

**КОМБІНОВАНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗРЕДУКТОРНИМ ДУГОСТАТОРНИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ АНТЕНИ СУДНОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ**

В.П. Стяжкін^{1*}, канд.техн.наук, **О.А. Зайченко**^{1**}, канд.техн.наук, **С.І. Гаврилюк**^{1***},
В.І. Теряєв^{2****}, канд.техн.наук

¹Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: tems@ukr.net, oleg_tems@ukr.net, serggtm@gmail.com

²НТУ України “КПІ ім. І. Сікорського”,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: kpivit@gmail.com

Проведено розрахунок і аналіз аеродинамічних навантажень суднової антени радіолокаційної станції. Отримано вираз залежності моменту на валу приводу антени від швидкості її обертання, кута повороту, швидкості і напрямку потоку вітру, на основі якого реалізовано пристрій для непрямого вимірювання величини моменту навантаження. Виконано синтез комбінованої системи автоматичного керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени радіолокаційної станції, основний канал якої діє за принципом керування по відхиленню і має замкнутий контур регулювання швидкості, а другий канал – за принципом керування по збуренню (моменту навантаження) і має розімкнутий контур. Проведені дослідження, підтвердили ефективність комбінованого керування. Використання коригуючого зв'язку по збуренню дає змогу компенсувати вплив моменту навантаження на задане значення вихідної швидкості обертання антени. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: суднова антена радіолокаційної станції, безредукторний дугостаторний електропривод, комбінована система автоматичного керування, компенсація збурень, синтез, дослідження.

Вступ. Суднова навігаційна радіолокаційна станція (РЛС) призначена для визначення місця розташування судна і забезпечення безпеки плавання судна у будь-якій точці акваторії світового океану за будь-яких погодних умов. До навігаційних РЛС, як і до всього радіоелектронного обладнання судна, пред'являються високі вимоги по надійності і довговічності роботи. Основою РЛС є антена, обертання якої здійснюється за допомогою електроприводу. Тому від того, як спроектований електропривод і синтезована система керування, будуть залежати технічні характеристики РЛС.

Багато сучасних робіт присвячено системам електроприводів, які здатні ефективно працювати на малих швидкостях, та можуть бути застосовані для антен РЛС [1-4]. Ведуться дослідження по реалізації установок РЛС на основі вентильних електроприводів, сервоприводів, а також асинхронних електроприводів з частотним і векторним керуванням [5-7]. Крім того, розробляються нові системи автоматичного керування задля покращення характеристик електроприводів навігаційних систем, що забезпечують тримання заданого курсу судна [8, 9], які подібні до систем керування антенами РЛС. Незважаючи на високі показники якості, більшість з цих технічних рішень складно застосувати для суднових антен, що вже знаходяться в експлуатації. В даній роботі розглядається можливість модернізації існуючого електроприводу суднової РЛС “МІУС”.

Одним з видів безредукторних електроприводів є дугостаторний. В [10] показано доцільність використання безредукторного дугостаторного електроприводу на прикладі навігаційної РЛС типу «МІУС», причому заміна серійного редукторного електроприводу на дугостаторний, незважаючи на його недоліки, призводить до підвищення надійності і довговічності силової частини приводу. Завдяки цій якості безредукторний електропривод може застосовуватися також і в інших електротехнічних комплексах, наприклад, у приводі ротора електромагнітного сепаратора [11].

До безредукторних електроприводів антени, крім високої надійності і тривалого періоду безаварійної роботи, пред'являються технічні вимоги, виконання яких забезпечується безпосередньо системою керування, а саме: регулювання робочої швидкості обертання антени з максимальною точніс-

то та швидкодією в умовах зміни навантажувального моменту на валу внаслідок впливу вітрового потоку. Система керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени, запропонована в [10], не враховує цього фактору, а її швидкодія не перевищує 0,8 с. Тому необхідно синтезувати систему автоматичного керування безредукторним електроприводом РЛС, яка забезпечує максимальну швидкодію керування по основному каналу системи (швидкості обертання антени), а також компенсує вплив збурення, що виникає внаслідок вітрового навантаження.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення якості статичних та динамічних режимів роботи безредукторного дугостаторного електроприводу суднової антени РЛС шляхом використання керування за відхиленням та збуренням з непрямым вимірюванням моменту вітрового навантаження.

