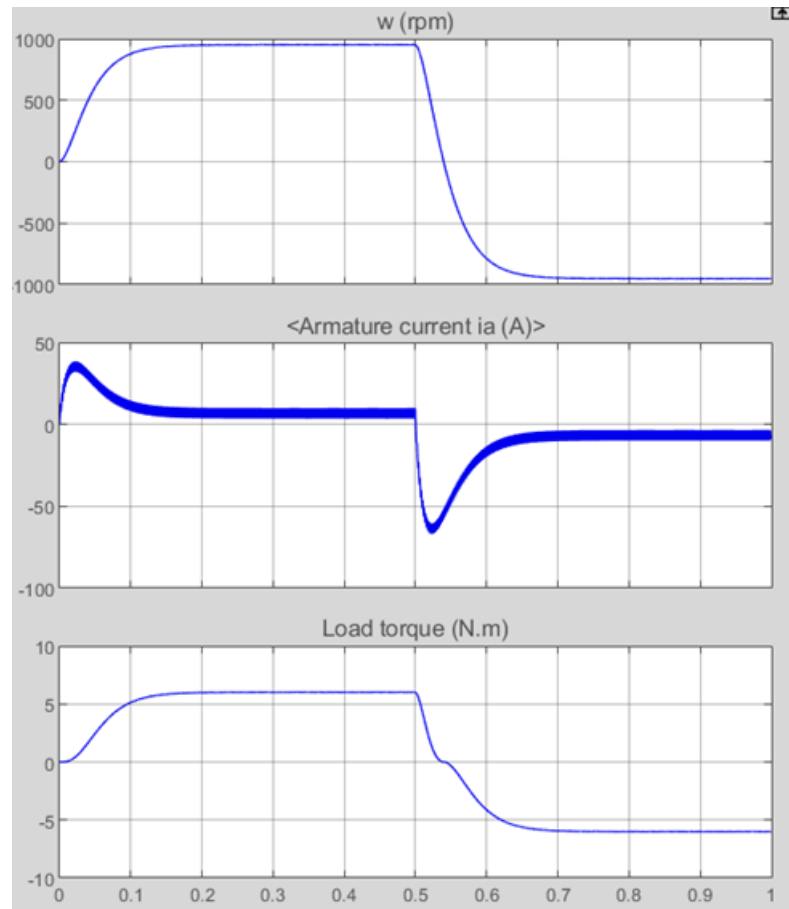


Рис. 3.9 Результати дослідження перехідних процесів

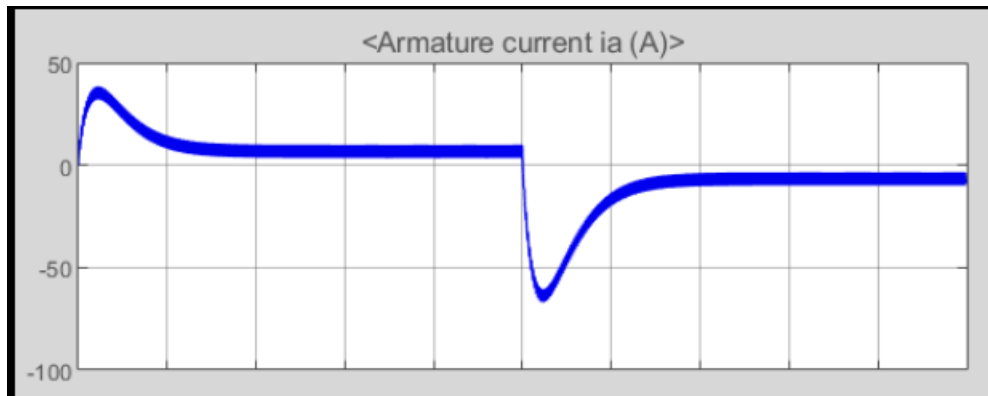


Рис. 3.10 Результати дослідження перехідних процесів

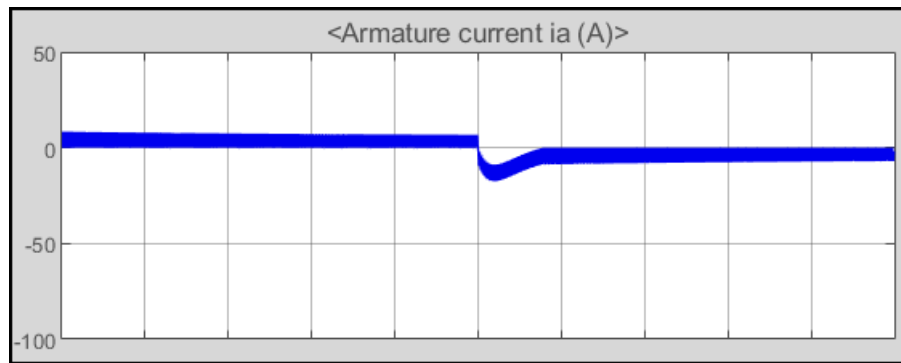


Рис. 3.11 Результати дослідження перехідних процесів

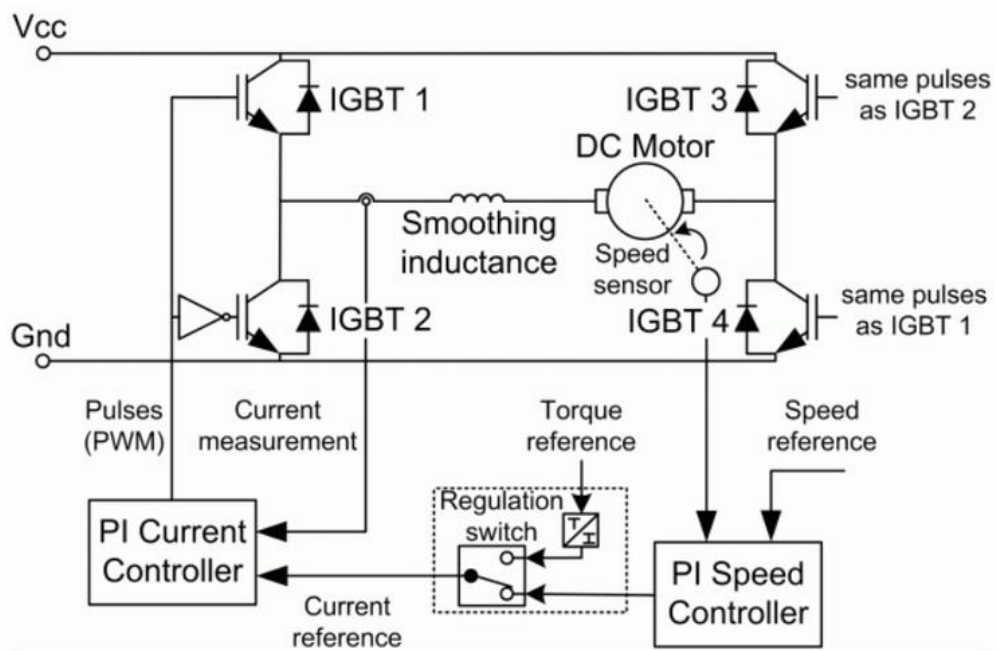


Рис. 3.12 Система електроприводу

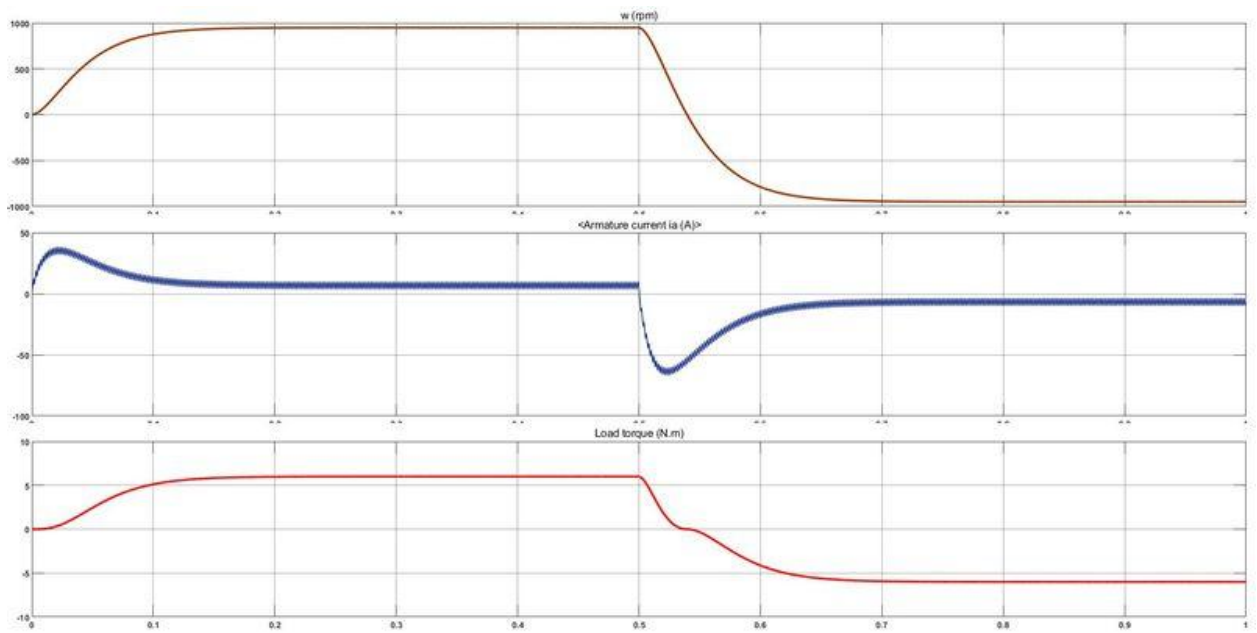


