

УДК. 621.313.33

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.63885>

**ДВОРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР З ПОКРАЩЕНОЮ ФОРМОЮ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ**

**Ю.І. Гусевський, д-р техн. наук, С.М. Лутай, к-т техн. наук, А.Г. Мастепан, Ю.В. Пашинська**

**ДВУХУРОВНЕВЫЙ ИНВЕРТОР С УЛУЧШЕННОЙ ФОРМОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

**Ю.И. Гусевский, д-р техн. наук, С.Н. Лутай, к-т техн. наук, А.Г. Мастепан, Ю.В. Пашинская**

**INVERTER WITH IMPROVED OUTPUT VOLTAGE**

**Y. Gusevskij , doct. of techn. sciences, S. Lutay, A. Mastepan, Y. Pashinska**

*У статті запропоновано інвертор з поліпшеною формою вихідної напруги для сучасних електровозів. Виконано аналіз конструкційних особливостей даного інвертора, запропоновано послідовність перемикання силових ключів для отримання фазної напруги близької до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетичних показників запропонованого інвертора. За базу досліджень узятий електровоз серії ДСЗ.*

**Ключові слова:** автономні інвертори напруги, електровоз, асинхронний електродвигун, широтно-імпульсна модуляція.

*В статье предложено инвертор с улучшенной формой выходного напряжения для современных электропоездов. Выполнен анализ конструктивных особенностей данного инвертора, предложено последовательность переключения силовых ключей для получения фазного напряжения близкого к синусоидальной форме. Выполнен анализ энергетических показателей предложенного инвертора. За базу исследований взят электропоезд серии ДС3.*

**Ключевые слова:** автономные инверторы напряжения, электропоезд, асинхронный электродвигатель, широтно-импульсная модуляция.

*The article analyzes the work of two-level inverters used in modern rolling stock and proposed inverter with an improved form of the output voltage. The analysis of the structural features of this inverter is proposed switching sequence power switches for phase voltage close to sinusoidal. The shortcomings of the existing scheme inverter. Analyzed the losses in the inverter and power switches. The analysis of the energy performance of the proposed inverter. For the base of studies taken locomotive series DS3.*

*In a series of electric DS3 uses PWM mode start-up and acceleration, and then used once modulation. Therefore, it is important to improve the harmonic components of the output voltage, which will significantly increase the efficiency of the frequency converter and induction motor when working on long speed mode to max.*

*To determine the energy performance has been calculated phase currents of three-phase system of "autonomous voltage inverter - motor." Calculation is carried out by two components, based on the method of fundamental and harmonics method of equivalent static load. Calculation of phase currents made to the parameters of induction motor AD-914.*

**Keywords:** stand-alone inverters voltage, electric, induction motor, pulse width modulation.

### Вступ.

Автономні інвертори напруги (АІН) останнім часом найбільш широко застосовуються в електроприводі змінного струму з частотним керуванням у якості перетворювачів постійної напруги у змінну. Такі привода все частіше застосовуються у тяговому електроприводі, все більше витісняючи приводи постійного струму. Діапазон потужностей частотних приводів з АІН дуже широкий: від декількох ватт до десятків мегават. Типи перетворювачів частоти і принципи їх дії у частотному електроприводі достатньо докладно описані в [1, 2].

### Аналіз останніх досліджень.

У якості двигуна у такому електроприводі використовується асинхронний трифазний електродвигун з коротко замкнутим ротором (АД). Для забезпечення можливості регулювання вихідних параметрів двигуна необхідно, щоб інвертор міг регулювати трифазну напругу одночасно по амплітуді і частоті. Типова схема автономного інвертора напруги з підключенням до нього двигуном зображена на рис.1.