Поставлена мета може бути реалізована застосуванням комбінованого керування електроприводом антени. Перший (основний) канал системи діє за принципом керування за відхиленням вихідної величини (швидкості обертання антени) і має замкнутий контур швидкості, другий канал діє за принципом керування по збуренню (моменту навантаження) і має розімкнутий контур. Під час побудови першого каналу формується замкнутий контур швидкості обертання антени і синтезується регулятор з налаштуванням на технічний оптимум. Задля побудови другого каналу необхідно провести аналіз і розрахунок аеродинамічних навантажень антени, тобто встановити залежність моменту навантаження на валу приводу від кута повороту та швидкості обертання антени, а також від швидкості і напрямку повітряного потоку (що дасть можливість технічно реалізувати пристрій непрямого вимірювання моменту навантаження), а також провести синтез коригуючої ланки задля компенсації змін навантаження.

Розрахунок та аналіз аеродинамічних навантажень антени РЛС. Розрахунок проводиться на прикладі антени РЛС типу «МІУС», максимальна робоча швидкість обертання якої $\omega=18$ об/хв. Електропривод антени РЛС повинен забезпечити рівномірне обертання антени за поривів вітру до 50 м/с.

Антену РЛС типу «МІУС» має відкрите виконання, тому основну частину навантажень складають аеродинамічні зусилля, що виникають через парусність антени за її обертання під впливом вітру.

Аеродинамічний момент, діючий на вісь антени, формується внаслідок впливу повітряного потоку (вітрового навантаження) і визначається із відомого виразу [12]

$$M_{ad} = m \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot H \cdot L^2, \quad (1)$$

де $\rho=1.32$ кг/м³ – густина повітря; $L = 2300$ мм, $H = 115$ мм, $l = 170$ мм, $h = 45$ мм – габаритні розміри антени; V – швидкість повітряного потоку, m – коефіцієнт аеродинамічного моменту.

Коефіцієнт аеродинамічного моменту є функцією кута повороту антени β , який можна визначити як суму статичної (m_s) та динамічної (m_d) складових

$$m = k \cdot (m_s + m_d), \quad (2)$$

де $k=1.2$ – емпіричний коефіцієнт, що характеризує вплив кронштейна на аеродинамічний опір антени.

Статична і динамічна складові аеродинамічного моменту визначаються:

$$m_s = \lambda n \cdot \lambda^{-1} \cdot \sin 2\beta, \quad (3)$$

$$m_d = \frac{1}{3} \cdot Sn \cdot \cos \beta \cdot Cn \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \cdot k' \cdot \lambda\right), \quad (4)$$

де $\lambda n = S/H^2 = 0.998$ – зведене подовження профілю, $S = 0.0132$ м² – поперечний переріз профілю, $\lambda = L/H = 20$ – подовження профілю, $Sn = (\omega L)/(2V)$ – число Струхала, $Cn = 1.2$ і $k' = 0.04$ – коефіцієнти із таблиць (ОСТ 5.8285-73) відповідно геометричним розмірам даної антени.

Сумарний момент навантаження на валу приводу складається з аеродинамічного моменту вітрового потоку і моменту опору руху самої антени

$$M_L = M_{ad} + M_{an}, \quad (5)$$

$$M_{an} = \mu \cdot \omega^2, \quad (6)$$

де $\mu = 1.5$ Нмс² – коефіцієнт пропорційності, який визначається геометричними розмірами антени.

Підставивши вирази (3) і (4) в (2) та враховуючи вираз (6), сумарний момент навантаження на валу приводу

$$M_L = k \cdot \left(\frac{\lambda n}{\lambda} \cdot \sin 2\beta + \frac{1}{3} \cdot Sn \cdot \cos \beta \cdot Cn \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \cdot k' \cdot \lambda\right) \right) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot H \cdot L^2 + \mu \cdot \omega^2. \quad (7)$$

Перетворимо вираз (7) відносно змінних β , V , ω

$$M_L = a \cdot \sin 2\beta \cdot V^2 + b \cdot \cos \beta \cdot \omega \cdot V + \mu \cdot \omega^2, \quad (8)$$

де a та b постійні коефіцієнти:

$$a = k \cdot \frac{\rho \cdot H \cdot L^2}{2} \cdot \frac{\lambda n}{\lambda}, \quad b = k \cdot \frac{\rho \cdot H \cdot L^2}{6} \cdot Cn \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \cdot k' \cdot \lambda\right). \quad (9)$$

Таким чином, вираз (8) представляє собою функціональну залежність моменту навантаження на валу приводу антени від трьох змінних: кута повороту антени β , швидкості повітряного потоку V і кутової швидкості обертання антени ω .