Рис. 3.13 Результати дослідження перехідних процесів

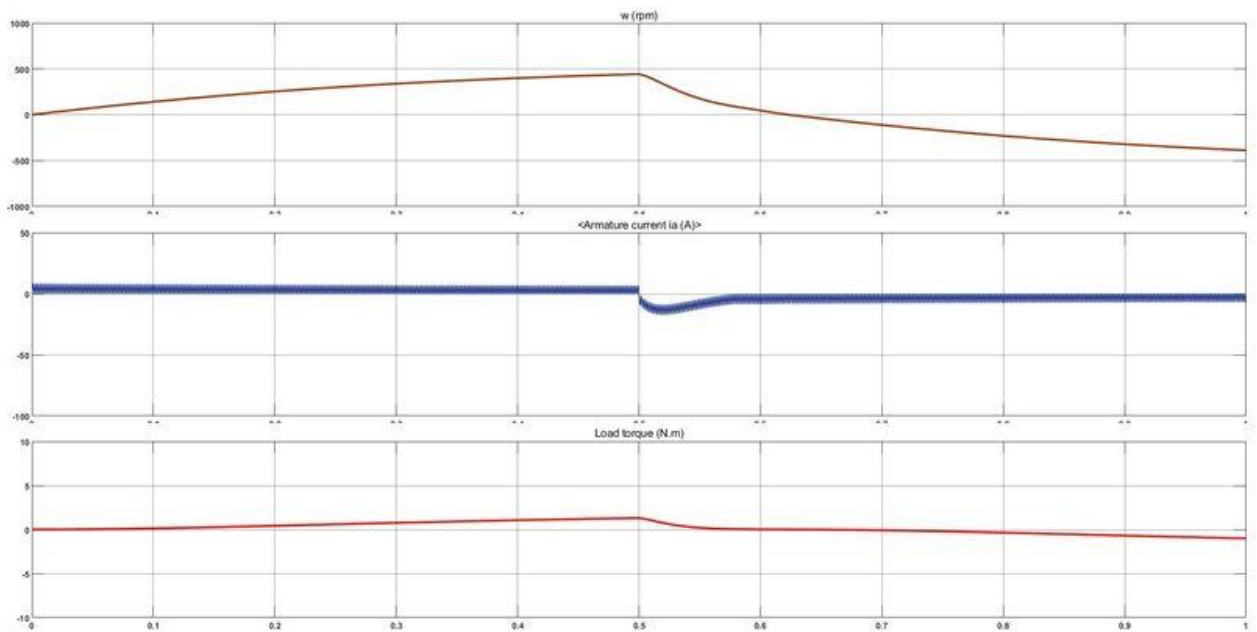


Рис. 3.14 Результати дослідження перехідних процесів

3.3. Закони керування тяговим перетворювачем

Процеси у структурі перетворювача можна визначити завдяки впровадженню та реалізації системи контролю його параметрів.

Перехідні процеси у таких структурах є швидкоплинні, тому потребують відповідного регулювання при зміні параметрів керованих елементів.

