

УДК 629.423.24

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГА

Д. О. Кулагін

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: nemix123@rambler.ru

Розв'язано задачу синтезу математичної моделі тягового перетворювача частоти для дизель-потяга з тяговою електропередачею змінного струму. Отримано, що розроблена математична модель тягового перетворювача частоти для дизель-потяга дозволяє здійснювати математичне моделювання процесів у тяговому перетворювачі частоти, синтезувати систему автоматичного керування тяговою електропередачею на основі виведених співвідношень, математично описувати тяговий перетворювач частоти з різними типами керуючих систем, що працюють в режимі реального часу, спростити об'єм робіт на стадії імітаційного моделювання при побудові загальної моделі тягової передачі автономного локомотива. Для реалізації системи керування перетворювачем частоти у мікропроцесорній системі керування локомотивом виведено ключову перемикаючу функцію автономного інвертора напруги.

**Ключові слова:** тягова електропередача, перетворювач частоти, дизель-потяг, система керування.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА

Д. А. Кулагин

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковського, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: nemix123@rambler.ru

Решена задача синтеза математической модели тягового преобразователя частоты для дизель-поезда с тяговой электропередачей переменного тока. Разработанная математическая модель тягового преобразователя частоты для дизель-поезда позволяет проводить математическое моделирование процессов в тяговом преобразователе частоты, синтезировать систему автоматического управления тяговой электропередачей на основе выведенных соотношений, математически описывать тяговый преобразователь частоты с различными типами управляющих систем, которые работают в режиме реального времени, упростить объем работ на стадии имитационного моделирования при построении общей модели тяговой передачи автономного локомотива. Для реализации системы управления преобразователем частоты в микропроцессорной системе управления локомотивом выведено ключевую переключающую функцию автономного инвертора напряжения.

**Ключевые слова:** тяговая электропередача, преобразователь частоты, дизель-поезд, система управления.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** В умовах модернізації рухомого складу залізниці України для неелектрифікованих ділянок та збільшення швидкостей руху дизель-потягів усе частіше використовується тягова електропередача змінного струму [1]. До того ж дизель-потяги з тяговою передачею змінного струму за тієї ж маси, що й з іншими видами передач, розвивають більшу силу тяги, яка дозволяє використовувати менше число моторизованих осей вагонів за тієї ж маси рухомого складу [2].

Необхідно зазначити характерні особливості тягових електропередач з автономними джерелами живлення (дизель-генераторами), в яких з'являються специфічні, властиві лише даному класу систем вимоги:

- обмеженість потужності джерела живлення;
- зміна температури елементів тягової електропередачі в межах від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (наприклад, початок роботи дизель-поїзда взимку за низької температури та поступове прогрівання під час руху до високих температур);
- необхідність зменшення масогабаритних показників систем для оптимізації енергоспоживання, зменшення габаритів конструкції;
- високі вимоги до якості та динаміки розгону і гальмування (підвищення прискорення до максимально можливого рівня, зменшення гальмівного шляху);

– необхідність встановлення в системі розвинутого інтерфейсу для підключення до різноманітних об'єктів діагностики, контролю, керування (пультів, комп'ютерів);

– високі вимоги до надійності системи (в більшості випадків такі тягові одиниці працюють в місцях, що віддалені від ремонтних пунктів, обслуговуючих дільниць, тому швидкий оперативний ремонт ускладнений) [3].

Широко розповсюдженим є використання в тягових електропередачах асинхронного двигуна (АД) з частотним регулюванням [4, 5], оскільки за своїми конструктивними особливостями частотно-регульовані тягові електропередачі з безколекторними електродвигунами змінного струму і напівпровідниковими перетворювачами частоти (ПЧ) мають значні потенційні можливості для підвищення швидкості руху дизель-потягів, економії трудових і, що особливо важливо, енергетичних ресурсів.

Для проведення досліджень особливостей роботи таких систем необхідна математична модель тягового перетворювача частоти, що буде враховувати особливості побудови електропередач автономних локомотивів.

Мета роботи – синтез математичної моделі тягового перетворювача частоти для дизель-потяга з тяговою електропередачею змінного струму.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**  
Слід зазначити, що як напівкеровані силові ключі для тягового перетворювача частоти використовуються різні типи транзисторів, приклади технічної реалізації яких наведено на рис. 1 [4, 6].

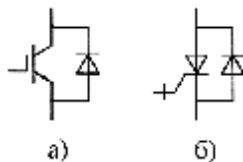


Рисунок 1 – Технічна реалізація транзисторних ключів для АІН: а) IGBT; б) IGCT

На рис. 2 наведена схема перетворювача частоти, яка отримала широке практичне використання в тягових передачах змінного струму [7, 8], що виконана на IGBT силових ключах.