Тут автономний інвертор живиться від автономного джерела постійної напруги. Ємність С1 згладжує пульсації з виходу випрямляча. Ключ, як правило, складається з біполярного ключа VT з польовим керуванням (IGBT-ключ) і діоду VD, який включений протилежно живлячій напрузі. Діод VD призначений для повернення енергії в мережу у випадку, коли струм через ключ має напрям, протилежний напрямку напруги на ньому. У цьому випадку струм пропускає діод VD. Подібна ситуація спостерігається при реактивно-активному навантаженні. Схема з'єднання діодів VD1-VD6 представляє собою трифазний мостовий шестипульсний діодний випрямляч, який дозволяє здійснити повернення енергії від двигуна в мережу.

У типовій схемі автономного інвертора напруги міститься 6 ключів. Транзисторні ключі, перемикаючись у певній послідовності, формують на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. У такому інверторі фази двигуна можуть бути підключені до потенціалів постійної напруги різними способами. Результируючий вектор напруги на виході АІН має, відповідно, 8 положень, з яких 2 положення є

виродженими, оскільки вони призводять до нульового значення результуючого вектору [3].

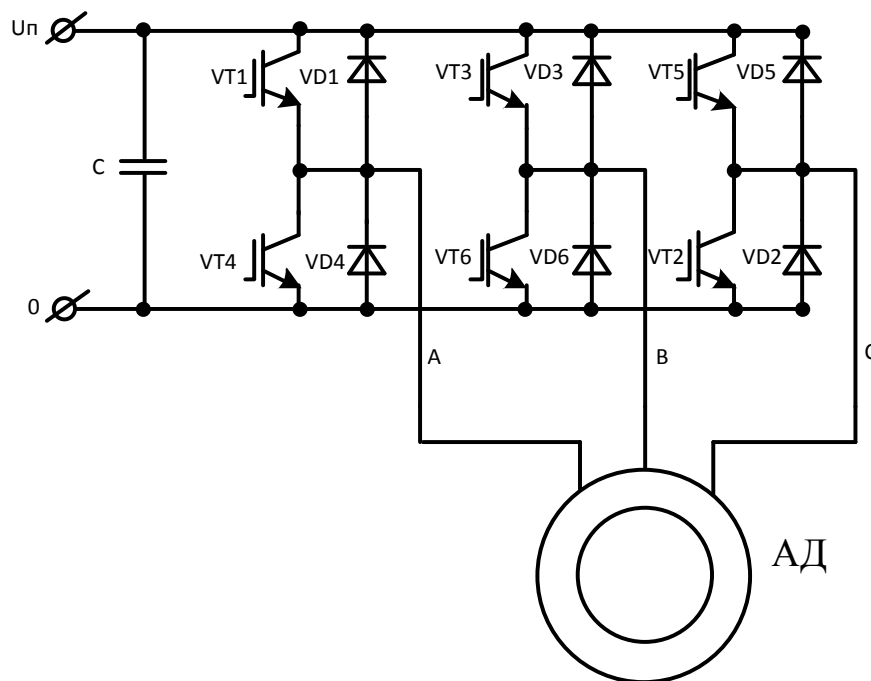


Рис.1. Типова схема дворівневого автономного інвертора напруги

Регулювання частоти трифазної напруги на виході АІН здійснюється шляхом зміни частоти перемикачів транзисторних ключів. Зміна амплітуди трифазної напруги проводиться за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [2].

Істотним недоліком такої схеми (рис. 1) є те, що форма отриманої фазної напруги значно відрізняється від синусоїди. У результаті енергетичні характеристики асинхронного двигуна погіршуються, якщо їх порівнювати з енергетичними характеристиками двигуна, який живиться від трифазної синусоїдальної напруги.

Для покращення енергетичний характеристик приводу використовуються різноманітні способи ШІМ: синусоїдальна, лінійна [1] і ін., і їх різноманітні модифікації [4–8]. Широтно-імпульсна модуляція переслідує ціль послабити значні по амплітуді вищі гармоніки, найбільш близькі до основної. Це досягається тим, що впродовж періоду повторюваності  $T_{ПВТ} = T/6$  відбувається періодична зміна основної діаграми роботи ключів інвертора при одночасному введенні нульових ділянок.

