

В.М. Оксентюк¹, канд. техн. наук,

А.П. Кушнір², канд. техн. наук, доцент, І.П. Кравець², канд. техн. наук, доцент
(¹Національний університет "Львівська політехніка" СКБ електромеханічних систем)

(²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ВИКОНАВЧОГО ДВИГУНА ДЛЯ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ ПЛАТФОРМИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДЙОМНИКА

Відсутність редуктора в механізмі повороту платформи пожежного автопідйомника дає змогу значно спростити механічну частину привода і суттєво підвищити жорсткість системи. В статті проаналізовано та вибрано математичну модель виконавчого моментного вентильного двигуна безредукторного механізму повороту платформи. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання колекторного та вентильного моментних двигунів постійного струму у якості виконавчого електроприводу повороту платформи. Показано правомірність заміни математичного опису вентильного двигуна на колекторний у випадках для яких важливим є збіг статичних і динамічних характеристик залежності моменту і кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання.

Ключові слова: комп'ютерна модель, вентильний моментний двигун, пожежний автопідйомник, механізм повороту платформи, електропривод.

В.М. Оксентюк, А.П. Кушнір, І.П. Кравець

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА ПЛАТФОРМЫ ПОЖАРНОГО АВТО- ПОДЪЕМНИКА

Отсутствие редуктора в механизме поворота платформы пожарного автоподъемника дает возможность значительно упростить механическую часть привода и существенно повысить жесткость системы. Проанализировано и выбрано математическую модель исполнительного моментного вентильного двигателя безредукторного механизма поворота платформы. Проведено математическое и компьютерное моделирование коллекторного и вентильного моментных двигателей постоянного тока в качестве исполнительного электропривода поворота платформы. Показана правомерность замены математического описания вентильного двигателя на коллекторный в случаях для которых важным является совпадение статических и динамических характеристик зависимости момента и угловой скорости исполнительного двигателя от входного напряжения, а не его конструктивное выполнение.

Ключевые слова: компьютерная модель, вентильного моментный двигатель, пожарный автоподъемник, механизм поворота платформы, электропривод.

V.M. Oksentyuk, A.P. Kushnir, I.P. Kravets

COMPUTER DESIGN OF VALVE EXECUTIVE ENGINE FOR PLATFORM'S ROTATION MECHANISM OF AERIAL APPLIANCE

Absence of reducing gear in the mechanism of turn of platform of fire autolift enables considerably to simplify mechanical part of gearing and to substantially promote inflexibility of the system have been analyzed. An analysis and choice of mathematical model of executive valve torquer of gearedless mechanism of turn of platform has been made in the article. A mathematical and computer design is conducted collector and valve torquers of direct-current in quality of executive electromechanic of turn of platform. Legitimacy of replacement of mathematical description of valve engine is rotined on a collector in cases for which important is a coincidence of static and dynamic descriptions of dependence of moment and angulator of executive engine from entrance tension, but not him structural implementation.

Keywords: aerial appliance, platform's rotation mechanism, brushless torque motor.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції у будівництві і перенаселеність міст зумовлюють спорудження великої кількості висотних будинків та багатофункціональних комплексів, висота яких може сягати понад 100 м. Такі об'єкти мають ряд переваг над іншими, але попри те, що вони оснащені сучасними системами протипожежного захисту, через свої особливості вони можуть стати джерелом підвищеної небезпеки для людини, пов'язаної із загрозою виникнення пожежі, різного роду аварій і т.д. У таких будівлях передбачено евакуаційні виходи, однак, з різних причин (захаращеність евакуаційних виходів, зачинені евакуаційні двері тощо), виникає проблема щодо проведення рятувальних робіт на значних висотах. Для проведення рятувальних робіт та подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі необхідна спеціальна сучасна пожежно-аварійна техніка: висотні автопідйомники та автодрабини з люлькою і без. Робота на значних висотах із застосуванням підймальних механізмів супроводжується значним ризиком для життя, як рятувальників, так і потерпілих.

Класичні підйомні механізми, змонтовані на автомобільних шасі, вже не відповідають вимогам сьогодення. Вони повинні бути адаптовані як для проведення аварійно-рятувальних робіт з урахуванням усіх особливостей, так і для подачі вогнегасної речовини на значні висоти порядку 30 м і більше. На сучасних автопідйомниках впроваджується велика кількість інноваційних технічних рішень, спрямованих на підвищення функціональності, надійності і безпеки. До числа основних таких розробок можна віднести: систему комп'ютерної стабілізації, яка дозволяє демпфувати коливання стріли за допомогою гідравлічної протидії при поривах вітру, посадці в люльку тощо; застосування багатофункціональної люльки підвищеної вантажопідйомності (400 кг і вище), яка має систему подачі вогнегасних речовин, багатофункціональні пристрої для кріплення додаткового устаткування; стрілу із зчленованим коліном, що забезпечує її роботу на тильній стороні будівлі; реалізацію алюмінієвої концепції при виготовленні стріл; інноваційну систему дистанційної діагностики елементів автопідйомника, яка забезпечує передачу інформації про динаміку зміни її параметрів; комп'ютерну систему, що управляє усіма рухами стріли і системою безпеки, починаючи з установки машини на ґрунт тощо.

