Розвиток, бойове застосування та озброєння авіації

УДК 629.374.7

DOI: 10.30748/nitps.2021.42.04

В.Г. Башинський¹, Ю.О. Денисов², А.С. Ревко², О.О. Бурсала¹

¹ Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів

² Національний університет “Чернігівська політехніка”, Чернігів

ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ МЕХАНІЗМІВ БОРТОВОЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Для управління позиціонуванням робочого органу, який виконує поступальний рух в процесі відпрацювання відповідних команд бортового комп'ютера літального апарату, запропоновано триконтурну систему з контролем споживаного струму, швидкості руху і заданого положення. На основі модульного оптимізму знайдено умови забезпечення мінімальної похибки позиціонування в перехідному і усталеному режимах.

Ключові слова: лінійний двигун, похибка регулювання, передавальна функція, перехідна характеристика, датчик.

Вступ

Постановка проблеми. В сучасних літальних апаратах широко застосовуються пневматичні і гідравлічні приводи для управління поступальним рухом робочих органів механізмів відповідних передач. Їх недолік полягає в невисоких значеннях швидкості і точності при виконанні процесу позиціонування. На даний час вдосконалення льотно-технічних характеристик літаків пов'язано з зростаючим застосуванням на їх борту систем управління і регулювання на основі електроприводів замість їх пневматичних і гідравлічних аналогів. Кінцева мета полягає у створенні електричного літака з повною відмовою від пневматичних і гідравлічних систем управління [1]. В контексті вирішення цієї актуальної проблеми виникає потреба в розробці електроприводів для точного функціонування робочого органу під час його поступального руху, що знайшло своє відображення у сучасній науково-технічній періодиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи електроприводу широкого призначення викладено в фундаментальній роботі [2], де показано, що двигун лінійного переміщення відрізняється від звичайного електродвигуна лише конструкційними особливостями. Практичне застосування та особливості конструкції лінійних двигунів висвітлено в роботі [3]. Діапазон застосування лінійного електроприводу досить широкий і складає 40–50 % реального електроприводу. Він широко представлений в агропромисловому комплексі, на транспорті [4–6], в авіаційній та космічній галузях [7].

Аналіз останніх досліджень лінійних електроприводів показав, що основна увага приділяється розробці систем управління та моделюванню їх електромагнітних процесів [8–11]. На жаль, у відомих роботах не знайшли достатнього відображення питання оцінки точності позиціонування систем, які застосовують в бортових системах літака, та її підвищення за рахунок оптимізації процесів в таких системах.

Метою даної роботи є розробка лінійного електроприводу для позиціонування робочого органу бортової авіаційної техніки з раціональною структурною побудовою, що дозволяє мінімізувати похибку регулювання головного параметра системи – положення.

Виклад основного матеріалу

1. Структурна схема двигуна лінійного переміщення

Під час поступального лінійного руху електричний двигун лінійного переміщення (ДЛП) створює осьове зусилля:

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Cx + F_{mp} + F_n, \quad (1)$$

де F_n – зовнішня сила опору руху виконавчого органу. В разі її відсутності $F_n = 0$, що має місце в бортових системах літаків;

m – маса, що переміщується;

D – коефіцієнт в'язкого тертя, який звичайно дорівнює нулю;

C – коефіцієнт пропорційності, який враховує вплив сил пружності. В разі їх відсутності $C = 0$;

F_{mp} - сила тертя, яку при наявності шарикопідшипників можна не враховувати.

Рівняння електричного ланцюга ДЛП:

$$U_n = L \frac{di_a}{dt} + i_a R + E, \quad (2)$$

де U_n - номінальна прикладена напруга;

L, R - індуктивність і активний опір якоря;

$E = B_{cp} \cdot l_{\Sigma} \cdot V_a$ - проти-е.р.с. обмотки якоря;

B_{cp} - середня індукція повітряного проміжку ДЛП;

l_{Σ} - сумарна довжина обмотки якоря;

$V_a = \frac{U_n}{B_{cp} \cdot l_{\Sigma}}$ - швидкість переміщення якоря у

встановленому режимі.