Максимальне значення моменту навантаження на електропривод антени становить 84 Нм за швидкості вітру 50 м/с, тому електропривод повинен бути розрахований на подолання цієї величини навантажувального моменту. Таким чином, для приводу антени РЛС "МІУС" проведено розрахунок дугостаторного двигуна з наступними характеристиками: $P_n=2$ кВт – номінальна потужність; $\omega_n=1.9$ с⁻¹ – номінальна швидкість обертання; $M_n=84$ Нм – номінальний навантажувальний момент; $p=12$ – кількість пар полюсів; $\theta=0.2$ – відносний центральний кут.

Отриманий вираз (8) залежності моменту аеродинамічного опору від швидкості вітру, швидкості обертання антени і кута повороту дає змогу непрямим шляхом визначити навантажувальний момент електроприводу M_L і реалізувати компенсуючий зв'язок по збуренню. Вихідними даними для реалізації такого зв'язку є сигнали, пропорційні швидкості обертання ω та кутового положення антени α (від датчиків, встановлених на валу антени), а також сигнали, пропорційні швидкості V та напрямку вітрового потоку φ (від анемометра та пристрою вимірювання напрямку вітру, встановлених на борту судна). Вказані сигнали передаються з бортової навігаційної системи судна.

Використання регульованого електроприводу потребує оцінювання значень його координат в процесі роботи. Деякі з цих координат неможливо або нераціонально визначати за допомогою датчиків. Тому науковий і практичний інтерес представляє застосування в системах керування електроприводами спостерігачів. Їх доцільно використовувати для оцінки швидкості двигуна і виконавчого органу, моментів двигуна та навантаження, а також пружних моментів. Відомі різні варіанти побудови спостерігачів, але у всіх випадках вони базуються на моделі об'єкта спостереження. Від результатів ідентифікації цієї моделі істотно залежить робота спостерігача і системи керування в цілому.

Непряме вимірювання координат забезпечує нові можливості електропривода і, в той же час, покращує надійність та підтримує високий рівень його характеристик без збільшення вартісних і масогабаритних показників. Функціональну схему технічної реалізації пристрою задля непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС згідно рівняння (8) наведено на рис. 1, де показана антена, встановлена на одному валу з ротором дугостаторного двигуна, та ротор, виконаний у вигляді диска, що обертається аналогічно короткозамкненому ротору в асинхронному двигуні. Також показано індуктори, в яких розміщені обмотки та які представляють собою статор двигуна, датчики кутової швидкості і положення антени та пристрій вимірювання швидкості і напрямку вітру. Безпосередньо сам пристрій непрямого вимірювання моменту показаний у вигляді структурної схеми, на