Деякі із цих інноваційних технологій уже реалізовані у автопідйомниках іноземного виробництва. Найбільш відомим у всьому світі виробником пожежних автопідйомників є фінська компанія "Бронто-Скайліфт". Вони випускають автопідйомники з робочою висотою від 23 до 114 м, які мають шарнірно-телескопічну стрілу з гідроприводом і люлькою на кінці стріли. Аналогічні підйомники випускає фірма "Фаун", "Івеко", "Тергерг" та інші. Автопідйомники оснащені електрогенератором і резервними акумуляторними системами для живлення електрогідравлічних систем керування в разі припинення подачі енергії від електрогенератора. Висотні автопідйомники вже комплектуються спеціальними дизель-генераторами від 3 до 15 кВт з метою забезпечення енергією інших спеціальних машин і інструментів.

У підймальних механізмах стріла не є абсолютно жорсткою, а тому через різні збурюючі впливи під час підймання люльки на висоту 30-114 м виникають пружні коливання. До факторів, які викликають коливання [1], можна віднести недосконалість виготовлення механічних елементів та їх з'єднань, неефективну роботу системи керування, реактивну дію вогнегасних речовин, що подаються по сухотрубах та пориви вітру (за швидкості вітру понад 10 км/с користуватися автопідйомником не рекомендується). Усе це зменшує точність позиціонування люльки в заданих координатах, тим самим зменшується ефективність гасіння пожежі і рятування людей, ускладнюється робота рятувальників, які знаходяться в люльці. Також під час зміни розташування стріли у просторі змінюється навантаження на приводний двигун наведення азимутальної координати у вигляді зміни моменту інерції.

Тому постало завдання розроблення системи автоматичного керування (САК) виконавчим електродвигуном механізму повороту платформи пожежного автопідйомника із забезпеченням високих статичних та динамічних показників в режимах роботи позиціонування і стабілізації з врахуванням вказаних параметричних і координатних збурень. Процес синтезування САК передбачає математичну модель об'єкта керування, в даному випадку математичну модель виконавчого двигуна механізму повороту. Враховуючи складність математично-

го опису об'єкта керування в цілому – механізму повороту платформи – доцільно визначити раціональний варіант математичного представлення, який би був поєднанням необхідної простоти і задовільної точності відображення характеристик виконавчого двигуна.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Одним з основних режимів роботи механізму повороту платформи є режим позиціонування [2, 3], коли необхідно перемістити стрілу з люлькою на заданий кут з високою точністю, без статичної похибки з обмеженням координат. Також робота в режимі позиціонування визначається граничними кутовими швидкостями стріли з люлькою, яку повинна забезпечити САК на основі тактико-технічних вимог до механізму повороту платформи.

Намагання отримати кращі показники переміщення стріли з люлькою (наприклад, вимоги до точності позиціонування доходять до 1 кутової секунди) призводить до ускладнення завдань, що виконуються приводами повороту стріли. Тому САК повинна відповідати переліку жорстких вимог: висока швидкодія, статична і динамічна точність відтворення заданих траєкторій, плавність розгону і гальмування двигуна, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низька чутливість до координатних і параметричних збурень, висока надійність [4].

Серйозною перешкодою для отримання якісних статичних та динамічних характеристик системи повороту платформи є наявність редуктора в механізмі повороту, що призводить до утворення люфтів і, як наслідок, до виникнення динамічних ударів під час запуску, зупинки чи дії навантаження на опорно-поворотний механізм. Це обумовлює зношення зубців редукторної системи та неможливість стабілізації положення люльки. Тому для забезпечення високих статичних і динамічних показників було запропоновано [5] модернізувати систему повороту платформи пожежного автопідйомника шляхом заміни механічної редукторної системи повороту між виконавчим двигуном і робочим механізмом електромеханічною безредукторною, побудованою на базі моментного вентильного двигуна. Відсутність редуктора дає змогу значно спростити механічну частину привода і суттєво підвищити жорсткість електромеханічної системи механізму повороту платформи.

Математичний опис вентильних двигунів є достатньо складним [6] і громіздким до використання у математичному апараті для синтезування різноманітних систем керування. Під час синтезування САК переміщенням люльки зокрема повороту платформи для забезпечення вказаних вище показників передбачається застосування достатньо складного математичного апарату, наприклад, оптимального керування, релейного керування тощо [7-11]. Тому, безперечно, була б перевагою можливість застосування альтернативного простого та інформативного математичного опису об'єкта керування – вентильного двигуна постійного струму.

Метою роботи є синтез, аналіз та вибір математичної моделі виконавчого моментного вентильного двигуна (МВД) безредукторного механізму повороту платформи пожежного автопідйомника для подальшого синтезування системи автоматичного керування.

Результати дослідження. Поєднання умови високоточної роботи на низьких швидкостях з необхідністю розвивати великий момент на валу забезпечується використанням МВД [7] у ролі приводного двигуна електроприводу (ЕП), який дає можливість недовготривалої роботи останнього навіть у режимі короткого замикання. Використання в безредукторному ЕП з МВД давачів кута, положення ротора і швидкості, які не потребують власних підшипників (вбудована конструкція), є перспективним вирішенням проблеми створення високоточних динамічних ЕП повороту.

