

УДК 621.314.572 : 621.313.33

Б.Т. Кононов¹, Б.Г. Любарський², Н.М. Куравська¹¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДА АНТЕНИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

В статті запропонована імітаційна модель асинхронного двигуна за допомогою функціональної схеми, що дозволяє дослідити та аналізувати особливості роботи електропривода антени радіолокаційної станції.

Ключові слова: імітаційна модель асинхронного двигуна, частотно-управляємий електропривод, дуго-статорний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

Вступ

В Повітряних Силах Збройних Сил України використовуються радіолокаційні комплекси і станції, що розрізняються за характером задач, які виконуються в бойовому режимі, черговому режимі і в режимах спеціального призначення. Частота обертання антени при використанні рядкового, лінійного або спірального методів огляду повітряного простору повинна бути різною. При створенні частотно-управляемого електропривода антен радіолокаційних станцій (РЛС) одною із важливих науково – технічних задач, які виникають при проектуванні, є визначення динамічних та статичних характеристик електроприводів. Для вирішення цієї задачі доцільно провести моделювання роботи приводу за допомогою імітаційної моделі.

Аналіз літератури. В [1] обґрунтовані шляхи використання метода фізичного моделювання при дослідженні явищ, що відбуваються в процесі роботи електричних машин. Запропоновані в [1] підходи дозволяють при проведенні експериментальних досліджень відпрацьовувати варіанти нових конструкцій та нових рішень електричних машин. Створювати для експериментального дослідження потужні дослідні зразки електричних машин та за їх допомогою знаходити основні закономірності це марна трата коштів і часу, оскільки ця задача вирішується методами фізичного моделювання значно скоріше та з кращим ефектом. Використовуючи методи теорії подібності і створюючи на їх основі імітаційної моделі електричних машин, можливо дослідити параметри й окремі характеристики оригінальних конструкцій електричних машин нових типів.

При розробці імітаційної моделі електропривода антен РЛС доцільно максимально наблизити цю модель до моделі двигуна постійного струму, що дає змогу використовувати відомі методи управління такими двигунами для стабілізації частоти обертання електроприводу змінного струму. Під час створення імітаційної моделі приводу слід намагатися розробити таку його конструкцію, яка б не вимагала

використання редуктора для отримання необхідних для роботи антени інфранизьких частот обертання.

Мета статті полягає в обґрунтуванні імітаційної моделі електроприводу та її дослідженні. Імітаційна математична модель асинхронного двигуна розроблена в системі координат d, q з використанням адаптивних алгоритмів управління.

Основний матеріал

При визначенні вимог [2] до системи обертання антени РЛС встановлено, що частота обертання антени залежить від багатьох чинників та в ідеальному варіанті повинна бути змінною й дозволяти забезпечувати отримання необхідного мінімального часу між двома оглядами цілі й дозволяти знаходження координат цілей (азимут, кут місця і дальність) з вимагаємою точністю. Необхідно відмітити, що на малих висотах можливості за знаходженням цілей обмежені дальністю прямої видимості. Координати і параметри руху цілей, що вимірюють РЛС виявлення, служать вихідними даними для рішення задач розподілення цілей між РЛС управління стрільбою і видачі вказівок пунктом управління. Кількість імпульсів, що отримуються від цілі, повинна бути достатньою для здійснення селекції цілей. Так, при частоті повторення імпульсів $f_r = 250$ Гц, кількість імпульсів, приймаємих від цілі за один огляд простору $N_{\min} = 17$, та ширині кута променя $\theta_p = 2^\circ$, швидкість обертання антени ω_d повинна дорівнювати 5 об/хв. При цьому в разі використання звичайного двигуна з кількістю пар полюсів $p = 2$, потрібно мати редуктор, який в 300 разів знижує швидкість.

Для отримання потрібних значень швидкості обертання антен радіолокаційних станцій, частіше за все, приводний асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором об'єднують з механічною передачею (редуктором).

Використання механічної передачі, яку іноді називають контактним приводом, приводить до значного зносу вала, фрикційних муфт та підшипників. Тому для підвищення надійності системи обертання антени слід використовувати безредукторний привід

та для отримання потрібних частот обертання живити електричний двигун напругою інфранизької частоти, яку можна отримати, використовуючи перетворювач частоти, створений на базі ланки випрямляч – інвертор. Звичайний високо надійний асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором в разі його живлення напругою інфранизької частоти не спроможний розвивати потрібні моменти обертання й приводити в рух антену особливо при дії значних вітрових навантажень.