Електричні (проти-е.р.с., струм якоря) і механічні характеристики (швидкість, осьове зусилля) пов'язані між собою коефіцієнтами проти-е.р.с.

($K_E = \frac{E}{V_a}$) і переміщення ($K_C = \frac{E}{I_a}$) [2].

Рівняння (1–2) в операторній формі запису матимуть наступний вигляд:

$$F(p) = mp^2 X(p) + Dp \cdot X(p) + C \cdot X(p); \quad (3)$$

$$U_a(p) = Lp I_a(p) + RI_a(p) + K_E p \cdot X(p); \quad (4)$$

$$F(p) = K_C I_a(p). \quad (5)$$

$$3(5) \quad I_a(p) = \frac{F(p)}{K_C}.$$

Підставимо отримане значення до (4), а знайдений з цього результат – до (3), і отримаємо передавальні функції:

за положенням –

$$W_x(p) = \frac{X(p)}{U(p)} = \frac{K_C}{p^3 L m + p^2 (R m + L D) + p (D R + C L + K_C K_E) + R C}; \quad (6)$$

за швидкістю –

$$W_v(p) = \frac{pX(p)}{U(p)} = \frac{pK_C}{p^3 L m + p^2 (R m + L D) + p (D R + C L + K_C K_E) + R C}. \quad (7)$$

Якщо в (6–7) $D = C = 0$, то, розділивши їх чисельник і знаменник на $K_C \cdot K_E$, маємо:

$$W_x(p) = \frac{\frac{1}{K_E}}{p(T_e T_m p^2 + p T_m + 1)};$$

$$W_v(p) = \frac{1}{T_e T_m p^2 + p T_m + 1},$$

де $T_e = \frac{L}{R}$, $T_m = \frac{mR}{K_C \cdot K_E}$ - електрична і електро-механічна постійні ДЛП.

У відповідності до отриманих передавальних функцій структурна схема ДЛП як ланки системи регулювання матиме наступний вигляд:

Рис. 1. Структурна схема двигуна лінійного переміщення

Джерело: розроблено авторами.

2. Структурна схема системи позиціонування

В системі позиціонування ДЛП перетворює вплив управління у лінійне переміщення виконавчого органу механізму і фіксує його кінцеве положення. Точність фіксування заданої позиції визначається якістю динамічних характеристик лінійного електроприводу – швидкодією, перерегулюванням, ступенем коливальності перехідного процесу, запасом стійкості. Головним показником лінійного електроприводу є точність виходу робочого органу на задану позицію, яка залежить від інших регульованих параметрів: струму, швидкості руху. Тому систему позиціонування запропоновано виконувати за триконтурною схемою з підпорядкуванням контурів струму і швидкості головному контуру, який реалізує процес виходу робочого органу на задану позицію. Її структурна схема наведена на рис. 2.

Внутрішній контур струму включає до себе: регулятор струму з передавальною функцією

$K_{pc}(p) = K_p \frac{1+pT_e}{pT_e}$ і ланку формування струму

якоря з передавальною функцією

$$K_{fc}(p) = \frac{1}{R(1+pT_e)}.$$

Очевидно, що в контурі струму інерційність ланки формування струму компенсується пропорційно-інтегральним регулятором. Проте, тут присутні і некомпенсовані інерційності, які визначаються параметрами фільтрів на виході регулятора струму і системи управління (СУ) широтно-імпульсного перетворювача (ШПІ) постійної напруги. Нескомпен-

нсована ланка представлена передавальною функцією $K_{nc}(p) = \frac{1}{1+p\sigma}$, де σ - сума некомпенсованих постійних часу.

До контуру швидкості включено ланку формування проти-е.р.с. з передавальною функцією $K_{\phi e} = \frac{K}{pT_m}$.

Рис. 2. Структурна схема системи позиціонування
Джерело: розроблено авторами.