Як уже зазначалося, математичний опис вентильних двигунів є достатньо складним і громіздким. Натомість класична математична модель двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів є загальновідомою [9], простою, зручною, широко адаптованою і дає змогу отримувати необхідні рішення різноманітних математичних задач синтезу САК без ускладнення процесу математичного опису. Тому проведено дослідження математичних моделей двигуна постійного струму та моментного вентильного двигунів у ЕП повороту платформи пожежного автопідйомника за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання.

Безредукторний тихохідний ЕП повороту платформи, побудований на базі МВД, має певні

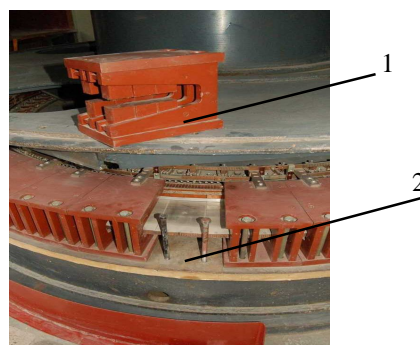
особливості: можливість роботи приводного двигуна у режимі короткого замикання; навантаження на валу виконавчого двигуна у вигляді значного реактивного статичного моменту, що створюється силами сухого та незначного в'язкого тертя через значну масу стріли; мала електромагнітна стала часу якірного кола і, порівняно з останньою, велика електромеханічна стала часу ЕП.

Механізм повороту платформи [2] відзначається великою масою, змінним моментом інерції та статичним і динамічним навантаженням. Він призначений для приводу поворотної платформи автомобільних підіймачів, в яких висота підйому становить 22 - 114 метрів, маса стріли може сягати до 10 000 кг, вантажопідйомність є в межах 250 до 500 кг, а швидкість повороту знаходиться в діапазоні 0,4 - 2,0 об./хв.

Враховуючи специфіку об'єкта керування (висока вартість, трудоемкість виготовлення) та на основі проведених досліджень для математичного моделювання, вибираємо такі параметри досліджуваного привода повороту, для якого можемо застосувати уже розроблений вентильний моментний двигун, а саме: $M_c = 1279 \text{ Нм}$; $\omega = 0,2 \text{ рад/с}$; $J = 160000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ (де M_c – момент статичного навантаження; ω , J – кутова швидкість та момент інерції відповідно механізму повороту платформи). Для кожної конкретної моделі пожежно-рятувальної машини необхідно використовувати уточнені параметри ЕП, але принцип синтезування САК і побудови власне ЕП залишається незмінним. Дослідження проведено на прикладі розробленого в СКБ ЕМС НУ "Львівська політехніка" вентильного моментного двигуна (рис. 1) з такими номінальними параметрами: $R_{\text{я}} = 1,52 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,0091 \text{ Гн}$; $C = 131 \text{ Нм/А}$; $M_{\text{max}} = 13000 \text{ Нм}$; $M_{\text{н}} = 8750,8 \text{ Нм}$; $\omega_{\text{н}} = 0,37 \text{ рад/с} = 21 \text{ град/с}$; $J_{\text{д}} = 2000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $U_{\text{н}} = 150 \text{ В}$ (де: $R_{\text{я}}$ – активний опір якірного кола; $L_{\text{я}}$ – індуктивність якірного кола; C – конструктивна стала двигуна; M_{max} , $M_{\text{н}}$ – максимальний та номінальний моменти двигуна відповідно; $\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість двигуна; $J_{\text{д}}$ – момент інерції двигуна; $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга живлення двигуна). Специфіка таких моментних машин полягає у їх унікальній конструкції та у високій прецизійності виконання через високі вимоги до якості наведення платформи. Вказані електричні машини мають "плоску" вбудовувану конструкцію без власних підшипників, діаметр біля 2,5 м, діаметр вала біля 1,3 м (рис. 1). З точки зору магнітоелектричного виконання ці машини зроблено з немагнітним сегментованим якорем та індуктором з блоковою структурою магнітної системи. Електромагнітна стала часу таких двигунів є достатньо малою і становить біля 0,006 с, ($T_{\text{я}} = 0,006 \text{ с}$) що забезпечується особливостями конструктивного виконання і пояснюється порівняно великим опором обмотки якоря і відсутністю магнітопроводу.



а)



б)

Рисунок 1 – Конструкція електричної моментної машини:

а) загальний вигляд; б) електромагнітна система (1 – індуктор, 2 – сегментований якор)

Проведемо математичне моделювання та комп'ютерний аналіз між ЕП переміщення люльки з колекторним двигуном постійного струму і між ЕП переміщення люльки з моментним вентильним двигуном. Для живлення колекторного двигуна постійного струму у ролі силового перетворювача використовується малоінерційний широтно-імпульсний перетворювач [8], а для живлення вентильного двигуна – силовий електронний комутатор з регулюванням за принципом широтно-імпульсної модуляції.

