

УДК 629.3

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.93.0.128

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНИЙ КЛАПАН ВИКОНАВЧОГО ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯМ

Михалевич М. Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Під час зміни умов роботи електропневматичного клапана змінюються його вихідні параметри. Метою роботи є формування залежностей, що визначають параметри керуючого сигналу для системи керування зчепленням транспортних засобів категорій M_3 та N_3 в умовах зміни напруги живлення, перепаду тиску на клапані та температури навколишнього середовища. Шляхом моделювання роботи електропневматичного клапана було побудовано поверхні відгуку щодо величини керуючого імпульсу залежно від таких параметрів, як напруга живлення бортової мережі транспортного засобу, температура навколишнього середовища та перепад тиску на електропневматичному клапані.

Ключові слова: електропневматична система керування зчепленням, електропневматичний клапан, пілотний імпульс, поверхня відгуку, вплив температури.

Вступ

Від роботи електропневматичного клапана залежить точність та плавність роботи всього електропневматичного приводу зчеплення. Під час рушання транспортного засобу найбільш затребуваним є режим максимальної точності керування клапана. У цьому режимі клапан працює за умови гранично можливої тривалості керуючого імпульсу. Тому врахування зміни температури, напруги живлення та перепаду тиску на електропневматичному клапані важливе для відтворення його робочого процесу й розуміння властивостей системи керування. Частіше за все математичне моделювання роботи тієї чи іншої системи або апарата відбувається за нормальних умов. Серед них тиск, вологість повітря та температура навколишнього середовища. Зазвичай верифікаційні експерименти проводять за умови кімнатної температури 16–22 °С, нормального атмосферного тиску та вологості повітря 40–70 %. Для унеможливлення впливу вологи електронні блоки, електромагнітні датчики та електродвигуни виготовляють із різним ступенем захищеності від вологи та пилу. Відповідна класифікація визначається стандартом [1]. Тиск на згадані елементи системи керування чинить незначний вплив, що зазвичай не враховують. Натомість температурний чинник може впливати на роботу системи керування дуже суттєво, але часто не береться до уваги в наукових дослідженнях. Відповідно до нормативних вимог [2, 3] діапазон використання електронних виробів для автомобільної промисловості становить від –40 °С до +50 °С.

Аналіз публікацій

На сьогодні можна виокремити три основних методи розрахунку магнітних полів і методів розрахунку електромагнітів [4]:

- аналітичні;
- графічні;
- чисельні.

Чисельні методи найбільш точні та дозволяють детально розраховувати магнітне поле магнітного ланцюга довільної форми. Програмні комплекси, в основі яких використовують методи кінцевих елементів, складно інтегрувати до аналітичних моделей. Зазвичай попередньо аналізують усі можливі стани магнітної системи для формування матричної аналітичної моделі електромагніту [5] та вже в такому вигляді використовують у складі аналітичних моделей системи керування. Програмні комплекси, що дозволяють здійснювати міждисциплінарні розрахунки, дуже дорого коштують [6]. Тому науковці та дослідники пропонують удосконалені аналітичні моделі, що найбільш пристосовані для вирішення окремих задач електродинаміки [7]. Виведення автомобільної продукції в серійне виробництво передбачає широкий комплекс випробувань. Одним із ключових випробувань є кліматичні. На жаль, наукових досліджень роботи автомобільних компонентів за умови різних температур небагато [8, 9].

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є формування залежностей, що визначають параметри керуючого сигналу для системи керування зчепленням

транспортних засобів категорій M_3 та N_3 в умовах зміни напруги живлення, перепаду тиску на клапані та температури навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести оптимізацію параметрів керуючого імпульсу за критерієм забезпечення мінімально можливого стійкого часу відкритого стану електропневматичного клапана керування виконавчим пристроєм керування зчепленням.

Модель електропневматичного клапана

На основі залежностей, що наведені в [10], можна сформулювати поверхню відгуку для відтворення індуктивності електромагнітного клапана в будь-якому положенні й під впливом різної температури навколишнього середовища.

Для моделювання робочого процесу електромагнітного клапана з можливістю врахування отриманих значень індуктивності та опору пропонується використовувати математичну модель (1). Вона є вдосконаленою моделлю з роботи [11] шляхом врахування впливу температури навколишнього середовища на індуктивність котушки електропневматичного клапана.

