

10.31653/smf45.2022. 155-168

Мельник О. М.¹, Налева Г. В.², Обнявко Т. С.³, Онищенко О. А.²

¹Одеський національний морський університет

²Національний університет "Одеська морська академія"

³Військова академія (м. Одеса)

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ БЕЗЩІТКОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сучасному морському судні використовується велика кількість електричних двигунів різних видів: щіткових постійного струму, одно- та багатофазних асинхронних, синхронних різного типу, вентильно-індукторних (*Switched Reluctance Motor – SRM*), лінійних тощо, які виконують різноманітні технологічні функції і завдання. Все частіше електричний двигун є ефективною заміною теплового двигуна у руському комплексі суден. Наприклад, для автономних (безпілотних) морських суден різного типу і призначення набагато простіше забезпечити енергоефективне керування електричним двигуном [1, 2], у порівнянні із керуванням тепловим двигуном.

Недостатність апробованих методів керування безщітковими двигунами, недосконалість існуючих методів синтезу, що забезпечують високу ефективність синтезованих систем керування продуктивністю (найчастіше – швидкістю і моментом) суднових машин і механізмів, не дозволяють безщітковим двигунам повністю замінити щіткові та асинхронні електричні двигуни для більшості суднових технічних систем і комплексів, для систем електроруху суден [2-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найперспективніших типів електричних двигунів для використання у різних берегових механізмах і механізмах морських суден є безщітковий двигун постійного струму [2-4]. У англійській технічній літературі такий двигун зветься *Brushless Direct Current Electric Motor – BLDC* [5, 6]. Перевагами безщіткового двигуна (перед щітковими, асинхронними та *SRM* двигунами) є дуже високе співвідношення механічної потужності до ваги, високий діапазон регулювання швидкостей, майже миттєвий контроль швидкості і крутного моменту, висока енергетична ефективність і невеликі витрати на обслуговування. Безщітковий електродвигун постійного струму (*BLDC Electric Motor* або *BL Electric Motor*), також відомий, як електричний двигун з елек-

тронною комутацією (*ECM* двигун, *EC* двигун) – це безколекторний (безконтактний, безщітковий) синхронний двигун із вбудованим електронним керуванням, або, коротше, електронно-комутований (*Electronically Commutated – EC*) двигун. Загалом, це синхронний двигун, що використовує джерело живлення постійного струму (*Direct Current – DC*).

У багатьох сучасних безпроводних ручних електроінструментах використовують безщіткові електричні двигуни: у повітрорудках, у пилах (дискових, циркулярного типу, поршневих), у дрелях/шурупвертах тощо. Перевага ваги та ефективності безщіткових двигунів над щітковими і асинхронними двигунами більш важливіша для ручних електроінструментів, що живляться від акумуляторів, ніж для стаціонарних інструментів, підключених до потужного джерела змінного або постійного струму.

У суднових системах охолодження (рефконтейнерах, кондиціонуванні повітря тощо), у галузях опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (*Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC*), у холодильній обробці і промисловості, існує тенденція до використання безщіткових електродвигунів замість різних типів електричних двигунів змінного струму. Найвагомішою причиною переходу на безщітковий двигун є зменшення потужності, необхідної для їх роботи, порівняно зі звичайним двигуном змінного струму. На додаток до вищої ефективності безщіткового двигуна, у системах *HVAC* (особливо таких, що мають змінну швидкість або модуляцію навантаження), використовують *BLDC* двигуни для того, щоб надати вбудованому мікропроцесору постійний контроль над охолодженням і потоком повітря, над контролем споживаної потужності і загальної енергетичної ефективності.

Слід відзначити, що *BLDC* двигуни зараз використовуються у різних електричних транспортних засобах, у гібридних транспортних засобах (системи "тепловий двигун-електричний двигун"), у персональних і безпілотних транспортних засобах. Наприклад, у більшості сучасних електричних велосипедах (у тому числі – морських прогулянкових), використовуються *BLDC* електродвигуни. Для наземних транспортних засобів (наприклад, автономних транспортних роботів) відома конструкція, яка вбудована у саму втулку приводного колеса, при цьому статор міцно закріплений на вісі, а магніти прикріплені до колеса та обертаються разом з ним. Той же принцип застосований у самобалансуючих колесах скутерів. У більшості рульових механізмів

радіокерованих морських безпілотників, у багатоцільових автономних плавальних апаратах також використовуються безщіткові електродвигуни – через їх високу енергетичну ефективність і відмінну керованість [7-10].