Незважаючи на суттєві відмінності у конструкціях двигунів, у таких ЕП механічні ха-

характеристики аналогічні як в статичних, так і в динамічних режимах роботи. Однак вони можуть відрізнятися через наявність електромагнітного зв'язку між обмотками двигуна і електромагнітної сталої часу обмоток якоря. Чим більші значення цих параметрів, тим більше відрізняються характеристики безконтактних і колекторних двигунів. Моментний вентильний двигун, який використовується у цій роботі, виготовлено з малою електромагнітною сталою часу обмоток, а електромагнітний зв'язок між ними мінімальний. Тому, для порівняння і дослідження характеристик колекторного і вентильного моментних двигунів з метою підтвердження їх аналогічності було проведено комп'ютерне моделювання.

У середовищі MATLAB\Simulink побудована комп'ютерна модель (рис. 2)

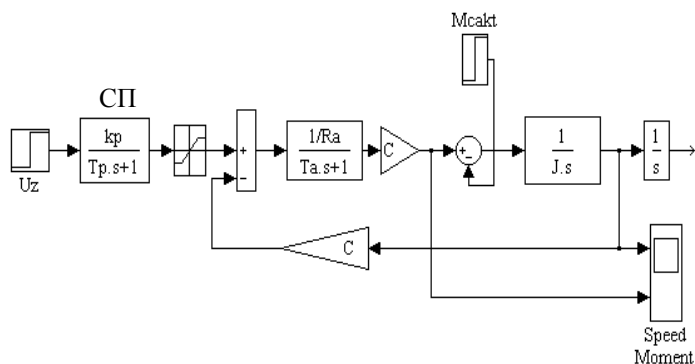


Рисунок 2 – Структурна схема комп'ютерної моделі колекторного двигуна постійного струму

колекторного моментного двигуна постійного струму на основі відомих рівнянь його електромеханічної характеристики та рівняння руху [9]. Сигнал напруги завдання U_z подається на силовий перетворювач, який представляється аперіодичною ланкою першого порядку із сталою часу $T_p = 0,005$ с.

На даній моделі було проведено експерименти, результати яких представлено на рис. 3а, 4а: прямий запуск і розгін

двигуна до швидкості неробочого ходу, яка становить $\omega_o = 1,145 \text{ рад/с}$; накидання навантаження $M_c = 5M_{сн} = 6395 \text{ Нм}$ у час 80 с.

Розгін відбувається за час, рівний $5T_{ем} = 68$ с, де $T_{ем}$ – електромеханічна стала часу ЕП, $T_{ем} = \frac{(J R_a)}{C^2} = 13,6$ с. Як видно з цих рисунків, статична характеристика (рис. 4а) моментного двигуна є достатньо м'якою, що є характерною особливістю двигунів такого типу.

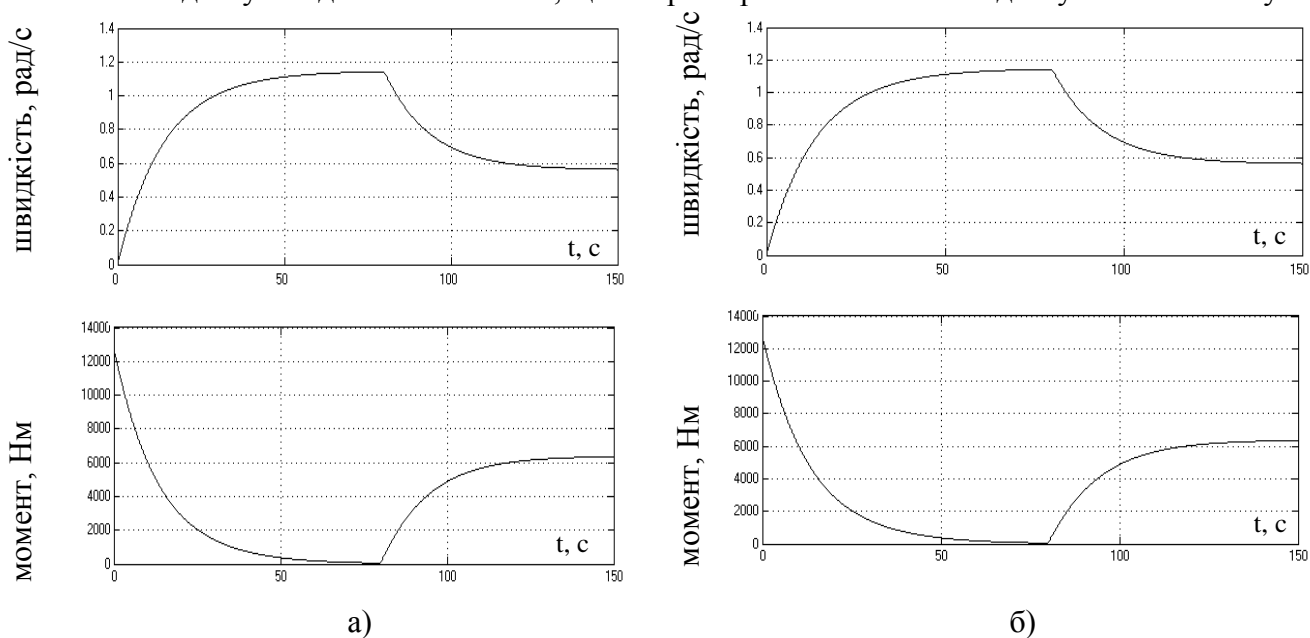


Рисунок 3 – Результати комп'ютерного моделювання виконавчого моментного двигуна: а) колекторний двигун постійного струму, б) вентильний безконтактний моментний двигун