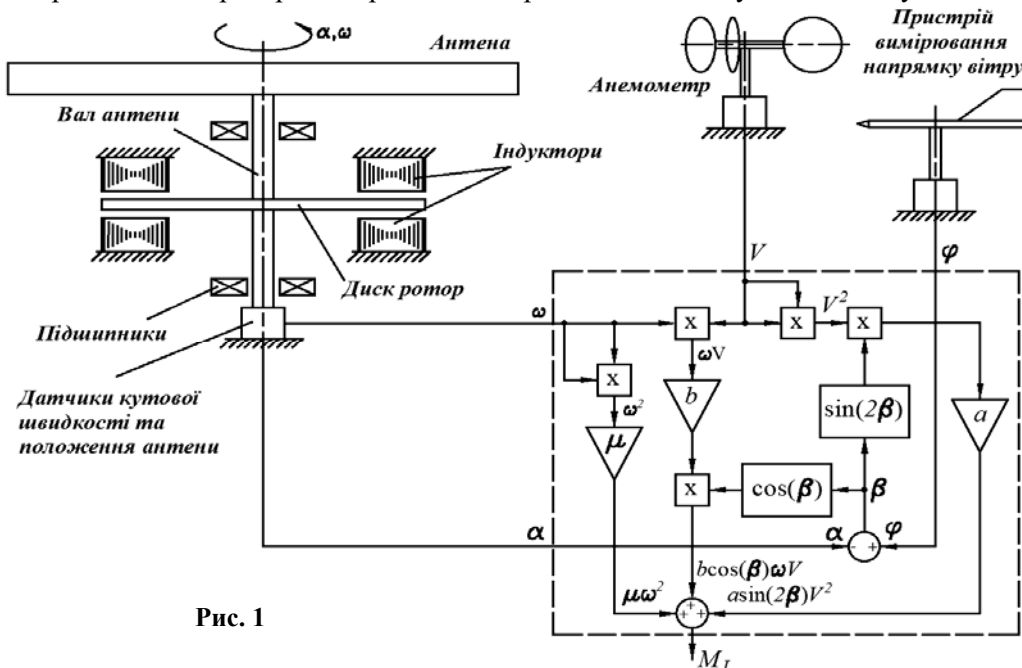


Рис. 1

яку заведено всі необхідні для розрахунку значення моменту сигнали з датчиків.

Синтез комбінованої системи автоматичного керування. На рис. 2 наведено структурну схему комбінованої системи автоматичного керування електроприводом антени РЛС. На схемі позначені: РШ – регулятор швидкості; ПЧ – перетворювач

частоти; ДД – дугостаторний двигун; ЕМС – електромеханічна система; W_{sr} – передаточна функція регулятора швидкості; W_k – коригуюча ланка. У структурній схемі дугостаторний двигун представлений спрощено з допущенням того, що робота двигуна здійснюється на лінеаризованій ділянці механічної характеристики. Система керування має два канали: один замкнений, який діє за принципом керування за відхиленням швидкості обертання антени ω від заданого значення ω_{ctr} , і другий розімкнутий, що діє за принципом керування по збуренню (моменту навантаження на валу приводу M_L).

На рис. 2 також позначені параметри системи: K_c , T_c – коефіцієнт підсилення та стала часу перетворювача частоти; K_m , T_e , b – коефіцієнт передачі, електромагнітна стала часу і жорсткість механічної характеристики дугостаторного двигуна; T_m – електромеханічна стала часу приводу антени. Числові значення параметрів системи складають: $K_c = f_c / u_c = 5$ Гц/В, де $f_c = 50$ Гц – частота перетворювача, $u_c = 10$ В – напруга завдання перетворювача; $T_c = 0.001$ с – для транзисторного перетворювача частоти; $K_m = 2\pi\theta/p = 0.105$; $T_e = 1/\omega_{0e}s_k = 0.0032$ с, де $\omega_{0e} = 2\pi f = 314.16$ с⁻¹ – кутова частота мережі, $s_k = 1$ – типове значення критичного ковзання дугостаторних двигунів; $b = M_n/(\omega_0 - \omega_n) = 25.18$ Нмс, де $\omega_0 = 2\pi f\theta/p = 5.2$ с⁻¹ – кутова швидкість холостого ходу; $T_m = 0.15$ с.

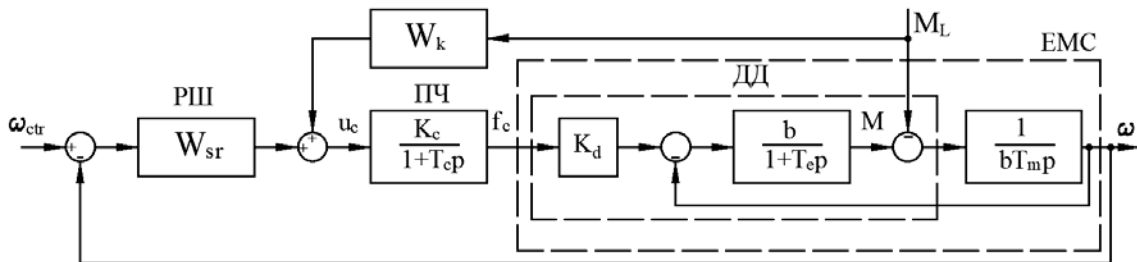


Рис. 2

Канал керування по збуренню повинен компенсувати вплив моменту навантаження на валу приводу M_L на швидкість обертання антени РЛС, яка є головною регульованою координатою. Звідси передаточна функція коригуючої ланки

