

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.771.23.016.01

Д. О. ЗАБАРИЛО^{1*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (063) 446 77 38, ел. пошта lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЛАНКИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Мета. Загальна протяжність електрифікованих ділянок залізниць України розподілена приблизно навпіл між ділянками постійного та змінного струмів. Для проходження місць стикування різних родів струму без зупинки поїзда застосовується двосистемний електрорухомий склад. Тому перспективним для залізниць України є впровадження саме такого рухомого складу нової концепції, тобто, з використанням асинхронного тягового привода. Окрім ряду переваг існує вагомий недолік рухомого складу подібної концепції, який полягає в імпульсному відбиранні енергії з джерела живлення, що може вплинути на надійність роботи колійних пристроїв автоматики, а, отже, і на безпеку руху поїздів. Крім того, питома потужність тягового трансформатора значно поступається питомій потужності інших елементів тягового кола. Для усунення таких недоліків були запропоновані перспективні схеми із застосуванням проміжної ланки підвищеної частоти. Ланка складається із трансформатора та інвертора. Першочерговою задачею для впровадження перспективних схем являється визначення робочої частоти високочастотної ланки. **Методика.** Для визначення максимальної робочої частоти комутації транзисторів в роботі використовується методика розрахунку теплових параметрів для напівпровідникових приладів. Для отримання аналітичного виразу кривої залежності енергії, яка виділяється при комутації IGBT (insulated-gate bipolar transistor) від струму його навантаження, застосовується метод апроксимації кривої. **Результати.** Встановлено, що допустима частота високочастотної ланки визначається струмом навантаження проміжного трансформатора. Визначено діапазон робочих частот ланки в залежності від струмів навантаження. Для заданого діапазону струмів виконано порівняльний аналіз комутаційних характеристик IGBT 65 класу виробництва компаній Infineon та ABB. **Наукова новизна.** Отримав подальший розвиток метод визначення максимальної робочої частоти проміжної ланки в схемі з використанням проміжного трансформатора підвищеної частоти. **Практична значимість.** Визначений діапазон робочих частот високочастотної ланки дозволить розвинути подальші дослідження роботи силової схеми з застосуванням трансформатора підвищеної частоти електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом, що зробить можливим оцінити ефективність впровадження схем подібної конфігурації.

Ключові слова: асинхронний тяговий двигун; електрорухомий склад подвійного живлення; трансформатор підвищеної частоти; ланка підвищеної частоти; IGBT; автономний інвертор напруги

Вступ

Залізниця України електрифіковані ділянками постійного і змінного струму та розділені пунктами стикування. Для проходження таких пунктів без зупинки поїздів застосовується двосистемний електрорухомий склад (ЕРС),

використання якого дозволяє знизити кількість інвентарного парку локомотивів та підвищити пропускну спроможність залізниць.

Станом на початок 2014 року інвентарний парк електрорухомого складу подвійного живлення складає 61 одиницю. З них 49 одиниць – електровози серії ВЛ82М, які практично повні-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

стю вичерпали свій ресурс і вимагають заміни на електрорухомий склад нового покоління.

ЕРС нового покоління характеризуються використанням асинхронних тягових двигунів, які мають низку переваг відносно колекторних двигунів постійного та пульсуючого струму.

Структура високовольтної частини привода визначає його ККД, масо-габаритні показники, надійність та рівень впливу на суміжні системи. В загальному вигляді структура силової схеми ЕРС подвійного живлення нового покоління зображена на рис. 1 [11]. Працює схема таким чином. При живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц напруга знижується головним трансформатором ГТ, далі випрямляється, підвищується і стабілізується чотириквadrантним перетворювачем ПЧ, згладжується у ланці постійної напруги ЛПН та подається на автономний інвертор напруги АІН, який живить тяговий асинхронний двигун АТД. При живленні від мережі постійного струму 3 кВ напруга подається безпосередньо до ланки постійної напруги ЛПН.