Положення робочого органу визначається в результаті інтегрування швидкості. Помилка контурів швидкості і положення обробляється регуляторами з передавальними функціями $K_{pc}(p), K_{pn}(p)$, значення яких знаходять за результатами оптимізації перехідних процесів.

Вихідні параметри контурів системи фіксують датчики струму, швидкості і положення з коефіцієнтами передачі K_{dc}, K_{di}, K_{on} відповідно.

В контурі струму присутня дискретна ланка - широтно-імпульсний перетворювач, підключений до ДПП. У подальшому аналізі враховуватимемо результат впливу лише постійної складової його вихідної напруги, приймаючи, що добуток коефіцієнтів підсилення системи управління і ШПП постійний і дорівнює K_{oc} . Таке рішення вірне, якщо електро-механічна постійна системи на порядок чи більше перевищує постійну інтегрування контуру струму [12]. В системі позиціонування ця умова виконується. Очевидно, що представлення дискретної ланки як неперервної дозволяє оцінити характеристики лише макропроцесів, залишаючи без уваги оцінку параметрів мікропроцесів, які є наслідком дискретності ШПП. Такий підхід вірний для аналізу дискретних систем невисокої точності. Для аналізу високоточних (прецизійних) систем регулювання необхідна також оцінка параметрів мікропроцесів.

3. Передавальні функції контурів системи позиціонування

а) Контур струму. З рис. 2 видно, що без врахування впливу проти-е.р.с. електродвигуна передавальна функція розімкненого контуру струму

$$W_{pc}(p) = K_{pc} \frac{1+pT_e}{pT_e} K_{oc} \frac{K_{dc}}{R(1+pT_e)(1+p\sigma)}.$$

При його налаштуванні на модульний оптимум $K_{pc} = \frac{T_e R}{2K_{dc} \cdot K_{oc} \sigma}$, тому передавальна функція замкненого контуру струму:

$$W_{zc}(p) = \frac{\omega^2}{p^2 + 2\xi\omega p + \omega^2}, \quad (8)$$

де

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}; \xi = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

б) Контур швидкості. Його передавальна функція в розімкненому стані при наявності пропорційного регулятора:

$$W_{pu}(p) = K_{pu} W_{zc}(p) \frac{R \cdot K_{dc}}{pT_m K_E}.$$

При налаштуванні контуру швидкості на модульний оптимум $K_{pu} = \frac{\sqrt{2}\omega T_m K_E}{R \cdot K_{di}}$, тому передавальна функція замкненого контуру швидкості:

$$W_{zu}(p) = \frac{\sqrt{2}\omega^3}{p^3 + 2\xi\omega p^2 + p\omega^2 + \sqrt{2}\omega^3}. \quad (9)$$

в) Контур позиціонування. Його передавальна функція в розімкненому стані при наявності пропорційного регулятора:

$$W_{pn}(p) = K_{pn} \frac{K_{on}}{p(p^3 + 2\xi\omega p^2 + p\omega^2 + \sqrt{2}\omega^3)},$$

де $K_{on} = \sqrt{2}\omega^3 K_{di}$.

При налаштуванні контуру швидкості на модульний оптимум $K_{pn} = \frac{\sqrt{2} \omega}{8 \cdot K_{\partial n}}$, тому передавальна функція замкненого контуру позиціонування:

$$W_{zn}(p) = \frac{0,25\sqrt{2} \omega^4}{p^4 + 2\xi\omega p^3 + p^2\omega^2 + p\sqrt{2}\omega^3 + 0,25\sqrt{2}\omega^4}. \quad (10)$$

4. Похибки регулювання контурів системи позиціонування

Для знаходження похибки окремого замкненого контуру системи позиціонування його передавальну функцію за управлінням в замкненому стані представимо у вигляді співвідношення двох поліномів, тобто $W_z(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$, де

$$A(p) = A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_0;$$

$$B(p) = B_l p^l + B_{l-1} p^{l-1} + \dots + B_0.$$

При впливі на вхід замкненого контуру збурення у вигляді нормованої одиничної функції зображення його реакції $H_z(p) = \frac{\bar{K}}{P} \cdot \frac{A(p)}{B(p)}$, де $\bar{K}$ - нор-