Досвід використання даних типів ПЧ [4, 6, 7] показує, що при побудові схеми автономного інвертора напруги (АІН) на основі IGBT досягається низка переваг порівнян з іншими видами схем:

- здатність до керованого запирання;
- висока робоча частота;
- проста система керування з малим власним споживанням потужності.

АІН підключено до шини постійного струму, що шунтована конденсаторним фільтром  $C$ . Наявність даного фільтра, який призначено для компенсації реактивної потужності навантаження, є характерною особливістю даної схеми [6]. Паралельно з блоком фільтра ввімкнено гальмівний резистор  $R_r$ , який керується гальмівним запираємим тиристором  $V_r$ .

Характерною особливістю сучасних вітчизняних дизель–потягів є наявність в тяговому генераторі двох трифазних обмоток, з'єднаних зіркою зі зміщенням між обмотками на 30 електричних градусів, від яких живляться некеровані трифазні мостові випрямлячі візка, створюючи шину постійного струму зі значеннями напруги від 600 до 1500 В. До даної шини підключено два АІН, що живлять відповідно асинхронні тягові двигуни одного візка. На основі цих конструктивних особливостей вироблено характерні режими та закони керування АІН.

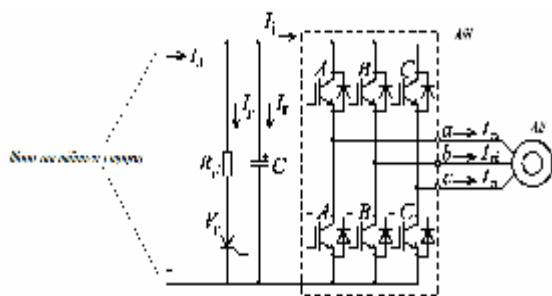


Рисунок 2 – Функціональна схема тягового ПЧ на основі АІН

Схема АІН складається із шести транзисторів, шунтованих діодами для досягнення двосторонньої провідності струму активно-індуктивного навантаження, яким є тяговий АД. Перетворення постійної напруги в трифазну змінну здійснюється комутацією транзисторів, що працюють у певній послідовності. У кожен момент часу відкриті одночасно три транзистори в кожній з фаз АІН, а інші закриті [4, 6, 7]. Включення транзисторів здійснюється подачею керуючого імпульсу на базу транзистора від СКІ. На відміну від тиристорного інвертора, де вихідна напруга має східчасту форму із тривалістю кожного щабля  $1/6$  періоду вихідної напруги [6], характеристики транзисторів дозволяють одержувати на виході інвертора змінну напругу майже синусоїдальної форми, частота якої регулюється зміною частоти подачі імпульсів (коефіцієнта модуляції) на ключі тягового ПЧ [4, 7].

Для всіх можливих комбінацій робочих відкритих і закритих станів силових ключів трифазного АІН при керуванні за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) наведені в табл. 1 конкретні значення відповідних фазних статорних напруг  $U_{sa}$ ,  $U_{sb}$ ,  $U_{sc}$ , а також значення узагальненого вектора статорної напруги АД у показниковій формі (через модуль і аргумент зазначеного вектора) залежно від постійної напруги на вході інвертора  $U_d$  [4, 6, 7]:

$$\bar{U}_{s(m)} = U_{s(m)} e^{j\theta_{s(m)}} \quad (1)$$

При живленні АД від розглянутого трифазного АІН максимальна кількість комбінацій, що розрізняються між собою, значень фазних статорних напруг і відповідних значень, що розрізняються, узагальнених векторів статорних напруг дорівнює семи [4].

Натуральне число  $m=1, 2, \dots, 7$  характеризує умовно прийняте позначення номера варіанта комбінацій значень фазних статорних напруг АД  $U_{sa}$ ,  $U_{sb}$ ,  $U_{sc}$  і відповідних створюваних узагальнених векторів статорної напруги (1) АД. У табл. 1 знаком «+» умовно позначені відкриті стани силових ключів, а знаком «-» – закриті стани силових ключів АІН згідно з їх позначенням на рис. 2.

Узагальненому вигляді значення узагальнених векторів статорної напруги АД можуть бути знайдені з виразу [4]

$$\bar{U}_{s(m)} = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \left[ \frac{m}{7} \right] \right\} U_d e^{j(m-1)\frac{\pi}{3}} \quad (2)$$

При синтезі математичної моделі тягової електродережки силові ключі ПЧ будемо вважати ідеальними, тобто вони не мають часового запізнення при перемиканні, мають власний нульовий опір у відкритому стані та нескінченно великий опір в закритому стані.