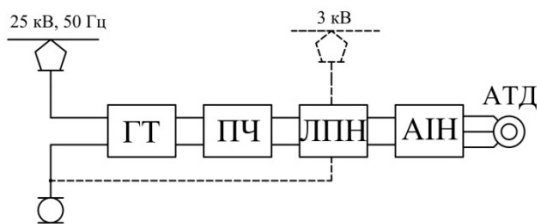


Рис. 1. Структура силової схеми ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом

Fig. 1. Power circuit structure of doubly-fed ERS asynchronous traction drive

Головним недоліком схем подібної конфігурації є імпульсний відбір енергії з вторинної обмотки трансформатора чотириквadrантним перетворювачем шляхом короткочасного замикання обмотки для підвищення напруги ЛПН [3]. Такі замикання створюють імпульси струму з піковими значеннями, які передаються, в остаточному підсумку, в рейкові кола і можуть викликати збій в роботі колійних пристроїв автоматики, в результаті чого знижується безпека руху поїздів. Крім того, питома вага тягового трансформатора значно поступається питомій вазі перетворювача, а традиційні методи її зниження (застосування електротехнічних сталей інших марок) не дають суттєвого виграшу, тому потрібно застосовувати альтернативні способи поліпшення масогабаритних показників трансформатора.

Doi 10.15802/stp2014/30448

Для усунення вказаних недоліків були запропоновані конфігурації схем [2, 3, 12, 13], в яких використовується проміжний трансформатор підвищеної частоти, що дозволить покращити масогабаритні показники тягового трансформатора та усунути імпульсний відбір енергії.

Загальну структуру функціональної схеми запропонованої конфігурації зображено на рис. 2. Схема працює таким чином. При живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц напруга випрямляється вхідним випрямлячем В1, перетворюється в змінну напругу підвищеної частоти інвертором І, перетворюється трансформатором підвищеної частоти ТПЧ до потрібного рівня, випрямляється випрямлячем В2, згладжується фільтром в ланці постійної напруги ЛПН та подається на вхід автономного інвертора напруги АІН, який живить асинхронний тяговий двигун АТД. При живленні від мережі постійного струму 3 кВ напруга подається до ланки постійної напруги ЛПН.

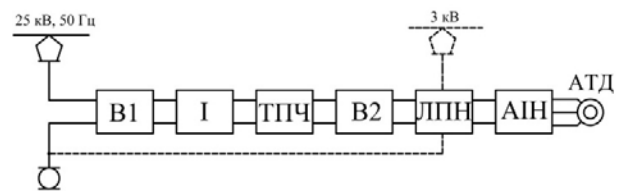


Рис. 2. Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з використанням трансформатора підвищеної частоти

Fig. 2. Doubly-fed ERS functional diagram using a high frequency transformer

В режимі рекуперації випрямлячі В1 та В2 працюють як інвертори, а інвертор І працює випрямлячем.

З точки зору конфігурації дану структуру схеми силових кіл можна використовувати для ЕРС з будь-якою кількістю осей [1], а з точки зору потужності – як для електропоїздів, так і для електровозів.

Силова електрична схема запропонованої конфігурації для одного тягового плеча представлена на рис. 3.

Мета

Одним з головних завдань, які потрібно вирішити для впровадження схеми з застосуванням трансформатора підвищеної частоти, є визначення робочої частоти блока інвертора.

