

ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РІЗНИХ РІВНЯХ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

О. О. УШКАРЕНКО

кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій, НУК ім адм. Макарова, м. Миколаїв, УКРАЇНА
e-mail: maestrotees@gmail.com

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуті принципи математичного опису елементів напівпровідникових перетворювачів електроенергії на прикладі системи частотного керування асинхронним двигуном для визначення її компонентного і структурного складу, а також виконання аналізу процесів логіко-динамічного перетворення інформації при взаємодії між собою всіх підсистем мікропроцесорної системи керування. Показано недоліки і обмеження використовуваних формальних методів опису процесів в системах керування. Визначено правила опису функціональних структур, таких як випрямляч, пасивний фільтр, інвертор, асинхронний двигун, мікроконтролер, на різних рівнях декомпозиції системи керування напівпровідниковим перетворювачем електроенергії. Розроблено структурно-функціональну модель мікропроцесорної системи частотного керування асинхронним двигуном, використання якої дозволило визначити відносини і типи зв'язків між підсистемами керування і візуалізації, а також описати функціональні можливості елементів окремих підсистем і алгоритми обробки сигналів. Перевагою запропонованого в роботі підходу є можливість використання різних рівнів декомпозиції для формалізованого опису підсистем і елементів систем керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії, в тому числі систем частотного керування асинхронними двигунами, що дозволяє виділити найбільш важливі аспекти опису на різних стадіях проектування і аналізу системи. Представлені в явному вигляді позначення елементів моделі і елементів перетворення сигналів залишаються прозорими для розробника, і містять інформацію про призначення елементів системи, вимоги до взаємодії з іншими підсистемами обробки сигналів, та їх функціональні можливості. Використання запропонованого в роботі підходу дає можливість формування математичних моделей напівпровідникових перетворювачів електроенергії та їх систем керування з підвищеним інформаційним змістом, дозволяє виконати аналіз системи шляхом багаторівневої декомпозиції для створення уявлення про її основні властивості, оцінити якість її структури та елементів з позиції загального системного підходу.

Ключові слова: логіко-динамічний процес; структурний аналіз; частотне керування; аналітична модель; декомпозиція

FORMALIZED DESCRIPTION OF THE ELEMENTS OF SEMICONDUCTOR ELECTRICITY CONVERTERS AT DIFFERENT DECOMPOSITION LEVELS

O. USHKARENKO

Department of Programmable Electronics, Electrotechnics and Telecommunications, NUOS named by Admiral Makarov, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT. The article describes the principles of mathematical description of the elements of semiconductor electricity converters on the example of an induction motor frequency control system to determine its component and structural composition, as well as analyzing the processes of logical-dynamic information conversion in the interaction of all subsystems of the microprocessor control system. The disadvantages and limitations of the formal methods used to describe processes in control systems are shown. The rules for describing functional structures, such as a rectifier, a passive filter, an inverter, an induction motor, a microcontroller, are defined at various levels of decomposition of the semiconductor electric power converter and its control system. A structural-functional model of a microprocessor control system of induction motor has been developed. The use of proposed functional model allows to define relations and types of connections between control and visualization subsystems, as well as describing the functionality of elements of individual subsystems and signal conversion algorithms. The advantage of the approach proposed in the article is the possibility of using different levels of decomposition for the formalized presentation of subsystems and elements of semiconductor electric power control systems, including frequency control systems for induction motors, which allows to highlight the most important aspects of the description at various stages of system design and analysis. The explicit designations of the elements of the model and the signal conversion elements remain transparent to the developer, and contain information about the purpose of the system elements, the requirements for interaction with other signal transformation subsystems, and their functionality. The use of the proposed approach allows the formation of mathematical models of semiconductor electricity converters and their control systems with enhanced information content, allows to analyze systems by multi-level decomposition to create an idea of its basic properties, to assess the quality of its structure and elements from the perspective of a common systems approach.

