

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНИЙ КЛАПАН ВИКОНАВЧОГО ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯМ

Михалевич М.Г.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Під час зміни умов роботи електропневматичного клапану змінюються його вихідні параметри. Метою роботи є формування залежностей, що визначають параметри керуючого сигналу, для системи керування зчепленням транспортних засобів категорій М3 та N3 в умовах зміни напруги живлення, перепаду тиску на клапані та температури навколишнього середовища. Шляхом моделювання роботи електропневматичного клапану було побудовано поверхні відгуку щодо величини керуючого імпульсу у залежності 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 клапану. В цьому режимі клапан працює при гранично можливій тривалості керуючого імпульсу. Тому врахування зміни температури, напруги живлення та перепаду тиску на електропневматичному клапані важливе для відтворення його робочого процесу і 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 при кімнатній температурі 16-22°C нормальному атмосферному тиску та вологості повітря 40-70%. Для унеможливлення впливу вологи електронні блоки, датчики електромагніти та електродвигуни виконують із різним ступенем захищеності від вологи та пилу. Відповідна класифікація визначається стандартом [1]. Тиск, на згадані елементи системи керування чинить не значний вплив, який зазвичай не враховують. Натомість температурний чинник може впливати на роботу системи керування дуже суттєво, але дуже часто не береться до уваги в наукових дослідженнях. Відповідно до нормативних вимог [2, 3] діапазон використання електронних виробів для автомобільної промисловості складає від -40°C до +50°C.

Аналіз публікацій

На даний момент можна виділити три основних методи розрахунку магнітних полів та 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 всі можливі стани магнітної системи для формування матричної аналітичної моделі електромагніту [5] та вже у 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 вдосконалені аналітичні моделі, що найбільш пристосовані для вирішення окремих задач електродинаміки [7]. Виведення автомобільної продукції в серійне виробництво передбачає широкий комплекс випробувань. Одним з ключових випробувань є кліматичні. Нажаль, наукових досліджень роботи автомобільних компонентів за умови різних температур не багато [8, 9].

Мета та постановка задачі

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

транспортних засобів категорій М3 та N3 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 клапану

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

Для моделювання робочого процесу електромагнітного клапану 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 клапану.

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

де x – переміщення осердя електромагніта, 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 клапану, Гн; $L(x)$ – індуктивність як функція від положення осердя електромагнітного клапану, 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 клапану з врахуванням таких ключових факторів як перепад тиску на клапані, температура навколишнього середовища, напруга живлення. При відомих параметрах електропневматичного клапану

отримаємо можливість відтворення його робочого процесу (рис. 1)

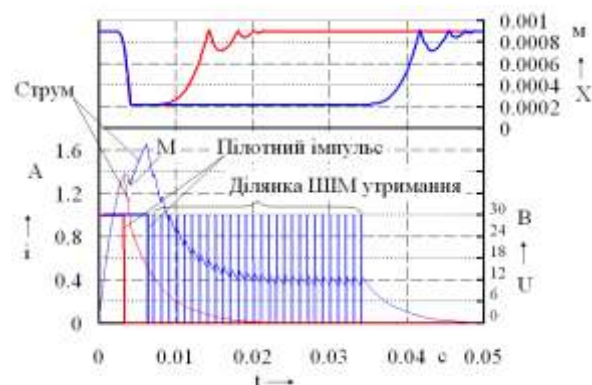


Рис. 1. Порівняння імпульсів керування електромагнітним клапаном

Для керування електропневматичним клапаном використовують керуючий імпульс, який складається з двох складових. Це пілотний імпульс – безперервний імпульс струму для забезпечення спрацювання електропневматичного клапану та ділянка утримання – проміжок часу під час якого відбувається утримання електропневматичного клапану у відкритому стані завдяки використанню широтноімпульсної модуляції (ШІМ). Керуючі впливи із ділянкою утримання використовуються при необхідності тривалого відкриття електропневматичного клапану. 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 клапану, досить суттєвий і ігнорування адаптації керуючого впливу під час керування електропневматичним клапаном може спричинити відмову системи керування всього апарату керування зчепленням з причини виходу за робочий діапазон електропневматичного клапану (рис. 2). Так до запуску двигуна внутрішнього згоряння напруга бортової мережі може опускатися нижче 24 В, що в умовах високих температур призведе до непрацездатності електропневматичного клапану. У той час як зростання живлячої напруги після запуску двигуна спричинить збільшення часу відкритого стану електропневматичного клапану, що дає змогу скорегувати керуючий пілотний імпульс для забезпечення більш точної роботи системи керування зчепленням в цілому. Аналогічний вплив чинить і зміна перепаду тиску на електропневматичному клапані яка

супроводжує руху штоку виконавчого пристрою керування зчепленням.

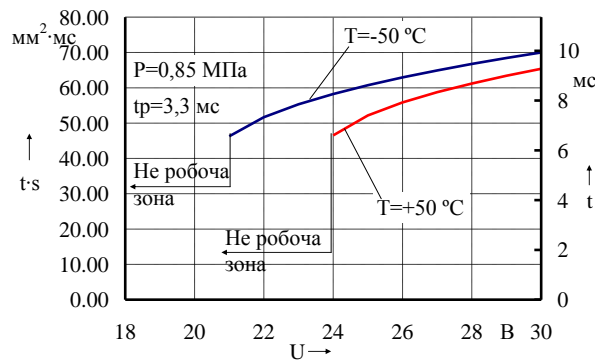


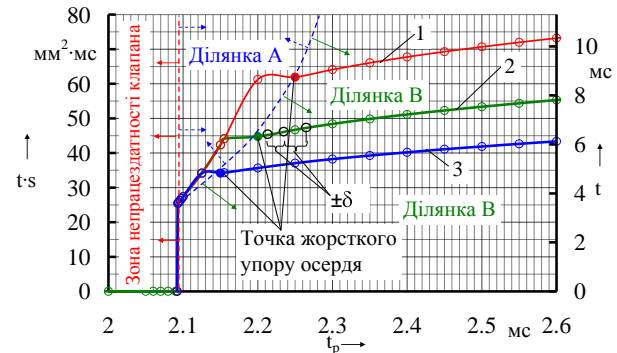
Рис. 2. Зміна часу-перерізу клапану та орієнтовного часу його відкритого стану при подачі різної напруги живлення за різних температурних умов