© Д. О. Забаріло, 2014

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

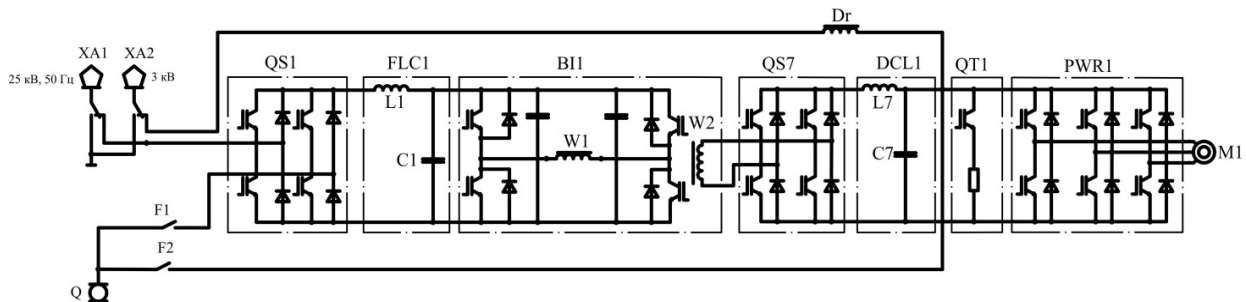


Рис. 3. Силова схема ЕРС подвійного живлення з використанням трансформатора підвищеної частоти: QS1, QS7 – випрямлячі; FLC1, DCL1 – фільтри; BI1 – блок інвертора, який складається з інвертора та трансформатора підвищеної частоти; QT1 – гальмівний чопер; PWR1 – автономний інвертор напруги; M1 – асинхронний тяговий двигун; Dr – вхідний дросель

Fig. 3. Doubly-fed ERS power circuit of using high frequency transformer

Методика

Блок інвертора складається із трансформатора підвищеної частоти та інвертора, який його живить.

Допустима робоча частота трансформатора визначається, головним чином, магнітними та електричними властивостями матеріалу магнітопроводу. Підвищення частоти призводить до зростання нагріву сердечника, що зумовлено, з одного боку, дією вихрових струмів, а з іншого – зменшенням площі поверхні охолодження (внаслідок зменшення габаритів трансформатора). Тому для зменшення температури нагріву необхідно знижувати вихрові струми в сердечнику. Для цього потрібно застосовувати магнітм'які матеріали з питомим опором більшим, ніж у електротехнічних сталях.

Останнім часом широке розповсюдження отримали аморфні сплави – це сплави, які мають випадкову (некристалічну) структуру. До складу сплаву входять дві групи елементів: перехідні метали (Fe, Co, ...) й так звані аморфоутворюючі елементи (B, C, Si, ...). Аморфна структура сплаву виходить тільки при визначеній швидкості його охолодження – сотні й тисячі градусів за секунду.

Для силового трансформаторобудування раціональним є застосування аморфних сплавів на основі заліза. Такі сплави мають індукцію насичення 1,5–1,6 Тл.

Найбільш потужною країною-виробником аморфних сплавів є США, які в цій країні називаються Metglas. Серед великої номенклатури аморфних сплавів вигідно відрізняється сплав марки 2 605 HB1M [6], який має більш низькі пи-

томі втрати (0,083 Вт/кг при $B = 1,3$ Тл, $f = 50$ Гц) та більш високу індукцію насичення (1,63 Тл) порівняно з аналогами.

На ЕРС змінного струму, який експлуатується на залізницях України, використовуються тягові трансформатори, магнітопроводи яких виконано з електротехнічної сталі марок 3 414 і 3 407 товщиною листа 0,30 мм та 0,35 мм відповідно. Під час заміни магнітопроводів з електротехнічної сталі вказаних марок на аморфний сплав марки 2 605 HB1M можна знизити втрати холостого ходу в 8,5...10,6 разу [2]. Тому використання аморфного сплаву марки 2 605 HB1M дозволить знизити температуру нагріву сердечника трансформатора підвищеної частоти. Такі сердечники і, відповідно, трансформатори можуть працювати на частотах до 100 кГц [6].

Порівняння питомих втрат в електротехнічній сталі та аморфному сплаві наведено в табл. 1.

Допустима робоча частота інвертора обмежується комутаційними властивостями силових ключів. Сучасні силові керовані напівпровідникові ключі великої потужності працюють на частотах до десятків кілогерц, а їх допустима робоча частота обмежується, головним чином, тепловими параметрами.

Для надійної роботи схеми (рис. 3) необхідно в перетворювачах застосовувати прилади не нижче 65 класу [1]. На сьогодні такими приладами є IGBT. Тому при визначеному класі IGBT допустима частота високочастотної ланки залежить від струму навантаження, який визначається допустимими втратами потужності.

