

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-126-137

УДК 629.374.7

Юрій Денисов¹, Геннадій Болотов², Євгеній Куц³

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки»,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>
ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). Scopus Author ID: [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Технологій зварювання та будівництва»
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovgp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>
ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917). Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

³аспірант кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки»
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: fharse@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8062-0602>
ResearcherID: [K-4380-2018](https://orcid.org/0000-0001-8062-0602). Scopus Author ID: [57211998151](https://orcid.org/0000-0001-8062-0602)

ОДНОКРАТНО ІНТЕГРУЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ ЗАПУСКУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ВЕРТОЛЬОТА

Для запуску газотурбінного двигуна вертольота запропонована однократно інтегруюча система електропривода із задатчком інтенсивності. За результатами її аналізу отримані закономірності зміни похідної струму бортового акумулятора від параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості та залежності її максимального значення від цього параметра. Для забезпечення плавного зростання струму запропоновано дискретно змінювати в процесі запуску його значення. Аналіз перехідної характеристики за струмом показав, що зміна величини параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості дозволяє отримати більше плавне, ніж при налаштуванні на модульний оптимум, зростання струму без перерегулювання, що сприяє збільшенню часу використання енергетичного ресурсу акумулятора.

Ключові слова: задатчик інтенсивності; передавальна функція; похідна струму; дискретний регулятор; перехідна характеристика; модифіковане z-перетворення.

Рис.: 5. Бібл.: 8.

Постановка проблеми. Запуск газотурбінного двигуна (далі – ГТД) вертольота відбувається за програмою, що реалізується впродовж десятків секунд. Процес запуску включає в себе попередню розкрутку ротора турбокомпресора електродвигуном до початку подачі палива та його загоряння. Потім розкрутка ротора продовжується сумісно електродвигуном і турбіною на ділянці обмеженої подачі палива до камери згоряння до вступу в роботу автомата приймальності. Після цього ротор продовжує розкручуватися турбіною без зовнішнього приводу з виходом ГТД на режим “малого газу”, а електродвигун переводиться в режим генератора, що живить бортову мережу вертольота. Очевидно, що електропривод системи запуску ГТД працює в обмеженому часовому інтервалі, відпрацьовуючи програму встановлення заданої швидкості.

Пусковий режим роботи електроприводу ускладнює виконання вимог забезпечення оптимального співвідношення між взаємно залежними динамічними й енергетичними характеристиками, з урахуванням обмеженої потужності джерела живлення (акумулятора).

Існує проблема розробки систем запуску ГТД вертольотів, у яких враховано вплив на їхні енергодинамічні характеристики особливостей джерела живлення обмеженої потужності (бортового акумулятора) і пускового режиму роботи електропривода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі створення системи запуску ГТД вертольота основну увагу приділяють вибору електродвигуна та конструюванню блоків управління стартер–генератором [1; 2]. Аналіз сучасного стану систем запуску ГТД вертольотів, який наведено в [3] і [4], показав, що існуючі системи запуску ГТД вертольотів виконуються за одноконтурними схемами з пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором, у яких контролюється лише один параметр – швидкість [4]. У таких системах ефективно вирішення вищезазначених проблемних питань неможливе.

Метою цієї роботи є розробка системи запуску ГТД вертольота, у якій здійснюється взаємопов'язаний контроль параметрів струму, що споживається від акумулятора, і процесу встановлення швидкості, що дозволяє збільшити час використання енергетичного ресурсу бортового акумулятора.

Основний розділ. 1. Структурна схема системи запуску ГТД вертольота. Мету, що поставлена, пропонується реалізувати в системі електропривода з контурами струму і швидкості, який повинен бути головним. Особливість системи полягає в тому, що вона повинна відпрацювати завдання за швидкістю при постійному навантаженні. Необхідність високоточної стабілізації швидкості, що відповідає режиму «малого газу», тут відсутня, тому система запуску ГТД вертольота може бути астатичною за струмом і статичною за швидкістю. Такі двоконтурні системи належать до однократно інтегруючих. Вони містять пропорційно-інтегральний регулятор у контурі струму і пропорційний регулятор в контурі швидкості. Програму запуску ГТД реалізує задатчик інтенсивності, який формує сигнал завдання на вході контуру швидкості. Його зображення:

$$U_3(p) = \frac{\Delta U_3}{p \cdot \Delta T},$$

де ΔU_3 – прирощення завдання за швидкістю в процесі запуску; ΔT – час, протягом якого напруга завдання змінюється на величину ΔU_3 . Темп зміни сигналу на виході датчика інтенсивності постійний і незалежний від величини сигналу на вході.

Структурна схема однократно інтегруючої системи запуску представлена на рис. 1.