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot i^2 - P_{np}(x) - P_{fr}}{m} \\ \frac{di}{dt} = \frac{U(t) - R(T) \cdot i - i \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}}{L(T, x)} \end{cases} \quad (1)$$

де x – переміщення осердя електромагніту, м; i – сила струму в обмотці електромагніту, А; $U(t)$ – напруга як функція від часу, яка відповідає сигналу з ЕБК, В; $L(T, x)$ – індуктивність як функція від температури та положення осердя електромагнітного клапана, Гн; $L(x)$ – індуктивність як функція від положення осердя електромагнітного клапана, Гн; $R(T)$ – опір котушки електромагніту як функція від температури навколишнього середовища, Ом; P_{fr} – сила тертя, Н; $P_{np}(x)$ – сила протидії, що враховує перепад тиску на клапані та вплив зворотної пружини, Н.

Модель (1) описує робочий процес електропневматичного клапана з урахуванням таких ключових факторів, як перепад тиску на клапані, температура навколишнього середовища, напруга живлення. За відомих параметрів електропневматичного клапана

отримаємо можливість відтворення його робочого процесу (рис. 1).

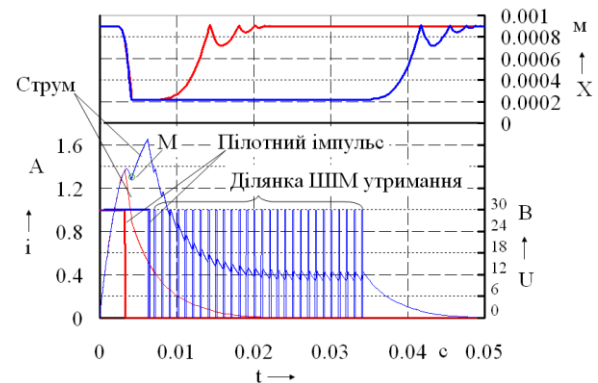


Рис. 1. Порівняння імпульсів керування електромагнітним клапаном

Для керування електропневматичним клапаном використовують керуючий імпульс, який складається з двох складників. Це пілотний імпульс – безперервний імпульс струму для забезпечення спрацювання електропневматичного клапана та ділянка утримання – проміжок часу, під час якого відбувається утримання електропневматичного клапана у відкритому стані завдяки використанню широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Керуючі впливи із ділянкою утримання використовуються за необхідності тривалого відкриття електропневматичного клапана. Для забезпечення мінімального переміщення органу керування зчепленням керуючий вплив на електропневматичний клапан необхідно подавати мінімально можливої тривалості. Зазвичай для цього достатньо пілотного імпульсу.

Вплив зазначених вище факторів на роботу електропневматичного клапана досить суттєвий, й ігнорування адаптації керуючого впливу під час керування електропневматичним клапаном може спричинити відмову системи керування всього апарату керування зчепленням із причини виходу за робочий діапазон електропневматичного клапана (рис. 2). Так, до запуску двигуна внутрішнього згоряння напруга бортової мережі може опускатися нижче ніж 24 В, що в умовах високих температур призведе до непрацездатності електропневматичного клапана. У той час як зростання живлячої напруги після запуску двигуна спричинить збільшення часу відкритого стану електропневматичного клапана, що дає змогу скорегувати керуючий пілотний імпульс для забезпечення більш точної роботи системи керування зчепленням загалом. Аналогічний вплив чинить і зміна перепаду тиску на електропневматичному

клапані, яка супроводжує рух штока виконавчого пристрою керування зчепленням.

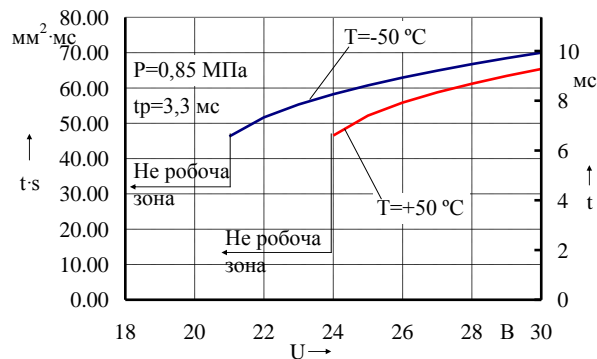


Рис. 2. Зміна часу-перерізу клапана та орієнтовного часу його відкритого стану в процесі подання різної напруги живлення за різних температурних умов

Отже, для забезпечення мінімально можливого часу відкритого стану електропневматичного клапана в разі зміни зазначених параметрів, що впливають на його роботу, необхідно провести оптимізацію керуючих впливів, які забезпечать стійку роботу електропневматичного клапана та системи керування зчепленням загалом.