Разом з тим, у асинхронного двигуна є можливість отримання малих значень кутових частот обертання, потрібних, наприклад, для приводу антен радіолокаційних станцій, якщо виконати статор не круговим, а дуговим. Уявлення про дуговий статор можливо отримати, слідуючи [2], якщо умовно розімкнути круговий статор й розвернути його в дугу, довжина якої дорівнює довжині кола круглого статора.

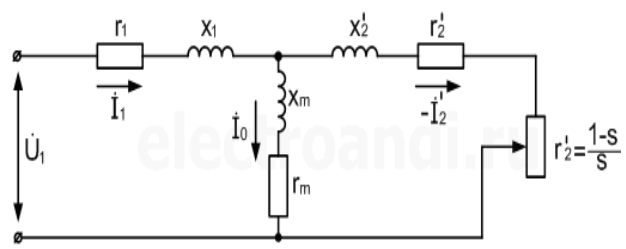
Для підвищення коефіцієнта корисної дії двигуна з дуговим статором можливо використовувати короткозамкнене кільце на вході і виході активної зони статора, яке виконане з феромагнітного матеріалу, що має довжину, яка дорівнює полюсному діленню статора.

Для з'ясування особливостей роботи приводу розглянемо, як може бути здійснено пряме управління моментом. Для цього будемо використовувати схеми заміщення асинхронного двигуна, показані на рис. 1, в якій позначені активні та реактивні опори статорного та роторного кіл, а саме r_1 та x_1 активний та індуктивний опір кола статора; r_2', x_2' , $r_{\mu 0}'$, $x_{\mu 0}'$ – приведені активний та реактивний опір кола ротора, активний та реактивний опір намагнічування.

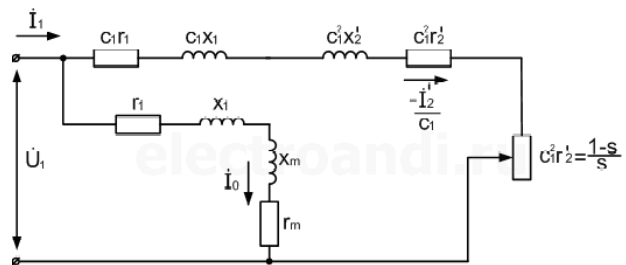
В схемі заміщення електромагнітний зв'язок замінений на електричний. При цьому параметри кола ротора приводяться до параметрів кола статора. По суті, схема заміщення асинхронного двигуна аналогічна схемі заміщення трансформатора. Відмінність в тому, що у асинхронного двигуна електрична енергія перетворюється в механічну енергію (а не в електричну, як це відбувається в трансформаторі), тому в схемі заміщення використовують змінний активний опір $r_2'(1-s)/s$, який залежить від ковзання s . В трансформаторі, аналогом цього опору є опір навантаження Z_n .

Величина ковзання визначає змінний опір, наприклад, при відсутності навантаження на валу, ковзання практично дорівнює нулю $s \approx 0$, а значить змінний опір дорівнює нескінченності, що відповідає режиму неробочого ходу. І навпаки, при перевантаженні двигуна $s=1$, а значить опір дорівнює нулю, що відповідає режиму короткого замикання.

В імітаційній моделі досліджується режим пуску асинхронного електродвигуна, режим неробочого ходу та робота під навантаженням.



а – Т-подібна схема заміщення



б – Г-подібна схема заміщення

Рис. 1. Схеми заміщення асинхронного двигуна

З двох можливих схем заміщення більш зручною є Г-подібна схема заміщення. В Г-подібній схемі гілка, що намагнічує, винесена до вхідних затискачів. Для отримання параметрів схеми заміщення необхідно розрахувати дані, які зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові дані