Keywords: logical-dynamic process; structural analysis; frequency control; analytical model; decomposition

Вступ

Сучасні напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ) та їх системи керування характеризуються великою кількістю елементів, безліччю зв'язків і значним обсягом інформації, що оброблюється. Фундаментальні зміни в силовій електроніці та електроенергетиці, які пов'язані з структурною перебудовою, необхідністю забезпечення високих показників якості електроенергії в мережі та енергоефективності в статичних та динамічних режимах роботи, збільшенням обсягів інформації та її розподіленою обробкою в реальному часі для забезпечення функціонування систем керування, призводять до значного зростання кількості технологічних задач при керуванні напівпровідниковими перетворювачами електроенергії, їх різноманітності та інтеграції через динамічність ситуацій, які необхідно аналізувати. В даний час розроблені та використовуються кілька варіантів формалізованого запису логіко-динамічних процесів перетворення сигналів в системах керування. До них відноситься опис у вигляді структурних і принципівих схем, диференціальних рівнянь [1-3]. Якщо перший рівень розуміння процесів перетворення енергетичних та інформаційних аргументів напруги в НПЕ реалізується для розробника різних функціональних структур у вигляді структурних і принципівих схем, то другий рівень розуміння призначений для функціональної структури обчислювального ядра мікроконтролера, і реалізується у вигляді обчислювальних математичних моделей з вхідними і перетвореними аргументами.

У багатьох середовищах моделювання НПЕ, системи керування, а також їх елементи, представлені з використанням різних рівнів абстрагування, отриманих в результаті декомпозиції вихідної системи на окремі підсистеми [4-6]. Таким чином, опис системи можна представити у вигляді взаємодіючих функціональних структур, кожна з яких виконує перетворення вхідних аргументів. При цьому функціональні структури (модулі) описуються відповідними математичними моделями [7]. Однак такі моделі практично не піддаються формалізації, і в деякому сенсі являють собою перехід від змістовного опису системи до математичного опису [8, 9]. Одним із завдань в сучасній теорії автоматичного управління є розробка нових методів формалізованого запису різних логіко-динамічних процесів перетворення аналогових і цифрових сигналів в системах керування (СК). Цей формалізований запис процесів перетворення сигналів має бути виконаний у вигляді аналітичних символів, які повинні формувати функціонально закінчену математичну модель. А ця модель, в свою чергу, дозволяла б зробити доступним свій інформаційний зміст і використовувати формальні методи при структурно-алгоритмічній оптимізації мікропроцесорних систем керування НПЕ [10, 11].

Головною вимогою при вивченні об'єкта як системи є можливість розгляду і опису не тільки його енергетичної сторони, а, перш за все, дослідження

його інформаційних аспектів [8, 12]. Характерною особливістю початкового етапу проектування СК НПЕ є обмеженість інформації про властивості майбутньої системи, що змушує, в першу чергу, звертатися до структури системи та інформації, що міститься в ній. Глибина опису, рівень деталізації обумовлюється призначенням системи, і використовується для побудови моделей систем. Тому актуальним є завдання створення і використання такого математичного апарату, який дозволив би об'єднати процеси керування, що мають різну фізичну, організаційну та цільову природу.

Мета роботи

Метою роботи є розробка аналітичних моделей елементів НПЕ для аналізу процесів логіко-динамічного перетворення сигналів, що включає формування правил символічного відображення елементів НПЕ, зокрема системи частотного керування асинхронним двигуном, на різних рівнях декомпозиції, і дозволяє досліджувати структурні властивості системи в цілому та її підсистем, а також використовувати для вироблення рекомендацій по її структурній оптимізації та усунення надмірності шляхом композиції окремих підсистем, які здатні перетворювати зовнішній вплив в інформаційні сигнали та відтворювати всередині себе процеси на інформаційному рівні.