На морських судах безщіткові двигуни знаходять застосування не тільки у судових допоміжних механізмах, а також і у системах електроруху, наприклад, у автономних багатоцільових судах [1, 10], у гвинто-рульових колонках суден тощо. У сучасних застосуваннях *BLDC* двигуни [3-7, 11-13] дозволили замінити редуктори дуже простою конструкцією з прямим (безпосереднім) приводом.

Підсумовуючи, слід відзначити, що на судні безщіткові двигуни ефективно виконують багато функцій, раніше виконуваних щітковими двигунами постійного струму і асинхронними електродвигунами. Найчастіше високоефективні безщіткові двигуни будуються на основі висококоерцетивних магнітів, які є доволі дорогими, проте вартість безщіткових двигунів поступово зменшується, особливо при серійному виробництві [5, 6].

Постановка завдання. Враховуючи сучасний стан розвитку теорії електричних машин та теорії машин і механізмів, систем управління електроприводами і середовищ імітаційного моделювання, найпростішим способом підвищення ефективності наукових досліджень у напрямку підвищення результуючої ефективності електроприводів з безщітковими двигунами є використання відомих загальнотеоретичних (фізичних) принципів функціонування двигунів одночасно з математичним моделюванням. Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення результуючої ефективності (енергетичної, якості процесів керування тощо) судових систем, механізмів і комплексів, що функціонують на основі безщіткових електродвигунів, є актуальними і відповідають напрямкам розвитку сучасного флоту.

Метою статті є уточнення існуючої термінології при моделюванні безщіткових електричних двигунів постійного струму і аналіз принципів побудови їх математичних моделей на основі структурних схем.

Виклад основного матеріалу. Для роботи безщіткового двигуна використовується електронний контролер (комутатор) – для перемикавання постійних струмів на обмотках *BLDC* двигуна. Саме за допомогою контролеру створюються магнітні поля, які ефективно "обертуються" у просторі і за якими слідує ротор двигуна з постійними магнітами. Контролер регулює фазу та амплітуду імпульсів постій-

ного струму – для керування швидкістю та крутним моментом. Така система керування є альтернативою механічному комутатору (щіткам), який використовується у багатьох звичайних електродвигунах постійного струму. Найбільшою перевагою *BLDC* двигунів є найбільший, серед відомих, коефіцієнт зв'язку (конструктивний коефіцієнт $c\Phi$) загального струму до електромагнітного моменту. Конструкція системи безщіткового двигуна, зазвичай, подібна до синхронного двигуна з постійними магнітами (*Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM*), але також може бути подібна реактивним *SRM* або асинхронним двигунам. Сучасні *BLDC* двигуни використовують неодимові магніти (рідкоземельні, *Nd-Fe-B*, неодим-залізо-бор,) та можуть бути конструктивно аутраннерами (статор оточений ротором), інраннерами (ротор оточений статором) або аксіальними (ротор і статор плоскі та паралельні).

Визначимося із загальною термінологією, яка використовується у описі принципів дії безщіткових електродвигунів і їх математичному описі. У різноманітних сучасних суднових технічних системах і комплексах застосовують, у основному, два способи регулювання швидкості синхронного електродвигуна:

– шляхом зміни частоти напруги живлення (струму), який подається на статорні обмотки;

– шляхом зміни амплітуди напруги при комутації статорних обмоток за сигналами датчика положення ротора (режим вентильного електродвигуна або безколекторного (безщіткового, безконтактного) електродвигуна постійного струму (БДПС – *BLDC*). У існуючій літературі [5, 6] терміни «вентильний двигун» та «безколекторний (безконтактний, безщітковий) двигун постійного струму» мають різні значення. Дуже часто вентильний двигун та безколекторний двигун постійного струму ототожнюють між собою. Зазвичай розглядається управління синхронною машиною у режимі вентильного двигуна (ВД), якщо при цьому використовується дуже простий датчик положення ротору з малою роздільною здатністю (близько 6 імпульсів (дискрет) на один оберт) при числі пар полюсів $Z_n = 1$. Під режимом безколекторного (безщіткового) двигуна постійного струму розуміється управління такою синхронною машиною, яка оснащена датчиком положення ротору з високою роздільною здатністю (*Shaft Position Sensor, Shaft Encoder* – енкодер, 1024 дискрети на один оберт та більше) [10-13].