Основним недоліком ШІМ є значно більш високий рівень втрат потужності, як у самих ключах, так і у формувачах області їх безпечної роботи, до яких відносяться RC-ланцюги, які шунтують кожен ключ, і реактор  $L_c$  з шунтуючим його діодом VD0 і резистором R0 (на рисунку не показані). У всіх цих елементах втрати прямо пропорційні частоті перемикачів силових ключів [4].

#### Формулювання цілей статті.

На основі вищесказаного, зниження частоти ШІМ є бажаним, однак воно призводить до росту амплітуд ближніх до основної вищих гармонік на виході інвертора, що тягне за собою збільшення втрат у двигуні. З іншої сторони, ШІМ значно послаблює лише ближні до основної гармоніки. Для послаблення гармонік більш високої частоти необхідно збільшувати частоту комутації ключів інвертора, що, звичайно, призводить до збільшення втрат у перетворювачі частоти.

На електровозі серії ДСЗ ШІМ використовується в режимі пуску та розгону, а далі використовується однократна модуляція. Тому важливо покращити

гармонічну складову вихідної напруги АІН, що дозволить значно підвищити ККД перетворювача частоти та асинхронного двигуна в режимах роботи від швидкості тривалого режиму до максимальної швидкості.

Запропоновано дещо інший підхід до перетворення постійної напруги у змінну. Зі схеми на рис. 1 наочно видно, що у формуванні трифазної змінної напруги бере участь один потенціал постійної напруги, відмінний від нульового потенціалу. Для формування змінної напруги можна використовувати більше одного потенціалу постійної напруги. При такому підході нижче не застосовується широтно-імпульсна модуляція, хоча використання ШІМ і у даному випадку можливе.

На рис.2 приведена схема автономного інвертора напруги, у якому використовується два ненульових потенціала постійної напруги. Схема містить 12 транзисторних ключів VT і 6 діодів VD. Як видно, схема потребує у 2 рази більше транзисторних ключів, ніж типова схема АІН. Автономний інвертор живиться від постійної напруги з виходу некерованого діодного випрямляча (на рисунку не показаний), або від автономного джерела постійної напруги. Ємності C1 і C2 згладжують пульсації з виходу випрямляча.

Схема з'єднання діодів VD1-VD6 представляє собою трифазний мостовий шестинапівперіодний діодний випрямляч, який дозволяє здійснити повернення енергії від двигуна в мережу. У момент часу, коли струм і напруга у фазі протилежні за напрямом, струм фази пропускає один з діодів фази, в іншому випадку струм фази проводить один з ключів фази.

Таким чином, запропонована схема визначається, як трифазна дворівнева схема АІН.

Нижче пропонується наступна послідовність перемикачів транзисторних ключів для отримання фазної напруги, близької до синусоїдальної форми (цифри означають номери ввімкнутих ключів): 561; 617; 612; 128; 123; 239; 234; 347; 345; 458; 456; 569; 561 і т.д. Як видно, період формованої фазної напруги ділиться на 12 періодів повторюваності, що у два рази перевищує число періодів повторюваності для дворівневого АІН з постійною структурою силової ланки інвертора.

Зміна частоти вихідної напруги здійснюється шляхом зміни частоти перемикачів транзисторних ключів (шляхом зміни тривалості періоду повторювання). Регулювання амплітуди вихідної напруги реалізується за рахунок використання одного з законів ШІМ [2].