Оптимізація керуючих впливів електропневматичного клапана

На відміну від класичних задач оптимізації, де метою є пошук мінімуму або максимуму функції для корекції керуючих впливів, що подаються електронним блоком керування на електропневматичний клапан, необхідно підтримувати задане значення вихідного параметра електропневматичного клапана. Таким параметром обрано час-переріз клапана. Особливості роботи виконавчого пристрою керування зчепленням вимагають раціонального вибору залежності, за якою буде змінюватися час-переріз клапана. Експериментально встановлено, що для задовільної роботи виконавчого пристрою керування зчепленням необхідно примусово обмежувати рівень індуктивності електромагнітного клапана в його повністю відкритому стані. Це досягається установкою діелектричних обмежувачів ходу осердя (рис. 3). У використанні електропневматичного клапана без обмеження індуктивності (крива 1 рис. 3) виконавчий пристрій демонструє низьку точність позиціонування. У разі обмеження діелектричною вставкою на рівні 3,3 мм (крива 3 рис. 3) точність позиціонування задовільна лише за умови дуже повільного наростання командного сигналу, водночас швидкості реагування на незначне збільшен-

ня швидкості цього сигналу досягти не вдалося і, як наслідок, точність позиціонування також не достатня.

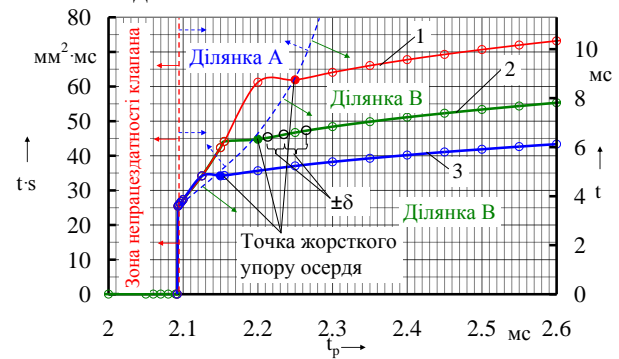


Рис. 3. Вихідні параметри електропневматичного клапана з поділом на зони динамічного стану (розрахунок): 1 – хід осердя електромагніту не обмежено; 2 – хід осердя електромагніту обмежено діелектричною вставкою на 0,22 мм; 3 – хід осердя електромагніту обмежено діелектричною вставкою на 0,33 мм

Отже, опорним варіантом для дослідного зразка виконавчого пристрою керування зчепленням обрано варіант із діелектричною вставкою 2,2 мм (крива 2 рис. 3). На рис. 3 можна спостерігати, як змінюється час-переріз клапана та орієнтовний час його відкритого стану для всіх трьох варіантів індуктивності електромагнітного клапана. Шкала абсцис відображає час одnorазового пілотного імпульсу, що забезпечує відповідний характер протікання робочого процесу електропневматичного клапана. Цей робочий процес можна спостерігати на рис. 4.

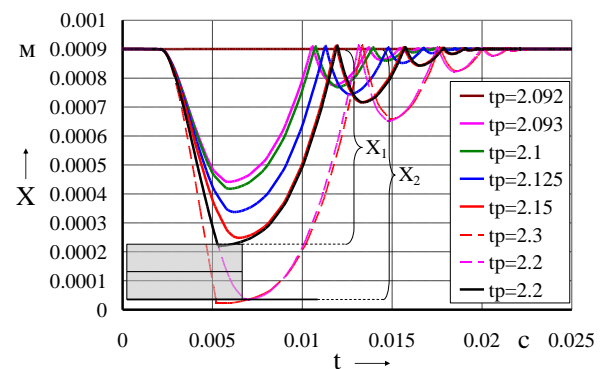


Рис. 4. Динаміка переміщення осердя електромагніту в зоні мінімально можливих одnorазових пілотних імпульсів

Час пілотного імпульсу, менший за $t_p = 2,092$ мс, не спричиняє відрив осердя з клапаном від сідла клапана, оскільки електромагнітна сила не перевищує сил опору за умови знаходження факторів впливу (напруга,

температура, тиск) у робочих діапазонах. Цей час позначений на рис. 3 червоною зоною непрацездатності клапана. Час пілотного імпульсу, який дорівнює та більший за $t_p = 2,2$ мс, забезпечує стійке повне відкриття електропневматичного клапана із чіткою фіксацією осердя на опорі в повністю відкритому стані. На рис. 4 цей процес відображено переміщенням на відстань X_1 та відстань X_2 під впливом пілотного імпульсу тривалістю $t_p = 2,2$ мс та $t_p = 2,3$ мс відповідно. Зазначена відстань X_1 відповідає електромагнітному клапану з діелектричними вставками, а X_2 – електромагнітному клапану без вставок. Ділянка стійкої роботи електропневматичного клапана з його повним відкриттям позначена на рис. 3 написом «Ділянка В», що має зелений колір та відокремлена пунктирною дугою синього кольору.