Існують різні прийоми математичного опису синхронних електродвигунів з постійними магнітами на роторі. Найпростіший підхід ґрунтується на тому, що у режимі ВД та *BLDC* синхронна машина за своїми характеристиками та принципами управління дуже схожа на традиційний двигун постійного струму, а її математична модель, за аналогією, представляється відомою передаточною функцією [5, 6]:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_{\text{дв}}}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}, \quad (1)$$

де p – комплексна змінна, оператор Лапласа; $\omega(p)$ – зображення швидкості ротора двигуна за Лапласом; $U(p)$ – зображення напруги, що подається на статорні обмотки двигуна; $k_{\text{дв}}$ – коефіцієнт передачі двигуна за каналом управління ("напруга - швидкість"); T_e – електромагнітна стала часу ланцюга статора двигуна; T_m – електромеханічна стала часу (двигун + механізм).

Згідно до другого прийому математичного опису динамічних режимів роботи синхронного електродвигуна з постійними магнітами на роторі, при будь-якому способі управління його швидкістю, використовують модель узагальненої двофазної машини змінного струму (рис. 1).

У різноманітних суднових електроприводах, де необхідний великий діапазон регулювання швидкості (більше 10) застосовують спосіб управління безщітковим синхронним електродвигуном за сигналами датчика положення ротору (енкодер), прив'язаного до магнітної системи машини [1, 5-6, 10, 12-13].

У цьому випадку управління швидкістю синхронного електродвигуна виробляють шляхом зміни діючого значення амплітуди напруги, прикладеної до обмоток статора.

Для такого режиму у синхронному безщітковому двигуні підтримують просторовий кут θ між векторами потокозчеплення ротора та статора близьким до 90° , а швидкість магнітного поля ω_0 практично співпадає зі швидкістю ω обертання ротора.

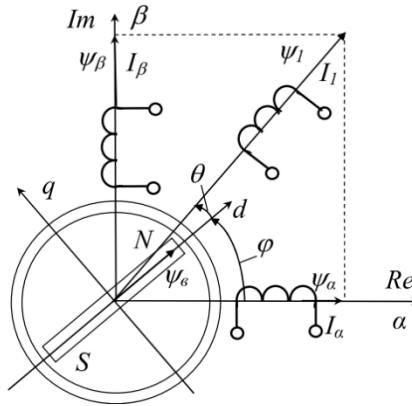


Рис. 1. BLDC двигун з постійними магнітами на роторі, як узагальнена двофазна електрична машина

Векторне рівняння для обмотки статора синхронної машини, працюючої у режимі BLDC, у системі координат Odq , що обертається разом з ротором, представляється наступним чином:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} + j\omega \bar{\psi}_1, \tag{2}$$

де R_1 – активний опір обмотки статора; \bar{U}_1 , \bar{I}_1 та $\bar{\psi}_1$ – вектори напруги, струму та потокозчеплення статора відповідно; ω – швидкість обертання ротора синхронного двигуна; j – уявна одиниця.

Рівняння (2) запишемо у проекціях на осі d і q :

$$\begin{cases} U_{1d} = R_1 I_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega \psi_{1q} \\ U_{1q} = R_1 I_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega \psi_{1d} \end{cases} \tag{3}$$

При цьому для (3) враховуємо, що

$$\begin{cases} \psi_{1d} = L_1 I_{1d} + \psi_\epsilon \\ \psi_{1q} = L_1 I_{1q} \end{cases}, \tag{4}$$

де L_1 – власна індуктивність еквівалентної обмотки статора; ψ_ϵ – потокозчеплення збудження від постійних магнітів ротора.