$$W_k = (W_c \cdot W_m)^{-1}, \quad (11)$$

де $W_c = K_c / (1 + T_c p)$, $W_m = K_m b / (1 + T_e p)$ – передаточні функції перетворювача частоти і дугостаторного двигуна, відповідно. Нехтуючи малим значенням сталої часу перетворювача частоти T_c , силова частина якого побудована на IGBT транзисторах, отримуємо передаточну функцію коригуючої пропорційно диференціальної ланки

$$W_k = (K_c \cdot K_m \cdot b)^{-1} + T_e \cdot (K_c \cdot K_m \cdot b)^{-1} \cdot p. \quad (12)$$

Результати досліджень. На рис. 3 наведено структурну схему імітаційної моделі системи автоматичного керування дугостаторним електроприводом антени РЛС з коригувальною ланкою і без неї, складену задля проведення досліджень в пакеті *MATLAB SIMULINK*. Всі елементи схеми імітаційної моделі відповідають елементам структурної схеми математичної моделі та позначені: PI –

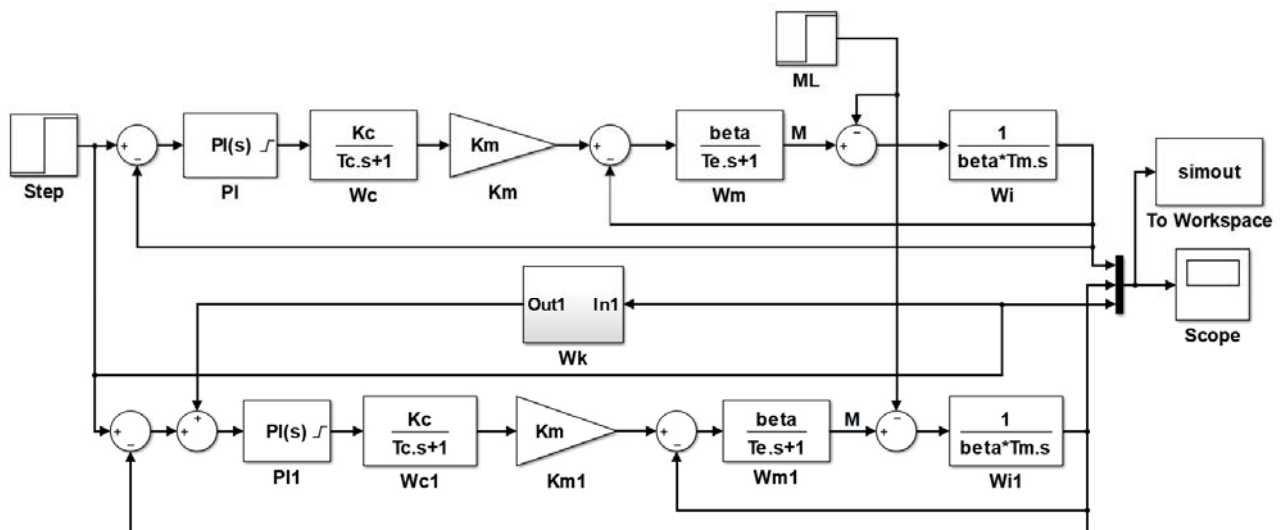


Рис. 3

пропорційно-інтегральний регулятор швидкості; W_c – перетворювач частоти; K_m – коефіцієнт підсилення двигуна; W_m – передаточна ланка двигуна; W_i – передаточна ланка антени; W_k – коригуюча ланка; ML – блок імітації моменту навантаження; $Step$ – блок імітації завдання швидкості; $Saturation$ – блок обмеження сигналу завдання перетворювача частоти.

У блоці *PID Controller* виконано налаштування пропорційно-інтегрального регулятора швидкості обертання антени на технічний оптимум. На прогнозованій кривій перехідного процесу задаємо максимально можливий час перехідного процесу так, щоб величина перерегулювання по швидкості не перевищувала 5%, та отримуємо значення коефіцієнтів пропорційно-інтегрального регулятора: $K_p=4.96$, $K_i=49.87$.