Динаміка переміщення осердя має ще один, перехідний, стан нестійкої рівноваги. У цьому стані (час пілотного імпульсу $2,092$ мс $\leq t_p < 2,2$ мс) на рис. 3 він позначений написом «Ділянка А», що має синій колір та розміщується між пунктирами червоного та синього кольору. На рис. 4 цю ділянку представлено сукупністю кривих, які відображають неповний хід осердя та, відповідно, неповне відкриття електропневматичного клапана. У процесі використання цієї ділянки можливе значне зменшення часу відкритого стану електропневматичного клапана та підвищення точності роботи виконавчого пристрою. Водночас допуск на відхилення в часі керуючого імпульсу становить 1 мкс (0,001 мс). З одного боку, це дає змогу швидко реагувати, з іншого, – викликає необхідність підвищувати частоту роботи електронного блоку керування та може стати причиною переходу в стан непрацездатності клапана за наявності неминучих відхилень у параметрах електромагнітного клапана у виробництві. Отже, метою для виконання оптимізації керуючих впливів оберемо крайню стійку точку роботи електропневматичного клапана за кривою 2 (рис. 3). У цій точці час-перерізу клапана становить $t \cdot s \approx 46$ мм² · мс. Як бачимо, ця точка не є мінімумом функції часу-перерізу.

Після того, як визначені цільові значення функцій для оптимізації (пошуку рішення), визначимо раціональний метод оптимізації. Оскільки пошук цільового значення функції буде здійснюватися шляхом послідовного моделювання роботи електропневматичного

клапана із врахуванням впливу одного з визначених параметрів, розглянемо методи одномірної оптимізації, що належать до методів нульового порядку. Найпростішим із цих методів є метод рівномірного пошуку. Він належить до пасивних стратегій (тобто із задалегідь визначеною кількістю ітерацій) [12, 13].

Для попередньої оцінки об'єму обчислень визначимо, у скільки разів нам необхідно зменшити ширину інтервалу невизначеності. Так, час тривалості пілотного імпульсу визначатимемо відповідно для трьох змінних факторів – це напруга живлення, температура навколишнього середовища та тиск у пневматичній магістралі, яку перекидає електропневматичний клапан. За попередніми оцінками, під час моделювання роботи електропневматичного клапана в крайніх станах зазначених факторів час тривалості пілотного імпульсу може коливатися в діапазоні від 1,8 мс до 6,3 мс. Для зручності розрахунків та запасу визначимо діапазон невизначеності для пошуку часу тривалості пілотного імпульсу як 1,5...6,5 мс. Це відповідає значенню $\Delta t_p = 5$ мс. Значення часу пілотного імпульсу визначатимемо з точністю 0,1 мкс (0,0001 мс), оскільки саме такий крок розрахунку в пробних точках моделі призводить до зміни вихідного параметра на $0,01$ мм² · мс. Це означає, що відносне зменшення інтервалу невизначеності дорівнюватиме $R(N) = \frac{5}{0,0001} = 50000$ (інтервал потрі-

бно звужити в 50000 разів). Визначимо необхідну кількість ітерацій за формулою (2) [12, 13].

$$\frac{1}{R(N)} = \frac{2}{N+1}, \quad (2)$$

де N – кількість ітерацій.

Таким чином зменшення необхідного діапазону невизначеності для часу тривалості пілотного імпульсу потребує зробити $N=100001$ ітерацію, а зменшення діапазону невизначеності для відсотка увімкненого стану становить $N=121$ ітерацію. Для методів дихотомії та ділення інтервалу навпіл необхідну кількість ітерацій можна визначити за нерівністю (3), для методу дихотомії використовують праву частину нерівності, а для методу ділення інтервалу навпіл всю нерівність, бо для цих методів величина можливих ітерацій значення не постійна та ро-

зміщена у визначених межах залежно від ходу процесу оптимізації [12, 13].

$$\frac{1}{2^{N-1}} \leq \frac{1}{R(N)} \leq \frac{1}{2^{\frac{N-1}{2}}}. \quad (3)$$

Так само для методу золотого перерізу необхідну кількість ітерацій можна визначити за нерівністю (4), до того ж для всіх випадків обирається найменше ціле число, що задовольняє нерівності [12, 13].

$$\frac{1}{R(N)} \geq \frac{\ln(R(N))}{\ln(0,618)}. \quad (4)$$

Так, для методу золотого перерізу кількість ітерацій становитиме $N = 24$, а для методу ділення інтервалу навпіл буде знаходитися в інтервалі значень $14 \leq N \leq 26$.