Переходячи у рівняннях (3) і (4) до однорідних змінних та враховуючи основне рівняння руху електроприводу, отримаємо

систему нелінійних рівнянь, яка дає повний опис синхронної машини з постійними магнітами на роторі при роботі у режимі *BLDC*:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1d}}{dt} = U_{1d} - \frac{R_1}{L_1}\psi_{1d} + \frac{R_1}{L_1}\psi_{\epsilon} + \omega\psi_{1q} \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} = U_{1q} - \frac{R_1}{L_1}\psi_{1q} - \omega\psi_{1d} \\ J \frac{d\omega}{dt} = \frac{m_1 Z_n \psi_{\epsilon}}{2L_1} \psi_{1q} - M_c \end{cases}, \quad (5)$$

де m_1 – число фаз обмотки статора; Z_n – число пар полюсів; J – приведений до валу електродвигуна момент інерції; M_c – момент опору.

Якщо перейти від (5) до операторної форми запису (із проміжними очевидними алгебраїчними перетвореннями), отримаємо таку систему рівнянь (6):

$$\begin{cases} (T_{11}p + 1)\psi_{1d} = T_{11}U_{1d} + \psi_{\epsilon} + T_{11}\omega\psi_{1q} \\ (T_{11}p + 1)\psi_{1q} = T_{11}U_{1q} - T_{11}\omega\psi_{1d} \\ Jp\omega = \frac{m_1 Z_n \psi_{\epsilon}}{2L_1} \psi_{1q} - M_c \end{cases}, \quad (6)$$

яка дозволяє дуже просто побудувати структурну схему синхронної машини з постійними магнітами на роторі, працюючої у режимі *BLDC* (рис. 2). Тут позначено: $T_{11} = L_1/R_1$ – електромагнітна стала часу ланцюга статора.

Лінеаризація системи рівнянь (6) в околі деякої робочої точки з координатами ψ_{1d0} та ψ_{1q0}

$$\begin{cases} (T_{11}p + 1)\psi_{1d} = T_{11}U_{1d} + \psi_{\epsilon} + T_{11}\omega\psi_{1q0} \\ (T_{11}p + 1)\psi_{1q} = T_{11}U_{1q} - T_{11}\omega\psi_{1d0} \\ Jp\omega = \frac{m_1 Z_n \psi_{\epsilon}}{2L_1} \psi_{1q} - M_c \end{cases}, \quad (7)$$

дає можливість отримати лінеаризовану структурну схему синхронного електродвигуна з постійними магнітами на роторі, що наведена на рис. 3.

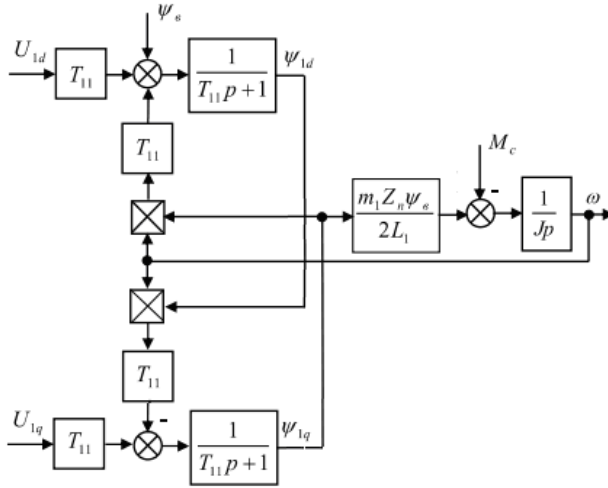


Рис. 2. Структурна схема *BLDC* двигуна з постійними магнітами на роторі

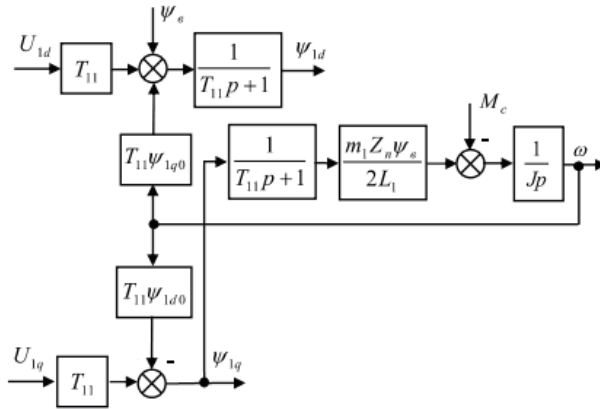


Рис. 3. Лінеаризована структурна схема *BLDC* двигуна

За допомогою отриманої лінеаризованої структурної схеми визначаються передаточні функції (ПФ) синхронного електродвигуна з постійними магнітами на роторі відносно до керуючого впливу U_{1q} та до впливу статичного навантаження M_c :

$$W_{\text{дв}2}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{1q}(p)} = \frac{1}{\psi_{1d0} (T_{e1} T_{m1} p^2 + T_{m1} p + 1)}, \quad (8)$$

$$W_{\text{дв}2}(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{T_{m1} (T_{e1} p + 1)}{J (T_{e1} T_{m1} p^2 + T_{m1} p + 1)}. \quad (9)$$