На рис. 4 представлено результати моделювання – криві пуску електроприводу антени без навантаження з подальшим накиданням моменту навантаження величиною в 25 Нм (а) і 84 Нм (б) на 0.6 с та зняття моменту навантаження на 1.1 с, з урахуванням обмеження сигналів регулятора і коригуючої ланки ± 10 В. Крива 2 відповідає системі без коригуючої ланки, крива 3 – системі з коригуючою ланкою, 1 – задане значення швидкості.

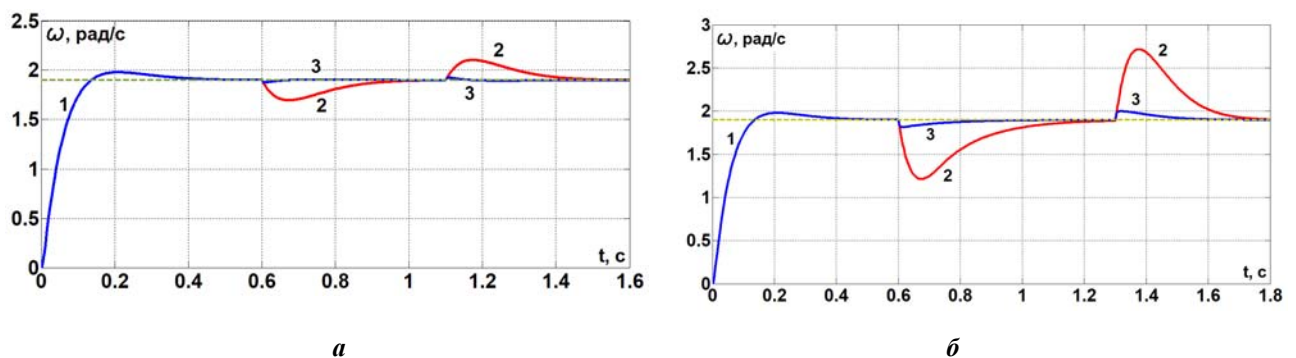


Рис. 4

За результатами моделювання можна зробити наступні висновки:

- величина перерегулювання по швидкості обертання антени не перевищує 5%, при цьому швидкодія системи (час першого досягнення усталеного значення) становить 0.13 с, що у 6 разів більше ніж у існуючої системи (з 0.8 с до 0.13 с);
- динамічна похибка при накиданні навантаження у системі з корекцією в середньому зменшилася у 8 разів, причому у разі відпрацювання завдання ефект від введення коригувального зв'язку більшою мірою виявляється за малих навантажень, і становить 1.2 % при накиданні моменту навантаження 25 Нм;
- навіть при накиданні максимального моменту навантаження 84 Нм, який може виникнути під час сильного пориву вітру до 50 км/год, величина динамічного падіння швидкості в системі з корекцією не перевищує 5 %, при цьому час відновлення швидкості зменшується майже у 2 рази.

Таким чином, комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом суднової антени РЛС дає змогу більш ніж у 5 разів збільшити швидкодію у порівнянні з існуючою системою електропривода та компенсувати зміну вітрового навантаження.

Висновки.

1. В результаті проведеного аналізу аеродинамічних навантажень на прикладі антени РЛС типу «МІУС» отримано вираз для моменту вітрового навантаження, який дає змогу обчислювати його миттєве значення в залежності від швидкості вітрового потоку, кута повороту і швидкості обертання антени, що дає можливість практичної реалізації коригуючої ланки і побудови комбінованого керування електроприводом антени.

2. Проведене моделювання показало ефективність комбінованого керування: коригувальний канал дає змогу підвищити швидкодію системи електроприводу і скомпенсувати вплив аеродинамічного моменту на швидкість обертання антени РЛС.

3. Запропонований метод непрямого вимірювання вітрового навантаження може бути також застосований для будь-яких інших безредукторних та редукторних систем електроприводу антен РЛС, наприклад, із синхронним двигуном з постійними магнітами, вентильним та іншими двигунами.