Викладення основного матеріалу

В сучасних системах керування НПЕ використовуються мікропроцесори, в яких програмно реалізований алгоритм керування. Виконується обробка вхідних сигналів, сигналів зворотного зв'язку, а також формування сигналів керування, які зазвичай представляють собою напругу. Для розробника електронної апаратури важливим є глибоке розуміння процесів перетворення сигналів, яке виконує система, для розробки відповідних алгоритмів.

У роботі ставиться завдання розробки методу аналітичного запису як аргументів, так і функціональних структур різних логіко-динамічних процесів перетворення аргументів напруги в системах керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії. Вхідний аргумент x в функціональній структурі піддається перетворенню, або дії (Action), що може бути описано у вигляді виразу:

$$x \rightarrow f(\text{Action}^x) \rightarrow y \quad (1)$$

В даному випадку y являється продуктом деяких дій над вхідним аргументом x , та є кінцевим результатом цих дій.

З урахуванням аналітичної форми запису функціональної структури (1) схемну реалізацію інтегруючого пристрою «Integrator» (пасивного фільтру нижніх частот), блок трифазного випрямляча Rectifier^{U_{ф1-3}}, як складових системи частотного керування АД [2, 4,

б), можна записати у вигляді аналітичного виразу, як показано на рис. 1.

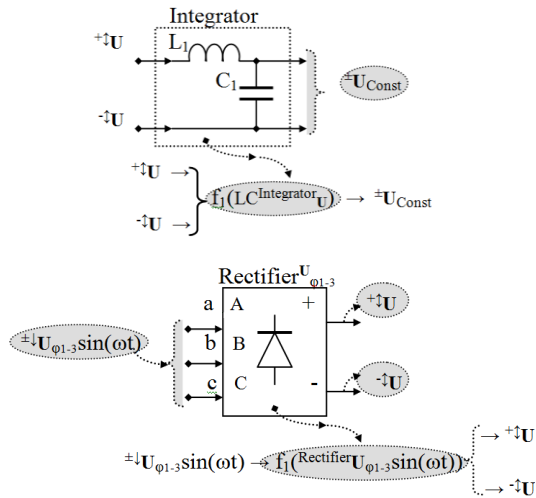


Рис. 1 – Аналітичне представлення фільтру і випрямляча

Для керування асинхронним двигуном (АД), системою керування виконується перетворення вхідного аргументу напруги, який проходить через послідовність функціональних структур. У загальному вигляді таке перетворення може бути представлене наступним чином:

$$Filter^U \rightarrow Inverter^{PWM} \rightarrow Motor^{Induction}$$

Математичну модель логіко-динамічного процесу перетворення енергетичних аргументів напруги $\pm U_{\phi 1-3} \sin(\omega t) \rightarrow \pm U_{Const}$ можна записати у вигляді наступного аналітичного виразу:

$$\pm U_{\phi 1-3} \sin(\omega t) \rightarrow f_1(Trans^{\pm U_{\phi 1-3}}) \rightarrow f_1(LC^{Integrator}_U) \rightarrow \pm U_{Const}$$

де $\pm U_{\phi 1-3} \sin(\omega t)$ – трифазний (φ1-3) енергетичний аргумент напруги $\pm U$ з підвищеним енергетичним рівнем ($\pm \uparrow$); $f_1(Trans^{\pm U_{\phi 1-3}})$ – функціональна структура трансформатора (Trans), що активізує перетворений енергетичний аргумент напруги ($\pm U_{\phi 1-3}$) з пониженим енергетичним рівнем напруги $\pm U_{\phi 1-3} \sin(\omega t)$.

У схемі, що представлена на рис. 2, відбувається перетворення енергії. Потік вхідної енергії надходить від джерела ззовні. Вихідний енергетичний потік спрямований в асинхронний двигун. Процес перетворення електроенергії, природним чином, потребує інформації. Отримання інформації, її обробка і формування керуючих сигналів виконує мікроконтролер.