Оскільки такі процеси мають забезпечити усі режими роботи електричного двигуна то розрахунок необхідно вести виходячи з такої потреби.

Час розрахунку подібних процесів у структурі перетворювача можна значно зменшити завдяки впровадженню методів математичного розрахунку параметрів змінних у контурах регулювання.

Відтворення прямої та оберненої послідовності при цьому не є однаковою щодо процесу розрахунку, оскільки в останньому випадку відчувається вплив зворотної напруги на визначення відповідних складових.

Ефективність режимів роботи перетворювача має бути досліджена відповідно до його практичної реалізації на прикладі застосування для електроприводу електромобілю.

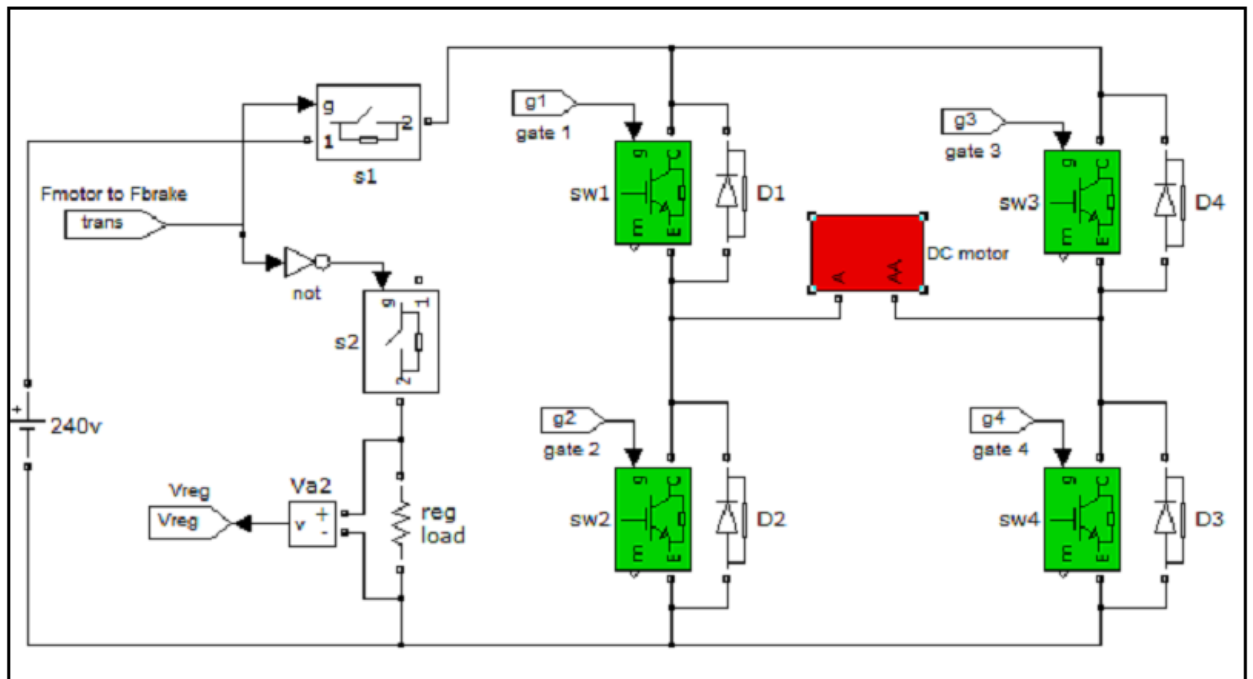


Рис. 3.15 Модель тягового перетворювача.

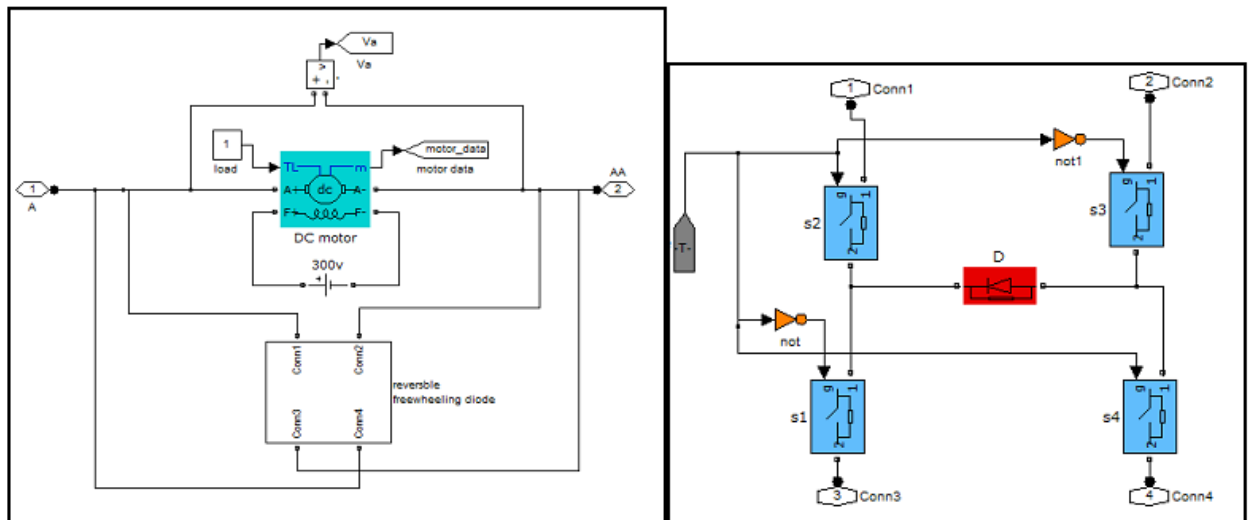


Рис. 3.16 Модель реверсувания тягового электроприводу.