Загальні втрати потужності в IGBT P визначаються тепловими параметрами приладу та складаються із таких складових:

Порівняння питомих втрат в електротехнічній сталі та аморфному сплаві

Table 1

Comparison of specific losses in electrical steel and amorphous alloys

Марка сталі, сплаву	3 414	3 407	2 605 HB1M
Питомі втрати, Вт/кг	0,878	0,737	0,083
Відношення питомих втрат в сталі до аморфного сплаву	10,6	8,5	–

$$P = P_{cond} + P_{sw} + P_{упр} + P_{зс}, \quad (1)$$

де P_{cond} – втрати потужності у провідному (відкритому) стані, Вт; P_{sw} – втрати потужності при комутації, Вт; $P_{упр}$ – втрати потужності на управління приладом, Вт; $P_{зс}$ – втрати потужності, спричинені протіканням зворотного струму, Вт.

Втрати потужності $P_{упр}$ та $P_{зс}$ мають відносно низькі значення, тому ними можна знехтувати, що не вплине на точність при розрахунках. Тоді:

$$P = P_{cond} + P_{sw}. \quad (2)$$

Втрати потужності у провідному стані P_{cond} в IGBT при синусоїдальній ШІМ для дворівневого АІН визначаються за формулою [10]:

$$P_{cond} = 0,5 \left(U_{CEO} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(U_{CEO} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right), \quad (3)$$

де U_{CEO} – порогова напруга IGBT у відкритому стані, В (рис. 4); r_{CE} – динамічний опір IGBT у відкритому стані, Ом; m – коефіцієнт модуляції; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності трансформатора підвищеної частоти; I_m – амплітудне значення струму навантаження трансформатора підвищеної частоти:

$$I_m = \sqrt{2} I_d, \quad (4)$$

де I_d – діюче значення струму навантаження трансформатора підвищеної частоти, А.

Втрати потужності при комутації визначаються за виразом [5, 10]:

$$P_{sw} = f_{sw} \left(\frac{a}{2} + \frac{bi}{\pi} + \frac{ci^2}{4} \right) \frac{U_{DC}}{U_{nom}}, \quad (5)$$

де f_{sw} – частота комутації, Гц; a , b , c , – коефіцієнти поліному, який апроксимує залежність енергії втрат при комутації IGBT від струму колектора (рис. 5);

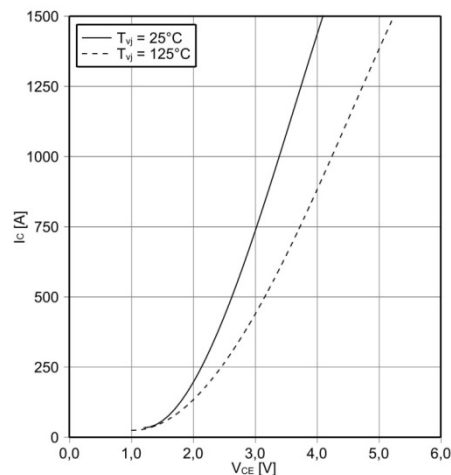


Рис. 4. Залежність падіння напруги на транзисторі від струму колектора IGBT типу FZ750R65KE3 компанії Infineon

Fig. 4. Dependence of the lost volts on the transistor from IGBT collector current, type FZ750R65KE3, Infineon company

U_{DC} – напруга ланки постійного струму, В; U_{nom} – значення напруги, при якому визначаються параметри вмикання та вимикання IGBT, В.

Допустимі значення повних втрат визначаються за формулою [9].

Повні втрати потужності P визначаються за формулою:

$$P_{max} = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}}, \quad (6)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

де T_j – максимально допустима температура нагріву напівпровідникового кристалу; T_a – температура навколишнього середовища, °С. R_{thja} – тепловий опір кристал – середовище охолодження, Вт/°С.

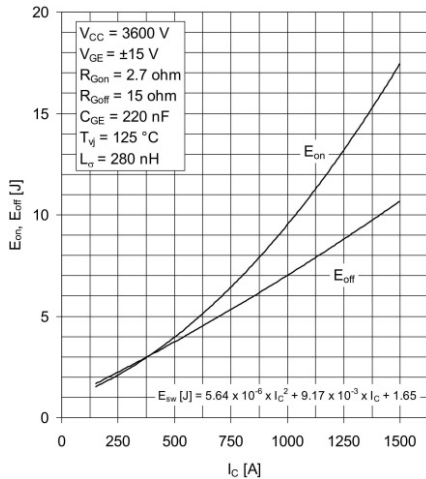


Рис. 5. Залежність енергії комутації від струму колектора за імпульс для IGBT типу 5SNA0750G650300 фірми ABB