Особливістю в моделі є аналітичний запис функціональної структури асинхронного двигуна

$f_1(Motor^{Induct}L_3)$ з результирующим аргументом ωMom^{Rotor} обертового моменту ротора та інформаційним аргументом напруги $\pm U_{\omega \phi 1-3}$ швидкості обертання ротора трьох фаз в статорних індуктивностях, який активізований на додаткових індуктивностях статора.

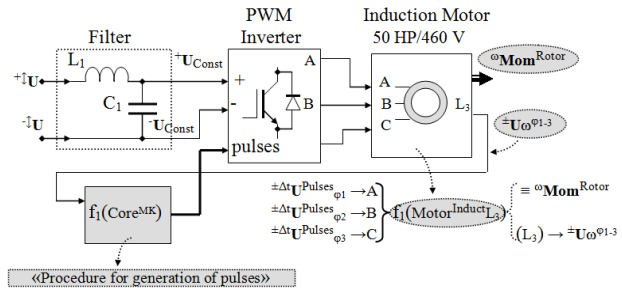
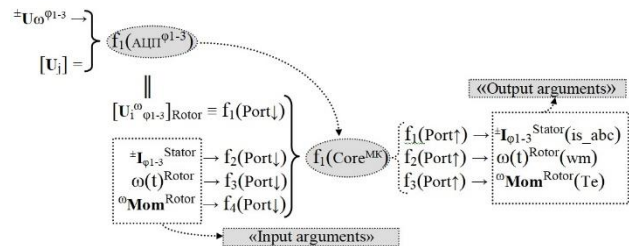


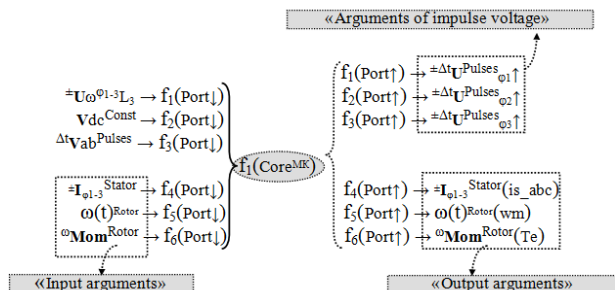
Рис. 2 – Структура моделі системи частотного керування асинхронним двигуном

При цьому слід відмітити, що для функціональної структури АД $f_1(Motor^{Induct}L_3)$ необов'язково формувати інформаційний аргумент напруги $\pm U_{\omega \phi 1-3}$ трьох фаз в статорних індуктивностях, а достатньо мати інформацію про аргумент напруги однієї з фаз.

Якщо розглянути схему на рис. 2, представивши її у вигляді аналітичного виразу:



то можна побачити, що функціональна структура обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(Core^{MK})$ включає процедуру аналого-цифрового перетворення $f_1(ADC^{\phi 1-3})$, тому цей вираз може бути записаний без функціональної структури $f_1(ADC^{\phi 1-3})$ у вигляді:



При переході на рівень принципової схеми формування аргументів напруги, які приводять до появи моменту обертання (Mom^{ω}) в функціональній структурі асинхронного двигуна «Motor^{Induction}», графоаналітичний вираз має вигляд, представлений на рис. 3.

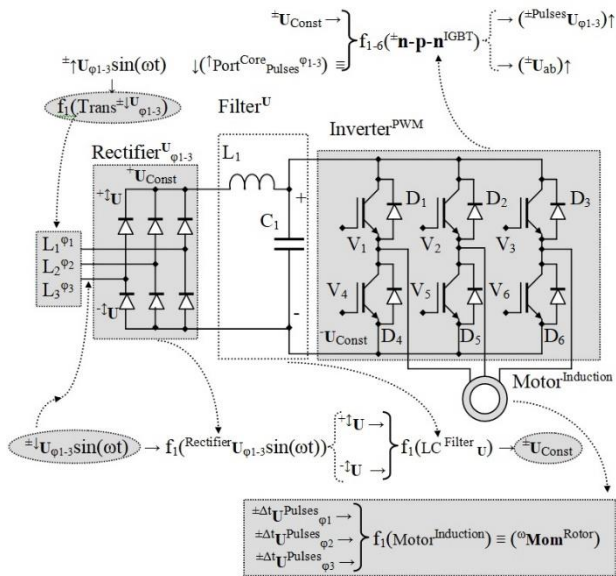


Рис. 3 – Опис напівпровідникового перетворювача електроенергії на компонентному рівні