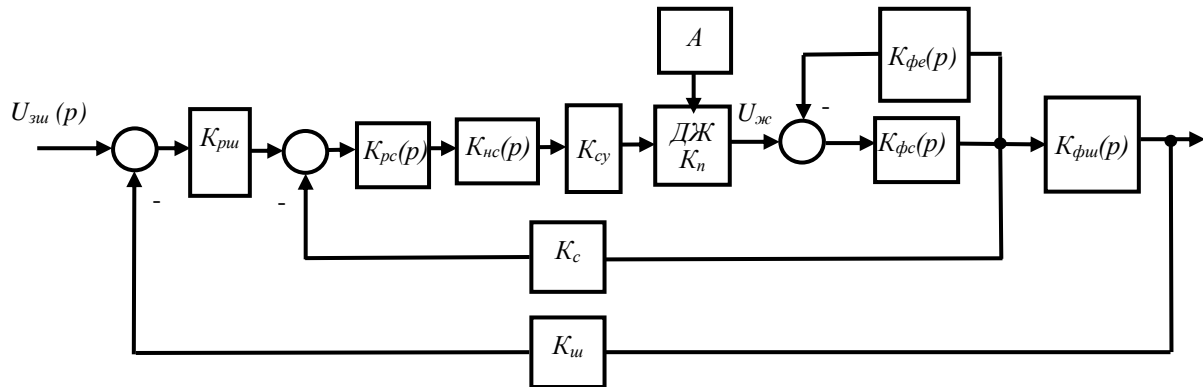


Рис. 1. Структурна схема однократно інтегруючої системи запуску

На схемі, рис. 1: A – акумулятор, $ДЖ$ – джерело живлення електродвигуна постійного струму, у ролі якого доцільно використовувати вентильний двигун із постійними магнітами. Джерело живлення електродвигуна являє собою квазірезонансний імпульсний перетворювач, який перемикається при нульовому струмі, що мінімізує втрати потужності на його силовому ключі. Частота роботи такого джерела живлення знаходиться в діапазоні десятків-сотень кілогерц, тому коефіцієнт його передачі K_n слабо залежить від пульсації вихідної напруги, і його можна вважати незмінним. Також на схемі $K_c, K_{ш}$ – коефіцієнти передачі датчиків струму і швидкості;

$$K_{рс}(p) = \frac{R_e(pT_e + 1)}{pT_c K_n K_c K_{сy}}$$

- передавальна функція регулятора струму, де R_e – активний опір

обмотки двигуна, T_e – електромагнітна стала, T_c – стала інтегрування струму, $K_{сy}$ – коефіцієнт передачі системи управління; $K_{рш}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості;

$$K_{нс}(p) = \frac{1}{pT_{\mu} + 1}, K_{фе}(p) = \frac{R_e}{pT_m}, K_{фс}(p) = \frac{1}{R_e(pT_e + 1)}, K_{фш}(p) = \frac{R_e}{pT_m C_e \Phi}$$

– передавальні функції таких ланок структурної схеми: некомпенсованої та формування: проти-е.р.с., струму, швидкості відповідно, де T_μ, T_m – некомпенсована й електромеханічна сталі C_e – конструктивна постійна двигуна Φ – потік збудження.

Перетворимо структурну схему (рис. 1) в одноконтурну структурну схему (рис. 2). У процесі перетворення, з урахуванням налаштування контуру струму на модульний оптимум, складову $\frac{p^2 T_c^2}{2}$ не враховуємо внаслідок її незначущості, оскільки $T_c = 2T_\mu$, а величина T_μ повинна відповідати не більш ніж двом періодам комутації ДЖ. Вплив проти-е.р.с. електродвигуна також не враховуємо.

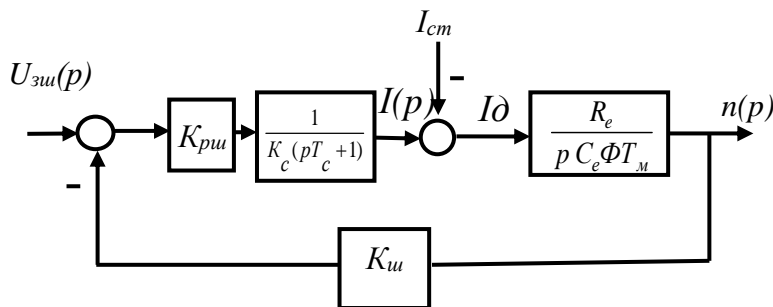


Рис. 2. Одноконтурна структурна схема

На схемі рис. 2: I_{cm} – струм статичного навантаження. Коефіцієнт передачі регулятора контуру швидкості [5]:

$$K_{пу} = \frac{T_m K_c C_e \Phi}{a_{у} T_c K_{у} R_e}, \tag{1}$$

де $a_{у}$ – параметр його налаштування.

Процесом наростання швидкості електропривода ГТД керує задатчик інтенсивності з часовим інтервалом ΔT , упродовж якого напруга завдання збільшується на $\Delta U_z = K_{у} \Delta n$, де Δn – статизм за швидкістю. З рис. 2 видно, що його зображення:

$$\Delta n(p) = \frac{I_{cm} K_c (pT_c + 1) R_e}{p C_e \Phi T_m K_c (pT_c + 1) + R_e K_{пу} K_{у}}. \tag{2}$$

В усталеному режимі ($p=0$) статизм за швидкістю з урахуванням (1):

$$\Delta n = I_{cm} \frac{T_c a_{у} R_e}{T_m C_e \Phi}. \text{ Враховуючи значення } T_m = J \frac{R_e \pi}{C_m C_e \Phi^2 \cdot 30}, \quad I_{cm} = \frac{M_c}{C_m \Phi}, \text{ де}$$

M_c – статичний момент опору навантаження, отримуємо: $\Delta n = M_c \frac{a_{у} T_c}{B}$, де $B = J \frac{\pi}{30}$,

J – момент інерції електроприводу системи запуску. Очевидно, що $\Delta n = const$, оскільки $M_c = const$. Його створює ротор турбокомпресора. Величина часового кроку задатчика

швидкості $\Delta T = \frac{\Delta n}{M_\delta}$, де $M_\delta = C_m \Phi I_\delta$ – динамічний момент, що розвивається

електродвигуном, I_δ – його динамічний струм C_m – конструктивна постійна двигуна. З урахуванням значень $\Delta t, \Delta n, M_\delta$ знаходимо, що:

$$U_z(p) = \frac{C_m \Phi K_c I_\delta}{p \cdot B}. \tag{3}$$

Вираз (3) встановлює зв'язок між напругою на виході задатчика швидкості й динамічним струмом електродвигуна, який є усталеним значенням унаслідок дії сигналу на вході системи, що формує задатчик інтенсивності. Його величина залежить від темпу зміни вихідної напруги задатчика інтенсивності. Система запуску підтримує динамічний струм постійним, що забезпечує незалежність прискорення двигуна від статичного навантаження. Враховуючи, що струм статичного навантаження $I_{cm} = const$, зі схеми рис. 2 знаходимо зображення струму електродвигуна:

$$I(p) = U_3(p) \cdot W_{zc}(p),$$

де $W_{zc}(p) = \frac{pK_{pu}C_e\Phi T_m}{pC_e\Phi T_m K_c(pT_c + 1) + K_{pu}K_u R_e}$ - передавальна функція замкненої структури (рис. 2) за струмом.