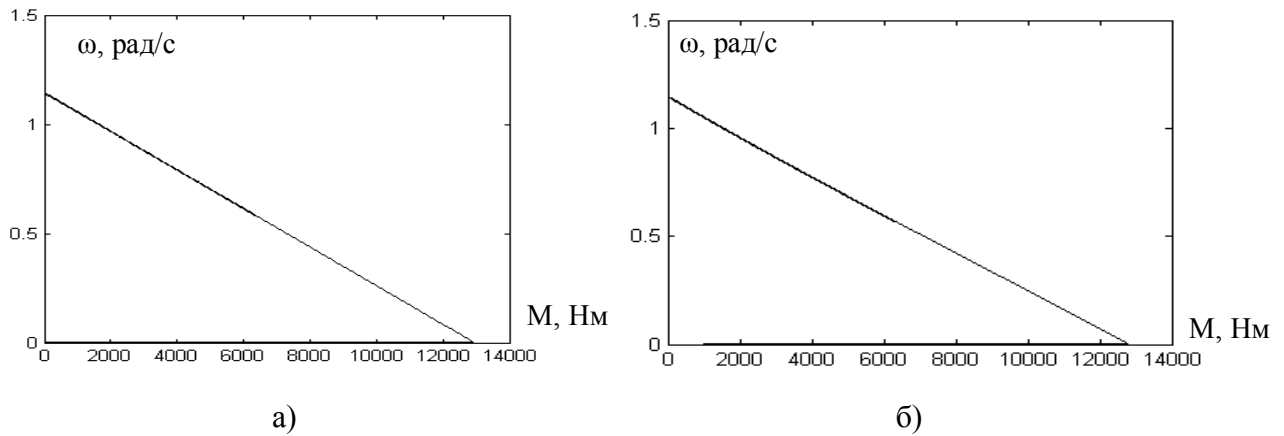


Рисунок 4 – Результати комп'ютерного моделювання виконавчого моментного двигуна - статична характеристика: а) колекторний двигун постійного струму, б) вентильний безконтактний моментний двигун

Математичний опис вентильного двигуна в просторових векторах має такий вигляд [6]:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt}; \quad (1)$$

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + \vec{\Psi}_r; \quad (2)$$

$$M = \frac{3}{2} p \operatorname{mod}(\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s); \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (4)$$

де \vec{u}_s , \vec{i}_s – вектори напруг і струмів статора; $\vec{\Psi}_s$ – вектор повного потокозчеплення обмотки статора; $\vec{\Psi}_r$ – вектор потокозчеплення обмотки статора, сформованого магнітним потоком полюсів ротора.

Враховуючи малу величину L_s , можна прийняти, що $\vec{\Psi}_s = \vec{\Psi}_r$. Підставляючи (2) в (1), і переходячи до нерухомої ортогональної системи координат (α, β), замість рівнянь (1) – (4) отримаємо

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \omega \Psi_{r\beta}; \quad (5)$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + \omega \Psi_{r\alpha}; \quad (6)$$

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \quad (7)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (8)$$

де індексами α і β позначені відповідні проекції векторів на нерухомі осі координат.

Під час обертання ротора проекції на осі α і β вектора потокозчеплення $\vec{\Psi}_r$ запишемо у вигляді:

$$\Psi_{r\alpha} = \Psi_{r,m} \cos(\varphi_o + \omega_e t); \quad \Psi_{r\beta} = \Psi_{r,m} \sin(\varphi_o + \omega_e t), \quad (9)$$

де $\Psi_{r,m}$ – амплітуда вектора потокозчеплення $\vec{\Psi}_r$; φ_o – початковий кут положення ротора щодо нерухомої системи координат; ω_e – кутова швидкість ротора в електричних радіанах за секунду.

З метою отримання стабільності величини електромагнітного моменту вентильного двигуна з максимальним значенням просторовий вектор магніторушійної сили статора, а отже і вектор струму статора повинен бути зсунутий щодо просторового вектора потокозчеплення, викликаного магнітним полем ротора, на кут ± 90 ел. град [6]. Враховуючи можливість керу-

вання двигуном шляхом регулювання величини напруги, яка підводиться до обмоток статора, а також беручи до уваги незначний вплив електромагнітної постійної часу обмоток, миттєві величини проекцій напруги на осі нерухомої системи координат описуватимуться рівняннями:

$$u_{s\alpha} = U_m \cos\left(\varphi_o + \omega_e t \pm \frac{\pi}{2}\right); u_{s\beta} = U_m \sin\left(\varphi_o + \omega_e t \pm \frac{\pi}{2}\right), \quad (10)$$

де U_m – амплітудне значення напруги, що прикладається до обмоток статора в даний момент; знак "+" відноситься до рухового режиму роботи, а знак "-" – до гальмівного; ω_e – кутова швидкість ротора в електричних радіанах за секунду, $\omega_e = \omega p$.