Fig. 5. Dependence of switching energy per pulse collector current for IGBT type 5SNA0750G650300, the ABB firm

Тепловий опір R_{thja} складається з таких складових (рис. 6):

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}, \quad (7)$$

де R_{thjc} – тепловий опір кристал – корпус, Вт/°С; R_{thch} – тепловий опір корпус – охолоджувач, Вт/°С; R_{thha} – тепловий опір охолоджувач – охолоджувальне середовище, Вт/°С;

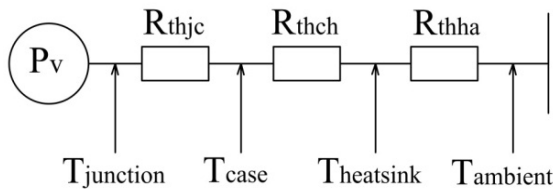


Рис. 6. Теплова схема заміщення

Fig. 6 Thermal equivalent circuit

Значення величин R_{thjc} та R_{thch} наводяться у паспортних даних на прилад, а R_{thha} – на охолоджувач.

Загальні втрати потужності P не повинні перевищувати допустимих втрат P_{max} , тому їх значення можна порівняти:

$$P_{cond} + P_{sw} = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}}. \quad (8)$$

З урахуванням виразів (2), (3), (5)...(8) допустиму частоту комутації IGBT можна визначити за формулою (9).

Серед багатьох світових виробників напівпровідникових приладів лише окремі виробники виготовляють IGBT 65 класу, тому для подальших розрахунків обрано IGBT виробництва компаній Infineon та ABB [7, 8]. До табл. 2 зведені значення максимальної частоти залежно від струму навантаження та типу IGBT. На рис. 8, 9 наведені графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії Infineon та ABB відповідно.

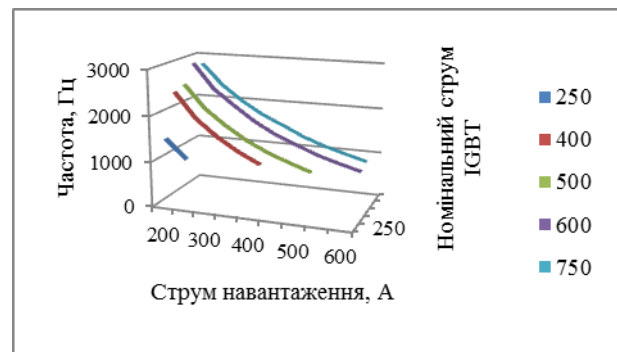


Рис. 8. Графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії Infineon

Fig. 8. Frequency-versus-current for IGBT, company Infineon

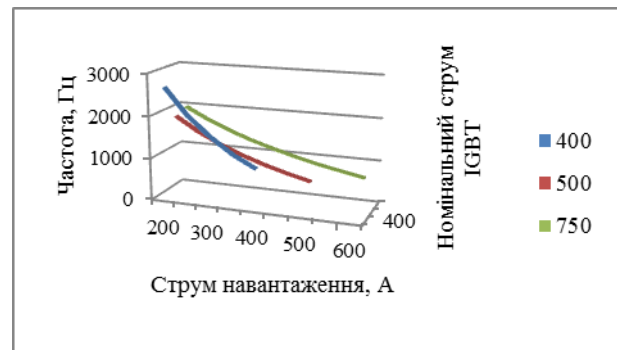


Рис. 9. Графіки залежності частоти від струму для IGBT компанії ABB

Fig. 9. Frequency-versus-current for IGBT, company ABB

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$f_{sw} = \frac{\left(\frac{T_j - T_a}{R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}} - \left(0,5 \left(U_{CEO} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(U_{CEO} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right) \right) \right) \frac{U_{nom}}{U_{DC}}}{\left(\frac{a}{2} + \frac{bi}{\pi} + \frac{ci^2}{4} \right)} \quad (9)$$