№ п/п	Параметри	Розрахункові формули
1	2	3
I. Розрахунок статора		
1	Внутрішній діаметр статора	$D = k_D D_b$
2	Полюсне ділення	$D = \pi D / (2p)$
3	Розрахункова потужність	$P' = P \cdot k_E / (\eta \cos \varphi)$
4	Розрахункова довжина магнітопровода	$\ell_\delta = \frac{P'}{k_B D^2 \Omega k_{об1} AB_\delta}$
5	Кількість пазів статора	$z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{z1min}} ; z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{z1max}}$
6	Кількість ефективних провідників в пазу	$z_{1min} = \pi D A / (t_{ном} Z_1)$
7	Кількість витків в фазі	$w_1 = u_n Z_1 / (2am)$
8	Лінійне навантаження	$A = 2 I_{ном} w_1 m / (\pi D)$
9	Магнітний потік	$\Phi = k_E U_{ном} / (4k_B w_1 k_{об1} f_1)$
10	Індукція в повітряному проміжку	$\Phi = F\Phi / (D \ell_\delta)$
11	Щільність струму в обмотці статора	$J = A j_1 / A$
12	Розміри паза в штампі	$h_{ш} = (D_a - D) / 2 - h_a$
13	Коефіцієнт заповнення паза	$k_3 = d_{из} U_{из} n / S'_n$
II. Розрахунок ротора		
1	Зовнішній діаметр ротора	$D_2 = D - 2\delta$
2	Зубове ділення ротора	$\ell_{z2} = \pi D_2 / z_2$

Закінчення табл. 1

1	2	3
3	Внутрішній діаметр ротора	$D_1 = k_B D_B$
4	Струм в обмотці ротора	$I_2 = kI_0$
5	Полюсне ділення	$\ell_{z_2} = \pi D_2 / z_2$
6	Розрахункова довжина статора	$l_\delta = \frac{6,1S}{a_3 k_3 k_{обі} AB_{ном} D^2 n_{ном}}$
7	Дійсна довжина статора	$l_1 = 1,05l_\delta$
8	Ширина пазу	$b_{z_1} = 0,39l_{z_1}$
9	Повітряний зазор	$\delta = 0,285 \frac{A}{B_\delta} \frac{\tau}{x_\delta} 10^{-4}$
10	Магнітний потік в зазорі	$\Phi = \frac{E_1}{4kj\omega k_{обі}}$
11	Середня довжина витка в обмотці статора	$l_{ср1} = 2(l_1 + l_\delta)$

Для виконання розрахунків, потрібних для заповнення табл. 1, будемо виходити з тактико – технічних вимог до електроприводу антени РЛС, що задаються при її проектуванні. Відповідні дані наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Тактико-технічні вимоги до електроприводу РЛС

Паспортні дані	Номинал
1	2
Момент інерції антени	11000 - 22000 кг/м ²
Максимальний аеродинамічний момент	$m = 15000 \sin\omega t$ Н/м при швидкості вітру $V = 30$ м/с
Температура навкол. середовища	$T_{навк. серед} = \pm 50^\circ C$
Частота обертання антени при швидкості вітру: $V = 30$ м/с $V = 20$ м/с $V = 15$ м/с	$3 \pm 0,6$ об/хв $6 \pm 0,6$ об/хв. $12 \pm 0,6$ об/хв
Час переходу з одної частоти на другу, не більше	60 с
Величина похибки стеження	$\pm 2^\circ$
Похибка устан. на заданий азимут	$\pm 1,5^\circ$
Динамічна похибка	$\pm 1,5^\circ$
Діапазон сектора, від	10° до 170°
Час обробки кута	9 с
Потужність приводу (при $U = 380$ В, $f = 50$ Гц;)	5 або 7 кВт
Момент інерції	11000 кг/м ²
Прийнята розр. потужність приводу	7,5 кВт
Кількість пар полюсів	1
КПД	87%
$\cos \phi$	0,91
Номинальне ковзання	3,4%
Критичне ковзання	29%
Синхронна частота	3000 об/хв
Редуктор з передаточним числом	500
Активний опір статора	0,7 Ом
Активний опір ротора	1,05 Ом
Індуктивність взаємної індукції	0,25 Гн
Індуктивність статора	0,254 Гн
Індуктивність ротора	0,254 Гн
Індуктивність розсіювання статора	0,0036 Гн

Закінчення табл. 2

1	2
Індуктивність розсіювання ротора	0,0036 Гн
Ном. фазний струм	10,47 А
Ном. момент	184 кг*м
Момент інерції ротора	$J = 0,0075$ кг*м ²
Кратність пускового струму	7,5
Кратність пускового моменту	2,0
Кратність максимального моменту	2,5.

Моделювання асинхронного двигуна будемо проводити в абсолютних одиницях. Параметри, необхідні для розрахунку в середовищі Matlab, знайдені завчасно. При створенні імітаційної моделі, крім того, враховано наступне.