муючий множник відповідного замкненого контуру, значення якого дорівнює модулю його передавальної функції в розімкненому стані, а саме:

$$\bar{K}_{pc}(p) = K_{pc} \frac{K_{\partial c}}{R}, \bar{K}_{pu}(p) = K_{pu} K_{\partial u}, \bar{K}_{pn}(p) = K_{pn} K_{\partial n}.$$

У відповідності до теореми розкладання Хевісайда, оригінал перехідної характеристики замкненого контуру:

$$H_z(t) = \bar{K} \left[\frac{A(p)}{B(p)} \right]_{p \rightarrow 0} - \sum_{v=1}^l A_v e^{P_v t}, \quad (11)$$

де P_v - корні характеристичного рівняння замкненого контуру; $A_v = \frac{A(p)}{d/dp[B(p)]_{p \rightarrow P_v}}$ - відрахування для відповідного полюсу.

З урахуванням цього похибка регулювання контуру:

$$\Delta = \bar{K} [1 - H_z(t)]. \quad (12)$$

За формулами (11–12) розраховані процеси встановлення похибки кожного контуру для наступних значень параметрів ланок структурної схеми, рис. 2:

$$T_m = 0,1 \text{ с}; T_e = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; K_{\partial c} = 15 \text{ Ом}; R = 3 \text{ Ом};$$

$$K_e = 10,38; L_a = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; m = 3,5 \text{ кг};$$

$$K_C = 9,81 \frac{\text{Н}}{\text{А}}; K_{\partial u} = 6 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}}; K_{\partial n} = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

На рис. 3 представлені результати розрахунку процесу встановлення похибки, контуру струму для

відповідних значень некомпенсованої постійної і коефіцієнта передачі регулятора струму.

Рис. 3. Процеси встановлення похибки контуру струму:

$$1 - \sigma = 0,5 \text{ мс}, K_{pc} = 1; \quad 2 - \sigma = 0,25 \text{ мс}, K_{pc} = 2;$$

$$3 - \sigma = 0,1 \text{ мс}, K_{pc} = 5; \quad 4 - \sigma = 0,05 \text{ мс}, K_{pc} = 10$$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 3 видно, що при налаштуванні контуру струму на модульний оптимум величина перерегулювання залишається незмінною на рівні 4,3% і не залежить від некомпенсованої постійної і коефіцієнта підсилення регулятора. Зниження некомпенсованої постійної до значення $\sigma = 0,05 \text{ мс}$ призводить до суттєвого зниження часу перехідного процесу з стійкою реакцією на установлення при $K_{pc} < 10$. Як було відмічено вище, величина некомпенсованої постійної визначається постійними часу фільтрів, які вмикають на виході датчика струму і регулятора для зниження пульсацій. Її значення мають свою нижню межу з урахуванням прямого зв'язку з постійною інтегрування регулятора струму, що визначає граничну швидкість контуру [12] при його налаштуванні на модульний оптимум або ж при налаштуванні імпульсної системи на процес кінцевої тривалості.

Характеристичне рівняння замкненого контуру струму, як видно з [8], має другий порядок, що дозволило її корені знайти у загальному вигляді. Характеристичні рівняння замкнених контурів швидкості і положення, як видно з [9–10], мають третій і четвертий порядок відповідно, тому значення їх коренів були отримані чисельним методом з використанням функцій Штурма.

На рис. 4 представлений процес встановлення контуру швидкості.

З кривих на рис. 4 видно, що некомпенсована постійна контуру струму помітно впливає і на параметри процесу встановлення похибки контуру швидкості: амплітуду, частоту і час. Варіювання параметрів регуляторів контурів струму, швидкості і величини некомпенсованої постійної дозволило знайти діапазони їх змінювання, які відповідають

найменшим значенням перерегулювання і часу встановлення похибки контуру швидкості:
 $\sigma \leq 0,05 \cdot 10^{-2} \text{ c}$; $10 \leq K_{pc} \leq 50$; $100 \leq K_{pш} \leq 500$.