Таблиця 2

Значення максимальних частот від струмів для IGBT

Table 2

The value of maximum frequency of the currents for IGBT

Струм навантаження обмотки трансформатора, А	Виробники IGBT							
	Infineon				ABB			
	Номінальний (паспортний) струм навантаження IGBT, А							
	250	400	500	600	750	400	500	750
Максимально допустима частота IGBT, Гц								
200	1 491	2 410	2 487	2 882	2 804	2 661	1 857	1 973
250	1 076	1 857	1 970	2 326	2 330	2 037	1 530	1 705
300	–	1 491	1 622	1 977	1 987	1 582	1 269	1 477
350	–	1 201	1 327	1 649	1 704	1 208	1 053	1 282
400	–	971	1 100	1 391	1 494	932	871	1 121
450	–	–	920	1 194	1 267	–	719	973
500	–	–	759	1 008	1 094	–	586	841
550	–	–	–	864	955	–	–	734
600	–	–	–	736	826	–	–	629

Як видно з табл. 2, IGBT компанії Infineon за частотними параметрами переважають IGBT компанії ABB для всього розглянутого діапазону струмів навантаження (200...600 А). Також з та-блиці видно, що для досягнення максимальної частоти комутації IGBT при струмі навантаження трансформатора 200 А потрібно використовувати прилад з номінальним паспортним струмом навантаження 600 А, для решти величин струму, розглянутого діапазону, – 750 А.

Результати

Встановлено, що допустима частота високочастотної ланки в схемі з використанням проміжного трансформатора визначається струмом його навантаження. Визначено діапазон робочих частот для високочастотної ланки.

Наукова новизна та практична значимість

Набув подальшого розвитку метод визначення максимальної робочої частоти високочастотної ланки для схеми з використанням трансформатора підвищеної частоти, що дозволить визначити діапазон робочих частот ланки залежно від потужності навантаження та типу напівпровідникового приладу.

Висновки

1. Частота високочастотної ланки в схемі з використанням трансформатора підвищеної частоти визначається струмом навантаження трансформатора.

2. За комутаційними властивостями в діапазоні струмів навантаження 200...600 А IGBT 65 класу компанії Infineon значно випереджають IGBT такого ж класу компанії ABB.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Максимально допустима частота комутації IGBT при струмі навантаження 200 А становить 2 882 Гц, при 600 А – 826 Гц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вісін, М. Г. Аналіз силових схем з використанням високочастотного трансформатора для живлення асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу / М. Г. Вісін, Д. О. Забарилло // Електрифікація трансп. – 2013. – № 5. – С. 25–32.
2. Вісін, М. Г. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення із застосуванням трансформатора з високочастотною розв'язкою та асинхронними тяговими двигунами / М. Г. Вісін, Д. О. Забарилло // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 64–69.
3. Забарилло, Д. О. Перспективи застосування аморфних сплавів для тягового рухомого складу / Д. О. Забарилло // Локомотив-інформ. – 2014. – № 7 (97). – С. 44–47.
4. Муха, А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05. 22. 09 / Муха Андрій Миколайович ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – 36 с.
5. Остренко, В. С. Определение максимального допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT / В. С. Остренко // Электро-техника та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 28–33.
6. Параметри аморфного сплаву марки 2605NB1M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.metglas.com/assets/pdf/msds/msds2605sa1.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
7. Характеристики IGBT виробництва компанії ABB [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/verifydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/\\$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/verifydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
8. Характеристики IGBT виробництва компанії Infineon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-module/igbt-module-4500v-6500v/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab69f8450396>. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
9. Чебовский, О. Г. Силовые полупроводниковые приборы : справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
10. Applying IGBT [Електронний ресурс] / Bjorn Backlund, Raffael Schenell, Ulrich Schlapbach, Roland Fisher, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors. – Режим доступу: <http://www05abb.com> свободный. – Назва з екрана. – Перевірено : 02.06.2014.
11. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives / M. M. Bakran, H.-G. Eckel, P. Eckert et al. // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (20.06-25.06.2004). – Aachen, 2004. – Vol. 1. – P. 697–703. doi: 10.1109/PESC.2004.1355833.
12. Kunz, M. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge / M. Kunz, F. Hörl, Th. Klockw // ZED+DET Glass Ann. 123. – 1999. – № 11/12. – P. 423–426.
13. Victor, M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittlere frequen ztransformator / M. Victor // Elektrische Bahnen 103. – 2005. – № 11. – P. 505–510.