Для реалізації пошуку функції корегування пілотного імпульсу та відсотка увімкненого стану використовуємо метод золотого перерізу. Використаний алгоритм пошуку встановленого значення функції відрізняється від класичного пошуку мінімуму блоками порівняння. У використаному алгоритмі обчислення за моделлю значення порівнюються із шуканим значенням функції, а не між собою. Крім того, змінено визначення нового інтервалу пошуку.

Визначимо поверхню відгуку функції корегування тривалості пілотного імпульсу залежно від напруги живлення й температури навколишнього середовища (рис. 5). На рис. 5 зображена теоретична поверхня, отримана шляхом оптимізації та моделювання.

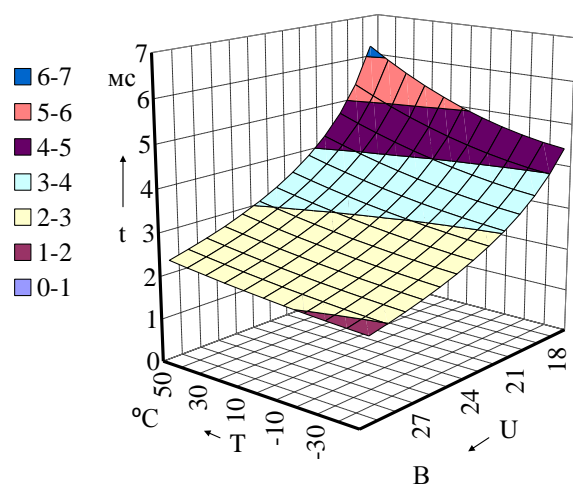


Рис. 5. Поверхня відгуку функції корегування тривалості пілотного імпульсу в координатах температури та напруги

Відповідною поверхнею відтворимо функцію корегування залежно від температури навколишнього середовища та тиску в пневматичній магістралі біля клапана (рис. 6). Адаптація тривалості керуючого імпульсу за температурою можлива за рахунок визначення температури навколишнього середовища в районі виконавчого пристрою керування зчепленням. Для цього потрібен додатковий датчик температури або шляхом об'єднання виконавчого пристрою та електронного блоку в єдиний апарат. У цьому випадку визначення температури можливе шляхом отримання даних про температуру процесора, вбудованого в мікроконтролер.

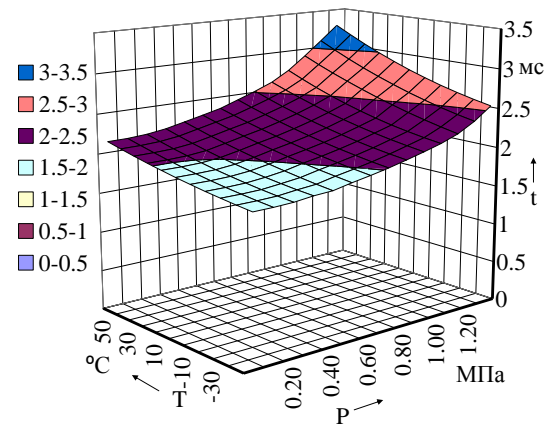


Рис. 6. Поверхня відгуку функції корегування тривалості пілотного імпульсу в координатах температури й тиску

У процесі вимірювання напруги живлення в електронному блоці керування використовується 12-розрядний аналогово-цифровий перетворювач. Під час вимірювання напруга у 24 В трансформується у 3,3 В для можливості її аналізу аналогово-цифровим перетворювачем. Так вдається досягти роздільної здатності в 0,006 В у перерахунку на вимірювальну величину у 24 В. Таким чином отримаємо можливість відтворювати теоретичну залежність, що зображено на рис. 5 з точністю не гірше ніж 0,01 % (для ділянки близько 16 В – 0,01 %, а для ділянки близько 30 В – 0,0025 %).

Для реалізації адаптації за тиском у межах робочого діапазону можна використовувати статичну характеристику електропневматичного приводу зчеплення (рис. 7) [14].

