

Підйомно-транспортні машини

УДК 62-83: 621.314

ДВОЗОННЕ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ У ТРАНСПОРТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З ПОЗИТИВНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ШВИДКОСТІ

В. Скиданов, М. Самойленко*, О. Мантицький

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський пр-т, 31, 03680, Київ, Україна, e-mail: s.nikolay@bigmir.net

АНОТАЦІЯ. Дослідження спрямоване на технологічний внутрішньозаводський електротранспорт – електрокари, електронавантажувачі, електроштабелери, електровізки, тощо. Обґрунтована можливість застосування технічних рішень та створення необхідних алгоритмів керування бортовими перетворювачами у транспортних електроприводах з позитивним зворотним зв'язком по швидкості для підвищення їх функціональної та експлуатаційної ефективності. Розроблено керуючі алгоритми та методологічний супровід задачі загальної побудови систем автоматизованого керування імпульсними перетворювачами у колі якоря та колі збудження для реалізації двозонного регулювання у тяговому електроприводі з позитивним зворотним зв'язком по швидкості.

Ключові слова: технологічний електротранспорт, логічна схема алгоритму, двозонне керування, позитивний зворотний зв'язок по швидкості.

ДВУХЗОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В ТРАНСПОРТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ

В. Скиданов, Н. Самойленко*, А. Мантицький

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
Воздухофлотский пр-т, 31, 03680, Киев, Украина, e-mail: s.nikolay@bigmir.net

АННОТАЦИЯ. Исследование направлено на технологический внутривозводской электротранспорт - электрокары, электропогрузчики, электроштабелеры, электротележки и тому подобное. Обоснована возможность применения технических решений и создание необходимых алгоритмов управления бортовыми преобразователями в транспортных электроприводах с положительной обратной связью по скорости для повышения их функциональной и эксплуатационной эффективности. Разработаны управляющие алгоритмы и методологическое сопровождение задачи общего построения систем управления импульсными преобразователями в кругу якоря и цепи возбуждения для реализации двухзонного регулирования в тяговом электроприводе с положительной обратной связью по скорости.

Ключевые слова: технологический электротранспорт, логическая схема алгоритма, двухзонное управления, положительная обратная связь по скорости.

DUAL-ZONE CONTROL FOR CONVERTERS IN TRANSPORT'S ELECTRIC DRIVES WITH POSITIVE FEEDBACK ON SPEED

V. Skidanov, M. Samojlenko*, O. Mantickij

Kyiv National University of Construction and Architecture,
03680, 31, Povitroflotsky avenue, Kyiv, Ukraine, e-mail: s.nikolay@bigmir.net

ABSTRACT. Research is oriented to technological intrafactory electric transport - electric cars, electric lift trucks, electropilers, electric carts, etc. Here grounded the possibility of the use of technical solutions and creating the necessary on-board converter control algorithms for vehicles drives with positive feedback of speed to improve their functional and operational efficiency. Developed control algorithms and



methodological support for the task of general creating control systems for pulse converters in the power circuit and the motor's exciting circuit for the implementation dual-zone regulation of the traction electric drive with positive feedback on speed.

Keywords: *technological electric transport, logical scheme of algorithm, dual-zone control, the positive feedback on speed.*

Постановка проблеми та мета дослідження. Технологічний акумуляторний електротранспорт у багатьох випадках є неодмінною складовою у технологічних циклах та процесах, особливо за умов необхідності виконання транспортних операцій у закритих приміщеннях (цехи, склади, тощо), де застосування рухомого складу з двигунами внутрішнього згоряння небажане або взагалі неприпустиме. Тобто, автономний технологічний електротранспорт є практично безальтернативним для цілої низки виробництв і процесів. Стаття спрямована на подальше удосконалення алгоритмічного забезпечення керування регуляторами у силових контурах технологічного електротранспорту (електрокари, електронавантажувачі, електроштабелери, електровізки, тощо), задіяного у різних галузях промисловості, що в цілому сприятиме підвищенню функціональності, ефективності та надійності його експлуатації і тому є достатньо актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як витікає з попередніх досліджень [1, 2], двозонне управління у транспортних системах енергоживлення з двигунами незалежного збудження є найбільш універсальним підходом до регулювання тягового двигуна, тому що забезпечує відпрацювання максимального діапазону швидкості обертання та моменту на його валу при можливості формування досить складних тягових та регулювальних характеристик. З цієї точки зору двигуни постійного струму з незалежним збудженням мають очевидну перевагу перед двигунами з послідовним збудженням незважаючи на те, що останнім притаманні класичні тягові характеристики, обумовлені їх фізичними властивостями. Однак технічна реалізація, наприклад, розширення швидкісного діапазону, здійснення рекуперативного гальмування, тощо, у разі використання двигунів послідовного збудження вельми ускладнена.