Д. А. ЗАБАРИЛО^{1*}

^{1*}Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (063) 446 77 38, эл. почта lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗВЕНА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. Общая протяженность электрифицированных участков железных дорог Украины распределена приблизительно в равных долях между участками постоянного и переменного токов. Для прохождения мест стыкования разных родов тока без остановки поезда применяется двухсистемный электроподвижной состав. Поэтому перспективным для железных дорог Украины является внедрение именно такого подвижного состава новой концепции, то есть с применением асинхронного тягового привода. Помимо ряда преимуществ существует весомый недостаток у подвижного состава подобной концепции, который заключается в им-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

пульсном отборе энергии от источника питания, что может повлиять на надежность работы путевых устройств автоматики, а, следовательно, и на безопасность движения поездов. Кроме того, удельная мощность тягового трансформатора значительно уступает удельной мощности других элементов тяговой цепи. Для устранения таких недостатков были предложены перспективные схемы с применением промежуточного звена повышенной частоты, которое состоит из трансформатора и инвертора. Первоочередной задачей для дальнейшего внедрения перспективной схемы является определение рабочей частоты высокочастотного звена. **Методика.** Для определения максимальной рабочей частоты коммутации транзисторов в работе используется методика расчета тепловых параметров полупроводниковых приборов. Для получения аналитических выражений кривых зависимости энергии, выделяемой при коммутации IGBT (insulated-gate bipolar transistor) от тока его нагрузки, применяется метод аппроксимации. **Результаты.** Установлено, что допустимая частота высокочастотного звена определяется током нагрузки промежуточного трансформатора. Определен диапазон рабочих частот звена в зависимости от токов нагрузки. Выполнен сравнительный анализ коммутационных характеристик IGBT 65 класса производства компаний Infineon и ABB. **Научная новизна.** Получил дальнейшее развитие метод определения максимальной рабочей частоты промежуточного звена в схеме с использованием промежуточного трансформатора повышенной частоты. **Практическая значимость.** Установленный диапазон рабочих частот высокочастотного звена позволит развить дальнейшие исследования работы силовой схемы с применением трансформатора повышенной частоты электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом, что сделает возможным оценить эффективность внедрения схем подобной конфигурации.

Ключевые слова: асинхронный тяговый двигатель; электроподвижной состав двойного питания; трансформатор повышенной частоты; IGBT; автономный инвертор напряжения; высокочастотное звено

D. O. ZABARYLO^{1*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012

FREQUENCY DETERMINATION OF HIGH-FREQUENCY LINK FOR PERSPECTIVE ELECTRIC ROLLING STOCK

Purpose. Total mileage of Ukrainian electric railways is distributed approximately equally between the areas of direct and alternating current. A double system of electric rolling stock is used to pass jointing places of different current kinds without train's stop. Therefore introduction of such rolling stock of a new concept that is using an asynchronous traction drive is prospective for Ukrainian railways. Apart from advantages a rolling stock of similar concept has significant disadvantages, it is pulse energy consumption from the power supply, and it can affect the reliability of track automatic devices, and consequently, the train traffic safety. In addition the specific power of traction transformer is considerably inferior to the power density of other traction elements. The promising schemes using an intermediary link of increased frequency, which consist of a transformer and inverter, have been proposed for disadvantages amendments. The main task for the further introduction of prospective circuit is to determine the operating frequency for high frequency link. **Methodology.** The method of thermal parameters calculation of semiconductor devices has been used for determination switching transistors of maximum operating frequency. To obtain analytical expressions curves of energy, released during the IGBT (insulated-gate bipolar transistor) switching from its current load approximation method is used. **Findings.** The permissible frequency of low-frequency link is determined by load current of intermediate transformer. Operating frequency range of a link depending on load current has been determined. A comparative analysis of the switching characteristics of 65 class IGBT production by companies Infineon and ABB has been performed. **Originality.** The further determination method of the maximum operating frequency of intermediate link for circuit with high-frequency transformer has been developed. **Practical value.** The established operating frequency range of the high-level link will develop further research of tractive circuit with high-frequency transformer use for double feed electric rolling stock with asynchronous tractive drive. It will evaluate the introduction effectiveness of similar configuration circuits.