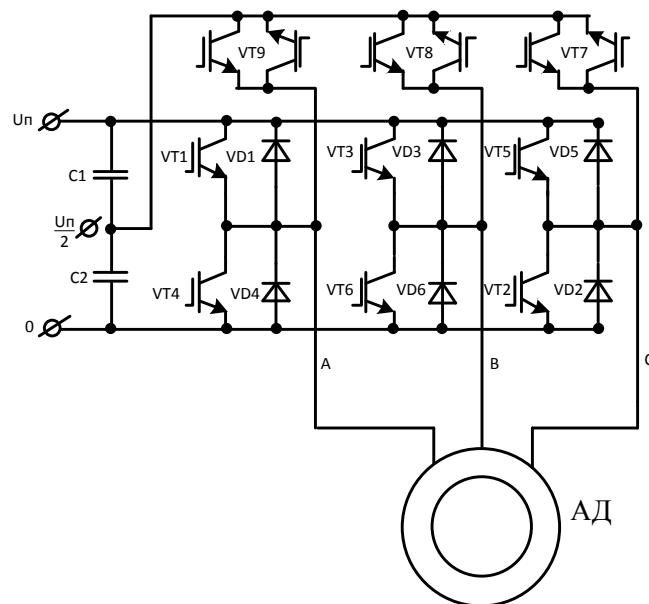


Рис. 2. Дворівневий автономний інвертор напруги з покращеною формою вихідної напруги

Дворівневий АІН із запропонованим законом керування не додає у вихідний сигнал додаткових вищих гармонік. Він істотно зменшує амплітуди близьких до основної високочастотних гармонік. Крім цього, запропонований інвертор значно зменшує амплітуди ряду вищих гармонік протягом усього спектру гармонік. Так, амплітуди гармонік з номерами 5, 7, 17, 19, 29, 31, 41, 43, 53, 55, 65, 67, 77, 79, 89, 91 і т.д. зменшуються приблизно у 3,732 рази. Амплітуди гармонік з номерами 11, 13, 23,

25, 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 83, 85, 95, 97 і т.д. залишаються незмінними.

Для визначення енергетичних показників було розраховано фазні струми трифазної системи «Автономний інвертор напруги – трифазний двигун». Розрахунок ведемо методом двох складових, який базується на методі основних гармонік і методі еквівалентів статичного навантаження [9]. Розрахунок фазних струмів зроблений за параметрами асинхронного двигуна АД-914.

Система диференціальних рівнянь

для розрахунку напруг по окремим інтервалам:

$$U_j(\theta) = i_j(\theta) \cdot R_k + L_k \cdot \frac{di_j(\theta)}{dt} \quad (1)$$

Рекурентне рівняння для розрахунку струмів:

$$i_j(\theta) = \frac{n_j \cdot U_d}{R_k} \cdot (1 - e^{-(\theta - \theta_j)/\omega\tau}) + i_{n_j} \cdot e^{-(\theta - \theta_j)/\omega\tau}; \quad (2)$$

Для розв'язку системи необхідно знати початкові умови  $i_{n_j}$  на границях інтервалів. Їх можна визначити, виходячи із умови неперервності струмів на границях інтервалів  $i_{n_j} = i_{k(j-1)}$ , що кінцеве значення струму кожного попереднього інтервалу є

початковим значенням струму наступного інтервалу

Оскільки система подається у вигляді одного рівняння, необхідно ввести тривалість інтервалу  $\theta$  та кутову комутуючу функцію  $\theta_j$ . Значення тривалості інтервалу та кутової комутуючої функції на інтервалі від 0 до  $2 \cdot \pi$  наводимо в таблиці 1.

Таблиця 1 Значення тривалості інтервалу та кутової та амплітудної комутуючої функції

Параметр			
Ном ер інтервалу	Тривалість інтервалу	Кутова комутуюча функція	Амплітудна комутуюча функція
$n$	$\theta$	$\theta_j$	$n_j$
1	$0 \div \gamma_1$	$0 \div \pi/12$	0
2	$\gamma_1 \div \gamma_2$	$\pi/12 \div 3 \cdot \pi/12$	0,333
3	$\gamma_2 \div \gamma_3$	$3 \cdot \pi/12 \div 5 \cdot \pi/12$	0,5
4	$\gamma_3 \div (\pi - \gamma_3)$	$5 \cdot \pi/12 \div 7 \cdot \pi/12$	0,667
5	$(\pi - \gamma_3) \div (\pi - \gamma_2)$	$7 \cdot \pi/12 \div 9 \cdot \pi/12$	0,5
6	$(\pi - \gamma_2) \div (\pi - \gamma_1)$	$9 \cdot \pi/12 \div 11 \cdot \pi/12$	0,333
7	$(\pi - \gamma_1) \div \pi$	$11 \cdot \pi/12 \div \pi$	0