Реалізація двозонного управління потребує одночасного керування двома перетворювачами - силовим імпульсним перетворювачем у колі якоря та перетворювачем значно меншої потужності у колі збудження тягового двигуна. Нагадаємо, що реалізація керування у першій зоні відбувається при максимальному струмі збудження за умови регулювання напруги на якорі від нуля до повної напруги джерела живлення. При цьому оберти двигуна збільшуються від нульового до номінального значення, яке складає приблизно третину від максимальних обертів. Зазначимо, що момент на валу якоря у першій зоні максимальний завдяки максимальному потоку збудження. Регулювання у другій зоні відбувається при повній нарузі на якорі тягового двигуна за умови керованої зміни струму збудження від максимального до мінімального значення. При цьому оберти двигуна зростають від номінальних до максимальних (дві третини діапазону регулювання), а тяговий момент на валу буде зменшуватись. Тобто, виконується взаємозалежне багаторівневе керування, яке обумовлює необхідність організації окремих алгоритмічно-програмних засобів у загальній структурі системи управління для генерації керуючих сигналів для кожного перетворювача. Схожа задача у загальному вигляді докладно досліджена у роботах [3, 4]), де одержані відповідні розрахункові залежності, приведені до вигляду придатного для безпосереднього обчислення засобами бортової мікропроцесорної техніки.

Мета роботи. Метою дослідження є створення алгоритмічної бази для вирішення задачі двозонного керування силовими регуляторами (у колі збудження та у колі якоря тягового двигуна з незалежним збудженням) акумуляторного технологічного електротранспорту з використанням позитивного зворотного зв'язку по швидкості.

Виклад основного матеріалу дослідження. У перебігу виконання двозонного управління перетворювачами у тягових приводах транспортного призначення виникають

додаткові труднощі, обумовлені необхідністю стикування міжзонних переходів як у прямому, так і у зворотному напрямках. Найбільш складно вирішується алгоритмічна задача у випадку закінчення режиму вільного вибігу (накату), який виконувався, починаючи з будь-якої зони регулювання (обидва перетворювача були вимкнені), при поверненні у тяговий або гальмівний режим. Тут мають бути точно визначені необхідні параметри управління обома перетворювачами, які б забезпечили їх початкове безструмове вмикання, тобто необхідно визначити, якій зоні управління відповідає режим руху транспортного засобу на момент прийняття рішення. Така задача є досить складною та громіздкою навіть для мікропроцесорних засобів управління, не кажучи вже про традиційні апаратні керуючі структури, бо передбачає виконання послідовності відповідних обчислювальних та ітераційних процедур, спрямованих на вірогідне визначення таких коефіцієнтів заповнення імпульсного циклу перетворювачів кінця якоря та збудження, що при початковому вмиканні не спричиняють стрибків струму та не вплинуть на поточну динаміку руху.

Однак, для цілої низки випадків практичної реалізації двозонного управління у тягових приводах з двигунами незалежного збудження ця задача може бути суттєво спрощена, причому без погіршення функціональних можливостей транспортних засобів та якісних показників управління в цілому.

Суть спрощення полягає в запропонованому цій статті нетрадиційному підході до управління перетворювачем збудження у другій зоні, що дозволяє не удаватися до будь-яких обчислювальних процедур по визначенню керуючих дій для регулювання швидкості обертання або струму якоря тягового двигуна.

Однак спочатку коротко прокоментуємо методологію читання алгоритмів, які сформовані у вигляді логічної схеми алгоритму (ЛСА), що є дієвим математичним апаратом не тільки у представленні керуючих алгоритмів, а й у їх структурній мінімізації [5,6].

