

Ушкаренко О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто використання методу структурного аналізу та синтезу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів при вирішенні завдання структурної оптимізації на прикладі моделі для дослідження системи частотного керування асинхронним двигуном. На етапі структурного аналізу з використанням зазначеного методу визначено якісні характеристики моделі системи керування, що було досягнуто шляхом її декомпозиції на елементи й підсистеми різного рівня та аналізу зв'язків між ними з використанням графоаналітичної форми запису, що дозволило доповнити їх логічним змістом. Використання методу структурного аналізу та синтезу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів дозволило формалізувати зв'язок між структурою моделі системи керування та її ефективністю, виконати аналіз інформаційних потоків у системі керування та дослідити її якісні характеристики. Проведено аналіз логіко-динамічних процесів перетворення аналогових та цифрових сигналів, що відбуваються в різних елементах у складі моделі системи частотного керування асинхронним двигуном. З одного боку, це дало можливість відобразити логіко-динамічні процеси перетворення аргументів на гранично мінімізованому рівні формалізації. З іншого боку, використання такої форми запису процесів перетворення сигналів дозволяє проводити порівняльний аналіз різних варіантів структур моделей систем керування для подальшого вибору найбільш оптимальної з них та формування математичних моделей. На основі цього аналізу обґрунтовано необхідний обсяг та форми подання інформації між елементами моделі системи керування, методів її передавання та обробки для реалізації функцій частотного керування асинхронним двигуном. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропонований підхід дозволяє зменшити часові витрати на розробку, налагодження та модельні дослідження системи керування, виконати програмну реалізацію різних алгоритмів частотного керування асинхронним двигуном для пошуку найбільш ефективного при заданих режимах роботи.

Ключові слова: структурна оптимізація, моделювання, асинхронний двигун, система керування, графоаналітична модель.

Постановка проблеми. При використанні середовища моделювання Matlab Simulink для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном (АД), першочергово виконується розробка моделі системи керування, яка складається з сукупності блоків, в яких відбуваються деякі функціональні перетворення сигналів, і зв'язків між ними, що в узагальненому вигляді описують структуру системи [1-4]. Такі моделі містять в собі значний обсяг інформації про структурні властивості моделі і досить наглядні. Всі елементи, що входять до складу системи, при необхідності також можуть бути декомпозовані та представлені у вигляді комбінації окремих елементів, уточнені і конкретизовані. Пр цьому змінювати всю схему немає потреби, а достатнім є заміна окремих елементів структурними схемами, що містять декілька взаємодіючих елементів замість одного, і навпаки. При структурній оптимізації систем однією з проблем є обмеження застосування конкретного методу через особли-

вості процесів, що відбуваються в системах, що містять у своєму складі елементи різної фізичної природи. Перетворення моделей, зокрема їх оптимізація, може виконуватись як евристичним шляхом, що базується на знаннях та досвіді дослідника, або з використанням математичних методів, що є більш доцільним. Використання математичних методів дозволяє запобігти необґрунтованих спрощень моделі. При цьому зберігається можливість аналізу процесів перетворення інформації в моделі, що є обов'язковим для перевірки адекватності отриманої моделі. Відсутність єдиного математичного апарату для опису процесів у системах з елементами, що мають різну фізичну природу, зумовлюють необхідність продовження досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи частотного керування АД відомих виробників, такі як ABB, Altivar, Siemens та інші, виконують обробку сигналів зворотнього зв'язку для формування керуючих сигналів. Перед пере-

даванням цих сигналів в мікроконтролер виконується їх аналого-цифрове перетворення. В свою чергу, мікроконтролер може містити математичну модель асинхронного двигуна [1, 5], і для розрахунку керуючих впливів використовуються значення вимірних параметрів. За необхідності може бути виконана оптимізація структури моделі для моделювання таких систем частотного керування АД. Це дозволить виконати декомпозицію системи, виділити елементи системи, визначити склад сигналів зворотнього зв'язку. В свою чергу, після виконання цього етапу стане зрозумілим, які з елементів системи можуть бути реалізовані програмно в мікроконтролері та усунути надлишковість моделі. В такому випадку мікроконтролер повинен мати достатньо ресурсів для реалізації функцій частотного керування АД (таймери, комунікаційні інтерфейси, АЦП, виконувати розрахунки, оперуючи числами з плаваючою комою з достатньою швидкістю та ін.).