Роботу виконано за державної науково дослідної роботи “ІНТЕХЕН-2” (Електромеханічні системи з електричними машинами і напівпровідниковими перетворювачами підвищеної ефективності), державний реєстраційний номер 0120U002125 (КПКВК 6541230).

1. Kalinkin D.Yu., Stolyarova O.O. Permanent magnet converter-fed motor for ship radar. IEEE, 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Novosibirsk, Russia. June 30 - July 4, 2014. Pp. 436-439. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2014.6882566>
2. Rashed. M, MacConnell P., Stronch A., Acarnley P. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54. No 3. Pp. 1664-1675. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.895136>
3. Ehsan Al-Nabi. Sensorless current source-fed PM drive system for low speed operations. Ryerson University, Canada. 2013. 172 p.
4. Iohimovich A.D., Korovin A.V., Pankratov V.V. The development of the direct electric drive system of a radar station antenna. IEEE, 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Novosibirsk, Russia. July 1-5, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1109/EDM.2013.6642000>
5. Jinpin Kong, Zhengfeng Xu, Boatao Wu. Research on predicting current of shipborne satcom antenna. *MATEC Web of Conferences*. Xiamen, China. May 29-30, 2015. Vol. 22. Pp. 1-6 (02028). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152202028>
6. Душинова Е.В., Потапенко Е.М., Деев С.Г., Шибалкин О.Е., Шийка А.А. Электропривод поворота антенны радиолокационной станции. *Электротехника и электроэнергетика*. 2011. № 1. С. 25-35. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2011-1-4>
7. Стяжкін В.П., Теряєв В.І, Гаврилюк С.І. Застосування методів частотного керування для дугостаторних електроприводів антен суднових навігаційних РЛС. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силовa електроніка та енергоефективність*. 2017. № 27(1249). С. 411-414. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34122> (дата звернення 15.01.2020)
8. Волянська Я.Б., Голюков В.В., Мазур О.М., Онищенко О.А., Шевченко В.А. Система стабілізації курсу морського судна, частково-інваріантна до вітро-хвильових навантажень. *Автоматизація технологічних і бізнес процесів*. 2019. Т. 10. № 2. С. 57-63. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.980>
9. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*. 2010. Vol. 20. No 2. Pp. 271-280. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10006-010-0020-8>
10. Стяжкін В.П., Гаврилюк С.І. Автоматизована система керування безредукторними електроприводами навігаційної суднової РЛС. *Електроніка та зв'язок*. 2016. № 4. С. 20-23. DOI: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.4.81914>
11. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.І. Безредукторний електропривод ротора електромагнітного сепаратора. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2019. № 31(107). С. 11-18. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.1>
12. Волков И.В., Стяжкин В.П., Милько Р.Э., Доманский Г.В. Безредукторная электромеханическая система с дугостаторным электроприводом для радиолокационной станции. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. № 3(79). С. 248-252.

УДК 621.317:621.313.3

КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ДУГОСТАТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АНТЕННЫ СУДОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

В.П. Стяжкин¹, канд.техн.наук, О.А. Зайченко¹, канд.техн.наук, С.И. Гаврилюк¹,
В.И. Теряев², канд.техн.наук

¹ Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,
e-mail: tems@ukr.net, oleg_tems@ukr.net, serggtm@gmail.com

² НТУ Украины «КПИ им. Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: kpivit@gmail.com

Проведен расчет и анализ аэродинамических нагрузок судовой антенны радиолокационной станции. Получено выражение зависимости момента на валу привода антенны от скорости её вращения, угла поворота, скорости и направления потока ветра, на основе которого реализовано устройство для косвенного измерения величины момента нагрузки. Проведён синтез комбинированной системы автоматического управления безредукторным дугостаторным электроприводом антенны радиолокационной станции, основной канал которой действует по принципу управления по отклонению и имеет замкнутый контур регулирования скорости, а второй канал - по принципу управления по возмущению (моменту нагрузки) и имеет разомкнутый контур. Проведенные исследования, подтвердили эффективность комбинированного управления. Использование корректирующей связи по возмущению позволяет компенсировать влияние момента нагрузки на заданное значение выходной скорости вращения антенны. Библиограф. 12, рис. 4.