З причини наявності гістерезису є сенс для визначення орієнтовного тиску використовувати верхню (зворотну) гілку характеристики. Так, похибка у визначенні тиску на прямій гілці статичної характеристики може становити значення, наведені на рис. 8. Вод-

ночас похибка встановлення тривалості пілотного імпульсу на зворотній гілці становитиме нуль, а на прямій гілці визначатиметься залежністю, наведеною на рис. 9. Згідно з дослідженнями, актуальний хід виконавчого пристрою керування зчепленням, упродовж якого відбувається керування крутним моментом двигуна (на холодному зчепленні), становить приблизно 5 мм (рис. 7). Відповідно на цьому ході і є найбільш важливе підтримання постійної величини пілотного імпульсу. На цій ділянці ходу виконавчого пристрою похибка у встановленні пілотного імпульсу на вимикання зчеплення (пряма гілка статичної характеристики) не перевищує 0,03 мс, що менше ніж 1% у перерахунку на вихідний параметр електропневматичного клапана ($t \cdot s$).

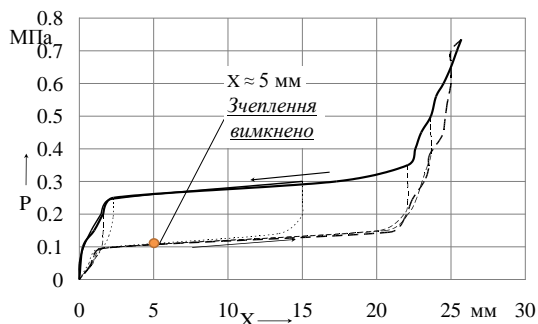


Рис. 7. Статична характеристика зчеплення з периферійними пружинами та виконавчого пристрою керування ним [14]

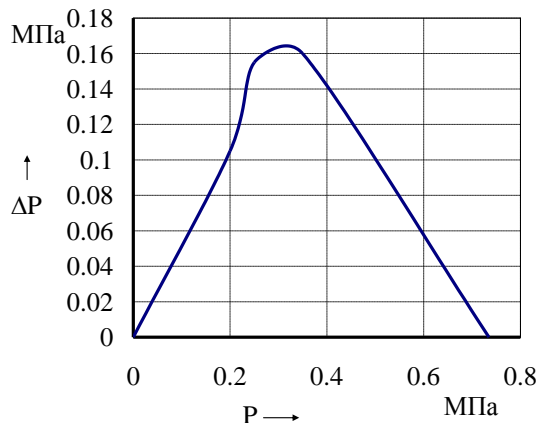


Рис. 8. Похибка у визначенні тиску за зворотною гілкою статичної характеристики

Функція для визначення надлишкового тиску в порожнині випускного клапана пропорційна положенню штока виконавчого пристрою, що повністю повторює характеристику натискної пружини (або пружин) з урахуванням зношування накладок веденого диска зчеплення. Упродовж зношування накладок зусилля, а з ним і тиск у порожнині випускного електропневматичного клапана

змінюється: зростає у випадку застосування діафрагмової натискної пружини й зменшується в разі застосування циліндричних периферійних натискних пружин.

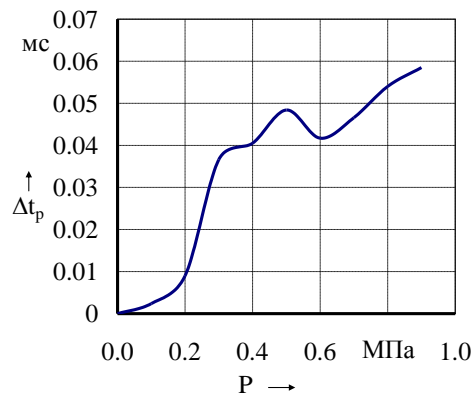


Рис. 9. Похибка у встановленні тривалості пілотного імпульсу на прямій гілці статичної характеристики

Так, матриця, що використовується для визначення тиску в порожнині випускного клапана, має вигляд (5):

$$\begin{Bmatrix} X_i & X_{i+1} & X_m \\ P2_i & P2_{i+1} & P2_m \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

де X – положення штока виконавчого пристрою, м; $P2$ – тиск у силевій порожнині виконавчого пристрою, МПа.

Надлишковий тиск у порожнині випускного клапана, на відміну від випускного, завжди вищий за тиск, що виникає в силовому циліндрі виконавчого пристрою, але пов'язаний із ним зворотною пропорційністю та визначається матрицею (6)

$$\begin{Bmatrix} X_i & X_{i+1} & X_m \\ P0 - P2_i & P0 - P2_{i+1} & P0 - P2_m \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

де $P0$ – тиск у живлячій магістралі виконавчого пристрою, МПа.

З огляду на те, що тиск у живлячій магістралі змінюється в межах, що визначає регулятор тиску, доцільно його постійним значенням використовувати верхню межу, встановлену регулятором тиску.