Формалізація таких структурних моделей досить складна, оскільки, з деякої точки зору, представляє собою процес переходу від її змістовного опису до математичної моделі [6-8]. При цьому слід зазначити, що структурна схема моделі не є моделлю структури. Тому завдання розробки інструменту для аналізу і синтезу структур моделей систем є достатньо актуальною. Головною вимогою при дослідженні об'єкта як системи є наявність можливості дослідження його інформаційних аспектів, а не лише розгляд та опис енергетичних процесів, що відбуваються в ньому [9, 10]. Обумовлено це тим, що створення нових і удосконалення існуючих моделей залежить від вирішення питань, що дозволяють аналізувати наявну інформацію, позбуватися її надлишковості та виділяти основну, виконувати оцінку та забезпечувати формування альтернатив для прийняття рішень. Саме в таких випадках постає завдання оптимізації структури моделі.

Ідея структурної оптимізації моделі, що запропонована в даній роботі, полягає в її спрощенні шляхом композиції окремих елементів системи для їх програмної реалізації в мікроконтролері із збереженням заданого рівня адекватності моделі. В роботах [11, 12] зазначено, що одними з основних показників, за якими можливе виконання процесу оптимізації моделі, є затрати часу, обчислювальних ресурсів та витрат для проведення дослідження з її використанням. В основі оптимізації лежить можливість перетворення моделі з однієї форми в іншу. Сама модель при цьому може стати розсосеред-

женою, мультикомп'ютерною. Силова частина моделі системи частотного керування АД може бути створена в середовищі Matlab Simulink, а керуюча частина бути реалізована, наприклад, в середовищі моделювання Proteus, як показано в роботах [10, 13]. Крім того, в такому випадку модель мікропроцесорної системи керування управління може бути представлена реальним пристроєм, що підключається до комп'ютера, і з використанням спеціальних комунікаційних модулів в Matlab, як показано в [14], виконувати функції керування силовою частиною напівпровідникового перетворювача.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном, що містить в своєму складі напівпровідникові перетворювачі електроенергії, та виконання її структурної оптимізації для усунення надлишковості шляхом композиції окремих елементів, які виконують перетворення зовнішніх впливів в інформаційні сигнали, а також відтворюють в собі процеси на інформаційному рівні.

Виклад основного матеріалу. Для формування керуючих впливів при роботі асинхронного двигуна необхідно вимірювати деякі його параметри, що використовуються в контурах зворотних зв'язків. В середовищі моделювання Matlab Simulink для вимірювання таких параметрів зазвичай використовується спеціальний блок – Machine Measurement Demux, у вікні налаштувань якого є можливість вибрати ті параметри, які необхідно вимірювати [2]. На рис. 1 представлено фрагмент моделі, в якій блок Machine Measurement Demux виконує вимірювання струмів трьох фаз, частоти обертання ротора асинхронного двигуна та моменту на його валу. Як зазначено в роботі [5], для створення моменту навантаження на валу двигуна в контурі зворотнього зв'язку використовується вимірне значення обертів ротора АД. З використанням блоку осциллографа є можливість візуалізувати осцилограми сигналів. На рис. 1 в якості прикладу також наведено аналітичний опис окремих елементів, що дозволить в подальшому отримати структурну модель системи.

Символом (\rightarrow) на рисунку позначено функціональний аналоговий зв'язок, а символом (\equiv) – функціональний логічний зв'язок. Елемент Gain являє собою коефіцієнт підсилення, що використовується для перетворення виміряного сигналу частоти обертання ротора (Rotor) функціональної структури моделі асинхронного двигуна