Ключевые слова: судовая антенна радиолокационной станции, безредукторный дугостаторный электропривод, комбинированная система автоматического управления, компенсация возмущений, синтез, исследование.

COMBINED CONTROL OF GEARLESS ARC-CORE ELECTRIC DRIVE OF A SHIP RADAR ANTENNA

V.P. Stiazhkin¹, O.A. Zaichenko¹, S.I. Gavryluk¹, V.I. Teriaiev²

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: tems@ukr.net, oleg_tems@ukr.net, serggtm@gmail.com

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, E-mail: kpivit@gmail.com

The calculation and analysis of the aerodynamic loads of the ship's antenna radar station are carried out. An expression is obtained of the dependence of the torque on the shaft of the antenna drive on its rotation speed, rotation angle, speed and direction of wind flow, on the basis of which a device is implemented for indirect measurement of the load torque. Has been synthesized a combined automatic control system for a gearless arc-core electric drive of the radar station antenna, the main channel of which operates according to the deviation control principle with a closed speed control loop, and the second channel, which operates according to the disturbance control principle (load torque) and has an open loop. Studies had confirmed the effectiveness of combined control, the use of corrective loop allows compensate the load effect on a given value of the speed of the antenna. References 12, figures 4.

Key words: ship radar antenna, gearless arc-core electric drive, combined automatic control system, disturbance compensation, synthesis, research.

1. Kalinkin D.Yu., Stolyarova O.O. Permanent magnet converter-fed motor for ship radar. IEEE, 15th International Conference of *Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Novosibirsk, Russia. June 30 – July 4, 2014. Pp. 436-439. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2014.6882566>

2. Rashed. M, MacConnell P., Stronch A., Acarnley P. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54. No 3. Pp. 1664-1675. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.895136>

3. Ehsan Al-Nabi. Sensorless current source-fed PM drive system for low speed operations. Ryerson University, Canada. 2013. 172 p.

4. Iohimovich A.D., Korovin A.V., Pankratov V.V. The development of the direct electric drive system of a radar station antenna. IEEE, 14th International Conference of *Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Novosibirsk, Russia. July 1-5, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2013.6642000>

5. Jinpin Kong, Zhengfeng Xu, Boatao Wu. Research on predicting current of shipborne satcom antenna. *MATEC Web of Conferences*. Xiamen, China. May 29-30, 2015. Vol. 22. Pp. 1-6(02028). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152202028>

6. Dushinova E.V., Potapenko E.M., Deev S.G., Shibalkin O.E., Shijka A.A. Radar antenna rotation electric drive. *Elektrotehnika i elektroenergetika*. 2011. No 1. Pp. 25-35. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2011-1-4>

7. Stiazhkin V.P., Teriaiev V.I., Gavryluk S.I. Application of frequency control methods for arc core ship's navigation radar antennas. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "Kharkivsky Polytekhnychny Instytut". Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist*. 2017. No 27(1249). Pp. 411-414. (Ukr) URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34122> (accessed at 15.01.2020)

8. Volianska Ya.B., Golikov V.V., Mazur O.M., Onischenko O.A., Shevchenko V.A. The system of stabilization of the ship's course, that are partially invariant to the wind-wave loads. *Avtomatizatsia tekhnologichnyh i biznes protsesiv*. 2019. Vol. 10. No 2. Pp. 57-63. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.980>

9. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*. 2010. Vol. 20. No 2. Pp. 271-280. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10006-010-0020-8>

10. Stiazhkin V.P., Gavryluk S.I. Automated control system of the gearless electro drives for navigational ship radar. *Elektronika ta zviyazok*. 2016. No 4. Pp. 20-23. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.4.81914>

11. Stiazhkin V.P., Zaichenko O.A., Gavryluk S.I. Gearless electric drive of rotor of electromagnetic separator. *Elektrotehnichni ta komputerni systemy*. 2019. No 31(107). Pp. 11-18. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.31.107.2019.1>

12. Volkov I.V., Stiazhkin V.P., Milko R.E., Domanski G.V. Gearless electromechanical system with air core electro drive for radar antenna. *Elektrotehnichni ta komputerni systemy*. 2011. No 3(79). Pp. 248-252. (Rus)

Надійшла 24.02.2020

Остаточний варіант 20.08.2020