Таблиця 1 – Комбінації станів силових ключів і відповідні значення узагальнених векторів вихідної напруги трифазного АІН на основі ШІМ

m	Значення фазних ста- торних напруг			Комбінація силових ключів					
	$U_{sa}$	$U_{sb}$	$U_{sc}$	A <sub>-</sub>	A <sub>+</sub>	B <sub>-</sub>	B <sub>+</sub>	C <sub>-</sub>	C <sub>+</sub>
1	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	+	-	-	+	-	+
2	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	+	-	+	-	-	+
3	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	-	+	+	-	-	+
4	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	-	+	+	-	+	-
5	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{U_d}{3}$	$\frac{2U_d}{3}$	-	+	-	+	+	-
6	$\frac{U_d}{3}$	$-\frac{2U_d}{3}$	$\frac{U_d}{3}$	+	-	-	+	+	-
7	0	0	0	+	-	+	-	+	-

Сучасні швидкодіючі силові ключі на основі IGBT, IGCT, GTO, що використовуються при створенні статичних перетворювачів частоти тягових електропередач, найбільш наближені до ідеальних ключів лише в частині [4, 9]:

– щодо малих значень часів затримки (фронту, зрізу) їхнього перемикавання в порівнянні з фактичними часовими довжинами провідного і непровідного станів зазначених ключів при ШІМ;

– наслідок малості струмів, що протікають через закриті ключі, порівняно з робочими значеннями струмів через них у відкритому стані.

Закон керування ключами силового перетворювача визначає ряд важливих як вхідних, так і вихідних параметрів перетворення електричної енергії, зокрема, якість вихідної напруги АІН тягової електропередачі. При цьому домінує значення має не тільки фактор забезпечення високого коефіцієнта корисної дії, якісного гармонійного складу сформованої вихідної напруги для живлення АД, але й послідовність поводження в цілому АІН як ланки замкнутої системи автоматичного керування тягової електропередачі.

Для реалізації системи керування ПЧ у мікропроцесорній системі керування локомотивом запишемо ключову перемикаючу функцію на основі табл. 1. Ключова перемикаюча функція  $F_i$  дорівнює 1, якщо  $i$ -й ключ проводить струм та  $F_i = 0$ , якщо  $i$ -й ключ не проводить струм.

При аналізі вважаємо джерело живлення та ключі ідеальними, нехтуємо інтервалом «мертвої» пау-

зи. Тоді при роботі на навантаження з активно-індуктивним характером та при ізольованій нейтральній точці АІН симплексний спосіб перемикавання повинен відповідати виразам

$$\begin{cases} U_{AB} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_1 \cdot F_4 \vee F_2 \cdot F_3 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_1 \cdot F_3 = 1 \text{ або } F_2 \cdot F_4 = 1; \end{cases} \\ U_{BC} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_3 \cdot F_6 \vee F_4 \cdot F_5 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_3 \cdot F_5 = 1 \text{ або } F_4 \cdot F_6 = 1; \end{cases} \\ U_{CA} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_5 \cdot F_2 \vee F_6 \cdot F_1 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_1 \cdot F_5 = 1 \text{ або } F_2 \cdot F_6 = 1. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

В процесі роботи, відповідно до табл. 1 неприпустимий стан ключів, коли

$$F_1 \cdot F_2 = F_3 \cdot F_4 = F_5 \cdot F_6 = 1. \quad (4)$$

У виразах (3) знаком « $\vee$ » позначено операцію логічного додавання.

Розширений опис методу керування ключами за законом (3) може забезпечувати паралельне підключення двох фаз працюючого АД послідовно із третьою. Дві інші фази АД змінюють стан по відношенню тільки до шин живлення АІН, тобто

$$\begin{cases} U_{AB} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_1 \cdot F_4 \cdot F_5 \vee F_2 \cdot F_3 \cdot F_6 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_1 \cdot F_5 = 1, F_4 = 0, \\ \text{ або } F_1 \cdot F_5 = 0, F_4 = 1; \end{cases} \\ U_{BC} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_3 \cdot F_5 \cdot F_2 \vee F_4 \cdot F_1 \cdot F_6 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_3 \cdot F_5 = 1, F_2 = 0, \\ \text{ або } F_3 \cdot F_5 = 0, F_2 = 1; \end{cases} \\ U_{CA} = \begin{cases} \pm U_d, \text{ якщо } F_5 \cdot F_2 \cdot F_4 \vee F_6 \cdot F_1 \cdot F_3 = 1; \\ 0, \text{ якщо } F_4 \cdot F_2 = 1, F_5 = 0, \\ \text{ або } F_2 \cdot F_4 = 0, F_5 = 1. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Доповнимо розроблені математичні відношення загальними рівняннями для шин постійного струму:

$$\begin{cases} u_U = \frac{1}{k_{ВП}}(1 + T_m p)e_d; \\ e_d = R_d(1 + T_d p)i_d + u_c; \\ i_d = i_c + i_U; \\ i_c = X_c p i_U; \\ u_U = k_U u_s; \\ i_U = \frac{3}{2} k_U i_{sx}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $k_{ВП}=2,34$  – коефіцієнт передачі вентиляного перетворювача за напругою;  $k_U = \frac{2}{p}$  – модуль комутативної функції АІН;  $T_m$  – постійна часу випрямляча;  $T_d$  – постійна часу блоку фільтрів;  $e_d$  – ЕРС ланки