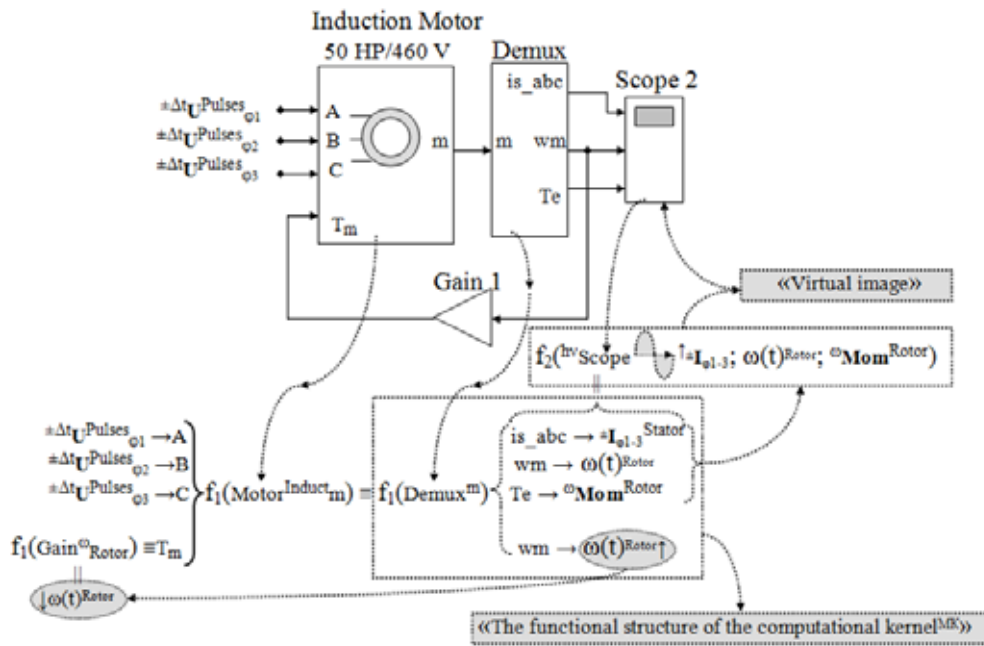


Рис. 1. Аналітичний опис структурних елементів моделі

$f_1(\text{Motor}^{\text{Induct}m}) \rightarrow f_1(\text{Motor}^{\text{Induction}m})$. За допомогою цього елемента виконується моделювання навантаження на валу АД, яке може бути описане аналітичним виразом вигляду:

$$\omega(t)_{\text{Rotor}} \rightarrow f_1(\text{Gain}^{\omega}) \rightarrow T_m \rightarrow T_{\omega}$$

Блок Induction Motor представляє собою функціональну структуру АД $f_1(\text{Motor}^{\text{Induction}m})$, в якій символ (m) містить в собі сукупність реальних аргументів (вимірних параметрів), що представлені у вигляді аналітичного виразу:

$$(m) \left\{ \begin{array}{l} \neq \mathbf{I}_{\phi 1-3}^{\text{Stator}} \\ \omega(t)_{\text{Rotor}} \\ \omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}} \end{array} \right.$$

де $\neq \mathbf{I}_{\phi 1-3}^{\text{Stator}}$ – енергетичний аргумент трьохфазного струму в індуктивностях статора (Stator); $\omega(t)_{\text{Rotor}}$ – частота обертів ротора (Rotor); $\omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}}$ – обертаючий момент ротора.

Для реалізації процедури формування оптичної інформації в функціональній структурі віртуального осцилографа для цих аргументів використовується функціональна структура демультиплексора (Demux) $\rightarrow f_1(\text{Demux}^m)$, і ця процедура представлена у вигляді аналітичного виразу:

$$f_2(\text{hvScope} \rightarrow \neq \mathbf{I}_{\phi 1-3}; \omega(t)_{\text{Rotor}}; \omega \mathbf{Mom}^{\text{Rotor}}),$$

де показані необхідні аргументи для подальшої обробки та використання в функціональній

структурі обчислювального ядра мікроконтролера (Core^{MK}).

В схемі системи, що представлена на рис. 2, відбувається перетворення енергії. Від зовнішнього джерела на вхід системи надходить потік енергії. В асинхронний двигун направлений вихідний потік енергії. Природним чином, процес перетворення енергії потребує інформацію. Отримання інформації, її обробка і формування сигналів керування виконуються мікроконтролером.

Вольтметр Vdc в схемі на рис. 2 використовується для вимірювання значення постійної напруги на виході пасивного LC-фільтра, і описується аналітичним виразом:

$$\left. \begin{array}{l} +U_{\text{Const}} \\ -U_{\text{Const}} \\ [U_j] \end{array} \right\} f_1(\text{ADC}) = [V_i^{\text{dc}}] \rightarrow V_{\text{dc}}^{\text{Const}} \quad (1)$$

За допомогою функціональної структури аналого-цифрового перетворювача $f_1(\text{ADC})$ з вхідною структурою опорних напруг $[U_j]$ і вхідними напругами $+U_{\text{Const}}$ і $-U_{\text{Const}}$ представлений вольтметр.