Для опису процесів, які мають місце при роботі електроприводу, будемо використовувати рівняння рівноваги напруг та моментів.

На надійність, вартість і якість характеристик електропривода суттєво впливає кількість вимірювальних параметрів та точність виміру. Для частотного управління АД необхідно виміряти принаймні дві із чотирьох доступних для вимірювання змінних:

- струм статора АД;
- напругу на зажимах статора АД;
- кутову швидкість ротора АД;
- кутове положення ротора АД.

З'ясувавши вимоги до системи обертання, визначивши тип двигуна та його потужність й враховуючи, що момент інерції антени при швидкості вітру $V = 30$ м/с може становити від 11000 до 22000 кг/м², переходимо до обчислення параметрів схеми заміщення двигуна. При цьому будемо керуватися методикою, наведеною в [3]. Основні характеристики двигуна приведено в табл. 3.

Таблиця 3

Основні характеристики двигуна

Параметри	Одиниця виміру	Номинал розрахунковий
Номинальна потужність,	Вт	7000
Номін. лінійна/фазна напруга	В	380/220
Номинальний фазний струм	А	25,43
Номинальна частота обертання	об/хв	3
Кількість пар полюсів	-	45
Зовнішній діаметр статора	м	2,3
Внутрішній діаметр статора	м	1,7
Повітряний зазор	м	0,001
Внутрішній діаметр ротору	м	1,05
Довжина осердя статора	м	2
Довжина осердя ротора	м	2
Кількість пазів статора	-	540
Кількість пазів ротора	-	414
Номинальний потік	Вб	217,4
Активний опір обмотки статора	Ом	1,81
Активний приведенний опір обмотки ротора	Ом	2,528
Індукт. опір обмотки статора	Ом	3,497
Індуктивний приведенний опір обмотки ротора	Ом	0,05
Індуктивність кола навантаження	Гн	0,059

Результати розрахунків дозволяють отримати відповідні значення коефіцієнтів в рівняннях електричного двигуна. При цьому будемо розглядати дугостаторний асинхронний електричний двигун, як об'єкт регулювання частоти обертання ротора, тобто будемо враховувати не тільки електромагнітні перехідні процеси, що описуються рівняннями рівноваги напруг, отриманими і опублікованими авторами в роботі [6], але й рівняннями рівноваги моментів, що описує рух валу двигуна. Крім того, будемо вважати, що дугостаторний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором являє собою симетричну електричну машину, у якій реактивні опори по осях d та q однакові й відповідно однакові струми та потокозчеплення по цих осях. Вказані припущення дають підставу представити рівняння об'єкту регулювання в вигляді системи рівнянь 1.

$$\begin{aligned} Vq_s &= R_{si}q_s + d\phi q_s/dt + \omega\phi d_s; \\ \phi q_s &= L_{si}q_s + L_{mi}q_r; \\ Vd_s &= R_{si}d_s + d\phi d_s/dt - \omega\phi q_s; \\ \phi d_s &= L_{si}d_s + L_{mi}d_r; \\ V'q_r &= R'_{ri}q_r + d\phi'q_r/dt + (\omega - \omega_r)\phi'd_r; (1) \\ \phi'q_r &= L'_{ri}q_r + L_{mi}q_s; \\ V'd_r &= R'_{ri}d_r + d\phi'd_r/dt - (\omega - \omega_r)\phi'q_r; \\ \phi'd_r &= L'_{ri}d_r + L_{mi}d_s; \\ T_e &= 1.5p(\phi d_{si}q_s - \phi q_{si}d_s); \\ L_s &= L'_s + L_m; \\ L'_r &= L'_r + L_m. \end{aligned}$$

В рівняннях (1) індексом s позначені параметри статорного кола, індексом r – роторного кола. Літерою V позначено напруга, літерою ϕ – потокозчеплення, літерою d ; позначена поздовжня вісь машини, літерою q – поперечна вісь; літерою L – індуктивність; L_m – взаємодуктивність; літерою T_e – електромагнітний момент; літерою ω_r – момент опору; літерою R – активний опір.