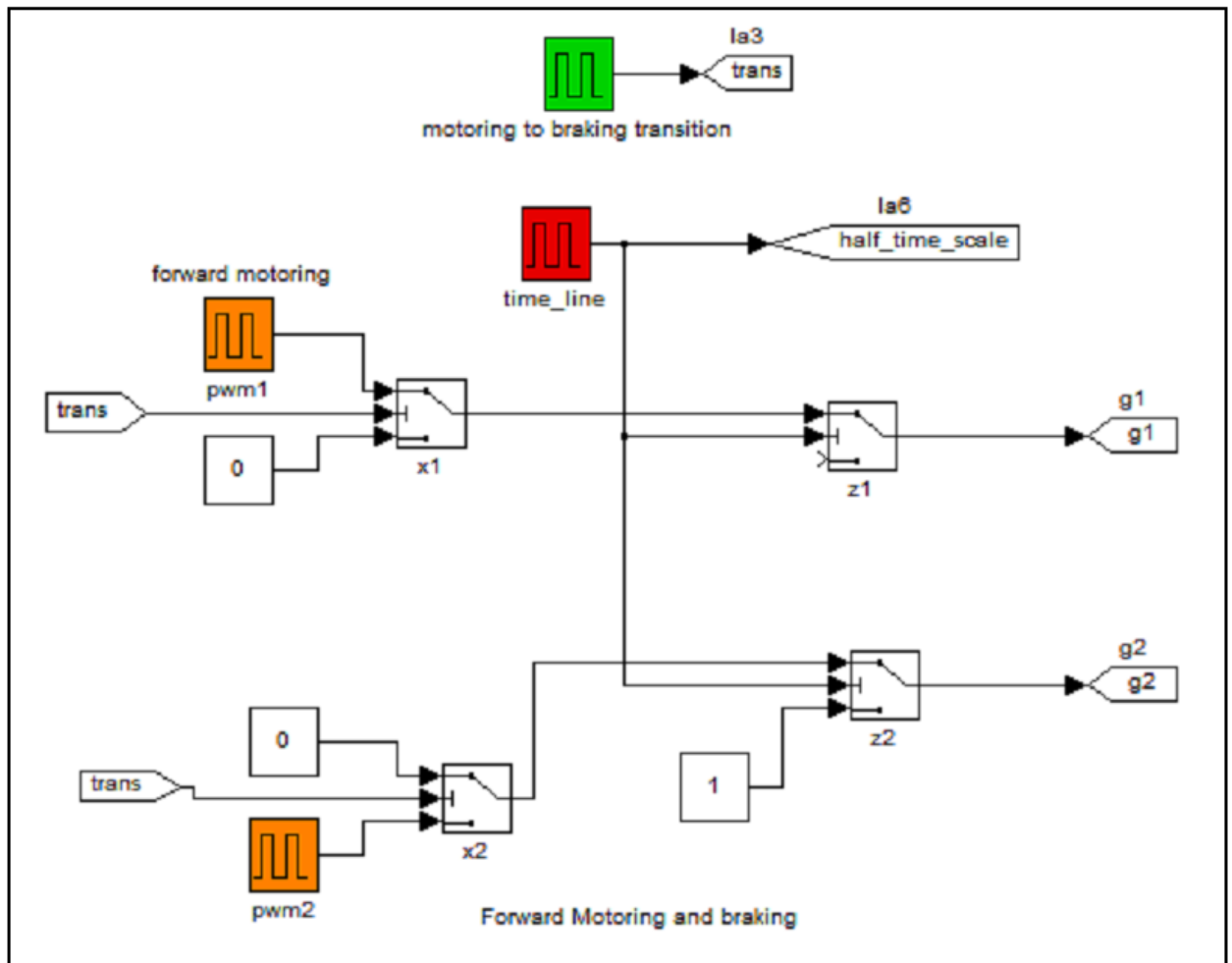


Рис. 3.17 Система керування.

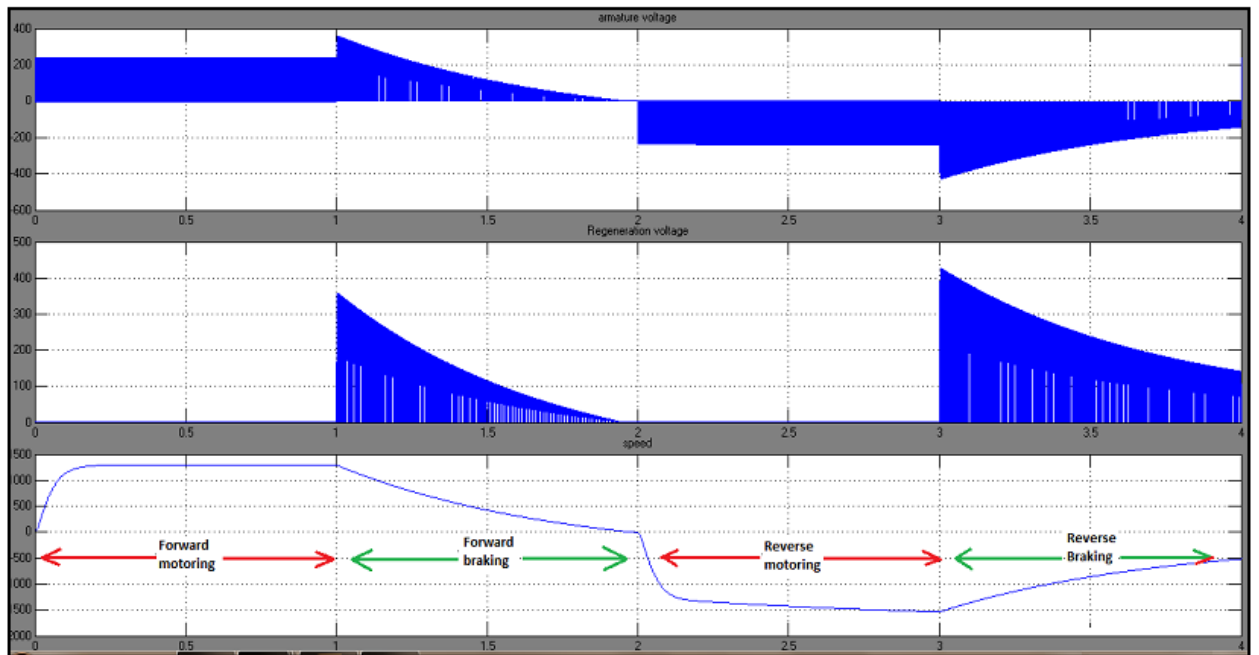


Рис. 3.18 Результати дослідження перехідних процесів за напругою якоря, напругою генерації та швидкістю