Блок вольтметра Vab_inv використовується для вимірювання лінійної напруги, яка формується на виході інвертора, і описується аналітичним виразом:

$$\left. \begin{array}{l} \neq \Delta t \text{Pulses } U_{\phi 1} \\ \neq \Delta t \text{Pulses } U_{\phi 2} \\ [U_j] \end{array} \right\} f_2(\text{ADC}) = [V_i^{\text{ab}}] \rightarrow \neq \Delta t \text{Vab}^{\text{Pulses}} \quad (2)$$

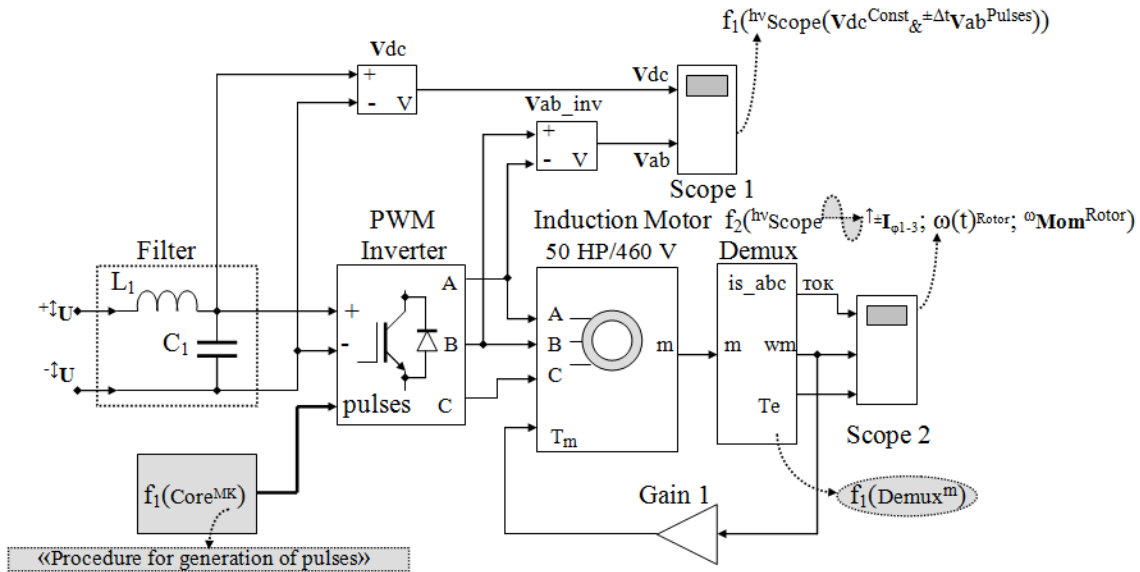


Рис. 2. Силова частина моделі системи частотного керування АД

Функціональною структурою аналого-цифрового перетворювача $f_2(ADC)$ з вхідним масивом опорних напруг $[U_j]$ і вхідними імпульсними напругами $\pm\Delta tPulses U_{\varphi 1}$ й $\pm\Delta tPulses U_{\varphi 2}$ представлено вольтметр.

Аналітична форма запису блоку осцилографа «Scope 1», що наведена далі, є особливістю опису системи:

$$f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses})).$$

Зміст цього аналітичного виразу полягає в тому, що в даній функціональній структурі результуюча інформація представлена в оптичній формі (hv) і містить процедуру представлення інформаційного змісту аргументу випрямленої напруги (Vdc^{Const}) та аргументів імпульсних напруг ($\pm\Delta tVab^{Pulses}$), що в функціональній структурі блоку осцилографа «Scope 1» в оптичній формі можуть бути представлені у вигляді, наведеному на рис. 3.