З урахуванням вищенаведених значень $U_3(p)$, K_{pu} , T_m маємо:

$$I(p) = \frac{I_0}{a_{uu}T_c^2(p-p_1)(p-p_2)(p-p_3)}, \quad (4)$$

де $p_1 = 0$; $p_{2,3} = -\frac{1}{2T_c} \pm \frac{1}{2T_c} \sqrt{1 - \frac{4}{a_{uu}}}$ - корені характеристичного рівняння.

Оригінал струму:

$$i(t) = \frac{1}{a_{uu}T_c^2} (A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}),$$

де $A_1 \div A_3$ - відрахування для коренів характеристичного рівняння, вони мають різні значення для можливих режимів роботи, які задаються вибором величини параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості a_{uu} , що є особливістю однократно інтегруючих систем..

Розглянемо можливість задоволення вимог динаміки та енергетики в різних режимах роботи електроприводу.

А) Коливальний режим.

Струм електродвигуна:

$$i(t) = I_0 \left[1 - \frac{2e^{-mt}}{\sqrt{4-a_{uu}}} \sin(\omega t + \psi) \right], \quad (5)$$

де величина динамічного струму електродвигуна I_0 при його розгоні й гальмуванні залежить від темпу зміни вихідної напруги задатчика інтенсивності. У цих режимах система регулювання підтримує динамічний струм постійним, що створює умови для збільшення часу витрати енергетичного ресурсу акумулятора.

У результаті диференціювання (5) отримуємо:

$$\frac{d\bar{i}}{d\bar{t}} = \frac{2e^{-m\bar{t}}}{\sqrt{4-a_{uu}}} \left[\sin(\omega\bar{t} + \psi) - \sqrt{\frac{4-a_{uu}}{a_{uu}}} \cos(\omega\bar{t} + \psi) \right], \quad (6)$$

де $\bar{i} = \frac{i}{I_0}$, $\bar{t} = \frac{t}{T_c}$.

Б) Аперіодичний режим.

Відповідає значенню параметра налаштування регулятора $a_{uu} > 4$. У цьому режимі відносна похідна струму:

$$\frac{d\bar{i}}{dt} = \frac{e^{p_2t} - e^{p_3t}}{a_{uu} \sqrt{1 - \frac{4}{a_{uu}}}} \quad (7)$$

Граничний режим відповідає значенням $a_{uu} = 4$, $b = 0$, тому для цього режиму відносна похідна струму:

$$\frac{d\bar{i}}{dt} = 0,5e^{-\frac{t}{T_c}} \quad (8)$$

Згідно з (6)-(8), для $T_\mu = T = 10^{-4}c$, де T – період роботи імпульсного перетворювача; $m = 2500\frac{1}{c}$, $T_c = 2 \cdot 10^{-4}c$ розраховано закономірності зміни відносної похідної струму для різних режимів роботи. Результати розрахунку представлено на рис. 3, а, де криві 1÷3 зі значеннями $a_{uu} = (1 \div 3)$ відповідно належать до коливального режиму, для граничного режиму справедлива крива 4 ($a_{uu} = 4$), а для аперіодичного - крива 5 ($a_{uu} = 5$).

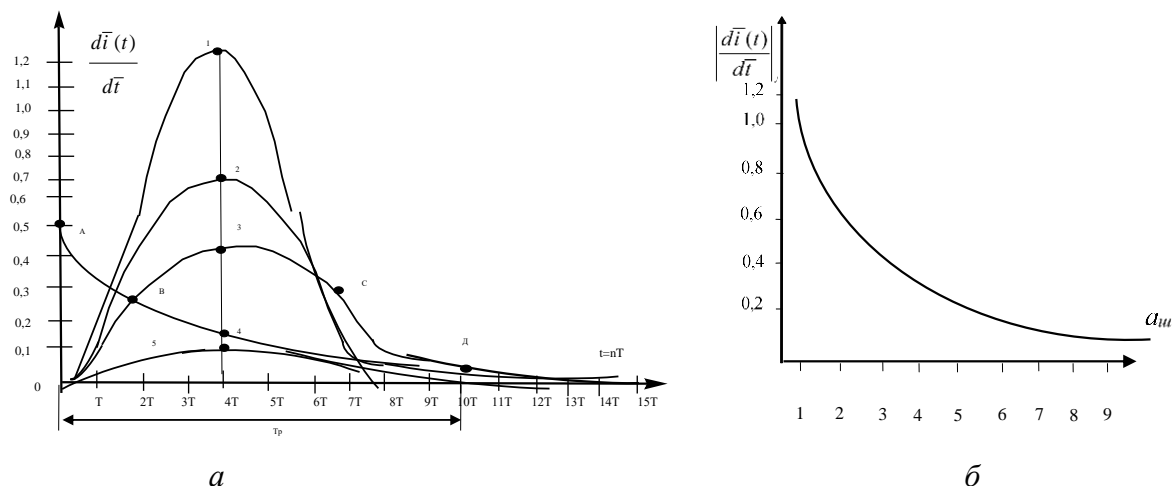


Рис. 3. Закономірності зміни відносної похідної струму та напруги

З рис. 3, а видно, що максимальні значення похідної струму для коливального і аперіодичного режимів відповідають часу $t = 4T$. Для цього моменту часу на рисунку 3 б побудовані залежності максимальних значень відносної похідної струму від величини параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості $\left| \frac{d\bar{i}(t)}{dt} \right|_{\max} = f(a_{uu})$. З рис. 3, б видно, що максимальне значення відносної похідної струму зі збільшенням параметра налаштування a_{uu} знижується, а час встановлення перехідного процесу, як видно з рис. 3, а, зростає. Оптимальне співвідношення між часом перехідного процесу і швидкістю його наростання відповідає налаштуванню регулятора на модульний оптимум ($a_{uu} = 2$, крива 2, рис. 3 а).