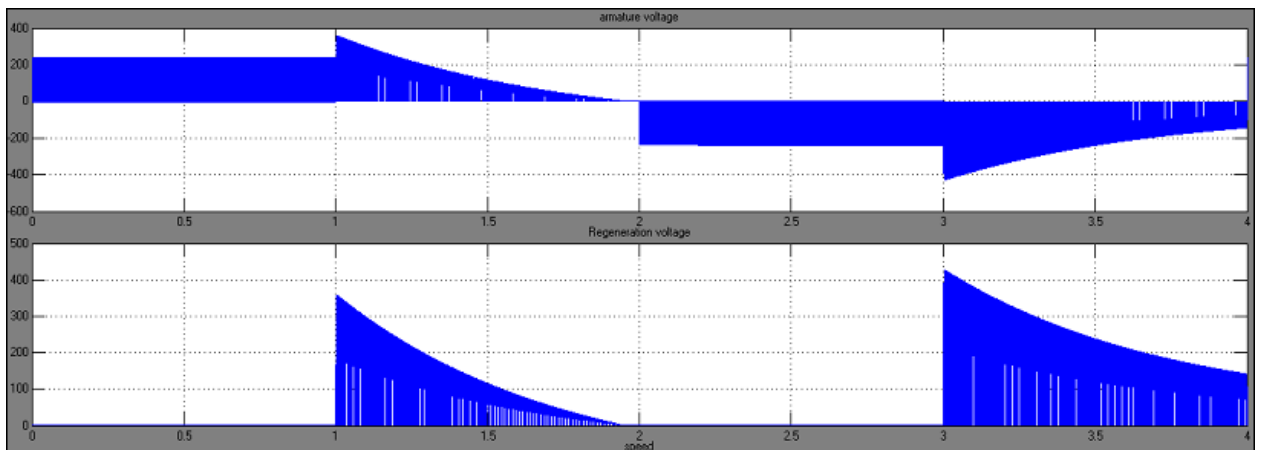


Рис. 3.19 Результати дослідження перехідних процесів за напругою якоря, напругою генерації та швидкістю

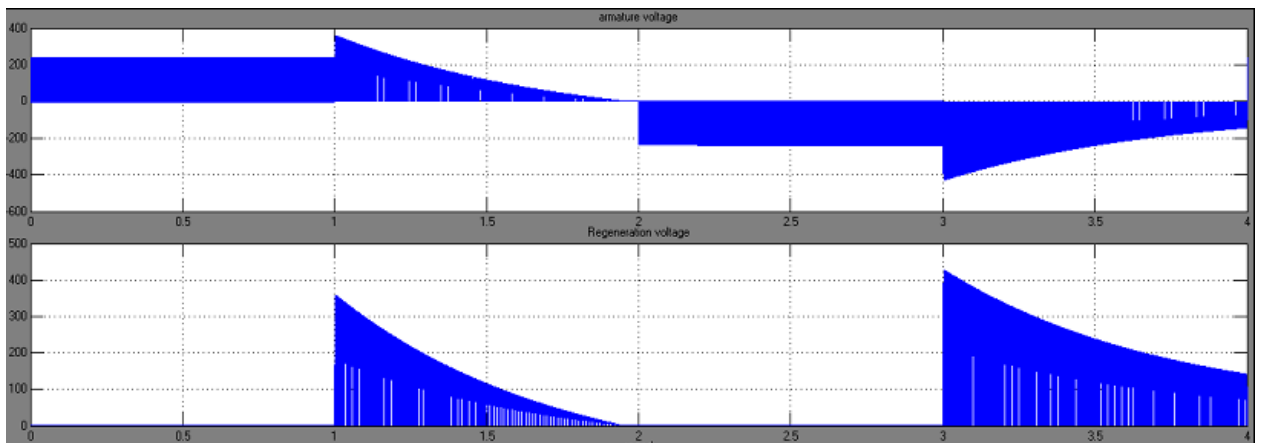


Рис. 3.20 Результати дослідження перехідних процесів за напругою якоря, напругою генерації та швидкістю

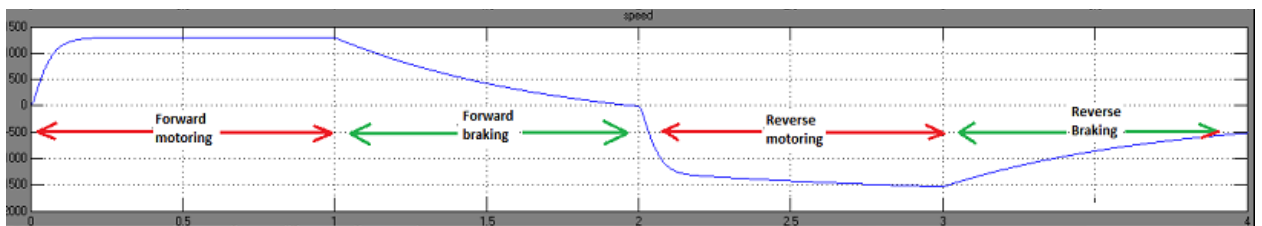


Рис. 3.21 Результати дослідження перехідних процесів за швидкістю

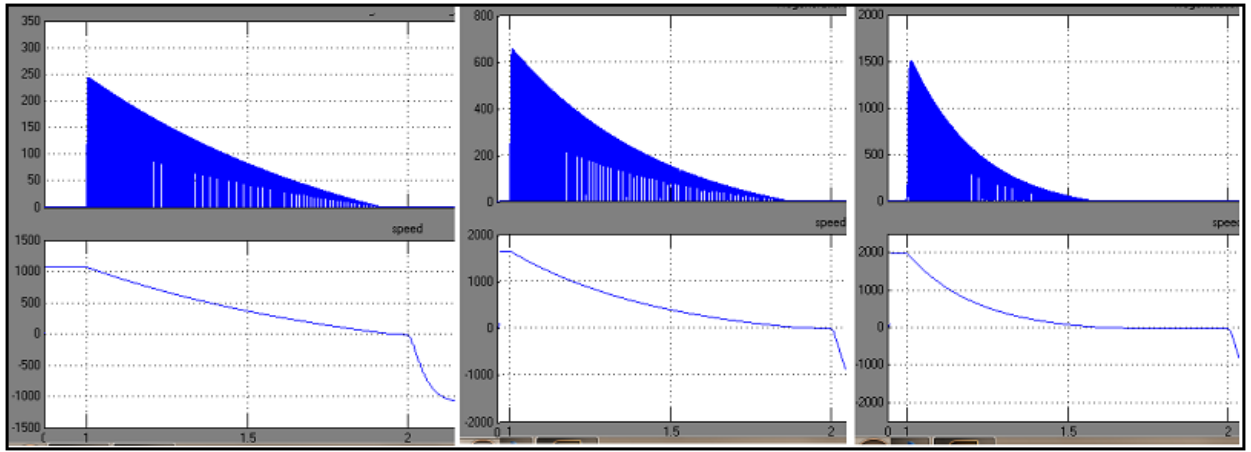


Рис. 3.22 Дослідження режиму гальмування при різних коефіцієнтах навантаження – 50%, 75% та 90%.