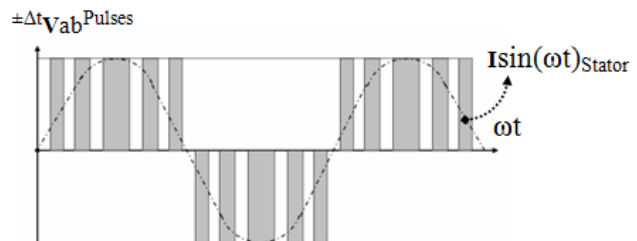


Рис. 3. Осцилограми лінійної напруги і фазного струму асинхронного двигуна

Фазний струм синусоїдальної форми статора позначено на рисунку як $I_{sin(\omega t)_{Stator}}$. Слід зазначити при цьому, що доцільно записати функціональну структуру осцилографа $f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses}))$ без функціональних графічних зв'язків, а з функціональними структурами вхідних аналого-цифрових перетворювачів $f_1(ADC)$ і $f_2(ADC)$ – у вигляді графоаналітичного виразу:

$$\left. \begin{aligned} &+U_{Const} = \\ &U_{Const} = \\ &[U_j] = \end{aligned} \right\} f_1(ADC) = [V_{i^{dc}}] = \left. \begin{aligned} &Vdc^{Const} \\ &f_1(hvScope(Vdc^{Const} \& \pm\Delta tVab^{Pulses})) , \\ &\pm\Delta tVab^{Pulses} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &\pm\Delta tPulses U_{\varphi 1} = \\ &\pm\Delta tPulses U_{\varphi 2} = \\ &[U_j] = \end{aligned} \right\} f_2(ADC) = [V_{i^{ab}}] =$$

де на екрані віртуального осцилографа «Scope 1» буде відображатися послідовність вхідних аргументів осцилографа.

Деталізована модель формування керуючих сигналів, що поступають на напівпровідниковий перетворювач електроенергії (інвертор) у складі

силової частини системи частотного керування АД, представлена у вигляді сукупності окремих блоків на рис. 4.

На рисунку використано наступні позначення: freq – опорне значення частоти; Gain – коефіцієнт підсилення; Product – блок добутку;

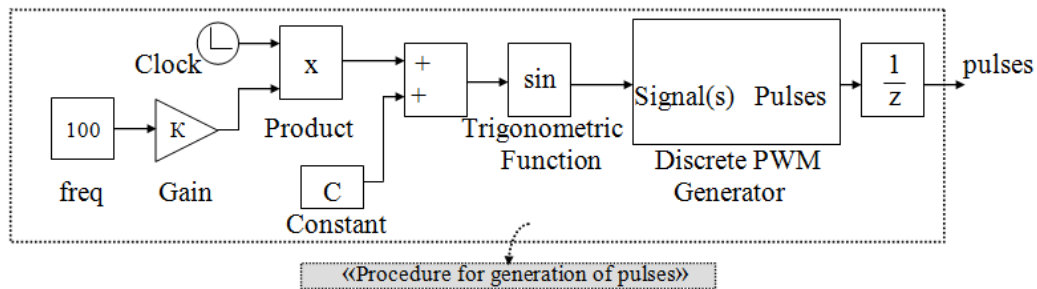


Рис. 4. Модель підсистеми формування сигналів керування на інвертор

Constant – числове значення (константа); Trigonometric Function – тригонометрична функція; Clock – задавач сигналу часу; Discrete PWM Generator – ШІМ-генератор. Ця модель підсистеми формування сигналів керування може бути реалізована програмно в мікроконтролері. Тому в модель слід ввести функціональну струк-

туру обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(Core^{MK})$.

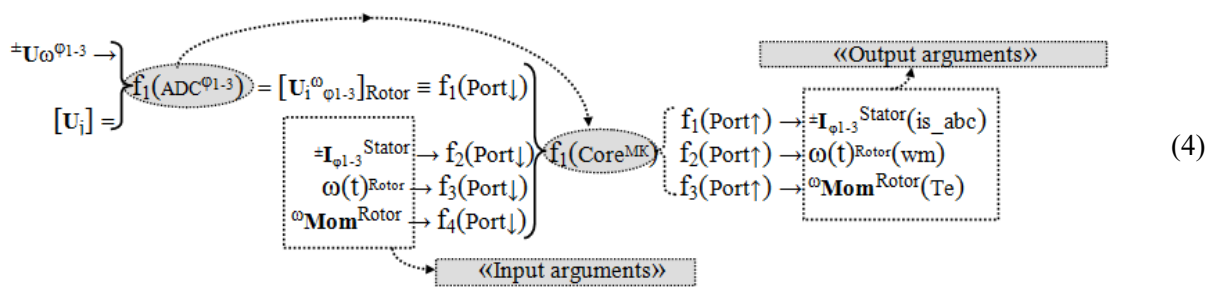
Оптимізація структури моделі. Аналіз аналітичного опису системи і процесів перетворення інформації дозволяє зробити висновок, що при фізичній реалізації системи окремі функціональні структури віртуальних осцилографів можуть бути