Налаштування процесів на модульний оптимум знаходить широке застосування в електроприводах постійного струму, які живляться від мережі – джерело нескінченно великої потужності. Тому тут не виникає проблем з часом використання енергетичного ресурсу. Обмеження похідної струму двигуна в таких системах відбувається за рахунок включення фільтра на вході регулятора, або включення задатчика інтенсивності на вході

регулятора, швидкості, чи включення його на вході регулятора струму [6]. При цьому закон зміни струму за часом відповідає оптимальній за модулем перехідній характеристиці з перерегулюванням 4,35 %.

Реалізація існуючих засобів обмеження похідної струму двигуна прив'язана до аналогової елементної бази, яка має невисоку стійкість стосовно електромагнітних завад. Висока захищеність систем управління бортової авіаційної техніки від радіозавад є однією з головних вимог. На борту вертольота електропривід системи запуску ГТД живиться від джерела обмеженої потужності – акумулятора. На тривалість застосування його енергетичного ресурсу впливають кидки струму навантаження та зміни його похідної в процесі запуску ГТД. Тому тут необхідно забезпечити більш плавне, ніж при налаштуванні регулятора контура швидкості на модульний оптимум, зростання струму, що відбирається від акумулятора, без перерегулювання. Такі вимоги можна задовільнити за рахунок включення до складу системи дискретного регулятора швидкості зі змінним коефіцієнтом підсилення, що дозволяє реалізувати кінцевий за часом процес без перерегулювання з виконанням вимог до завадостійкості. З рис. 3, *a* видно, що мінімальні значення відносної похідної струму відповідають аперіодичному режиму, крива 5, проте в цьому режимі перехідний процес є найбільш тривалим. Компроміс між швидкістю і значенням похідної струму можливо забезпечити за рахунок перебудови параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості.

Для цього неперервний пропорційний регулятор контуру швидкості пропонується замінити дискретною ланкою зі ступінчастим вихідним сигналом, період роботи якого T_p . Висота кожної сходинки напруги на виході регулятора визначається параметром його налаштування на відповідному часовому інтервалі, кількість яких можна встановити згідно з рис. 3, *a*.

З метою виконання вище поставлених вимог до електроприводу ГТД, як видно з рис. 3, *a*, формування перехідної характеристики за струмом доцільно починати на граничному режимі ($a_{ш} = 4$), за траєкторією АВ, протягом часу $0 \leq t \leq 2T$, а потім перейти на слабо коливальний режим ($a_{ш} = 3$) протягом часу $2T \leq t \leq 7T$, за траєкторією ВС. Завершити запуск доцільно у коливальному режимі ($a_{ш} = 2$) з виконанням модульного оптимуму протягом часу $7T \leq t \leq T_p$ за траєкторією CD.

Запропонований спосіб обмеження похідної струму двигуна досить просто реалізується на базі програмованого таймера. Регулятор швидкості являє собою конвеєрну структуру, значення коефіцієнтів налагодження в якій змінюється відповідно часовим інтервалам на періоді T_p . Їх кількість на періоді може бути як завгодно великою, що забезпечить плавну зміну похідної струму в процесі її обмеження, без перерегулювання. Можливо також і традиційне рішення з виконанням задатчика інтенсивності зі змінним коефіцієнтом підсилення на базі мікропроцесора, але цей варіант буде складнішим у реалізації, ніж запропонований.

2. Аналіз перехідної характеристики системи запуску ГТД за струмом із дискретним регулятором контуру швидкості. Дискретний пропорційний регулятор представлено на рис. 4, *a* сукупністю імпульсного елемента (ІЕ) та формуючого елемента (ФЕ), вихідний сигнал якого ($U_{\phi e}(t)$) представлено на рис. 4, *б*.

$$\text{Параметри регулятора: } K_{pш1} = \frac{K_{p0}}{4}, K_{pш2} = \frac{K_{p0}}{3}, K_{pш3} = \frac{K_{p0}}{2}, K_{p0} = \frac{T_M C_e \Phi K_c}{T_c K_{ш} R_{я}} \quad (9),$$

$t_1 = 2T$; $t_2 = 7T$, $T_p = 10T$ - період роботи.

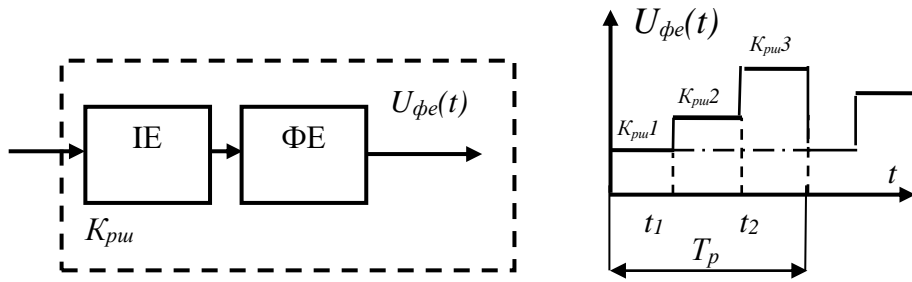


Рис. 4. Дискретний пропорційний регулятор та його вихідний сигнал

Представимо вихідний сигнал формуючого елемента набором ступінчастих функцій:

$$U_{\phi e}(t) = K_{ру1} [1(t) - 1(t - t_1)] + K_{ру2} [1(t - t_1) - 1(t - t_2)] + K_{ру3} [1(t - t_2) - 1(t - T_p)].$$

Зображення вихідного сигналу формуючого елемента:

$$K_{\phi}(p) = K_{p0} \frac{K_1 + K_2 e^{-pt_1} + K_3 e^{-pt_2} - K_4 e^{-pT_p}}{p},$$

де $K_1 = 0,25$; $K_2 = 0,0833$; $K_3 = 0,166$; $K_4 = 0,5$.