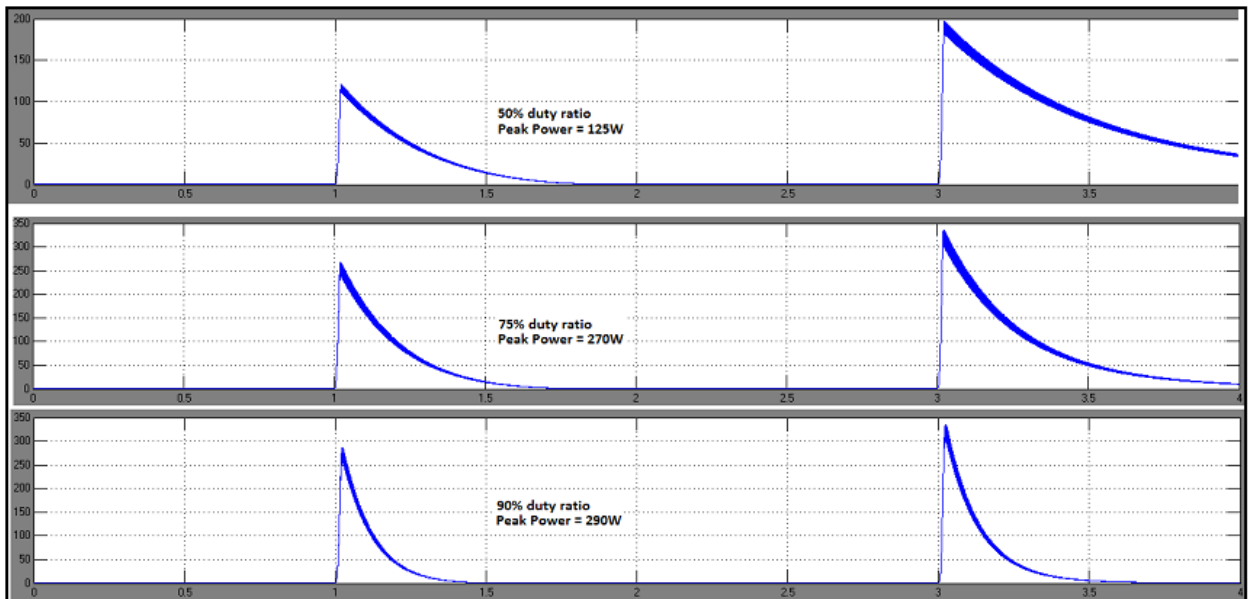


Рис. 3.23 Рекуперативне гальмування.

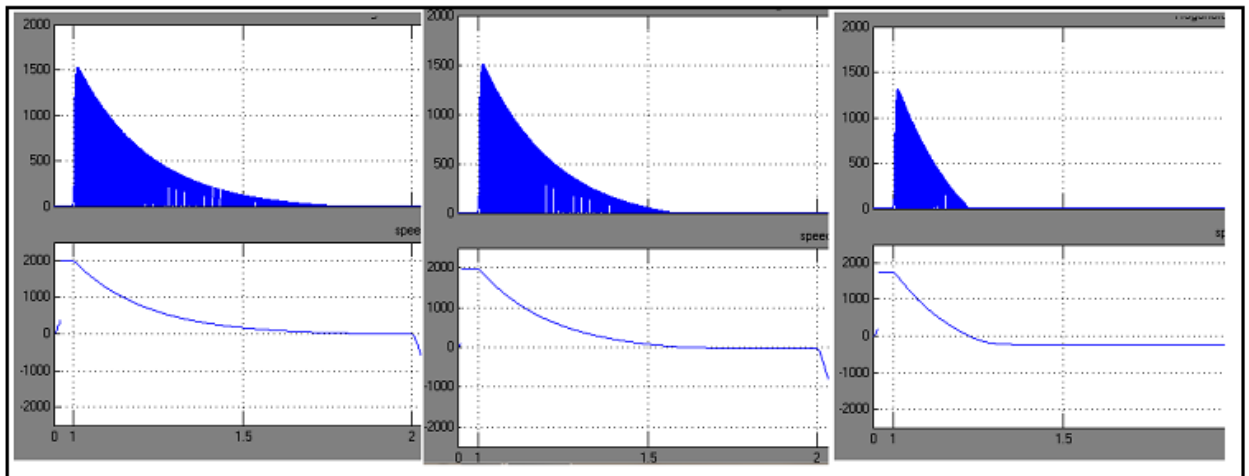


Рис. 3.24 Дослідження режиму гальмування при різних моментах навантаження – 1 Нм та 10 Нм.