Keywords: asynchronous tractive motor; double feed electric rolling stock; high-frequency transformer; IGBT; autonomous voltage inverter; high frequency link

REFERENCES

1. Visin M.H., Zabarylo D.O. Analiz sylovykh skhem z vykorystanniam vysokochastotnoho transformatora dlia zhyvlenia asynkhronnykh tiahovykh dvyhuniv elektrorukhomoho skladu [Analysis of power circuits using a high-frequency transformer for feed of asynchronous traction motors of electric rolling stock]. *Elektryfikatsiia transportu – Electrification of transport*, 2013, no. 5, pp. 25-32.
2. Visin M.H., Zabarylo D.O. Shestyvisnyi mahistralnyi vantazhnyi elektrovoz podviinoho zhyvlenia iz zasto-suvanniam transformatora z vysokochastotnoiu rozviazkoiu ta asynkhronnymy tiahovymy dvyhunamy [The six-axel mainline freight electric locomotive of double feed using the transformer with high-frequency junction and asynchronous tractive motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zal-iznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 132-136.
3. Zabarylo D.O. Perspektyvy zastosuvannia amorfnykh splaviv dlia tiahovoho rukhomoho skladu [Prospects of amorphous alloys application for traction rolling stock]. *Lokomotiv-inform – Locomotive-inform*, 2014, no. 7 (97), pp. 44-47.
4. Mukha A.M. *Rozvytok naukovykh osnov stvorennia tiahovykh elektropredach bahatosystemnykh elektrovoziv*. Avtoreferat Diss. [The development of scientific bases of tractive electric drive creation for multisystem electric locomotives. Author's abstract]. Dnipropetrovsk, 2011. 36 p.
5. Ostrenko V.S. Opredeleniye maksimalnogo dopustimogo znacheniya chastoty kommutatsii modulya IGBT [Determination of the maximum permissible value of the switching frequency of IGBT module]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka – Electrical Engineering and Power Industry*, 2012, no. 2, pp. 28-33.
6. *Parametry amorfnoho splavu marky 2605HB1M* (Parameters of amorphous alloy of brand 2605HB1M). Available at: <http://www.metglas.com/assets/pdf/msds/msds2605sa1.pdf> (Accessed 02 June 2014).
7. *Kharakterystyky IGBT vyrobnytstva kompanii ABB* (IGBT specifications manufactured by ABB). Available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/\\$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/bfeb34b019a8d50383257ca700384dff/$file/5sna%200750g650300_5sya%201600-03%2001-2014.pdf) (Accessed 02 June 2014).
8. *Kharakterystyky IGBT vyrobnytstva kompanii Infineon* (IGBT specifications manufactured by Infineon). Available at: <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-module/igbt-module-4500v-6500v/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab69f8450396> (Accessed 02 June 2014).
9. Chebovskiy O.G., Moiseyev L.G., Nedoshivin R.P. *Silovyye poluprovodnikovyye pribory* [Power semiconductor devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 400 p.
10. Backlund B., Schenell R., Schlapbach U., Fisher R., Tsyplakov E. Applying IGBT. *ABB. Semiconductors*. Available at: <http://www05.abb.com> (Accessed 02 June 2014).
11. Bakran M.M., Eckel H.-G., Eckert P., Gamach H., Wenkemann U. Comparison of multi-system traction converters for high-power locomotives. 35th Annal IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, 2004, pp. 697-703. doi: 10.1109/PESC.2004.1355833.
12. Kunz M., Hörl F., Klockw Th. Entwicklung einer massearmen Energieversorgung für elektrische Triebfahr-zeuge. *ZED+DET Glass Ann.* 123, 1999, no. 11/12, pp. 423-426.
13. Victor M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator. *Elektrische Bahnen 103*, 2005, no. 11, pp. 505-510.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 14.09.2014