У формулах (8) та (9) уведені позначення:

$$T_{e1} = T_{11}, T_{m1} = \frac{2JL_1}{m_1 Z_n \psi_{1d0} \psi_e T_{11}}.$$

Слід зазначити, що передаточна функція (8) з великою точністю повторює вираз (1).

Децю інший підхід до опису синхронної машини, працюючої у режимі ВД, полягає в урахуванні кута комутації Θ [5, 6, 12, 13].

У цьому випадку рівняння руху синхронного безщіткового електродвигуна виглядає так:

$$\begin{cases} \gamma U \sin \theta = R_1 I_{1d} + L_1 \frac{dI_{1d}}{dt} - \omega L_1 I_{1q} \\ \gamma U \cos \theta = R_1 I_{1q} + L_1 \frac{dI_{1q}}{dt} + \omega L_1 I_{1d} + E \end{cases}, \quad (10)$$

де γ – шпаруватість імпульсів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, *Pulse Width Modulation – PWM*); U – опорна напруга модуляції; E – ЕРС обертання, що наводиться у статорній обмотці.

Система рівнянь (10) дозволяє отримати передаточні функції та механічні характеристики синхронної машини, працюючої у режимі ВД.

Існує також підхід до математичного опису безщіткового синхронного двигуна з постійними магнітами у вигляді нелінійних рівнянь та структурних схем, аналогічних системі (6) та схемі, зображеній на рис. 2, з деякими модифікаціями з вибору систем координат та керуючих впливів.

Наприклад, у [1, 10] показано, що за наведеними вище принципами можлива побудова високоефективних систем керування електрорушійними багатопільових автономних плавальних апаратів.

Принцип побудови електрорушійника на основі заснований на спрощеній моделі вентильного електроприводу на основі *BLDC* із мінімальною апаратною надмірністю схеми. Електропривод на основі *BLDC* двигуна є синергетичним об'єднанням

електромеханічної системи синхронного електричного двигуна із збудженням від постійних магнітів та електронного комутатора. Оскільки керування ключами мостового інвертора здійснюється за командами енкодера, то таким чином реалізується жорсткий зворотний зв'язок за просторовим положенням ротора, що визначає алгоритм підключення обмоток *BLDC* двигуна до джерела постійного струму. Щітково-колекторний пристрій, по суті, є механічним комутатором, а його аналог – електронний комутатор *BLDC* двигуна. Саме ця властивість дозволяє провести аналогію між моделлю вентильного електроприводу на основі *BLDC* двигуна та моделлю класичного щіткового електродвигуна постійного струму (1), у якого секції обмотки якоря за допомогою щітково-колекторного пристрою підключаються до постійного джерела напруги.

Структурна схема, з елементами принципової схеми, системи керування швидкістю електропривода на основі *BLDC* двигуна електрорушії наведена на рис. 4.

Відзначимо, що налаштування такої системи починається з внутрішнього контуру, вихідна координата якого (струм) змінюється набагато швидше вихідної координати зовнішнього контуру – контуру швидкості. При налаштуванні електрорушії є вимоги до статичних і динамічних властивостей контурів і всієї системи: відсутність статичної помилки при стрибкоподібному відпрацюванні навантаження, забезпечення змін режимів швидкості (стрибком задаючого сигналу) з перерегулюванням, яке не повинно перевищувати 5 %. Є й інші спеціальні вимоги до режимів роботи електрорушіїв (наприклад, автономних плавальних апаратів), які залежать від типу і призначення судна.