Схемну реалізацію ШІМ-інвертора «Inverter^{PWM}» можна записати у вигляді аналітичного виразу:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow \pm U_{Const} \rightarrow \\ \downarrow (\uparrow Port^{Core} Pulses^{\phi 1-3}) \equiv \end{array} \right\} f_{1-6}(\pm n-p-n^{IGBT}) \left. \begin{array}{l} \rightarrow (\pm Pulses U_{\phi 1-3}) \uparrow \\ \rightarrow (\pm U_{ab}) \uparrow \end{array} \right\}$$

де $f_{1-6}(\pm n-p-n^{IGBT})$ – функціональна структура ШІМ-інвертора «Inverter^{PWM}» на IGBT транзисторах n-p-n; $\pm U_{Const}$ – вхідний аргумент постійної (Const) напруги; (\rightarrow) – функціональний аналоговий зв'язок; (\equiv) – функціональний логічний зв'язок; $(\uparrow Port^{Core} Pulses^{\phi 1-3})$ – порт обчислювального ядра (Core) мікроконтролера, на виході якого формується послідовність імпульсів ($Pulses^{\phi 1-3}$) керування для трьох фаз ($\phi 1-3$).

Абстрактна модель АД «Motor^{Induction}» записується у вигляді аналітичного виразу:

$$\left. \begin{array}{l} \pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1} \rightarrow \\ \pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 2} \rightarrow \\ \pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 3} \rightarrow \end{array} \right\} f_1(Motor^{Induction}) \equiv (\omega Mom^{Rotor})$$

де $f_1(Motor^{Induction})$ – функціональна структура АД з вхідними керуючими імпульсами ($\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1-3}$) трьох фаз; (ωMom^{Rotor}) – перетворений енергетичний аргумент моменту (Mom) обертання (ω) ротора (Rotor) асинхронного двигуна $f_1(Motor^{Induction})$.

З аналізу отриманих аналітичних виразів впливає, що енергетичний аргумент змінної напруги ($\pm U_{\phi 1-3}$) після проходження функціональної структури випрямляча $f_1(Rectifier U_{\phi 1-3} \sin(\omega t))$ активізує енергетичні аргументи напруги « $\pm U$ » й « $-U$ ». Для того, щоб енергетичні аргументи двох полярностей « $\pm U$ » й « $-U$ » не

мали змінної складової, вони подаються на функціональну структуру фільтра $f_1(LC^{Filter} U)$, на виході якого активізуються енергетичні аргументи ($\pm U_{Const}$) й (U_{Const}) постійного рівня. Вони, з одного боку, подаються разом з імпульсними аргументами $\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1}$ й $\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 2}$, які активізовані в функціональній структурі $f_{1-6}(\pm n-p-n^{IGBT})$ ШІМ-інвертора «Inverter^{PWM}» на IGBT транзисторах, на функціональну структуру осцилографа. З іншого боку, енергетичні аргументи ($\pm U_{Const}$) й (U_{Const}) подаються на функціональну структуру $f_{1-6}(\pm n-p-n^{IGBT})$ ШІМ-інвертора «Inverter^{PWM}», на виході якої за допомогою вхідних керуючих аргументів $\downarrow Core U^{Pulses}_{\phi 1-3}$ активізуються імпульсні енергетичні аргументи напруги $\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1-3} Motor$ для функціональної структури асинхронного двигуна $f_1(Motor^{Induct} L_3)$ та інформаційні аргументи $\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1-2} Core Scope$ для обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(Core^{MK})$ і для функціональної структури осцилографа $f_1(hv Score(\pm U_{Const} \pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1,2} IGBT))$. З аналізу аналітичних виразів також впливає, що імпульсні енергетичні аргументи напруги $\pm \Delta t U^{Pulses}_{\phi 1-3} Motor$ на вході функціональної структури асинхронного двигуна $f_1(Motor^{Induct} L_3)$ активізують енергетичний аргумент «Mom^{Rotor}» обертального моменту ротора асинхронного двигуна.