Декілька загальних положень. Логічною схемою алгоритму називають вираз, що складається з операторів, які слідують один за одним, та логічних умов, а також стрілок, наприклад:

$$\begin{array}{ccccccc} 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & & \\ \downarrow & A p_1 & \uparrow & B \downarrow & p_2 & \uparrow & C \omega \uparrow, \end{array}$$

де A, B, C – оператори, які задають керуючій структурі виконання команди (обчислити вираз або сформулювати деяку послідовність керуючих сигналів тощо); p_1, p_2 – логічні умови, що приймають значення 1 або 0 (“так” або “ні”), від яких залежить послідовність виконання операторів; ω – тотожно-хибна логічна умова, яка завжди має нульове значення і не потребує додаткової перевірки як традиційна логічна умова. Таким чином будується аналітичний образ блок-схеми алгоритму, де присутні виконавчі блоки та блоки прийняття рішень.

Далі – якщо логічна умова, яка перевіряється після оператора, виконана ($p_i = 1$), то далі виконується оператор, що стоїть за цією умовою; якщо ж логічна умова не виконана ($p_i = 0$), то виконується оператор, до якого веде стрілка, що стоїть після цієї умови.

Так у наведеній вище ЛСА при $p_1 = p_2 = 0$ весь час буде виконуватись оператор A , а при $p_1 = 1, p_2 = 0$ – послідовність $ABAB...AB$. Після оператора C буде безумовний перехід до оператора A .

Слід відзначити, що ЛСА однозначно може бути представлена також і у вигляді матриці – так звана матрична схема алгоритму (МСА), де оператори (від початкового до кінцевого) утворюють стовпчики та рядки, де елементом матриці α_{ij} є логічна функція логічних умов. При цьому оператор A_j буде виконаний після оператора A_i якщо $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(p_1, \dots, p_m) = 1$. Крім того, логічні функції МСА мають такі властивості: 1)



$\alpha_{ij} * \alpha_{il} = 0$, якщо $j \neq l$ та 2) $\bigvee_{j=1}^k \alpha_{ij} = 1$. Перша з цих умов забезпечує виконання після оператора A_i не більше одного іншого оператора, а друга – хоча б одного якогось оператора (тут “ \vee ” – знак диз’юнкції). При переході від МСА до ЛСА використовуються формули переходу, а мінімізація ЛСА може бути здійснена за рахунок скорочення числа логічних умов [12].

Традиційне управління двигуном незалежного збудження у тяговому режимі з використанням мікропроцесорних систем управління потребує виконання алгоритму, який наведено у формі логічної схеми алгоритму (ЛСА) у такому вигляді:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{cccccccc}
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 4 & 0 & 2 & 0 \\
 \downarrow A0 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow & \omega \uparrow & \downarrow A1 & \downarrow A2 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow & \omega \uparrow * \\
 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 8 & 0 & & \\
 * \downarrow p_3 \uparrow & A3 \omega \uparrow & \downarrow p_4 \uparrow & A4 \downarrow & A5 p_1 \uparrow & p_2 * & & & \\
 5 & 0 & 5 & 6 & 7 & 6 & 8 & 9 & 7 \\
 * \uparrow \omega \uparrow & \downarrow p_5 \uparrow & p_6 \uparrow & \downarrow p_3 \uparrow & A6 p_5 \uparrow & A8 \downarrow * & & & \\
 & 4 & 9 & 8 & & & & & \\
 * A9 \omega \uparrow & \downarrow A7 \omega \uparrow & & & & & & &
 \end{array}
 \end{array} \quad (1)$$