$$f_1(\text{Scope}(V_{dc}^{Const} \& \pm \Delta t V_{ab}^{Pulses})), f_2(\text{Scope}(\uparrow I_{\phi 1-3}; \omega(t)_{Rotor}; \omega Mom_{Rotor})),$$

виключені, оскільки у відповідності з аналітичним виразом (3) їх призначення полягає у реалізації візуального оптичного контролю параметрів та процесу зміни значень відповідних входних аргументів. Також функціональна структура демультіплексора $f_1(Demux^m)$ є надлишковою, оскільки

функції, що покладаються на неї, виконуються функціональною структурою обчислювального ядра мікроконтролера $f_1(Core^{MK})$.

Слід також зазначити при цьому, що якщо розглядати схему, наведену на рис. 2, представивши її аналітичним виразом:



тоді можна побачити, що обчислювальне ядро мікроконтролера, представлене функціональною структурою $f_1(Core^{MK})$, містить процедуру аналого-цифрового перетворення $f_1(ADC^{\phi 1-3})$, тому вираз (4) може бути записаний без функціональної структури $f_1(ADC^{\phi 1-3})$ у вигляді виразу (5).

На рис. 5 представлено схему, отриману в результаті виконання структурної оптимізації, яка забезпечує процес частотного керування АД та контроль його параметрів.

Аналітична форма запису функціональної структури АД $f_1(Motor^{Induct}L_3)$ з результуючим аргументом ωMom_{Rotor} моменту обертання ротора двигуна і інформаційним аргументом напруги трьох фаз $U_{\omega^{1-3}}$ в індуктивностях статора, що задає швидкість обертання ротора двигуна, є особливістю моделі. Слід зазначити при цьому, що для функціональної структури АД $f_1(Motor^{Induct}L_3)$ необов'язковим є формування інформаційних аргументів напруги $U_{\omega^{1-3}}$ трьох фаз в індуктивностях статора, і наявність інформації про аргу-