Отже, на аналітичному рівні представлення процесів перетворення сигналів можуть бути записані будь-які функціональні структури з можливістю розуміння їх змісту.

Обговорення результатів

В результаті використання запропонованого методу були отримані аналітичні вирази, що описують структуру і процеси перетворення сигналів в окремих підсистемах СК АД. Аналіз цих виразів дозволив зробити висновки про можливість структурної оптимізації вихідної моделі шляхом заміни множини окремих блоків одним мікроконтролером, в якому алгоритм керування реалізований програмно. При цьому на основі аналізу аналітичних виразів, що описують елементи моделі, були визначені склад сигналів зворотних зв'язків, необхідних для реалізації функцій керування. З введенням аналітичної форми запису елементів моделі системи керування асинхронним двигуном з'являється можливість записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів у вигляді узагальненого виразу. Аналітична форма запису дозволяє доповнити її логічним змістом. На практиці, з одного боку, це дає можливість відобразити логіко-динамічний процес перетворення аргументів на гранично мінімізованому рівні формалізації. З іншого боку, така форма запису дозволяє проводити порівняльний аналіз різних варіантів структур моделей систем керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії для подальшого вибору найбільш оптимальної з них і формування математичних моделей на аналітичному рівні.

Висновки

Впровадження мікропроцесорної техніки в різні системи керування і розвиток нових технологій створює умови для побудови інтегрованих систем керування НПЕ на єдиній інформаційній основі. З введенням аналітичної форми запису елементів моделі системи керування асинхронним двигуном з'являється можливість записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів у вигляді узагальненого виразу. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що запропонований метод формалізованого запису процедури перетворення інформаційних аргументів в функціональних структурах систем керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії дає можливість підвищити інформаційний зміст математичних моделей їх підсистем, та дозволяє виконати аналіз системи шляхом багаторівневої декомпозиції для створення уявлення про її основні властивості, оцінити якість її структури та елементів з позиції загального системного підходу. З практичної точки зору це спрощує проведення інтеграційного тестування за рахунок формального визначення всіх можливих схем взаємодії апаратно-програмних засобів, що входять до складу системи керування НПЕ.