Рівняння (1) після перетворень приведені до машинного вигляду й мають такий вигляд :

$$\begin{aligned} Vq_s &= R_{si}q_s + d\phi q_s/dt + \omega\phi d_s; \\ \phi q_s &= L_{si}q_s + L_m(i'q_{r1} + i'q_{r2}); \\ Vd_s &= R_{si}d_s + d\phi d_s/dt - \omega\phi q_s; \\ \phi d_s &= L_{si}d_s + L_m(i'd_{r1} + i'd_{r2}); \\ 0 &= R'_{r1}i'q_{r1} + d\phi'q_{r1}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'd_{r1}; (2) \\ \phi'q_{r1} &= L'_{r1}i'q_{r1} + L_{mi}q_s; \\ 0 &= R'_{r1}i'd_{r1} + d\phi'd_{r1}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'q_{r1}; \\ \phi'd_{r1} &= L'_{r1}i'd_{r1} + L_{mi}d_s; \\ 0 &= R'_{r2}i'q_{r2} + d\phi'q_{r2}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'd_{r2}; \\ \phi'q_{r2} &= L'_{r2}i'q_{r2} + L_{mi}q_s. \end{aligned}$$

Для з'ясування особливості закону управління, що приймається, звернемо увагу на те, що для реалізації управління треба мати можливість визначити момент опору, який залежить від швидкості та напругу вітру, кута повороту антени та її кутової частоти обертання. Пропонується при визначенні зна-

чені моменту опору знайти відповідні значення розрахунковим шляхом для різних швидкостей вітру, різних кутових частот обертання і різних кутах повороту антени відносно напрямку вітру й закласти результати розрахунків в пам'ять функціонального перетворювача, на вхід якого поступає інформація щодо величин швидкості обертання та напрямку вітру, а на виході отримується інформація щодо поточного значення моменту опору.

Параметри блоків Simulink можливо задавати не тільки, як числові параметри, але як імена змінних. Значення змінних необхідно задати перед початком розрахунку. Такий спосіб завдання параметрів зручний, якщо є необхідність проводити розрахунок для множини варіантів параметрів блоків моделі.

Доступною змінною, що управляється в АД є лише струм, який утворює магнітний потік та момент. Фазова орієнтація двох цих складових може бути знайдена тільки зовнішнім управляючим пристроєм, функціонально подібним пристроєм, що використовуються в колекторних машинах постійного струму.

Моделювання пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором здійснюється з використанням бібліотеки SimPowerSystems. Основу моделі (рис. 2) складає блок Asynchronous Machine SI Units. У параметра блока ASM Measurement Demux задається кутова швидкість обертання ротора й електромагнітний момент. Сигнали швидкості та моменту відправляються в блок Speed Moment, де будуються графічні залежності швидкості та моменту від часу. Для виміру та реєстрації міжфазної напруги передбачено блоки Voltage Measurement, UBC. Блок Speed Moment дає можливість побачити графіки залежностей швидкості обертання ротора та електромагнітного моменту залежно від часу. Результати моделювання свідчать про те, що при пуску двигуна без навантаження на валу спочатку виникають суттєві коливання моменту. При завершенні перехідного процесу відбувається стрибок моменту і спостерігається зменшення швидкості обертання ротора.

Simulink дозволяє проводити дослід, які в реальних лабораторних умовах будуть вимагати великих матеріальних витрат.

Висновки

1. В статті описується функціональна імітаційна модель безредукторного електроприводу, що дозволяє дослідити та аналізувати особливості його роботи.

2. Наведено вимоги до інфрачастотного асинхронного двигуна приводу системи обертання антени, які ураховують аеродинамічне навантаження на елементи конструкції. За допомогою апробованих методик проведено розрахунок цього двигуна. Отримані основні параметри схеми заміщення, а саме:

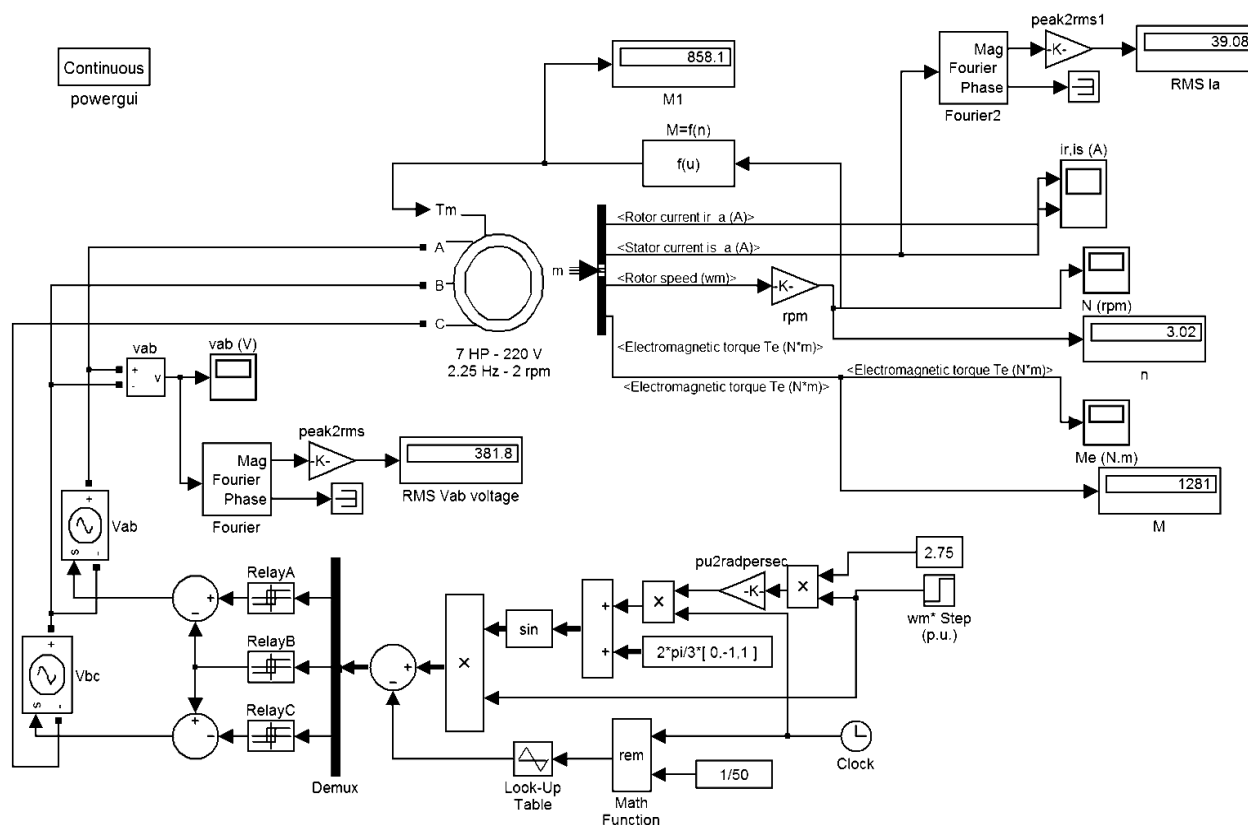


Рис. 2. Схема імітаційної моделі

активний опір обмотки статора 1,81 Ом,
 активний приведені опір обмотки ротора 2,528 Ом,
 індуктивний опір обмотки статора 3,497 Ом,
 індуктивний приведені опір обмотки ротора 0,05 Ом,
 індуктивність кола навантаження 0,059 Гн.

3. Запропонована імітаційна модель приводу повороту антени, що розроблена у середовище Matlab Simulink.

Список літератури

1. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электромашинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.
2. Кононов Б.Т. Математична модель дугостаторного двигуна з короткозамкненим ротором / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 1 (41). – С. 112-115.

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: Корона-принт, 2003. – 256 с.
5. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
6. Кононов Б.Т. Розрахункові співвідношення для визначення кидків струмів та провалів напруги при пуску дугостаторного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором / Б.Т. Кононов, Н.М. Рябуха // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 2 (19). – С. 132-136.

Надійшла до редколегії 1.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більяук, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АНТЕННЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Б.Т. Кононов, Б.Г. Любарский, Н.М. Куравская

В статье предложена имитационная модель асинхронного двигателя при помощи функциональной схемы, что позволяет исследовать и анализировать особенности работы электропривода антенны радиолокационной станции.

Ключевые слова: имитационная модель асинхронного двигателя, частотно-управляемый электропривод, дугостаторный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

SIMULATION MODEL OF RADAR ANTENNA ELECTRIC DRIVE

B.T. Kononov, B.G. Lubarsky, N.M. Kuravska

In the article the simulation model of asynchronous engine is offered through a functional diagram, that allows to probe and analyse the features of work of electro mechanic of aerial of the radio-location station.

Keywords: simulation model of asynchronous engine, frequency-guided electro mechanic, arc-stator asynchronous engine with a short circuited rotor.