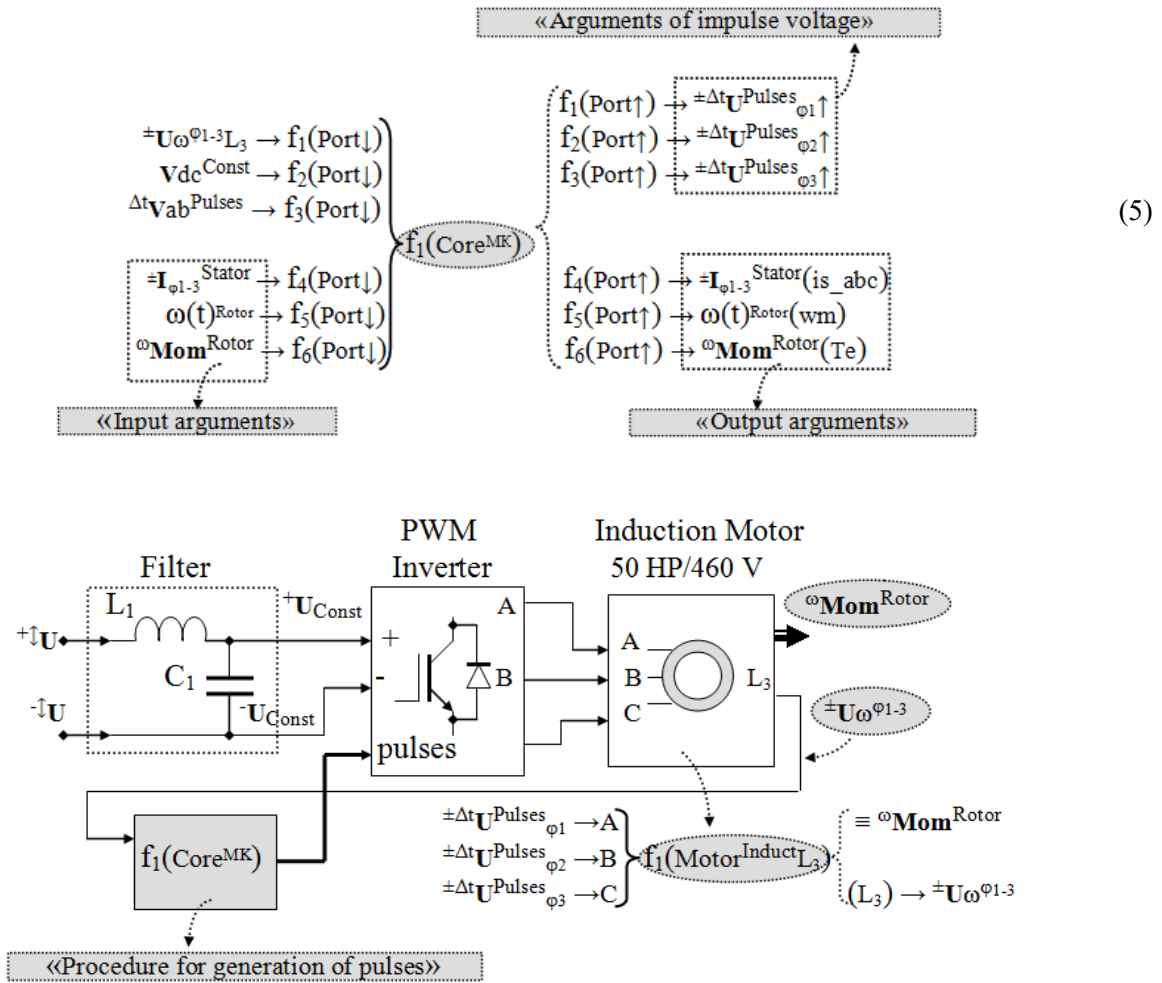


Рис. 5. Модель системи керування АД після структурної оптимізації

мент напруги однієї з фаз в індуктивності статора буде достатньою.

Висновки. В результаті аналізу моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном було виконано її структурну оптимізацію, в результаті чого усунуто надлишковість шляхом композиції окремих підсистем початкової моделі. Представлення структури моделі в аналітичній формі дозволило виділити такі підсистеми, які можуть бути реалізовані програмно в мікроконтролері, та сигнали зворотних зв'язків, які для цього необхідні та можуть бути оброблені. Мікроконтролер здатний перетворювати зовнішні сигнали (сигнали зворотного зв'язку) з використанням вбудованого аналого-цифрового перетворювача або різних цифрових інтерфейсів в інформаційні сигнали, передавати та переносити інформацію за допомогою портів введення/виведення, а також відтворювати

в собі процеси на інформаційному рівні, генерувати інформацію відповідно із програмно реалізованими алгоритмами. Аналіз процесів перетворення інформації підтверджує адекватність моделі після виконання її структурної оптимізації. Отримана оптимізована структура моделі для дослідження процесів частотного керування асинхронним двигуном може бути реалізована як мультикомп'ютерна, або містити елементи апаратної реалізації окремих підсистем, які взаємодіють між собою за допомогою комунікаційних інтерфейсів. Практична користь отриманих результатів полягає в тому, що запропонований підхід дозволяє зменшити часові витрати на розробку, налагодження та дослідження системи керування, програмно реалізувати та дослідити різні алгоритми частотного керування асинхронним двигуном для пошуку найбільш ефективного при заданих режимах роботи.