Підставляючи (9) і (10) в рівняння (5) – (8) і позначаючи електромагнітну постійну часу обмотки статора $T_e = L_s/R_s$, отримуємо наступну систему рівнянь, що описує роботу вентильного двигуна:

$$\frac{U_m}{R_s} \cos\left(\varphi_o + \omega_e t \pm \frac{\pi}{2}\right) = i_{s\alpha} + T_e \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \frac{\omega p \Psi_{r,m}}{R_s} \sin(\varphi_o + \omega_e t); \quad (11)$$

$$\frac{U_m}{R_s} \sin\left(\varphi_o + \omega_e t \pm \frac{\pi}{2}\right) = i_{s\beta} + T_e \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{\omega p \Psi_{r,m}}{R_s} \cos(\varphi_o + \omega_e t); \quad (12)$$

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_{r,m} [i_{s\beta} \cos(\varphi_o + \omega_e t) - i_{s\alpha} \sin(\varphi_o + \omega_e t)]; \quad (13)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \quad (14)$$

Виходячи з отриманої системи рівнянь (11) – (14), побудовано математичну модель вентильного двигуна, яка реалізована в середовищі MatLab/Simulink і приведена на рис. 5 (для рухового режиму роботи). Окрім рішення вказаних рівнянь, пропонується модель дає можливість визначати складову вектора струму, паралельну до вектора $\vec{\psi}_r$ (поздовжню складову i_d в ортогональній системі координат d, q, що обертається із швидкістю ротора, суміщеною віссю d з $\vec{\psi}_r$):

$$i_d = i_{s\alpha} \cos(\varphi_o + \omega_e t) + i_{s\beta} \sin(\varphi_o + \omega_e t). \quad (15)$$

Початкове кутове положення ротора φ_o задається блоком Start position.

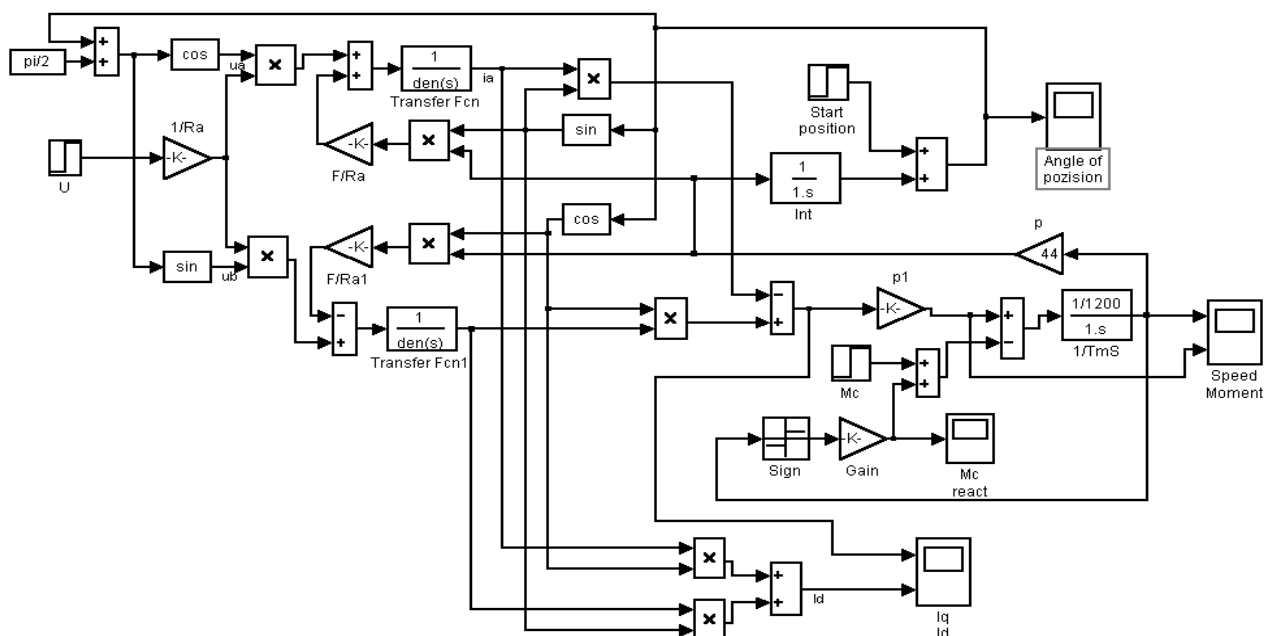


Рисунок 5 – Функціональна схема комп'ютерної моделі вентильного двигуна в нерухомій системі координат

На рис. 3б і 4б представлені осцилограми перехідних процесів прямого запуску вентильного двигуна і розгону до швидкості неробочого ходу (також становить 1,145 рад/с) при підключенні до джерела постійної напруги 150 В з подальшим накиданням навантаження такої ж величини 6395 Нм.

Через малу електромагнітну постійну часу обмоток статора запуск двигуна здійснюється подібно до класичного варіанта без урахування електромагнітної інерції.