Загальне діюче значення фазної напруги визначається за формулою:

$$U = U_d \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{2}{9} \cdot (\gamma_2 - \gamma_1) + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_3 - \gamma_2) + \frac{4}{9} \cdot (\pi - 2 \cdot \gamma_3) \right]}; \quad (3)$$

Амплітудне значення першої гармоніки фазної напруги розраховуємо за формулою:

$$U_{1a} = \frac{4 \cdot U_d}{3 \cdot \pi} \cdot \left( \cos(\gamma_1) + \cos\left(\frac{\gamma_2 + \gamma_3}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\gamma_3 - \gamma_2}{2}\right) \right); \quad (4)$$

Діюче значення першої гармоніки фазної напруги знайдемо за формулою:

$$U_1 = \frac{U_{1a}}{\sqrt{2}}; \quad (5)$$

Коефіцієнти викривлення напруги розрахуємо за формулою:

$$K_u = \frac{U_{1a}}{U}; \quad (6)$$

Середнє значення струму на вході інвертора розраховуємо за формулою:

$$I_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \int_{\gamma_2}^{(\pi - \gamma_2)} (i_1(\theta) - i_{k1}(\theta) + I_k(\theta)) d\theta + \int_{\gamma_3}^{(\pi - \gamma_3)} (i_1(\theta) - i_{k1}(\theta) + I_k(\theta)) d\theta \right]. \quad (7)$$

Діюче значення першої гармоніки струму визначається за формулою:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi i_1(\theta)^2 d\theta}. \quad (8)$$

Загальне діюче значення фазного струму загальмованого АД знаходимо за формулою:

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi I_k(\theta)^2 d\theta}. \quad (9)$$

Діюче значення фазного струму першої гармоніки загальмованого АД визначається за формулою:

$$I_{k1} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi i_{k1}(\theta)^2 d\theta}. \quad (10)$$

Струми вищих гармонік розраховується за формулою:

$$I_g = \sqrt{I_k^2 - I_{k1}^2}; \quad (11)$$

Діюче значення струму знайдемо за формулою:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_g^2}; \quad (12)$$

Коефіцієнт викривлення струму визначимо за формулою:

$$K_i = \frac{I_1}{I}; \quad (13)$$

Потужність на вході інвертора визначимо за формулою:

$$P_d = U_d \cdot I_d; \quad (14)$$

Потужність першої гармоніки визначаємо за формулою:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1g} \cdot I_1 \cdot \cos(\arg(z_{екв})); \quad (15)$$

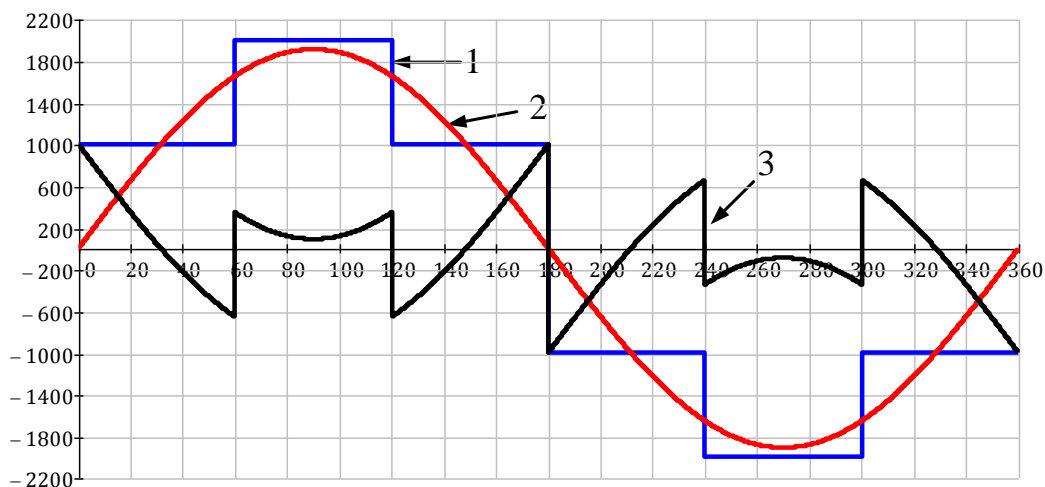
Коефіцієнт потужності розраховуємо за формулою:

$$\chi = \frac{P_d}{3 \cdot U \cdot I}; \quad (16)$$

#### Отримані в результаті дослідження результати.

Після усіх розрахунків було побудовано залежності фазних струмів та напруг, їх перших гармонік та вищих

гармонік від кута  $\theta$  для дворівневого інвертора з покращеною формою вихідної напруги. Також наводимо ті самі залежності, але для класичного дворівневого інвертора.



1 – форма фазної напруги інвертора;

2 – форма першої гармоніки фазної напруги; 3 – форма вищих гармонік напруги

Рис. 3. Залежності напруг дворівневого інвертора

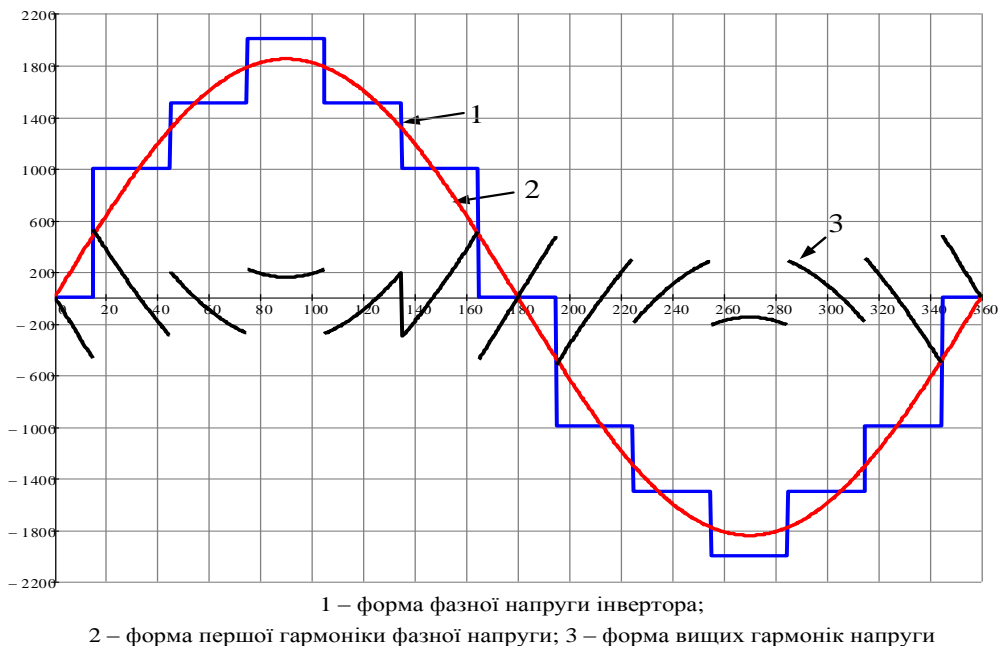


Рис. 4. Залежності напруг дворівневого інвертора з покращеною формою вихідної напруги

Порівняємо енергетичні показники запропонованого інвертора з покращеною класичного дворівневого інвертора та формою вихідної напруги.

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця енергетичних показників інверторів

Тип інвертора	$K_U$	$K_I$	$K_{GU}$	$K_{GI}$	$K_{\phi U}$	$K_{\phi I}$	$\cos \varphi$	$\chi$
Дворівневий	0,955	0,985	0,297	0,296	1,061	1,322	0,82	0,772
Дворівневий з покращеною формою вихідної напруги	0,986	0,996	0,717	0,784	1,08	1,211	0,872	0,844

Як видно з таблиці 2, дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги має значно кращі енергетичні показники.