Рис. 4. Процеси встановлення похибки контуру швидкості:

1 – $K_{pc} = 1$, $K_{pш} = 10$; $\sigma = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ c}$;

2 – $K_{pc} = 2$, $K_{pш} = 20$; $\sigma = 0,25 \text{ c}$

Джерело: розроблено авторами.

Криві процесів встановлення похибки контуру положення представлені на рис. 5.

Рис. 5. Процеси встановлення похибки контуру положення:

1 – $\bar{K}_{pc} = 25$; $\sigma = 0,1 \text{ мс}$; $\bar{K}_{pш} = 300$; $\bar{K}_{pn} = 500$;

2 – $\bar{K}_{pc} = 10$; $\sigma = 0,25 \text{ мс}$; $\bar{K}_{pш} = 120$; $\bar{K}_{pn} = 200$

Джерело: розроблено авторами.

Важливою характеристикою головного контуру положення є величина усталеної похибки $\Delta_{уст}$. Її точне значення в системах неперервної дії оцінити

неможливо, так як тут процес експоненціально наближується до свого усталеного значення. Тому усталену похибку неперервної системи оцінюють приблизно на кінцевій стадії процесу її усталення. Для кривих рис. 5 відносна усталена похибка має наступні значення: $1 - \Delta_{уст} = 0,07$; $2 - \Delta_{уст} = 0,09$.

У розширеному аналізі процесів усталення похибки контурів системи позиціонування не враховано її дискретний характер, хоча по своїй сутності вона є такою, внаслідок наявності у контурі струму широтно-імпульсного перетворювача, який представлений неперервною ланкою. Оптимізація контурів системи виконана в результаті наближення до одиниці модулів їх передавальних функцій (оптимум за модулем). Оптимальна перехідна функція контуру струму при цьому має наступні параметри: час першого досягнення рівня її усталеного значення $t_{p1} = 4,7\sigma$, час входження до області величин, які відрізняються не більше, ніж на $\pm 2\%$ від усталеного значення $t_{p2} = 8,4\sigma$ і перерегулювання $4,3\%$.

Таким чином, максимальна швидкість контуру струму відповідає часу t_{p2} . Аналіз дискретної системи за допомогою постійної складової вірний, якщо впливом пульсацій вихідної напруги ШПП на точність позиціонування можна знехтувати.

Врахування дискретності ШПП дозволяє досягти граничної швидкості системи за рахунок реалізації в ній процесів кінцевої тривалості за допомогою рекурсивних цифрових фільтрів (регуляторів) з складними законами управління. Такий аналіз вірний для систем високої точності, що потребує окремого розгляду.

Висновки

1. Лінійний електропривід для позиціонування робочого органу бортової авіаційної техніки доцільно будувати за триконтурною структурою підпорядкованого регулювання з контролем струму, швидкості-положення.

2. Встановлено, що на точність позиціонування лінійного електроприводу суттєво впливає некомпенсована постійна контуру струму. Надані рекомендації для обрання її величини з урахуванням вимог компенсації пульсацій струму і оптимальної швидкості системи електроприводу.

3. Встановлена межа зміни параметрів налаштування регуляторів контурів, при яких забезпечується лінійна усталена похибка позиціонування та максимальна швидкість системи лінійного електроприводу.

4. Отримані наукові результати можуть бути використані в авіації при модернізації бортових систем автоматичного регулювання.