Порівнюючи отримані результати динамічних та статичних характеристик безконтактного і колекторного двигунів (рис. 3, рис. 4) можна відмітити, що вони майже однакові (розбіжність 6%). Тому для подальших досліджень ЕП повороту платформи, коли важливою є залежність моменту і кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання, вибирається математична модель колекторного двигуна. Дана математична модель є простою, що є вагомим аргументом, зважаючи на складність і нелінійність ЕП повороту платформи.

Наведемо приклад синтезування САК переміщенням люльки із використанням математичного опису колекторного моментного двигуна постійного струму. У першу чергу розглянемо питання демпфування пружних коливань люльки засобами систем керування. Математична модель повороту платформи підйимального механізму наведена в роботі [13]. Визначити момент пружної деформації стріли досить проблематично. Тому реалізуємо двомасову позиційну САК, побудовану за принципом системи підпорядкованого керування (СПР) переміщенням люльки [8, 9] без контура регулювання моменту пружної деформації $M_{12}(p)$. Система підпорядкованого керування СПР швидкістю ЕП [9] традиційно будується як двоконтурна система з контурами регулювання струму та швидкості обертання. Оскільки ВМД дає можливість короткочасної роботи в режимі короткого замикання і пуск відбувається на природній характеристиці, а також враховуючи достатньо малу величину електромагнітної сталої часу якірного кола в контурі регулювання струму, порівняно з механічними сталими часу, призначеному для форсування наростання струму в перехідних режимах роботи, у компенсації впливу електромагнітної сталої часу, немає необхідності, тому в подальшому аналізі він виключається зі складу САК. Таким чином для першого наближення, САК переміщенням люльки побудовано як триконтурну СПР з контурами регулювання швидкостями обертання платформи, люльки і кута переміщення люльки [9]. Для синтезування регуляторів за малу некомпенсовану сталу часу прийнято суму сталих часу широтно-імпульсного перетворювача та якірного кола ($T_{\mu} = 0,011$ с). Тоді передавальна функція електричної частини привода $W_{el.np}(p) = 1/(T_{\mu}p + 1)$. На рис. 6 показана структурна схема такої СПР з відповідними позначеннями: $W_{pn}(p)$ – передавальна функція регулятора положення люльки; $W_{p\omega 1}(p)$, $W_{p\omega 2}(p)$ – передавальні функції регулятора кутової швидкості двигуна і люльки відповідно; J_1 , J_2 – сумарні моменти інерції першої та другої мас відповідно; M_1 – момент, що діє зі сторони двигуна; $F_s(p)$ – горизонтальна складова збурень, які обумовлені силою вітру і реактивним зусиллям від струменя води; C_{12} – коефіцієнт пружності деформації згину; b_{12} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя у пружній стрілі; $\omega_1(p)$, $\omega_2(p)$ – кутові швидкості двигуна і люльки відповідно; $M_{12}(p)$ – момент пружної деформації стріли в горизонтальній площині; $\varphi_{лк}(p)$ – кут переміщення люльки; p – оператор Лапласа.

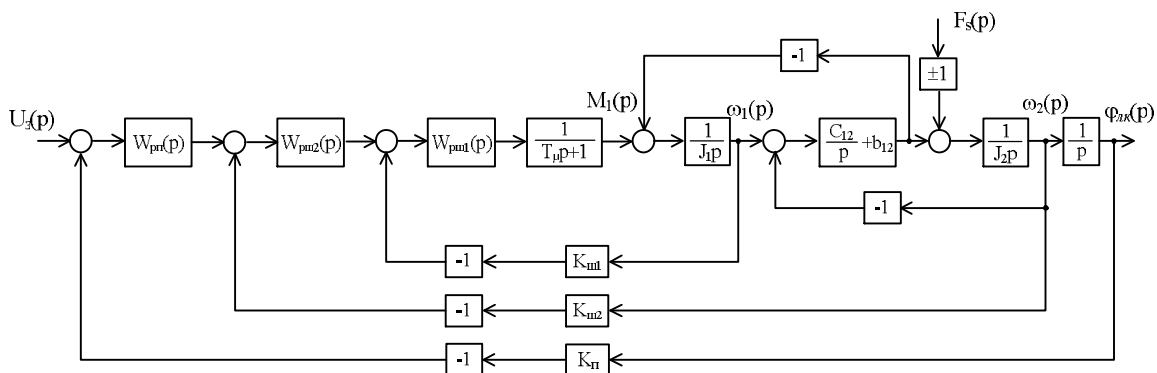


Рисунок 6 – Структурна схема двомасової позиційної СПР повороту платформи.

Передавальна функція $W_n(p) = \varphi_{лн}(p)/U_3(p)$ двомасової позиційної СПР повороту люльки (рис. 6) має вигляд:

$$W_n(p) = \frac{W_{pn}(p)W_{пу2}(p)W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)(b_{12}p + C_{12})}{J_1 p^2 (J_2 p^2 + b_{12}p + C_{12}) + (b_{12}p + C_{12})J_2 p^2 + W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)K_{у1}p(J_2 p^2 + b_{12}p + C_{12}) + \rightarrow} \\ \rightarrow + W_{пу2}W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)C(b_{12}p + C_{12})K_{у2}p + W_{pn}(p)W_{пу2}(p)W_{пу1}(p)W_{ел.нр}(p)C(b_{12}p + C_{12})K_n} \quad (16)$$

Як видно з передавальної функції (16), даний опис моментного вентильного двигуна дає змогу застосувати до синтезу СПР переміщенням люльки традиційні методи синтезу систем, згідно з теорією автоматичного керування.