#### Висновки.

У статті розглянуті принципи формування вихідної напруги у дворівневих інверторах напруги, які використовуються у сучасному рухомому складі найчастіше. Запропоновано інвертор з покращеною

формою вихідної напруги, який має кращі енергетичні показники, що досягаються наближенням форми вихідної напруги до синусоїдальної. Що дозволяє збільшити ККД системи інвертор – асинхронний двигун на 1-2 %, що з урахуванням потужностей сучасних електровозів являється досить важливим показником.

У подальшому рекомендується розглянути та порівняти втрати в ключах



стандартної дворівневої схеми інвертора з покращеною схемою.

### Список літератури

1. Герман-Галкин, С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями [Текст] : учебник / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
2. Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока [Текст] : учебник / И.И. Эпштейн. — М.: Энергоиздат, 1982. — 192 с.
3. Халас, Ш. Оптимизация управления инверторами напряжения в асинхронном электроприводе [Текст] / Ш. Халас // Электричество/ — М., 1993. №1. — С. 43–48.
4. Никитин, В.М. Управление значением выходного напряжения трехфазного инвертора [Текст] / В.М. Никитин // Электротехника/ — М., 1996. №4. — С. 34 – 40.
5. Рывкин, С.Е., Изосимов, Д.Б. Широтно-импульсная модуляция напряжения трехфазных автономных инверторов [Текст] / С.Е. Рывкин, Д.Б. Изосимов // Электричество/ — М., 1997/ №6. — С. 33 – 39.
6. Łukasik, Z. Asynchronous drive control of a traction vehicle using TCMS system [Text]/ Z. Łukasik, W. Nowakowski, A. Kuśmińska-Fijałkowska // INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH IN ENGINEERING & TECHNOLOGY (IJARET). — 2014. — Vol. 4, № 12. — P. 80–85.
7. Łukasik, Z. Train Control And Monitoring System Simulator [Text]/ Z. Łukasik, W. Nowakowski, T. Ciszewski // INDIAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH. — 2015. — Vol. 6, № 2. — P. 221–223.
8. Kaska, J. Nowoczesny układ sterowania asynchronicznego napędu trakcyjnego [Text]/ J. Kaska, Z. Łukasik, W. Nowakowski, J. Wojciechowski // XVIII Międzynarodowa Konferencja „TransComp”. — 2014. № 6. — P. 80–85.
9. Гусевський Ю.І., Сушко Д.Л., Ключка А.С. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему: «Розрахунок тягових та регулювальних характеристик асинхронного електропривода» [Текст] / Ю.І. Гусевський, Д.Л. Сушко, А.С. Ключка. — Х.: УкрДАЗТ, 2008. — 30 с.

---

Гусевський Юрій Ілліч, Доктор технічних наук, професор, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-75

Лутай Сергій Миколайович, Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра електроніки та комп'ютерних технологій систем керування, Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії, Контактний тел.: 0502413255, E-mail: Dep09@ya.ru

Мастепан Антон Геннадійович, Асистент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-76 , E-mail: [antonua86@bk.ru](mailto:antonua86@bk.ru)

Пашинська Юлія Володимирівна, Студент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-76

Yurij Gusevskij, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Contact tel.: (057) 730-10-75

Sergey Lutay, Ph.D., Associate Professor, Department of Electronics and Computer Technology control systems, Educational and Scientific Professional Pedagogical Institute of Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Contact tel.: 0502413255, E-mail: [Dep09@ya.ru](mailto:Dep09@ya.ru)

Anton Mastepan, assistant, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Contact tel.: (057) 730-10-76, E-mail: [antonua86@bk.ru](mailto:antonua86@bk.ru)

Yulia Pashinska, student, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Contact tel.: (057) 730-10-76

*Стаття поступила 22.04.2015*