Контур струму електропривода (рис. 4) стабілізує струм на заданому регулятором швидкості рівні, при цьому контур струму є практично безінерційним з наступних причин:

– напруга джерела живлення U_d завжди набагато перевищує ЕРС самоіндукції використаного двигуна, що дозволяє форсувати процеси наростання і спаду струму I у діапазоні його обмеження (від $+I_{max}$ до $-I_{max}$) за час, який набагато менший сумарної електромагнітної сталої часу. Саме тому електромагнітна стала часу і зворотний зв'язок за ЕРС *BLDC* електродвигуна майже не впливають на динамічні характеристики електрорушії;

– на сучасній елементній базі регулятор струму, датчик струму і блок силових транзисторних ключів конструктивно нескладно виконати практично безінерційними.

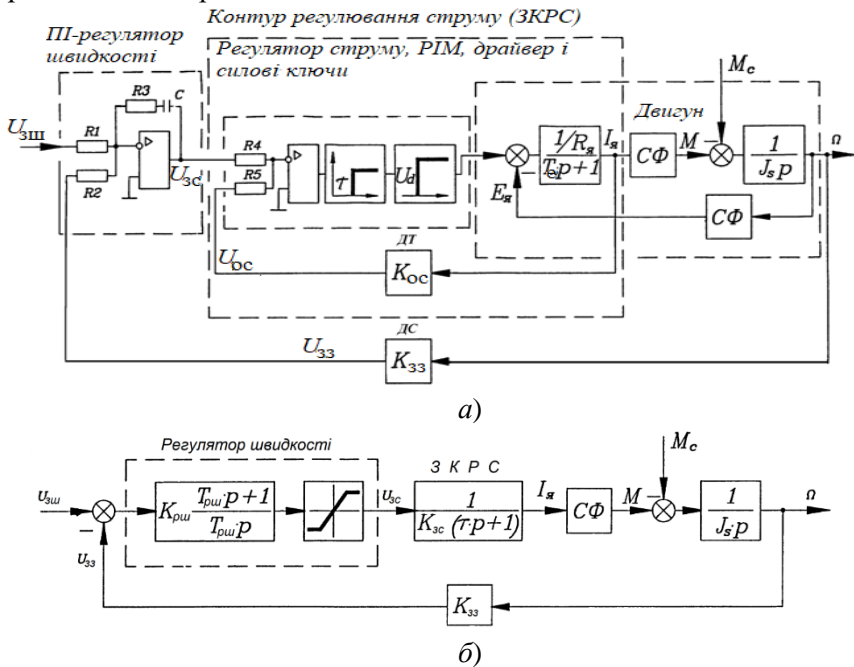


Рис. 4. Структурна схема, з елементами принципової (а), спрощеної системи керування швидкістю (б) електропривода рудня

При моделюванні, замкнутий контур регулювання струму ЗКРС можна наближено представити аперіодичною ланкою зі сталою часу $\tau = 1 \text{ мс}$ і статичним коефіцієнтом передачі ланки $K_c = 1/K_{3c}$.

Оптимізація контуру швидкості здійснюється на «технічний оптимум», для якого ПФ розімкнутого контуру швидкості набирає вигляду

$$W_{\text{р.кш}}(p) = \frac{1}{2\tau p \cdot (\tau p + 1)},$$

і на частоті зрізу $(0,5\tau)$ логарифмічна амплітудно-частотна характеристика забезпечує запас за фазою у $63,5^\circ$.

Висновки і перспективи подальших досліджень. З наведених рівнянь і структурних схем, з урахуванням використаної термінології, можна побачити, що деякі фрагменти математичних моделей

представляють взаємодію перетворювачів енергії та керуючої інформації. Саме тому:

– збудження від постійних магнітів дозволяє суттєво спростити модель еквівалентної обмотки збудження *BLDC* двигуна у порівнянні з моделлю синхронної електричної машини з електромагнітним збудженням (є достатнім уявити обмотку збудження, як незалежне джерело ЕРС із власним внутрішнім опором). Тоді ЕРС, що наводяться у фазах *BLDC* двигуна, не міститимуть складових, пропорційних похідній струму за часом, що протікає в еквівалентній обмотці збудження;

– у моделі вентильного електроприводу на основі *BLDC* двигуна легко передбачити можливість зміни частоти обертання у широких межах. Тому обов'язковим є включення до складу моделі механічної підсистеми, що дозволяє визначати миттєву частоту обертання ротора двигуна. Передача частоти обертання у допоміжну схему, що здійснює інтегрування, уможливило отримання інформації про становище ротора у будь-який момент часу (моделювання роботи енкодера є окремим завданням);