Передавальна функція ланки формування струму з дискретним регулятором контуру швидкості:

$$K_c(p) = \frac{K_{\phi}(p)}{K_c(pT_c + 1)}. \text{ При заміні } p = \frac{q}{T_p}, \text{ використовуючи теорему}$$

розкладання, з врахуванням $K_{\phi}(p)$, отримуємо:

$$K_c(q) = \frac{K_{p0}}{K_c} (K_1 + K_2 e^{-q\gamma_1} + K_3 e^{-q\gamma_2} - K_4 e^{-q}) \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{q + \alpha} \right),$$

$$\text{де } \gamma_1 = \frac{t_1}{T_p}; \gamma_2 = \frac{t_2}{T_p}; \alpha = \frac{T_p}{T_c}.$$

Дискретна передавальна функція ланки формування струму: $W_c^*(z, \varepsilon) = z_m \{K_c(q)\}$.

У результаті модифікованого z -перетворення отримуємо:

$$W_c^*(z, \varepsilon) = \frac{K_{p0}}{2K_c} \left[\frac{M_1^*(z, \varepsilon)}{z - 1} - \frac{M_2^*(z, \varepsilon)}{z - e^{-\alpha}} \right], \tag{10}$$

$$\text{де } M_1^*(z, \varepsilon) = 2[za_{11}(\varepsilon) + b_{11}(\varepsilon)]; M_2^*(z, \varepsilon) = 2[za_{21}(\varepsilon) + b_{21}(\varepsilon)].$$

Коефіцієнти багаточленів $M_1^*(z, \varepsilon), M_2^*(z, \varepsilon)$ прийматимуть різні значення на інтервалах зміни відносного часу $\varepsilon = \frac{\Delta t}{T_p}$.

Для $0 \leq \varepsilon \leq \gamma_1$:

$$a_{11}(\varepsilon) = K_1; b_{11}(\varepsilon) = K_2 + K_3 - K_4; a_{21}(\varepsilon) = K_1 e^{-\alpha\varepsilon}; b_{21}(\varepsilon) = e^{-\alpha\varepsilon} [K_2 e^{-\alpha(1-\gamma_1)} + K_3 e^{-\alpha(1-\gamma_2)} - K_4].$$

Для $\gamma_1 \leq \varepsilon \leq \gamma_2$:

$$a_{11}(\varepsilon) = K_1 + K_2; b_{11}(\varepsilon) = K_3 - K_4; a_{21}(\varepsilon) = e^{-\alpha\varepsilon} (K_1 + K_2 e^{-\alpha\gamma_1}); b_{21}(\varepsilon) = e^{-\alpha\varepsilon} (K_3 e^{-\alpha(1-\gamma_2)} - K_4).$$

Для $\gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1$:

$$a_{11}(\varepsilon) = K_1 + K_2 + K_3; b_{11}(\varepsilon) = -K_4; a_{21}(\varepsilon) = e^{-\alpha\varepsilon} (K_1 + K_2 e^{\alpha\gamma_1} + K_3 e^{\alpha\gamma_2}); b_{21}(\varepsilon) = -K_4 e^{-\alpha\varepsilon}.$$

Передавальна функція приведеної неперервної частини структурної схеми, рис. 2, з дискретним регулятором контуру швидкості:

$$K_{nnч}(p) = \frac{K_{p0}}{K_c} \cdot \frac{K_1 + K_2 e^{-pT_1} + K_3 e^{-pT_2} - K_4 e^{-pT_p}}{p^2(pT_c + 1)C_e \Phi T_m} R_e K_{uu} \quad (11)$$

Замінивши $p = \frac{q}{T_p}$, на підставі теореми розкладання маємо:

$$K_{nnч}(q) = \frac{K_{p0}}{K_c} (K_1 + K_2 e^{-\gamma_1 q} + K_3 e^{-\gamma_2 q} - K_4 e^{-q}) \cdot \left(\frac{B_1}{q^2} + \frac{B_2}{q} + \frac{B_3}{q + \alpha} \right),$$

де $B_1 = \frac{1}{\alpha}$, $B_2 = -\frac{1}{\alpha^2}$, $B_3 = \frac{1}{\alpha^2}$.

Дискретна передавальна функція розімкненої системи (рис. 2) з дискретним регулятором контуру швидкості:

$$W_p^*(z, \varepsilon) = z_m \{K_{nnч}(q)\}.$$

У результаті модифікованого z -перетворення отримуємо:

$$W_p^*(z, \varepsilon) = \alpha^2 \left[\frac{F_1^*(z, \varepsilon)}{(z-1)^2} + \frac{F_2^*(z, \varepsilon)}{z-1} + \frac{F_3^*(z, \varepsilon)}{z-e^{-\alpha}} \right], \quad (12)$$

де $F_1^*(z, \varepsilon) = 2[z c_{11}(\varepsilon) + d_{11}(\varepsilon)]$; $F_2^*(z, \varepsilon) = 2[z c_{21}(\varepsilon) + d_{21}(\varepsilon)]$; $F_3^*(z, \varepsilon) = 2[z c_{31}(\varepsilon) + d_{31}(\varepsilon)]$.