де $A0$ - оператор або підпрограма (п/п) режиму стоянки чи накату; $A1$ - п/п пуску тягового режиму першої зони, де виконується формування мінімального сигналу коефіцієнта заповнення імпульсного циклу (КЗЦ) якоря ($\gamma_{я \min}$) та сигналу КЗЦ збудження ($\gamma_{з \max}$) з контролем наявності та корекції необхідного струму збудження у функції напруги тягової акумуляторної батареї (ТАБ); $A2$ - п/п управління імпульсним перетворювачем у першій зоні управління; $A3$ - п/п оперативного зменшення поточного значення $\gamma_{я}$ (виконується дія $\gamma_{я} - 1$); $A4$ - п/п пуску тягового режиму у другій зоні, де виконується формування сигналу $\gamma_{я} = 1$ (імпульсний перетворювач III переводиться у постійний відкритий стан) та контроль наявності і корекція струму збудження; $A5$ - п/п управління перетворювачем збудження (ПЗ) у другій зоні; $A6$ - п/п виконує оперативне збільшення КЗЦ для перетворювача у колі збудження (дія $\gamma_{з} + 1$). Оператор $A6$ є додатковою дією по відношенню до аналогічних дій у п/п $A5$, що забезпечують відпрацювання поточного обмеження струму програмними засобами; $A7$ - п/п нормалізації чисельного значення (перевірка відповідності реальному діапазону змінювання) та виводу одержаного у п/п $A6$ КЗЦ перетворювача збудження; $A8$ - п/п корекції чисельного значення $\gamma_{з}$ у функції напруги ТАБ та виводу $\gamma_{з}$, що відповідає для даного значення напруги батареї максимальному струму збудження тягового двигуна; $A9$ - п/п формування та виводу $\gamma_{я}$, що забезпечує перетворювачу тривалий відкритий стан. Остання п/п виконується безпосередньо перед поверненням до управління у першій зоні, тобто є реакцією на закінчення управління у другій зоні, коли КЗЦ у колі збудження досягає максимального значення.

Логіка переходів між операторами в межах ЛСА ґрунтується на аналізі значень умов p_i . Коли $p_i = 1$ (позитивна відповідь у результаті аналізу умов типу “ $I_{я} > I_{я \text{ граничне}} ?$ ”, або “код акселератора > 0 ?”), то виконується наступний за p_i оператор або аналіз наступної логічної умови. Інакше виконується перехід до іншого оператора або умови за вихідною стрілкою до вхідної з тим же номером. Замикання деяких циклових процедур та виконання безумовних переходів забезпечує тотожно-хибна логічна умова ω , яка завжди має негативне значення і аналізу не підлягає.

Логічні умови, значення яких аналізуються при виконанні алгоритму (1), наведено у таблиці 1, де для аналізу умови p_4 використовується різниця значення повної шкали задавача

тяги - акселератора - $(2^m - 1)$ та значення $\gamma_{я}^1$, яке забезпечує відкритий стан ПІ у колі якоря (кінець регулювання у першій зоні). Аналіз умови p_6 передбачає додаткове зменшення величини коду, який аналізується, на величину Δ (певна кількість дискретних кроків), що забезпечує стійкість виконання алгоритму при виникненні коливаний педалі акселератора.

Алгоритм (1) реалізується керуючою структурою, яка виконує формування ШІМ-сигналів управління ПІ та ПЗ здебільшого за допомогою зовнішніх таймерів-формуваців. Для цього обробляється вхідна інформація, що складається з сигналів режимних задавачів (акселератор та гальмо), датчиків струму якоря у тяговому та рекуперативному режимах, датчиків напруги батареї та струму збудження, а також датчика швидкості обертання якоря двигуна, який у більшості випадків реалізується за допомогою тахогенератора та відповідної схеми нормалізації сигналу останнього відносно величини $n_{я}$, пропорційної поточному значенню обертів.

Розглянемо спрощене мікропроцесорне керування двигуном незалежного збудження у другій зоні з використанням позитивного зворотного зв'язку по швидкості (ПЗЗШ). Використовуючи структуру системи, що описана вище і не вдаючись до примусового регулювання швидкості, а застосовуючи у другій зоні принцип управління з ПЗЗШ, можна позбавитись низки програмних обчислювальних процедур, лишаючи незмінною структуру системи керування з двома таймерами-формувацями ШІМ-сигналів. При цьому буде забезпечено повномасштабне регулювання обертів тягового двигуна. Алгоритм, що відповідає поставленій задачі, слід записати у такому вигляді:

Табл. 1. Логічні умови та послідовність виконання підпрограм

Умова	Зміст умови	Позначення	$p_i = 1$, якщо
p_1	сигнал акселератора	γ_A	$\gamma_A > 0$
p_2	сигнал гальма	γ_G	$\gamma_G > 0$
p_3	струм якоря	$I_{я}$	$I_{я} > \text{граничне}$
p_4	КЗІЦ кола якоря	$\gamma_{я}$	$\gamma_{я} > (2^m - 1) - \gamma_{я}^1$
p_5	КЗІЦ кола збудження	γ_3	$\gamma_3 = \text{max}$
p_6	КЗІЦ кола якоря	$\gamma_{я}$	$\gamma_{я} > (2^m - 1) - \gamma_{я}^1 - \Delta$
p_7, p_8	резервні умови		
p_9	КЗІЦ кола якоря	$\gamma_{я}$	$\gamma_{я} > 0,9\gamma_{я}^1$
p_{10}	швидкість обертання якоря	$n_{я}$	$n_{я} > n_{я \text{порогове}}$
p_{11}	КЗІЦ кола якоря	$\gamma_{я}$	$\gamma_{я} > \gamma_{я}^1$
p_{12}	швидкість обертання якоря	$n_{я}$	$(n_{я})_t > (n_{я})_{t-1}$
p_{13}	швидкість обертання якоря	$n_{я}$	$n_{я} > n_{я \text{max}}$
p_{14}	КЗІЦ кола збудження	γ_3	$\gamma_3 > \gamma_3 \text{max}$

$$\begin{array}{cccccc}
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 4 & 0 \\
 \downarrow A0 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow & \omega \uparrow & \downarrow A1 & \downarrow A2 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow * \\
 2 & 0 & 2 & 3 & 1 & 1 & 4 & 3 & 4 & 4 & 10 \\
 * \uparrow \omega \uparrow & \downarrow p_3 \uparrow & \downarrow A3 & \omega \uparrow & \downarrow p_9 \uparrow & \uparrow p_{10} \uparrow & \downarrow * \\
 & 5 & 9 & 7 & 6 & 8 & 7 & 4 & & & \\
 * p_{11} \uparrow & \downarrow A10 & \downarrow p_3 \uparrow & \downarrow A12 & p_{14} \uparrow & \omega \uparrow * \\
 6 & 8 & 9 & 7 & 5 & 10 & 11 \\
 * \downarrow p_{12} \uparrow & p_{13} \uparrow & \uparrow A13 & \omega \uparrow & \downarrow A11 & p_3 \uparrow & \omega \uparrow
 \end{array} \quad (2)$$

де $A10$ - оператор зменшення поточного значення КЗІЦ у колі збудження на один крок дискретності, тобто ініціюється збільшення швидкості шляхом послаблення магнітного потоку в обмотці збудження тягового двигуна; $A11$ - оператор "дорегулювання" у першій



зоні (виконується дія $\gamma_{я} + 1$) повинен бути відпрацьований, оскільки за умови $p_{10} = 1$ (швидкість не менша за порогове значення, починаючи з якого дозволяється управління з ПЗЗШ) поточне значення $\gamma_{я}$ може ще не досягти рівня $\gamma_{я}^1$, тобто П продовжуватиме працювати у імпульсному режимі; А12 - оператор, що реагує на появу струмообмеження або на зменшення швидкості у разі перевантаження двигуна (виконується дія $\gamma_3 + \Delta\gamma$); А13 - п/п підтримання та контролю значення $\gamma_3 + \gamma_{3\min}$. Логічний зміст умов у алгоритмі (2) наведено у таблиці 1, де для p_{10} - порогове значення швидкості повинно відповідати співвідношенню

$$n_{\text{нор}} = (0,8 - 0,9)n_{\text{ном}} \quad (3)$$

Рівень дискретності при збільшенні значень КЗЦ збудження (оператор А12) та при їх зменшенні (оператор А10) слід визначати за формулою:

$$\Delta n = \Delta n [(2^m - 1) - \gamma_{я}^1] / (n_{\text{max}} - n_{\text{ном}}), \quad (4)$$

де Δn - необхідне значення збільшення (зменшення) швидкості обертання якоря двигуна, віднесене до рівня дискретності змінювання КЗЦ перетворювача у колі збудження; $(2^m - 1)$ максимально можливе значення станів дискретності на шкалі завдання КЗЦ при m -розрядній обробці інформації в МПСУ; $\gamma_{я}^1$ - КЗЦ, якому відповідає повна напруга на якорі двигуна (кінець регулювання у першій зоні); n_{max} та $n_{\text{ном}}$ - відповідно максимальні та номінальні оберти якоря.