Висновки

Проведено математичне та комп'ютерне моделювання колекторного та вентильного моментних двигунів постійного струму у якості виконавчого електромеханічного привода повороту платформи пожежного автопідійомника. Показана правомірність заміни математичного опису вентильного двигуна на колекторний у випадках, для яких важливим є збіг статичних і динамічних характеристик залежності моменту і кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання. Дана модель планується для використання під час синтезу двомасової системи автоматичного керування переміщенням люльки пожежного автопідійомника, яка забезпечить статичні та динамічні характеристики, згідно з технологічними вимогами.

Список літератури

1. Дівеєв Б.М. Застосування різного типу маятникових динамічних гасників коливань / Дівеєв Б.М., Коваль Т.Б., Пастернак М.Г. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. - Випуск 45. – С.472-478 с.
2. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины : [учебник для вузов по специальности “Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование”] / Вайнсон А.А. – М. : Машиностроение, 2004. – 536с.
3. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини : навчальний підручник / Іванченко Ф.К. – Вища шк., 1993. – 414с.
4. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT) : ДСТУ EN 14043:2008. – [Чинний від 2008-12-26]. – К. ; Держспоживстандарт України, 2008. – 176 с. – (Національний стандарт України).
5. Кушнір А.П. Вентильний електропривод механізму повороту платформи пожежного автопідійомника / Кушнір А.П., Марущак Я.Ю., Оксентюк В.М. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2014. – №24. – С.103-110.
6. Ткачук В. Електромеханотроніка : навчальний посібник / Ткачук В. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка». 2001. – 404 с.
7. Следящие приводы: В 3 т. 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 780 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
9. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням : навчальний посібник / Марущак Я.Ю. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2005. – 208 с.
10. Толочко О.И. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм управления позиционным приводом с учетом ограничений на скорость и ускорение / Толочко О.И., Розкаряка П.И. // Електротехніка і енергетика: Зб. наук. праць ДОНАТУ. – Донецьк: ДонДТУ, 2002. – № 41. – С. 159-163.

11. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
12. Управление вентиляемыми электроприводами постоянного тока / Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. – М.: Энергия, 1996 – 200 с.
13. Марущак Я.Ю. Керування горизонтальною складовою руху люльки підйимального механізму для рятувальних робіт / Марущак Я.Ю., Кушнір А.П. // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика : Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – № 28. – С. 309-311.

References

1. Diveiev, B., Koval T., Pasternak M. (2011). Application different of type pendulum dynamic gasnikiv vibration. *Avtomatizatsiya of virobnychih protsesiv in mashinobuduvanni that priladobuduvanni (Automation of productive processes in an engineer and instrument-making)*, 45, 472-478 (in Ukr.).
2. Vainson, A.A. (2004). *Lifting-transport machines*. Moscow : Mechanical engineering (in Rus.)
3. Ivanchenko, F.K. (1993). *Lifting-transport machines*. Higher school (in Ukr.).
4. *Autostairs are fire. General technical requirements and methods of test* (EN 14043:2005, IDT): DSTU EN 14043:2008/ Kyiv: Derzsposuzvstandart of Ukraine 2004 (in Ukr.).
5. Marushchak, Y.Y., Kushnir, A.P., Oksentyuk V.M. (2014). Switched electrical drive of platform’s rotation mechanism of aerial appliance. *Fire of safety*. Lviv: LDU BGD, 24, 103-110 (in Ukr.).
6. Tkachuk, V. (2001). *Elektromehanotronika*. Lviv : National university “Lviv polytechnic” (in Ukr.).
7. Chemodanov, B.K. (1999). *Tracker drives*. Moscow : MHTU Publishing house N.E. Bauman (in Rus.)
8. Kliuchiv, V.I. (2001). *Theory of electric drive*. Moscow : Energoatomizdat (in Rus.)
9. Marushchak, Ya.Yu. (2005) *Synthesis of electromechanical systems with serial and parallel adjustment*. Lviv : National university “Lviv polytechnic” (in Ukr.)
10. Tolochko, O.I. Rozkariaka, P.I. (2002). Forming of optimal on heating diagrams of management by a position drive taking into account limits on speed and acceleration. *Electrical engineering and energy*. 41, 159-163 (in Ukr.).
11. Sadovyi, A.V., Sukhinin, B.V., Cokhina, Yu. V. (1996). System of optimal control of precision electromechanics. Kyiv : ISIMO (in Ukr.).
12. Lebedev, E.D., Neimark, V.E., Pistrak, M.Ya., Slezhanovskyi, O.V. (1996). Management by the valve electromechanics of direct. Moscow : Energy (in Rus.).
13. Marushchak, Ya.Yu., Kushnir, A.P. (2010). Control of horizontal movement of lifting mechanism cradle for rescue works. *Problems of automatic electric drive. A theory and practice : An announcer of the National technical university the "Kharkiv polytechnic institute"*, 28, 309-311 (in Ukr.).