Для $0 \leq \varepsilon \leq \gamma_1$:

$$\begin{aligned} c_{11}(\varepsilon) &= B_1 K_1; \quad d_{11}(\varepsilon) = B_1 (K_2 + K_3 - K_4); \\ c_{21}(\varepsilon) &= (B_1 \varepsilon + B_2) K_1; \quad d_{21}(\varepsilon) = (B_1 \varepsilon + B_2) (K_2 + K_3 - K_4); \\ c_{31}(\varepsilon) &= B_3 K_1 e^{-\alpha \varepsilon}; \quad d_{31}(\varepsilon) = B_3 e^{-\alpha \varepsilon} [K_2 e^{-\alpha(1-\gamma_1)} + K_3 e^{-\alpha(1-\gamma_2)} - K_4]. \end{aligned}$$

Для $\gamma_1 \leq \varepsilon \leq \gamma_2$:

$$\begin{aligned} c_{11}(\varepsilon) &= B_1 (K_1 + K_2); \quad d_{11}(\varepsilon) = B_1 (K_3 - K_4); \\ c_{21}(\varepsilon) &= (B_1 \varepsilon + B_2) (K_1 + K_2); \quad d_{21}(\varepsilon) = (B_1 \varepsilon + B_2) (K_3 - K_4); \\ c_{31}(\varepsilon) &= B_3 e^{-\alpha \varepsilon} (K_1 + K_2 e^{\alpha \gamma_1}); \quad d_{31}(\varepsilon) = B_3 e^{-\alpha \varepsilon} [K_3 e^{-\alpha(1-\gamma_2)} - K_4]. \end{aligned}$$

Для $\gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1$:

$$\begin{aligned} c_{11}(\varepsilon) &= B_1 (K_1 + K_2 + K_3); \quad d_{11}(\varepsilon) = -B_1 K_4; \\ c_{21}(\varepsilon) &= (B_1 \varepsilon + B_2) (K_1 + K_2 + K_3); \quad d_{21}(\varepsilon) = -K_4 (B_1 \varepsilon + B_2); \\ c_{31}(\varepsilon) &= B_3 e^{-\alpha \varepsilon} (K_1 + K_2 e^{\alpha \gamma_1} + K_3 e^{\alpha \gamma_2}); \quad d_{31}(\varepsilon) = -B_3 e^{-\alpha \varepsilon} K_4. \end{aligned}$$

Дискретна передавальна функція замкненої системи, рис. 2, за струмом, з дискретним регулятором контуру швидкості:

$$W_{zc}^*(z, \varepsilon) = \frac{W_c^*(z, \varepsilon)}{1 + W_p^*(z, -0)},$$

де $W_p^*(z, -0) = z^{-1} \cdot W_p^*(z, 1)$ можна знайти з (12) для $\varepsilon = 1$.

З урахуванням (10), (12) отримуємо:

$$W_{zc}^*(z, \varepsilon) = \frac{K_{p0}}{2K_c} \times \frac{\left[M_1^*(z, \varepsilon)(z - e^{-\alpha}) - M_2^*(z, \varepsilon)(z - 1) \right] z(z - 1)}{z(z - 1)^2 (z - e^{-\alpha}) + \alpha^2 \left[F_1^*(z, 1)(z - e^{-\alpha}) + F_2^*(z, 1)(z - e^{-\alpha})(z - 1) + F_3^*(z, 1)(z - 1)^2 \right]} \quad (13)$$

Перехідна характеристика замкненої системи за струмом є реакцією на стрибок завдання на вході задатчика інтенсивності. Її z -зображення:

$$I^*(z, \varepsilon) = U_3^*(z) \cdot W_{zc}^*(z, \varepsilon), \quad (14)$$

У (14) з урахуванням (3): $U_3^*(z) = \Delta U_3 \cdot \frac{z}{z - 1}$, де $\Delta U_3 = \frac{C_M \Phi K_c I_d}{B}$,

Тому

$$I^*(z, \varepsilon) = \Delta U_3 \cdot \frac{z}{z - 1} \cdot \frac{K_{p0}}{2K_c} \cdot W_{zc}^*(z, \varepsilon). \quad (15)$$

Розділивши обидві частини (15), на $\frac{\Delta U_3 K_{p0}}{K_c}$ і враховуючи (13), отримаємо z -зображення перехідної характеристики за відносним струмом:

$$\bar{I}^*(z, \varepsilon) = \frac{E_4(\varepsilon)z^4 + E_3(\varepsilon)z^3 + E_2(\varepsilon)z^2}{D_4(1)z^4 + D_3(1)z^3 + D_2(1)z^2 + D_1(1)z + D_0(1)}, \quad (16)$$

де

$$E_4(\varepsilon) = 2[a_{11}(\varepsilon) - a_{21}(\varepsilon)];$$

$$E_3(\varepsilon) = 2[b_{11}(\varepsilon) - e^{-\alpha}a_{11}(\varepsilon) - b_{21}(\varepsilon) + a_{21}(\varepsilon)];$$

$$E_2(\varepsilon) = 2[b_{21}(\varepsilon) - e^{-\alpha}b_{11}(\varepsilon)];$$

$$D_4(1) = 1;$$

$$D_3(1) = 2[c_{21}(1) + c_{31}(1) - 2 - e^{-\alpha}];$$

$$D_2(1) = 2[1 + 2e^{-\alpha} + c_{11}(1) - c_{21}(1)(1 + e^{-\alpha}) + d_{11}(1) - 2c_{31}(1) - d_{21}(1)];$$

$$D_1(1) = 2[e^{-\alpha}(c_{21}(1) - c_{11}(1) - 1) - d_{21}(1)(1 + e^{-\alpha}) + d_{11}(1) + c_{31}(1) - 2d_{31}(1)];$$

$$D_0(1) = 2[d_{31}(1) + e^{-\alpha}(d_{21}(1) - e^{-\alpha}d_{11}(1))],$$

де коефіцієнти $c(1)$, $d(1)$ відповідають їх значенням для $\varepsilon = 1$.