Список літератури

1. Электрический самолет: от идеи до реализации: монография / А.В. Левин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалев. - М: Машиностроение, 2010. - 288 с.
2. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, С.А. Сандлер. - М: Энергия, 1979. - 615 с.
3. Шестаков И.Я. Линейные электродинамические двигатели. Конструирование. Практическое применение: монография / И.Я. Шестаков, А.И. Строк, А.А. Фадеев. - Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2013. - 148 с.
4. Chau K.T. Chaos in Electric Drive Systems: Analysis, Control and Application / K.T. Chau, Z. Wang. - John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. - 318 p.
5. Мошкин В.Н. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: монография / В.Н. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. - Курган: Издательство Курганского государственного университета, 2010. - 220 с.
6. Католицкий Н.А. Линейный электродвигатель / Н.А. Католицкий // НАУКА: RASTUDENT.RU. - 2015. - № 4(16). - С. 40-44.
7. Горловенко П.Г. Возможности применения линейных электродинамических двигателей в авиации и космонавтике / П.Г. Горловенко // Актуальные проблемы в авиации и космонавтики. Технические науки. Сибирский федеральный университет, ИГДТ. - Красноярск, 2013. - С. 177-185.
8. Бондар Р.П. Дослідження характеристик магнітоелектричного лінійного вібраційного двигуна при роботі на пружно-в'язке навантаження / Р.П. Бондар // Електротехніка і електромеханіка. - 2019. - № 1. - С. 9-16. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.02>.
9. Бондар Р.П. Моделювання електромеханічних процесів лінійного магнітоелектричного двигуна привода двомасової віброударної системи / Р.П. Бондар, Г.М. Голенков // Технічна електродинаміка. - 2019. - № 6. - С. 43-48. <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.043>.
10. Подольцев О.Д. Моделювання пов'язаних електромеханічних та теплових процесів в лінійному магнітоелектричному двигуні на основі теорії мультифізичних кіл / О.Д. Подольцев, Р.П. Бондар // Технічна електродинаміка. - 2020. - № 2. - С. 50-55. <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.050>.
11. Моделирование многоканального колебательного движения вибрационной системы с линейным двигателем [Электронный ресурс] / Р.П. Бондар, Г.М. Голенков, Л.И. Мазуренко, А.Д. Подольцев // Технічна електродинаміка. - 2012. - № 1. - С. 49-56. - Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/10.15407/123456789/62059>.
12. Влияние пульсаций бесколлекторного двигателя постоянного тока на процесс управления запуском газотурбинного двигателя вертолета / В.Г. Башинский, О.Л. Шаповалов, А.И. Денисов, Е.А. Бурсала, А.Л. Бурсала // Технічна електродинаміка. - 2020. - № 2. - С. 56-66. <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.056>.

Надійшла до редколегії 10.11.2020

Схвалена до друку 15.12.2020

Відомості про авторів:

Башинський Володимир Георгійович

доктор технічних наук старший науковий співробітник
начальник Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0966-5714>

Денисов Юрій Олександрович

доктор технічних наук професор
завідувач кафедри Національного університету
“Чернігівська політехніка”,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

Ревко Анатолій Сергійович

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри
Національного університету “Чернігівська політехніка”,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

Бурсала Олена Олександрівна

старший науковий співробітник Державного
науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1829-1980>

Information about the authors:

Volodymyr Bashynskiy

Doctor of Technical Sciences Senior Research
Chief of State Scientific Research Institute
for Testing and Certification
of Arms and Military Equipment,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0966-5714>

Yuri Denisov

Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department of National University
“Chernihiv Polytechnical”,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

Anatoliy Revko

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Department
of National University “Chernihiv Polytechnical”,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

Olena Bursala

Senior Research Associate
of State Scientific-Research Institute for testing
and certification of armament and military equipment,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1829-1980>

**ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА
МЕХАНИЗМОВ БОРТОВОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