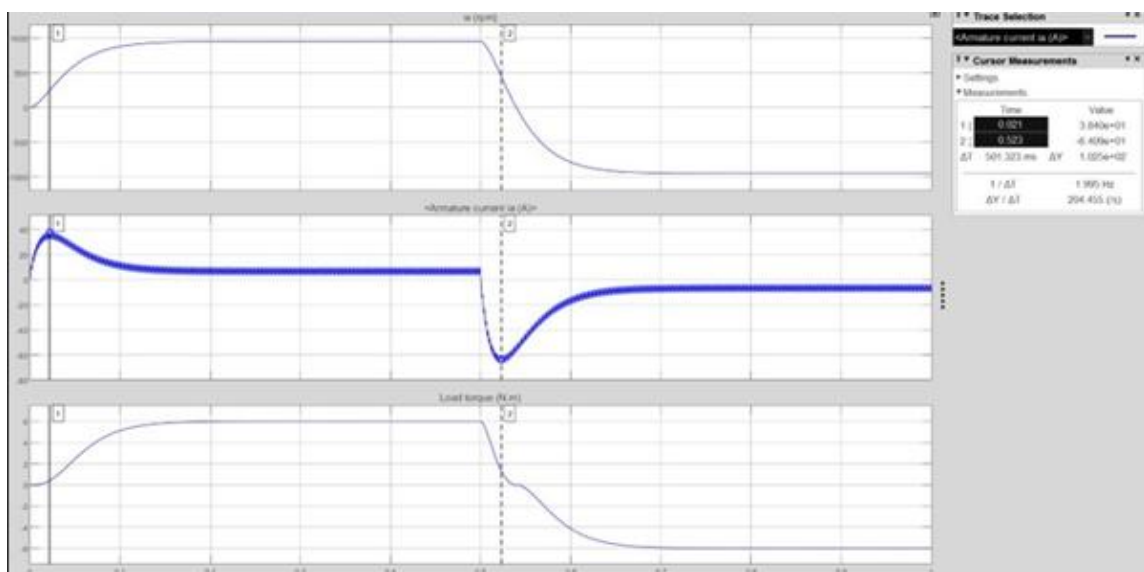


Рис. 3.25 Результати дослідження перехідних процесів

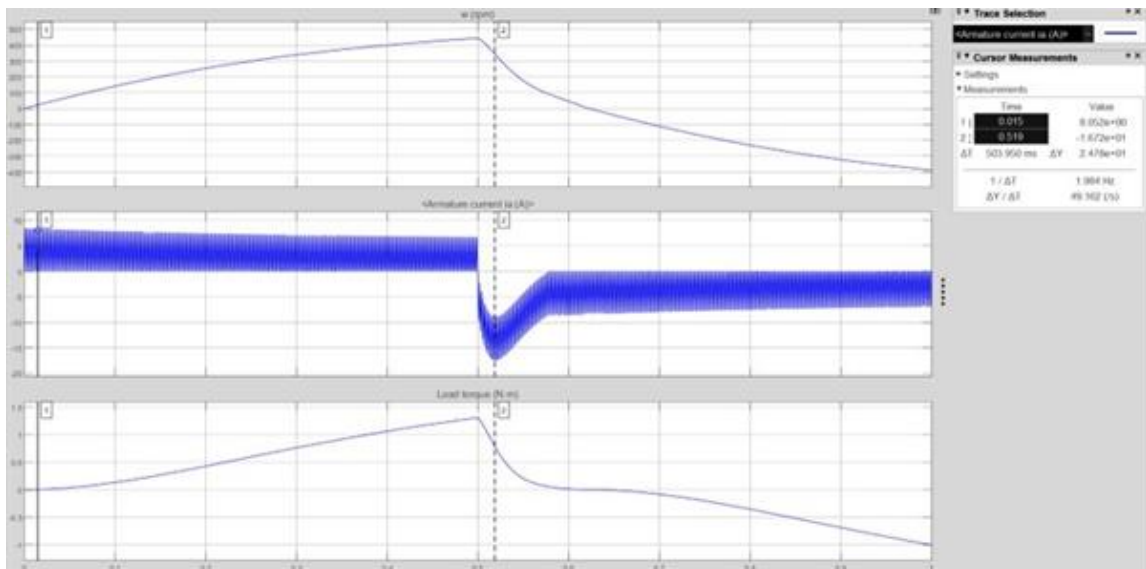


Рис. 3.26 Результати дослідження перехідних процесів

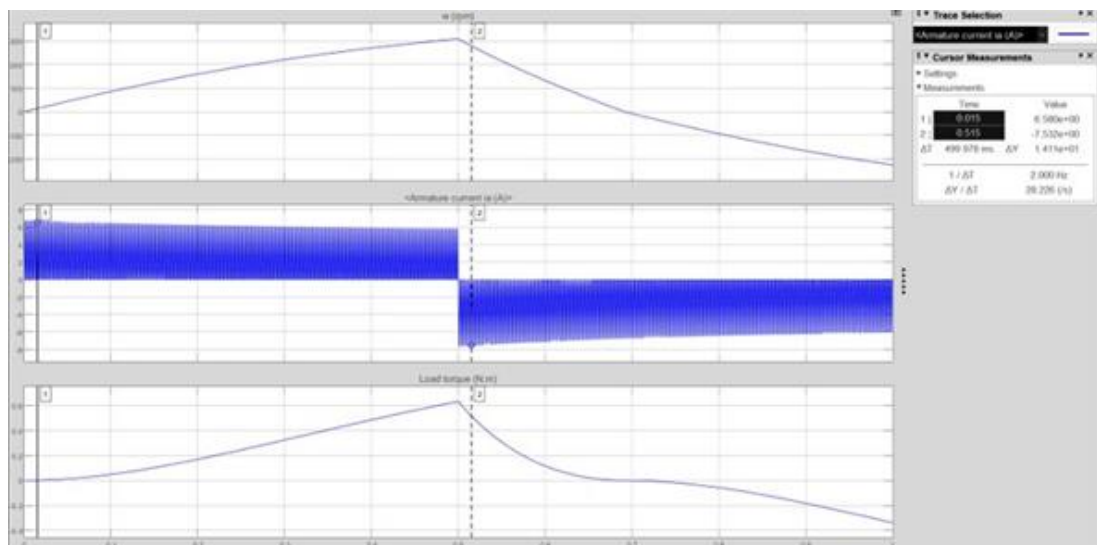


Рис. 3.27 Результати дослідження перехідних процесів



Рис. 3.28 Використання особливостей траєкторії руху

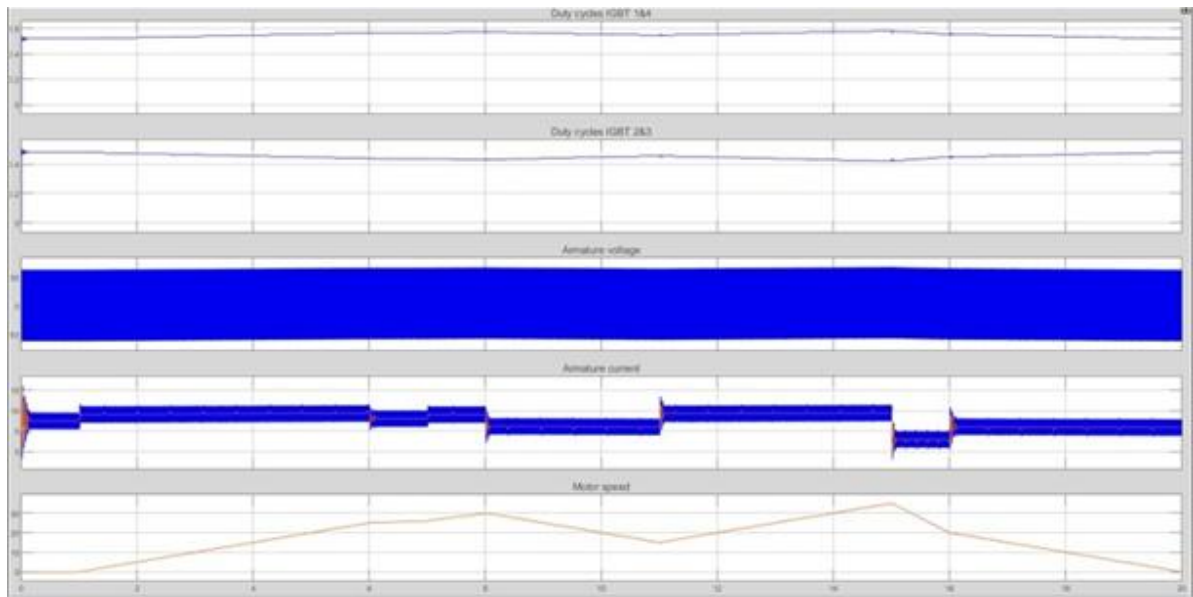


Рис. 3.29 Результати дослідження перехідних процесів

3.4. Реалізація тягового електроприводу з перетворювачем

Представимо структуру чотириквadrантного перетворювача який здійснює регулювання електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами.

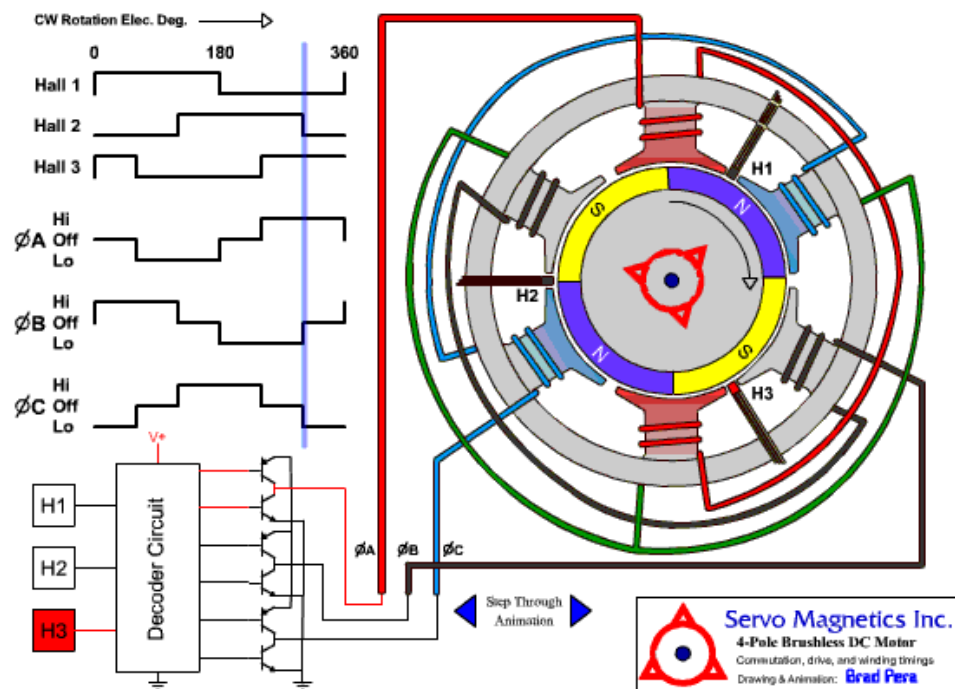


Рис. 3.30 Структурна схема тягового електроприводу з перетворювачем

Висновки

У першому розділі проаналізовано систему електроприводу електромобіля, розглянуто його структуру та складові, представлено схеми тягових перетворювачів.

У другому розділі досліджено математичну модель тягового перетворювача у структурі тягового електроприводу електромобілю та проведено аналіз електромагнітних процесів відповідно до режимів його роботи.

У третьому розділі обрано комп'ютерну модель щодо визначення показників перетворення електричної енергії у структурі тягового електроприводу, досліджено електромагнітні процеси при його роботі з використанням особливостей траєкторії руху.

Список використаних джерел

1. Самотий В. В. Математична модель каскаду "однофазний двоівперіодний випрямляч – мотор постійного струму з паралельним збудженням" [Електронний ресурс] / В. В. Самотий, У. Ю. Дзелендзяк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Сер.: Автоматика, вимірювання та керування. - 2013. - № 753. - С. 3-8. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2013_753_3