Список літератури:

1. Vector Control of Induction Machines / Robyns B. et al. Power Systems : Springer-Verlag London, 2012. 222 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-901-7
2. Ozpineci B., Tolbert L.M. Simulink implementation of induction machine model – a modular approach. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03. IEEE International, 1-4 June 2003 / Madison, WI, USA, 2003. P. 728–734. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210317
3. Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Воскобоєнко В.І. Моделювання мікропроцесорних систем управління газодизель-генераторними установками. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2009. № 637. С. 78–82.
4. Abdul Wahab H.F., Sanusi H. Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine, *American Journal of Applied Sciences*. 2008. Vol. 5. P. 1083–1090.
5. Momoh O.D. Dynamic Simulation of Cage Rotor Induction Machine – A Simplified and Modular Approach. *The 44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, 11-13 March 2012, Jacksonville, Florida, USA, 2012. P. 200–203. DOI: 10.1109/SSST.2012.6195112
6. Рябенський В.М. Ушкаренко О.О., Аль-Суод Махмуд Мохаммад, Халед Омар Ганнам. Імітаційне моделювання процесів комутації споживачів в автономних електроенергетичних установках. *Збірник наукових праць НУК*. 2011. № 4. С. 123–129.
7. Saini R.K., Saini D.K., Gupta R., Verma P. Optimized Design of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor based on Maximum Efficiency Operating under the Rated Voltage – based on Software Platform. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. No. 21. P. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i21/92002
8. Shell R.L., Ernest L.H. Handbook of Industrial Automation. New York : Marcel Dekker, 2000. 857 p. DOI: 10.1201/9780203908587
9. Al-suod M.M.S., Ushkarenko A.O., Dorogan O.I. Monitoring and Automatic Control for Ship Power Plants Based Logical Algorithms. *International Journal of Advanced Computer Research (IJACR)*. 2014. No. 17. P. 966–972.
10. Gardner C., Johnson D., Provine J. Networked Intelligent Instrumentation & Control for Switchboards. *Electric Ship Technologies Symposium*, 21-23 May 2007, Hyatt Regency Crystal City, Arlington, Virginia, USA, 2007. P. 510–518. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372134
11. Choudhary P.K., Dubey S.P., Gupta V.K. Efficiency optimization of induction motor drive at steady-state condition. *Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, International Conference on 18-19 December 2015, Noorul Islam University, Kumaracoil, Kanyakumari District, Tamilnadu, 2015. P. 498–503. DOI: 10.1109/ICCICCT.2015.7475325
12. Hasan M.D., Kumar A., Akhtar J. Design Optimization of Linear Induction Motor. *International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 15-17 December 2015, Hong Kong, 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESA.2015.7398889
13. Fazlipour Z., Kianinezhad R., Razaz M. Genetic Algorithm Based Design Optimization of a Six Phase Induction Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2015. No. 10. P. 1007–1014. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.1007
14. Рябенський В.М., Дорогань О.І., Ушкаренко О.О. Автоматизація процесів моніторингу параметрів та керування автономними електроенергетичними системами з дизель-генераторними агрегатами : монографія. Миколаїв : НУК, 2017. 240 с.

Ushkarenko O.O. USING THE METHOD OF STRUCTURAL ANALYSIS AND SYNTHESIS IN THE OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEM MODELS

The use of the structural analysis and synthesis of logical-dynamic processes of arguments transformation method in solving problems of structural optimization on the example of a model for studying a frequency control system for an induction motor is considered in the paper. At the stage of structural analysis, using this method, the qualitative characteristics of the control system model were determined, which were achieved by decomposing it into elements and subsystems of different levels and analyzing the relationships between them using a graphic-analytical form of notation, which made it possible to supplement them with logical content. The use of the method of structural analysis and synthesis of logical-dynamic processes of arguments transformation made it possible to formalize the relationship between the structure of the control system model and its effectiveness, analyze information flows in the control system and explore its qualitative characteristics. The analysis of logical-dynamic processes of analog and digital signals conversion performed in various elements as part of a frequency control system for an induction motor has been carried out. On the one hand, this made it possible to determine the logical-dynamic processes of argument transformation at the boundary-minimized form level. On the other hand, using such a form of signal transformation processes notation makes

it possible to perform the analysis of the various variants of control system structural models intended for further selection of the most suitable of them and to form their mathematical models. Based on this analysis, the necessary volumes and forms of information presentation between the elements of the control system model, methods of its transmission and processing for the implementation of frequency control functions of an induction motor are substantiated. The practical value of the obtained results is that the proposed approach allows to reduce the time spent on development, debugging and model studies of the control system, to perform software implementation of various frequency control algorithms for an induction motor in order to find the most effective one under the specified operating modes.

Key words: *structural optimization, modeling, induction motor, control system, graph-analytical model.*