В.Г. Башинский, Ю.А. Денисов, А.С. Ревко, Е.А. Бурсала

Для управления позиционированием рабочего органа, выполняющего поступательное движение в процессе наработки соответствующих команд бортового компьютера летательного аппарата, предложена трехконтурная система с подчиненным регулированием. Она включает в себя внутренний контур тока с пропорционально-интегральным регулятором, контур скорости и главный контур положения с пропорциональными регуляторами. Питание двигателя линейного перемещения осуществляется от импульсного преобразователя постоянного напряжения. В процессе анализа системы учитывалась лишь постоянная составляющая выходного напряжения импульсного преобразователя, нагрузка полагалась постоянной. Целью исследования являлось получение условий достижения предельной точности функционирования на основе рационального структурного построения системы и оптимизации в ней процессов управления. Получены передаточные функции контуров системы позиционирования с учетом особенностей характеристик линейного двигателя. Передаточная функция контура тока имеет второй порядок, контура скорости – третий и контура положения четвертый порядок. На основе модульного оптимума найдены параметры звеньев соответствующих контуров. Выполнены расчеты ошибки регулирования в переходных и установившихся режимах соответствующих контуров. При настройке контура тока на модульный оптимум величина перерегулирования остается на уровне 4,3% и не зависит от некомпенсированной постоянной и коэффициента усиления регулятора тока. Снижение некомпенсированной постоянной до значения 0,05 мс не приводит к существенному снижению времени переходного процесса и устойчивой реакции его установления, если коэффициент усиления регулятора меньше 10. Расчеты показали, что величина некомпенсированной постоянной контура тока заметно влияет на параметры процесса установления скорости – амплитуду, частоту, время.

Варьирование параметров регуляторов контуров тока, скорости и некомпенсированной постоянной позволило установить диапазоны их изменения, которые соответствуют наименьшим значениям перерегулирования и времени установления ошибки контура скорости. В результате анализа процессов в главном контуре положения установлено предельное значение его ошибки регулирования. В выполненном анализе не учтено влияние пульсаций импульсного преобразователя постоянного напряжения, который питает линейный двигатель, на точность позиционирования. Выполнена качественная оценка такого влияния, показаны возможности её учета.

Ключевые слова: линейный двигатель, ошибка регулирования, передаточная функция, переходная характеристика, датчик.

**LINEAR ELECTRIC ACTUATOR FOR POSITIONING OF THE WORKING BODY
OF THE MECHANISMS OF ON-BOARD AVIATION EQUIPMENT**

V. Bashinskyi, Y. Denisov, A. Revko, E. Bursala

To control the positioning of the working body performing the translational motion in the process of generating the corresponding commands of the on-board computer of the aircraft, a three-circuit system with subordinate regulation is proposed. It includes an internal current loop with a proportional-integral controller, a speed loop and a main position loop with proportional controllers. The linear motor is powered from a DC voltage pulse converter. In the process of analyzing the system, only the constant component of the output voltage of the pulse converter was taken into account, the load was assumed to be constant. The aim of the study was to obtain conditions for achieving the maximum accuracy of functioning on the basis of a rational structural design of the system and optimization of control processes in it. Transfer functions of the positioning system contours are obtained taking into account the characteristics of the characteristics of the linear motor. The transfer function of the current loop is second order, the speed loop is third and the position loop is fourth order. On the basis of the modular optimum, the parameters of the links of the corresponding contours are found. Calculations of the control error in the transient and steady-state modes of the corresponding circuits are performed. When the current loop is tuned to the modular optimum, the overshoot value remains at 4.3% and does not depend on the uncompensated constant and the gain of the current controller. A decrease in the uncompensated constant to a value of 0.05 ms does not lead to a significant decrease in the time of the transient process and a stable response of its establishment, if the gain of the controller is less than 10. Calculations have shown that the value of the uncompensated constant of the current loop also significantly affects the parameters of the process of establishing the speed - amplitude, frequency, time. Varying the parameters of the regulators of the current loops, the speed and the uncompensated constant made it possible to establish the ranges of their variation, which correspond to the smallest values of overshoot and the settling time of the error of the speed loop. As a result of the analysis of the processes in the main position loop, the limiting value of its control error was established. The analysis does not take into account the effect of the ripple of the DC voltage pulse converter, which powers the linear motor, on the positioning accuracy. A qualitative assessment of this influence has been carried out, the possibilities of its accounting are shown.

Keywords: linear motor, control error, transfer function, transient response, sensor.