2. Івакіна К. Я. Аналіз електромагнітних процесів випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією [Електронний ресурс] / К. Я. Івакіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2013. - № 6. - С. 65-67. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2013_6_19
3. Федів Є. І. Силові випрямлячі систем електропостачання з покращеним коефіцієнтом реактивної потужності [Електронний ресурс] / Є. І. Федів, О. М. Сівакова // Вісник Приазовського державного технічного університету. - 2008. - № 18(2). - С. 60-64. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vprtu_2008_18\(2\)__15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vprtu_2008_18(2)__15)
4. Дзелендзяк У. Ю. Модель системи: однофазний двоівперіодний випрямляч – мотор постійного струму з незалежним збудженням [Електронний ресурс] / У. Ю. Дзелендзяк, В. В. Самотий, А. Г. Павельчак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. - 2015. - № 821. - С. 17-23. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2015_821_5
5. Кшевецький О. С. Дослідження випрямлячів у навчальному експерименті з використанням комп'ютерних засобів [Електронний ресурс] / О. С. Кшевецький, Ю. В. Литвинов // Вісник Чернівецького торговельно-економічного інституту. Економічні науки. - 2015. - Вип. 2. - С. 244-259. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchtei_2015_2_29

6. <https://skill-lync.com/projects/multi-quadrant-operation-of-dc-motor-in-simulink>
7. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/1990>
8. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/dc7-four-quadrant-chopper-200-hp-dc-drive.html>
9. <https://www.edn.com/brushless-dc-motors-part-ii-control-principles/>
10. <https://www.edn.com/brushless-dc-motors-part-i-construction-and-operating-principles/>
11. <https://robu.in/brushless-dc-motor-working-principle-construction-applications/>
12. <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/bldc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>