У випадку виникнення аварійної ситуації тиск у живлячій магістралі може зрости до 1,3 МПа. Цей факт вплине на роботу лише випускного клапана. Тому як аварійне значення доцільно прийняти максимально можливе значення тиску та перевести роботу клапана на максимальну тривалість імпульсу за відповідною характеристикою (рис. 6).

Висновки

На основі математичної моделі електропневматичного клапана визначено ступінь впливу на його роботу таких ключових факторів, як температура навколишнього середовища, напруга живлення та перепад тиску на клапані.

Адаптованим методом одномірної оптимізації визначено поверхні відгуку для корекції тривалості пілотного імпульсу, що подається на обмотку електропневматичного клапана в режимі забезпечення максимальної точності позиціонування штока виконавчого пристрою системи керування зчепленням.

На основі параметрів зчеплення, виконавчого пристрою керування ним та електронного блоку визначено похибки відтворення теоретичної поверхні відгуку тривалості пілотного імпульсу, що подається на обмотку електропневматичного клапана.

Запропоновано спосіб визначення перепаду тиску на впускному та випускному клапані без необхідності застосування датчика тиску в системі керування зчепленням.

Література

- ГОСТ 14254-96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP). 2008.
- ДСТУ ISO 7588-2:2007. Колісні транспортні засоби. Пристрої перемикальні електричні/електронні. Ч. 2. Пристрої електронні (ISO 758802^1998, IDT).
- Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. Third edition. Elsevier. 2004. 463 p.
- Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Москва: Энергия. 1970. 376 с.
- Huang S., Zhang F., Liu Y., Guo Q. A dynamic simulation of the circuit breaking electromagnetic system with a drive circuit. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11(3) 1–9. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814019828564>
- Hoffmann J., Hafner C., Leidenberger P., Hesselbarth J., Burger S. Comparison of electromagnetic field solvers for the 3D analysis of plasmonic nanoantennas, *Proc. SPIE 7390, Modeling Aspects in Optical Metrology II*, 73900J (17.06.2009). URL: <https://doi.org/10.1117/12.828036>.
- Байбузов А.В., Букашев Ф.И. Принципы проектирования электромагнитных клапанов с форсированным электромагнитом. *Вестник новгородского государственного университета*. 2009. № 50. С. 51–52.
- Рыжих Л.А. Особенности рабочих процессов пневматического тормозного привода автомобиля при низких температурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Харьков: ХНАДУ, 1987.

- Баранюк Р.А. Системы теплового зашиту напівпровідникових перетворювачів електроенергії: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12. Київ: НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017.
- Михалевич М.Г., Дзюбенко О.А., Ярита О.О. Дослідження впливу температури на роботу електромагнітного клапана. Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування». Харків, 16–18 вересня 2020 р. С. 25–28.
- Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М. О расчёте тягового усилия электромагнита. *Известия Томского политехнического института*. Томск, 1965. Т. 129. С. 162–172.
- Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. 2-е изд., исправл. Москва: Высш. шк., 2005. 544 с.
- Северин В.П. Методы одномерного поиска: учебно-метод. пособ. по курсу «Методы оптимизации». Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. 112 с.
- Ярита О.О. Вдосконалення електропневматичного приводу зчеплення великовантажних автомобілів та автобусів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.02 (274). Харків: ХНАДУ, 2017.

References

- GOST 14254-96 (2008) Stepeni zashchity, obespechivaemye obolochkami (kod IP) [Degrees of protection provided by enclosures (IP code)] [in Russian].
- DSTU ISO 7588-2:2007 (2007) Kolisni transportni zasoby. Prystroi peremykalni elektrychni/elektronni. Ch. 2. Prystroi elektronni. [Wheeled vehicles. Electrical / electronic switching devices. Part 2. Electronic devices]. (ISO 758802^1998, IDT) [in Ukraine].
- Denton T. (2004). Automobile Electrical and Electronic Systems. Third edition. Elsevier. 463 p.
- Bins K., Laureson P. (1970) Analiz i raschet ehlektricheskikh i magnitnykh polej. Moskva. Ehnergiya. 376 c.
- Huang S., Zhang F., Liu Y., Guo Q. (2019). A dynamic simulation of the circuit breaking electromagnetic system with a drive circuit. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 11(3) 1–9. <https://doi.org/10.1177/1687814019828564>.
- Hoffmann J., Hafner C., Leidenberger P., Hesselbarth J., Burger S. (2009). Comparison of electromagnetic field solvers for the 3D analysis of plasmonic nanoantennas, *Proc. SPIE 7390, Modeling Aspects in Optical Metrology II*, 73900J (17.06.2009); <https://doi.org/10.1117/12.828036>.
- Bajbuzov A.V., .Bukashev F.I. (2009). Principy proektirovaniya ehlektromagnitnykh klapanov s forsirovannym ehlektromagnitom. *Vestnik*

- novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [Principles of designing solenoid valves with forced solenoid]. No. 50. P. 51–52 [in Russian].
8. Ryzhikh L.A. (1987). Osobennosti rabochikh processov pnevmaticheskogo tormoznogo privoda avtomobilya pri nizkikh temperaturakh [Features of working processes of the pneumatic brake drive of the car at low temperatures]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03. Khar'kov: KHNADU [in Russian].
 9. Baraniuk R.A. (2017). Systemy teplovoho zakhystu napivprovodnykovykh peretvoriuvachiv elektroenerhii [Thermal protection systems for semiconductor power converters]: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.12. Kyiv: NTU «KPI im. Ihoria Sikorskoho» [in Ukraine].
 10. Mykhalevych M.H., Dziubenko O.A., Yaryta O.O. (2020). Doslidzhennia vplyvu temperatury na robotu elektromahnitnoho klapan. [Investigation of the influence of temperature on the operation of the solenoid valve]. Naukovi pratsi Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii prysviachenoj 90-richchju Kharkivskoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu ta 90-richchju avtomobilnoho fakultetu «Suchasni tendentsii rozvytku avtomobilnoho transportu ta haluzevoho mashynobuduvannia». Kharkiv, 16–18 veresnia 2020 r. P. 25–28. [in Ukraine].
 11. Ryashencev N.P., Timoshenko E.M. (1965). O raschyote tyagovogo usiliya ehlektromagnita. [About calculating the traction force of an electromagnet]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo institute. T. 129. P. 162–172 [in Russian].
 12. Pantelev A.V., Letova T.A. (2005). Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh. [Optimization methods in examples and problems] Ucheb. posobie. 2-e izd., ispravl. Moskva: Vyssh. shk. 544 p. [in Russian].
 13. Severin V.P. (2012). Metody odnomernogo poiska. [One-dimensional search methods]. uchebno-metod. posob. po kursu «Metody optimizatsii». Khar'kov: NTU «KHPI». 112 p. [in Russian].
 14. Yaryta O.O. (2017). Vdoskonalennia elektropnevmaticheskogo pryvodu zcheplennia velykovantazhnykh avtomobiliv ta avtobusiv [Improvement of the electropneumatic actuator of clutch in heavy trucks and buses]: dys. ... kandydata tekhn. nauk: 05.22.02 (274). Kharkiv: KhNADU [in Ukraine].

Михалевич Микола Григорович¹, к.т.н., доцент кафедри автомобілів, mkolyag@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9890-3838

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Optimization control actions on electropneumatic valve of actuator of clutch control

Abstract. Problem. Electropneumatic valves are a key element of the electropneumatic clutch control system for vehicles of categories N3 and M3. The speed and accuracy of the clutch control system depend on their parameters. When the operating conditions of the solenoid valve change, its initial parameters also change, even before the loss of serviceability. **Goal.** The goal of the work is to form dependencies that determine the parameters of the control signal for the clutch control system of vehicles of categories M3 and N3 in the conditions of change of supply voltage, pressure drop on the valve and ambient temperature. **Methodology.** To achieve this goal, an advanced mathematical model and one-dimensional optimization method were used to determine the optimal control effect on the electropneumatic valve of the clutch control system. **Results.** The block diagram of the control pulse in different modes of operation of the electropneumatic clutch control system is given. Based on the calculated data, the characteristic areas of operation of the electropneumatic valve are determined and the purpose for the optimization process is determined. Based on the defined range of data change and the accuracy of finding the optimal value, a rational optimization method is determined. By modeling the operation of the solenoid valve with parameters according to the chosen optimization method, the response surfaces were constructed relative to the control pulse depending on such parameters as supply voltage of the vehicle onboard network, ambient temperature and pressure drop on the solenoid valve. **Originality.** The error in the reproduction of the theoretical response surfaces based on the parameters of the clutch and the electronic control unit is also determined. Theoretical aspects for providing the required inductance of the solenoid valve coil are shown. **Practical value.** A method for determining the pressure drop on an electropneumatic valve is proposed. The method takes into account the change in pressure during operation of the clutch control system due to wear of the friction plate. The error in ensuring the duration of the control pulse due to the presence of hysteresis in the operation of the clutch and the executive control device is estimated. **Key words:** electropneumatic clutch control system, electropneumatic valve, pilot pulse, response surface, temperature effect.

Mykhalevych Mykola¹, Assoc. Prof., automobile Department named A.B. Gredeskul, mkolyag@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9890-3838 ¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.