Таким чином, управління перетворювачами у колі якоря та колі збудження тягового двигуна з ПЗЗШ у другій зоні здійснюється згідно з алгоритмом (2) з урахуванням умов (3) та (4). При цьому зростання швидкості відбуватиметься, коли: а) швидкість досягне відповідного порогового значення наприкінці першої зони, б) буде відсутній режим струмообмеження та в) швидкість зростатиме у відповідь на кожний дискретний крок зменшення КЗЦ перетворювача збудження. У разі ж самодовільного зниження швидкості, обумовленого додатковим навантаженням (рух вгору, наприклад), або при виникненні режиму струмообмеження, забезпечується компенсація тягової (моментної) характеристики машини шляхом збільшення поточних значень КЗЦ у колі збудження, тобто за рахунок зменшення швидкості руху.

Подальше спрощення управління перетворювачами транспортних систем енергоживлення з двигунами незалежного збудження може бути досягнуто за допомогою згаданої керуючої структури але без використання таймера-формувача ШІМ-сигналів для кола збудження. В даному випадку управління ПЗ кола якоря у першій зоні як і раніше виконує МПСУ. А управління ПЗ буде виконувати спеціалізований модуль регулювання збудження, який можна побудувати, наприклад, використовуючи мікросхему 1114ЕУ4 (аналоги - 1114ЕУ3, TL494СN), яка має вхід управління, два входи зворотного зв'язку та вихід управління, де генерується відповідний ШІМ-сигнал [7]. У такому разі система керування повинна виконати такий алгоритм:

$$\begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 4 & & 0 & 2 \\ \downarrow & A0 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow & \omega \uparrow & \downarrow & A1 & \downarrow & A14 & A2 & p_1 \uparrow & p_2 \uparrow^* \\ & & 0 & 2 & 3 & & 4 & 3 & 4 & 5 & & 4 & & 5 \\ * & \omega \uparrow & \downarrow & p_3 \uparrow & A3 & \omega \uparrow & \downarrow & p_9 \uparrow & \downarrow & p_{10} \uparrow & & A14 & \omega \uparrow \end{array} \quad (5)$$

де А14 - оператор, що формує сигнал дозволу на регулювання (DR=1) перетворювачем збудження з ПЗЗШ у другій зоні.

Таке рішення дозволяє спростити апаратну частину МПСУ та керуючу програму для ПЗ, оскільки необхідне регулювання виконується модулем регулювання збудження. У першій зоні (сигнал $DR=0$) відпрацьовується уставка, яка формується зовнішніми пристроями та через канал аналогового комутатора (за умови, коли на його адресних входах присутні обидва нульові потенціали), що забезпечує подачу на ПЗ максимального значення КЗЦ збудження. В кінці регулювання у межах першої зони за умови досягнення якорем двигуна певних обертів, що відповідають наперед визначеному пороговому значенню, система керування сигнал дозволу регулювання ($DR=1$) з ПЗЗШ. Поява сигналу $DR=1$ блокує управління перетворювачем збудження у функції відпрацювання згаданої уставки і подальше управління здійснюється з ПЗЗШ. Організація необхідних зворотних зв'язків за струмом навантаження та напругою батареї гарантує відпрацювання струмообмеження в колі якоря при управлінні перетворювачем збудження з ПЗЗШ у другій зоні та стабілізацію максимального значення КЗЦ збудження при управлінні імпульсним перетворювачем у першій зоні.

Спосіб управління з ПЗЗШ пройшов успішну апробацію в лабораторних умовах, що дозволило переконатись у функціональній адекватності такого управління у загальній задачі двозонного керування тяговим двигуном незалежного збудження.

Висновки. Таким чином, управління перетворювачами у транспортних системах енергоживлення з двигунами незалежного збудження з позитивним зворотним зв'язком по швидкості у другій зоні може бути реалізоване як мікропроцесорними засобами управління, так і спрощеними структурами на базі спеціалізованої мікроелектроніки, а також комбінованими структурами управління.

Відзначимо, що управління з ПЗЗШ може мати статус окремої задачі, а може бути її частинною задачею бо у будь-якому разі є ефективним засобом для здійснення двозонного регулювання двигунів незалежного збудження, оскільки дозволяє виконати повнофункціональне (з відпрацюванням усіх можливих діапазонів швидкостей та моментів двигуна) управління, використовуючи для цього технічні засоби різного рівня складності, які на практиці можуть бути приведені до гранично простого вигляду.