– синергетичне об'єднання у складі електроприводу наведених компонентів (рис. 4, а) не впливає на їх сумісну роботу. Однак для побудови замкнутої системи управління модель, що наведена на рис. 2 може виявитися надмірною, оскільки, при її розвиненні, здатна враховувати всі електромагнітні процеси та процеси перемикання (енкодера, ключів, логічних елементів), що різко обмежує швидкість розрахунків і ускладнює синтез контролерів. Тому найпростіша аналогія між електромеханічним перетворювачем та керованого інвертором може становити основну особливість і проблему математичного моделювання електроприводу з *BLDC* двигуном, що потребує подальшого розвинення;

– структурне уявлення електроприводу на основі *BLDC* двигуна (рис. 4), з урахуванням прийнятих припущень та спрощень, дозволяє реалізувати, наприклад, засобами *MatLab/Simulink*, його математичну модель і подальший синтез контролерів струму та швидкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Volyanska Ya., Volyanskiy S., Onishchenko O. Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle / Ya. Volyanska, S. Volyanskiy, O. Onishchenko // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2017. – № 4. – P. 26-33.

2. Jeon H., Hur J., Yoon K. Control Method for Performance Improvement of BLDC Motor used for Propulsion of Electric Propulsion Ship / H. Jeon, J. Hur, K. Yoon // Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety. The Korean Society of Marine Environment and Safety. – 2019. – Vol. 25. – Issue 6. – P. 802-808. – Режим доступу : <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.6.802>

3. Jeon H. M., Kim S. W., Kim J. S. Comparative analysis for selection of electric propulsion motors for small-sized ships with DC distribution / H. M. Jeon, S. W. Kim, J. S. Kim // Journal of the Korean Society of Marine Engineering. The Korean Society of Marine Environment and Safety. – 2018. – Vol. 42. – № 10. – P. 836-842. – Режим доступу : <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.10.836>

4. Ho-Yong Choi. Design of permanent Synchronous Motor for Ship Propulsion / Choi Ho-Yong // Proc. of International Conference on Electrical Machines and Systems «ICEMS-2009». – 2009. – Vol. 1. – P. 209-223.

5. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives / R. Krishnan // Mechanical Engineering, Marcel Dekker, CRC Press. – 2009. – 612 p. ISBN-10: 0824753844.

6. Chang-liang Xia. Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls / Xia C.-li. // Wiley. – 2012. – 304 p. ISBN-10: 1118188330.

7. Design of the Unidirectional Current Type Coreless DC Brushless Motor for Electrical Vehicle with Low Cost and High Efficiency / K. Yasuhiro, T. Amarsanaa, Y. Araki etc. // IEEE – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion «SPEEDAM-20210». – 2010. – P. 1036-1039.

8. Review of permanent magnet brushless DC motor basic drives based on analysis and simulation study / S. Niapour, G. Garjan, M. Shafier etc. // International Review of Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 9. – № 5. – P. 930-957.

9. Yoon D. Y. Control technical of DC motor / D. Y. Yoon // Ohm PRESS. – 2015. – P. 15-16.

10. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології. Монографія / [А. Букарос, Я. Волянська, С. Волянський і ін.] ; За наук. ред. В. Голікова та О. Онищенко. – Миколаїв: Ліон. – 2022. – 396 с. – Режим доступу: DOI: 10.6084/m9.figshare.20279652. ISBN 978-617-534-687-7.

11. Dwivedi A., Tiwari A. A review: Speed control of brushless DC motor / A. Dwivedi, A. Tiwari // International Journal of Bio Science and Technology. – 2013. – Vol. 1. – № 6. – P. 14-19.

12. Janpana I., Chaisricharoenb R., Boonyananta P. Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode / I. Janpana, R. Chaisricharoenb, P. Boonyananta // Proc. International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference - 2011. Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of «I-SEEC-2011». Procedia Engineering. – 2012. – № 32. – P. 279-285.

13. Xitai W., Xuexiu Z., Lifeng L., Bingshan L. Brushless DC Motor Speed Control System of the Walking Aids Machine / W. Xitai, Z. Xuexiu, L. Lifeng, L. Bingshan // IEEE – International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems «ICINIS-2009». – 2009. – P. 589-592.