З (16) видно, що z -зображення відносного струму $\bar{I}^*(z, \varepsilon)$ на відповідних часових інтервалах визначається величинами коефіцієнтів a, b, c, d , які залежать лише від одного

параметра $\alpha = \frac{T_p}{T_c}$, де стала інтегрування регулятора контуру струму $T_c = 2T$. Для

забезпечення високої швидкодії період роботи дискретного регулятора T_p повинен відповідати часу перехідного процесу при його налаштуванні на модульний оптимум, який зазвичай не перевищує десять некомпенсованих сталих.

Оригінал перехідної характеристики системи запуску за струмом знайдено за допомогою методу розкладання z -зображення в ступеневий ряд [7] відповідно до рекурентного співвідношення:

$$\bar{I}^* [s+l-k, \varepsilon] = \frac{1}{D_l} \left\{ E_{k-s}(\varepsilon) - \sum_{i=0}^{s-1} \bar{I}^* [i+l-k, \varepsilon] D_{l-s+i} \right\}, \quad (17)$$

де $l=k=4$ - порядок знаменника (16), який дорівнює порядку чисельника, $s=0,1,2,\dots$ - номер періоду роботи регулятора, $\varepsilon = \frac{t}{T_p}$ - відносний час.

На рисунку 5 крива 1 - результат розрахунку перехідної характеристики згідно (17), для $T_m = T = 10^{-4}c$, $T_c = 2T$, $T_p = 10T$, $\alpha = 5$. Крива 2, з перегулюванням 4,3 % яку розраховано за (5) для $a_u = 2$, відповідає налаштуванню неперервного регулятора контуру швидкості на модульний оптимум. З рис. 5 видно, що перехідна характеристика системи запуску ГТД вертольота з дискретним пропорційним регулятором (крива 1) відрізняється від аналогічної характеристики з неперервним регулятором (крива 2) відсутністю перегулювання і більш плавним характером наростання струму, при однаковій швидкодії. Реально ж під впливом пульсації джерела живлення перегулювання перехідної характеристики контуру струму який налаштований на модульний оптимум, становить 25 % [8]. Дискретний регулятор дозволяє реалізувати процеси кінцевої тривалості без перегулювання і при наявності пульсації джерела живлення. Відмічені особливості перехідної характеристики дозволяють збільшити час використання енергетичного ресурсу бортового акумулятора.

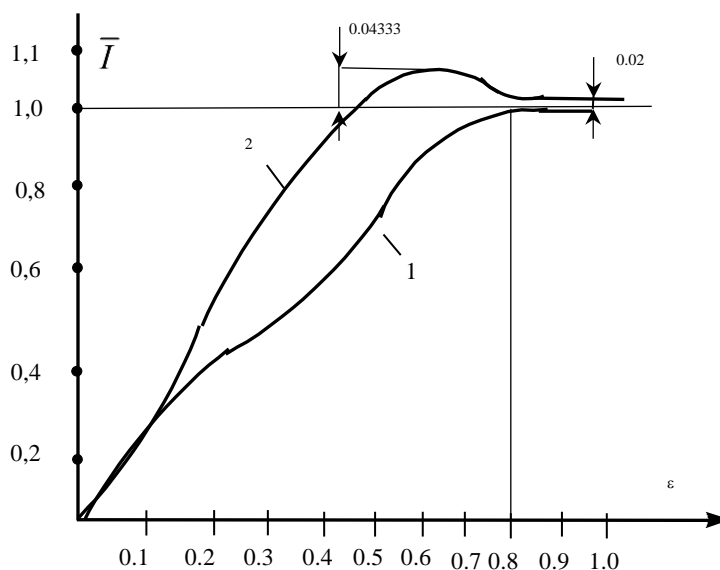


Рис. 5. Перехідні характеристики системи запуску двигуна вертольота

Висновки.

1. Показано, що мети, яка поставлена в роботі, можна досягти, якщо електропривід системи запуску ГТД вертольота виконати за однократноінтегруючою схемою з задатчиком інтенсивності. У такій системі можна реалізувати взаємопов'язаний контроль закону встановлення швидкості ротора турбокомпресора і параметрів струму, що відбирається від бортового акумулятора. Наслідком цього є збільшення часу використання його енергетичного ресурсу.

2. З рис. 3, а видно, що час витрачання енергетичного ресурсу акумулятора можливо збільшити за рахунок зниження перепадів похідної перехідної характеристики за струмом. Для цього її початкову ділянку необхідно формувати в граничному режимі, а наступний – в слабоколивальному. На завершальній ділянці перехідна характеристика повинна відповідати налаштуванню регулятора контуру швидкості на модульний оптимум.

3. Формувати перехідну характеристику за струмом із мінімальними перепадами її похідної запропоновано за допомогою дискретного регулювання параметра налаштування пропорційного регулятора контуру швидкості, що підтверджують результати розрахунків перехідної характеристики за струмом на заданих трьох інтервалах часу. Їх збільшення дозволяє підвищити рівномірність темпу зміни похідної струму.