Недоліками найпростіших варіантів побудови систем управління є суттєві складності організації повного комплексу функціональних блокувань та обмежень, а також неможливість вирішення оптимізаційних задач будь-якого рівня.

Література

1. Павлов В.Б. Украинский электромобиль / В.Б. Павлов, В.М. Скиданов // Машинобудування України. - 1995. - №3. - С.17-19.
2. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока / Павлов В.Б., Шидловский А.К., Скиданов В.М., Рычков В.А. - К.: Наук. думка, 1987. - 284 с.
3. Скиданов В.М. Метод непосредственного назначения параметров управления напівпровідниковими перетворювачами у функції струму навантаження у тягових електроприводах постійного струму / В.М. Скиданов // Технічна електродинаміка. - 1997. - №2. - С.22-26.
4. Скиданов В.М. Управление напівпровідниковими перетворювачами транспортних електроприводів у функції заданих напруги та швидкості тягового двигуна постійного струму / В.М. Скиданов // Технічна електродинаміка. - 1997. - №3. - С.18-24.
5. Лазарев В.Г. Синтез управляющих автоматов / В.Г. Лазарев, Е.И. Пийль. - М.: Энергия, 1978. - 408с.
6. Скиданов В.М. Мінімізація алгоритмів управління тяговими електроприводами автономного технологічного електротранспорту / В.М. Скиданов, В.В. Рибак, І.В. Дубовик // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.: Респ.міжвуз.зб. – 2003. - Вип.62. – С.66-72.
7. Казначеев В. А. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение: Справочник / В. А. Казначеев, И. С. Кириухин, А. В. Перебаскин. - Додэка ХХІ, 2001. - 612с.

**REFERENCES**

1. Pavlov, V.B., Skidanov, V.M. (1995). Ukrainskij elektromobil. [Ukrainian electric vehicle]. *Mashinobuduvannya Ukraini [Engineering Ukraine]*, 3, 17-19. – (in Ukrainian)
2. Pavlov, V.B., Shidlovskiy, A.K., Skidanov, V.M., Richkov, V.A. (1987). *Poluprovodnikovie preobrazovateli v avtonomnom elektroprivode postoiannogo toka. [Semiconductor converters in autonomous DC electric drive]*. Kyiv: Naukova Dumka. – (in Ukrainian)
3. Skidanov, V.M. (1997). Metod bezposerednyogo viznachennia parametriv upravlinnia napivprovodnikovimi peretvoryuvachami u funktsii strumu navantazhennia u tiagovikh elektroprivodakh postiinogo strumu. [The method of direct determination of control parameters of semiconductor converters as the function of load current in DC traction electric drives]. *Tekhnichna elektrodinamika [Technical electrodynamics]*, 2, 22-26. – (in Ukrainian)
4. Skidanov, V.M. (1997). Upravlinnia napivprovodnikovimi peretvoryuvachami transportnikh elektroprivodiv u funktsii zadanih napruzi ta shvidkosti tiagonogo dviguna postiinogo strumu. [Control of semiconductor converters of electric vehicles as a function of the given voltage and speed of the traction DC motor]. *Tekhnichna elektrodinamika [Technical electrodynamics]*, 3, 18-24. – (in Ukrainian)
5. Lazarev, V.G., Pijl, E.I. (1978). *Sintez upravlyayushchix avtomatov [Synthesis of automatic control]*. Moscow: Energy Publ. – (in Russian)
6. Skidanov, V.M., Rybak, V.V., Dubovik, I.V. (2004). Minimizaciya algoritmiv upravlinnya tyagovimi elektroprivodami avtonomnogo texnologichnogo elektrotransportu [Minimizing control algorithms for traction electric drives of technological electric vehicles]. *Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativhi mashiny [Mining, constructional, road and melioration machines]*, 62, 66-72. – (in Ukrainian)
7. Kaznacheev, V.A., Kiryuhin, I.S., Perebaskin, A.V. (2001). *Mikroskhemi dlia impulsnikh istochnikov pitaniia i ikh primenenie. Spravochnik. [Microchips for pulsed power supplies and their use.- Handbook]*. Dodeka XXI. – (in Russian)

Надійшло до редакції 25.04.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Яковенко В.Б.