Список літератури

1. **Su, L.** A novel DC voltage balancing scheme of five-level converters based on reference-decomposition SVPWM / **L. Su, L. Ning, W. Yue** // *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – Orlando, 2012. – P. 1597-1603. – doi:10.1109/APEC.2012.6166033.
2. **Momoh, O. D.** Dynamic Simulation of Cage Rotor Induction Machine – A Simplified and Modular Approach / **O. D. Momoh** // in *Proceedings of the 44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*. – 2012. – P. 200-203. – doi:10.1109/SSST.2012.6195112.
3. **Leedy, Aleck W.** Simulink / MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as a Teaching and Research Tool / **Aleek W. Leedy** // *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*. – 2013. – Vol. 3, Issue 4. – P. 102-107. – doi:10.1109/SECON.2013.6567399.
4. **Abdul Wahab, H. F.** Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine / **H. F. Abdul Wahab, H. Sanusi** // *American Journal of Applied Sciences*. – 2008. – Volume 5. – P. 1083-1090. – doi:10.3844/ajassp.2008.1083.1090.
5. **Chiniforoosh, S.** Definitions and Applications of Dynamic Average Models for Analysis of Power Systems / **J. Jatskevich, Y. Amirnaser, S. Dinavahi, V. Martinez, J. A. Ramirez** // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2010. – Vol. 25, No. 4. – P. 2655-2669. – doi:10.1109/TPWRD.2010.2043859.
6. **Le-Huy, H.** Modeling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset / **H. Le-Huy** // *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*. – Denver, 2001. – Vol. 3. – P. 1603-1611. – doi:10.1109/IECON.2001.975530.
7. **Ozpineci, B.** Simulink implementation of induction machine model - a modular approach / **B. Ozpineci, L. M. Tolbert** // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. – Madison, 2003. – Vol. 2. – P. 728-734. – doi:10.1109/IEMDC.2003.1210317.
8. **Mahmoud M., Al-Suod.** Analysis of logical-dynamic conversion processes in arithmetic devices of digital control systems / **Mahmoud M. Al-Suod, A. Ushkarenko, L. Petrenko** // *Eastern European Journal of enterprise technologies*. – 2017. – Vol. 6, No. 4. – P. 28-34. – doi:10.15587/1729-4061.2017.118167.
9. **Рябенський В. М.** Метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю та керування / **В. М. Рябенський, А. О. Ушкаренко** // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск. – 2011. – Ч. 2. – С. 121-125.
10. **Yu, L.** A Survey on Particle Swarm Optimization Algorithms for Multimodal Function Optimization / **L. Yu, L. Xiaoxi, S. Zhewen, L. Mingwei, F. Jing, Z. Liang** // *Journal of software*. – 2011. – Vol. 6, No. 12. – P. 2449-2455. – doi:10.4304/jsw.6.12.2449-2455.
11. **Yudong, Z.** A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications / **Z. Yudong, W. Shuihua, J. Genlin** // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – P. 1-38. – doi:10.1155/2015/931256.
12. **Zagirnyak, M.** An Algorithm for Induction Motor Monitoring System Based on Electrical Signals Analysis / **M. Zagirnyak, D. Mamchur, A. Kalinov** // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2018. – No. 6. – P. 15-18. – doi:10.15199/48.2018.06.03.

References (transliterated)

1. **Su, L., Ning, L., Yue, W.** A novel DC voltage balancing scheme of five-level converters based on reference-decomposition SVPWM. *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, 2012, 1597-1603, doi:10.1109/APEC.2012.6166033.
2. **Momoh, O. D.** Dynamic Simulation of Cage Rotor Induction Machine – A Simplified and Modular Approach. In *Proceedings of the 44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, 2012, 200-203, doi:10.1109/SSST.2012.6195112.
3. **Leedy, Aleck W.** Simulink / MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as a Teaching and Research Tool *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2013, 3, 4, 102-107, doi:10.1109/SECON.2013.6567399.
4. **Abdul Wahab, H. F., Sanusi, H.** Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine. *American Journal of Applied Sciences*, 2008, 5, 1083-1090, doi:10.3844/ajassp.2008.1083.1090.
5. **Chiniforoosh, S., Jatskevich, J., Amirnaser, Y., Dinavahi, S., Martinez, V., Ramirez, J. A.** Definitions and Applications of Dynamic Average Models for Analysis of Power

- Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25, 4, 2655-2669, doi:10.1109/TPWRD.2010.2043859.
6. **Le-Huy, H.** Modeling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset. *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*, Denver, 2001, 3, 1603-1611, doi:10.1109/IECON.2001.975530.
 7. **Ozpineci, B., Tolbert, L. M.** Simulink implementation of induction machine model - a modular approach. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, 2, 728-734, doi:10.1109/IEMDC.2003.1210317.
 8. **Mahmoud M. Al-Suod, Ushkarenko, A., Petrenko, L.** Analysis of logical-dynamic conversion processes in arithmetic devices of digital control systems. *Eastern European Journal of enterprise technologies*, 2017, 6, 4, 28-34, doi:10.15587/1729-4061.2017.118167.
 9. **Ryabenkiy, V. M., Ushkarenko, A. O.** Metod sintezu matematychnih modelei logiko-dynamichnyh protsesiv kontrolyu i keruvanya. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2011, 2, 1, 121-125.
 10. **Yu, L., Xiaoxi, L., Zhewen, S., Mingwei, L., Jing, F., Liang, Z.** A Survey on Particle Swarm Optimization Algorithms for Multimodal Function Optimization. *Journal of software*, 2011, 6, 12, 2449-2455, doi:10.4304/jsw.6.12.2449-2455.
 11. **Yudong, Z., Shuihua, W., Genlin, J.** A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-38, doi:10.1155/2015/931256.
 12. **Zagirnyak, M., Mamchur, D., Kalinov, A.** An Algorithm for Induction Motor Monitoring System Based on Electrical Signals Analysis. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, 6, 15-18, doi:10.15199/48.2018.06.03.

Сведения об авторах (About authors)

Ушкаренко Олександр Олегович – доктор технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій; м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0002-3159-330X; e-mail: maestrotees@gmail.com.

Oleksandr Ushkarenko – Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Docent, Department of Programmable Electronics, Electrotechnics and Telecommunications, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3159-330X; e-mail: maestrotees@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ушкаренко, О. О. Формалізований опис елементів напівпровідникових перетворювачів електроенергії на різних рівнях декомпозиції / **О. О. Ушкаренко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 177-182. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.26.

Please cite this article as:

Ushkarenko, O. Formalized description of the elements of semiconductor electricity converters at different decomposition levels. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 177-182, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.26.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ушкаренко, А. О. Формализованное описание элементов полупроводниковых преобразователей электроэнергии на разных уровнях декомпозиции / **А. О. Ушкаренко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 177-182. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.26.

АННОТАЦІЯ. В статті розглянуті принципи математичного описання елементів полупроводникових преобразователей електроенергії на прикладі системи частотного управління асинхронним двигателем для визначення її компонентного та структурного складу, а також виконання аналізу процесів логико-динамічного преобразования інформації при взаємодії між собою всіх підсистем мікропроцесорної системи управління. Показані недоліки та обмеження використовуваних формальних методів описання процесів в системах управління. Визначені правила описання функціональних структур, таких як випрямач, пасивний фільтр, інвертор, асинхронний двигачель, мікроконтролер, на різних рівнях декомпозиції системи управління полупроводниковим преобразователем електроенергії. Розроблена структурно-функціональна модель мікропроцесорної системи частотного управління асинхронним двигателем, використання котрої дозволяє визначити відношення і типи зв'язей між підсистемами управління і візуалізації, а також описати функціональні можливості елементів окремих підсистем і алгоритми обробки сигналів. Перевагою запропонованого в статті підходу є можливість використання різних рівнів декомпозиції для формалізованого представлення підсистем і елементів систем управління полупроводниковими преобразователями електроенергії, в тому числі систем частотного управління асинхронними двигачелями, що дозволяє виділити найбільш важливі аспекти описання на різних стадіях проектування і аналізу системи. Представлені в явном виді позначення елементів моделі і елементів преобразования сигналів залишаються прозорими для розробачика, і містять інформацію о назначенні елементів системи, вимогах до взаємодії з іншими підсистемами обробки сигналів, і їх функціональних можливостях. Використання запропонованого в роботі підходу дає можливість формування математичних моделей полупроводникових преобразователей електроенергії і їх систем управління з підвищеним інформаційним вмістом, дозволяє виконати аналіз системи путем багаторівневої декомпозиції для створення представлення о її основних властивостях, оцінити якість її структури і елементів с позиції об'єктивного системного підходу.

Ключевые слова: логико-динамічний процес; структурний аналіз; частотне управління; аналітична модель; декомпозиція

Надійшла (received) 19.07.2019