Список використаних джерел

1. Newell R. Electric motor efficiency depends upon power factor. Part 1 [Electronic resource] / Richard Newell // Eetimes. – Accessed mode: <https://www.eetimes.com/electric-motor-efficiency-depends-upon-power-factor-part-1>.
2. Chau K. T. *Chaos in Electric Drive Systems: Analysis Control and Applications* / K. T. Chau z. Wang, John Wiley, S. Sons. – Pte Ltd, 2011. – 318 p.
3. Денисов А. И. Совершенствование систем бортового электропитания и запуска газотурбинных двигателей вертолетов / А. И. Денисов, Е. А. Бурсала, К. В. Башинский // Системы озброєння і військової техніки. – 2016. – № 4(48). – С. 98-103.
4. Цалимов Г. Ф. Разработка электронных блоков управления стартер-генераторами для систем запуска авиационных двигателей / Г. Ф. Цалимов, С. В. Козюра, Е. Е. Васько // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2 – С. 102-105.
5. Управление вентиляемыми электроприводами постоянного тока / Е. Д. Лебедев, В. Е. Неймарк, М. Я. Пистрак, О. В. Слежановский. – М. : Энергия, 1970. – 232 с.
6. Зимин Е. Н. Автоматическое управление электроприводами : учеб. пособие / Е. Н. Зимин, В. И. Яковлев. – М. : Высшая школа, 1979. – 318 с.
7. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования: учеб. Пособие / Г. Ф. Зайцев. – К. : Вища школа, 1988. – 431 с.
8. Денисов Ю. О. Влияние пульсаций напряжения живления линейного электродвигуна на параметри перехідної характеристики контуру струму бортової авіаційної системи позиціонування / Ю. О. Денисов, О. О. Бурсала // Технічна електродинаміка. – 2021. – № 6. – С. 20–28. – DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.020>.

References

1. Newell R. (2009). Electric motor efficiency depends upon power factor. Part 1. *Eetimes*. <https://www.eetimes.com/electric-motor-efficiency-depends-upon-power-factor-part-1>.
2. Chau, K.T. z. Wang, John, Wiley, Sons, S. (2011). *Chaos in Electric Drive Systems: Analysis Control and Applications*. Pte Ltd.
3. Denysov, A.I., Bursala, E.A., Bashynskiy, K.V. (2016). Sovershenstvovanie sistem bortovogo elektropitaniia i zapuska gazoturbinnnykh dvigatelei vertoletov [Improvement of systems of onboard power supply and launch of gas turbine engines of helicopters]. *Systemy ozbroiennia i viiskovoi tekhniki – Systems of construction and military equipment*, (4(48)), 98-103.
4. Tsalyimov, H.F., Koziura, S.V., Vasko, E.E. (2015). Razrabotka elektronnykh blokov upravleniia starter-heneratoramy dlia system zapuska avyatsyonnykh dvigatelei [Development of electronic control units for starter-generators for aircraft engine start systems]. *Vestnyk dvyhatelestroeniia – Bulletin of engine building*, (2), 102-105.
5. Lebedev, E.D., Neimark, V.E., Pystrak, M.Ya., Slezhanovskiy, O.V. (1970). *Upravlenie ventilnymi elektroprivodami postoiannogo toka [Control of DC valve electric drives]*. Energiia.
6. Zymyn, E.N., Yakovlev, V.Y. (1979). *Avtomaticheskoe upravlenie elektroprivodami [Automatic control of electric drives]*. Vysshhaia shkola.
7. Zaitsev, H.F. (1988). *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia i regulirovaniia [Theory of automatic control and regulation]*. Vyshcha shkola.
8. Denysov, Yu.O., Bursala, O.O. (2021). Vplyv pulsatsii napruhy zhyvlennia liniinoho elektrodvyhuna na parametry perekhidnoi kharakterystyky konturu strumu bortovoi aviatsiinoi systemy pozytsionuvannia [The effect of pulsations of the supply voltage of a linear electric motor on the parameters of the transient characteristic of the current circuit of the onboard aircraft positioning system]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, (6), 20–28. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.020>.

Отримано 09.03.2023

Yurii Denisov¹, Gennady Bolotov², Yevhenii Kuts³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the «Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics» Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). Scopus Author ID: [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

²Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovgp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917). Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

³PhD Student of the «Electronics, automation, robotics and mechatronics» department, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: fharse@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8062-0602>

ResearcherID: [K-4380-2018](https://orcid.org/0000-0001-8062-0602). Scopus Author ID: [57211998151](https://orcid.org/0000-0001-8062-0602)

ONE-TIME INTEGRATING DC ELECTRIC DRIVE SYSTEM FOR LAUNCHING A HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE

The purpose of this work is to develop a system for starting a gas turbine engine (GTE) of a helicopter, which implements interconnected control of the parameters of the current consumed from the on-board battery and the process of setting the speed by means of a valuer, which allows to optimize the dynamic characteristics of the system and increase the time spent on the energy resource of the battery. The goal was achieved in a double-circuit single-integrating electric drive system, which is astatic in current and static in speed, which corresponds to the requirements for the launch system of the GTE helicopter. As a result of the analysis of the transient characteristics of the system by current, the conditions for the existence of aperiodic, boundary, oscillatory modes, as well as the regularities of changes in the derivative current in these modes, are obtained. The magnitude of astaticism by velocity and its relationship with the pattern of change in the output voltage of the velocity setter have been established. As a result of the analysis of the patterns of change in the derivative current, its minimum values for various setting parameters of the proportional regulator of the speed circuit at the time intervals of the transient characteristic have been established. It is proposed to form a transient characteristic of the electric drive system by current in three modes. Its initial section must be formed in the boundary mode, the next - in a weakly oscillatory mode. The third section should correspond to the adjustment of the regulator to a modular optimum. For the practical implementation of the proposed principle of forming the transition characteristic of the electric drive system, it is necessary to include a proportional regulator with a relay law of changing the setting parameter in the speed circuit. An analysis of the transient characteristic for current is carried out, taking into account the discrete nature of the change in the setting of the speed circuit regulator. Its comparison with the transitional characteristic corresponding to the optimum modulo is carried out. It is established that the transient characteristic of the electric drive system with a relay regulator of the speed circuit differs from the transition characteristic tuned to the modular optimum, the absence of overregulation and smaller differences of the derivative at the interval of its existence. The presence of a speed specifier that allows you to stabilize the dynamic current of the electric motor and the low drops of its derivative during the start-up of the GTE create conditions for a longer consumption of the limited energy resource of the on-board battery of the helicopter.

Key words: intensity setter; transfer function; current derivative; discrete controller; transient characteristic; modified z-conversion.

Fig: 5. References: 8.