постійного струму;  $R_d$  – активний опір фільтра ланки постійного струму;  $X_C$  – ємнісний опір фільтра ланки постійного струму;  $u_s$  – модуль статорної напруги АД;  $u_C$  – напруга на конденсаторі фільтра;  $i_C$  – струм через конденсатор фільтра;  $u_U$  – напруга АПН;  $i_U$  – струм АПН;  $p$  – оператор Лапласа.

ВИСНОВКИ. Розроблена математична модель тягового перетворювача частоти для дизель-потяга дозволяє:

- проводити математичне моделювання процесів у тяговому ПЧ;
- синтезувати систему автоматичного керування АПН на основі виведених співвідношень;
- математично записувати тяговий ПЧ до різних типів керуючих систем, що працюють в режимі on-line;
- спростити об'єм робіт на стадії імітаційного моделювання при побудові загальної моделі тягової передачі автономного локомотива.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Використання дизельного рухомого складу в приміському русі / Г.Г. Басов, А.П. Фалендиш // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – 2003. – № 47. – С. 201–206.
2. Локомотив для Европы без границ // Железные дороги мира. – 2008. – № 4. – С. 35–41.

3. Темиров А.П. Теория и практика разработки судовых систем электроснабжения и бортовых блоков управления электродвигателей. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 2004. – 250 с.

4. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск, 2006. – 421 с.

5. Дацковский Л.Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) // Электротехника. – 1996. – № 10. – С. 18–28.

6. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall, 2002. – 712 p.

7. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. – 654 с.

8. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: Энергия, 1967. – 432 с.

9. The 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkötter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999 // Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. – 1999. – Vol. 3. – PP. 1787–1792.

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF A DIESEL-LOCOMOTIVE TRACTION FREQUENCY CONVERTER

**D. Kulagin**

Zaporizhzhya National Technical University

vul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063. E-mail: nemix123@rambler.ru

The problem of synthesis of the mathematical model of the traction inverter for AC traction diesel-locomotive is solved. It is shown, that the developed mathematical model of the traction frequency converter for diesel-locomotives allows to carry out mathematical modelling of the traction frequency converters operating, and synthesize an automatic control system for traction electric transmission on the basis of the equations gained, describe mathematically the traction frequency converter with different control systems, which operates in a real-time mode, and lower the scope of work as for the locomotive traction transmission general model simulation. For the frequency converter implementation, the key switching for autonomous voltage inverter is built into the microprocessor control system.

**Key words:** traction transmission, frequency converter, diesel-locomotive, control system.

#### REFERENCES

1. The use of diesel rolling stock in the suburban movement. G.G. Basov, A.P. Falendish // *Scientific and technical collection "Capacity-sector cities"*. – 2003. – № 47. – PP. 201–206. [in Ukrainian]
2. Locomotive for a Europe without borders // *Railways of the world*. – 2008. – № 4. – PP. 35–41. [in Russian]
3. Temirev A.P. *Theory and practice of development of the ship's power supply systems and airborne bloing control of electric motors*. – Rostov-on-Don: publishing house of the Rostov university, 2004. – 250 p. [in Russian]
4. *Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with impulse modulation* / G.G. Pivnyak, A.A. Volkov. – Dnepropetrovsk, 2006. – 421 p. [in Russian]
5. Datskovskiy L.H. Current status and trends in asynchronous frequency-regulated electric drive (policy brief) // *Electrical Engineering*. – 1996. – № 10. – PP. 18–28. [in Russian]
6. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall, 2002. – 712 p.

7. Schreiner R.T. *Mathematical simulation of the electric drives of an alternating current with for semiconductors frequency converters*. – Ekaterinburg: URO-ran, 2000. – 654 p. [in Russian]

8. Alekseev A.E. *Traction electrical machines and converters*. – L.: Energy, 1967. – 432 p. [in Russian]

9. The 3rd generation of 1200 V IGBT modules / Hierholzer M. Laska, Th. Loddenkötter M. Munzer, M. Pfirsch F. Schaffer, C. Schmidt Th. // Industry Applications Conference, 1999 // *Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*. – 1999. – Vol. 3. – PP. 1787–1792.

Стаття надійшла 25.03.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Морозом М.М.