Таким чином, для забезпечення мінімально можливого часу відкритого стану електропневматичного клапану при зміні зазначених параметрів, що впливають на його роботу необхідно провести оптимізацію керуючих впливів, які забезпечать стійку роботу електропневматичного клапану та системи керування зчепленням в цілому.

Оптимізація керуючих впливів електропневматичного клапану

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 параметру електропневматичного клапану. 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 клапану в повністю відкритому стані клапана. Це досягається установкою діелектричних обмежувачів ходу осердя (рис. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**3). При використанні електропневматичного клапану без обмеження індуктивності (крива 1 рис. 3) виконавчий пристрій демонструє низьку точність позиціонування. При обмеженні діелектричною вставкою на рівні 3,3 мм (крива 3 рис. 3) точність позиціонування задовільна лише за дуже повільно-

го наростання командного сигналу, при цьому швидкості реагування на невелике збільшення швидкості цього сигналу досягти не вдалося і, як наслідок точність позиціонування також не достатня.



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

Рис. 3. Вихідні параметри електропневматичного клапану з поділенням на зони динамічного стану (розрахунок)

Таким чином, в якості опорного варіанту для дослідного зразка виконавчого пристрою керування зчепленням обрано варіант з діелектричною вставкою 2,2 мм (крива 2 рис. 3). На рисунку **Ошибка! Источник ссылки не найден.**3 можна спостерігати як змінюється час-переріз клапану та орієнтовний час його відкритого стану для всіх трьох варіантів індуктивності електромагнітного клапану. Шкала абсцис відображає час одноразового пілотного імпульсу, що забезпечує відповідний характер протікання робочого процесу електропневматичного клапану. Цей робочий процес можна спостерігати на рисунку 4.

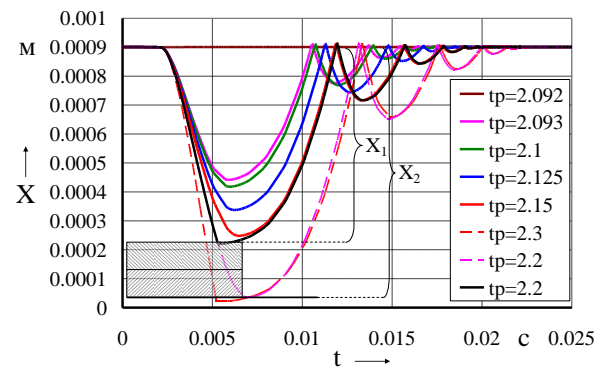


Рис. 4. Динаміка переміщення осердя електромагніту в зоні мінімально можливих одноразових пілотних імпульсів

Час пілотного імпульсу менший за $t_p = 2,092 \text{ мс}$ не спричиняє відрив осердя з клапаном від сідла клапану оскільки електромагнітна сила не перевищує сил опору за умови знаходження факторів впливу (напруга, температура, тиск) в робочих діапазонах. Цей час позначений на рисунку 3 красною зоною непрацездатності клапана. Час пілотного імпульсу, який дорівнює та більший за $t_p = 2,2 \text{ мс}$ забезпечує стійке повне відкриття електропневматичного клапану із чіткою фіксацією осердя на упорі у повністю відкритому стані. На рисунку 4 цей процес відображено переміщенням на відстань X_1 та відстань X_2 під впливом пілотного імпульсу тривалістю $t_p = 2,2 \text{ мс}$ та $t_p = 2,3 \text{ мс}$ відповідно. Зазначені відстані відповідають, X_1 - електромагнітному клапану з діелектричними вставками та X_2 - електромагнітному клапану без вставок. Ділянка стійкої роботи електропневматичного клапану з його повним відкриттям позначена на рисунку 3 написом «Ділянка В», що має зелений колір та відокремлена пунктирною дугою синього кольору.

Динаміка переміщення осердя має ще один, перехідний стан нестійкої рівноваги. В цьому стані (час пілотного імпульсу $2,092 \text{ мс} \leq t_p < 2,2 \text{ мс}$), на рисунку 3 він позначений написом «Ділянка А», що має синій колір та знаходиться між пунктирами червоного та синього кольору. На рисунку 4 цю ділянку представлено сукупністю кривих які відображають неповний хід осердя та, відповідно, неповне відкриття електропневматичного клапану. Користуючись цією ділянкою можливе значне зменшення часу відкритого стану електропневматичного клапану та підвищення точності роботи виконавчого пристрою. В той же час допуск на відхилення в часі керуючого імпульсу складає 1 мкс ($0,001 \text{ мс}$). З одного боку, це дає можливість швидкого реагування, з іншого викликає необхідність підвищувати частоту роботи електронного блоку керування та може стати причиною переходу у стан непрацездатності клапану при наявності неминучих відхилень в параметрах електромагнітного клапана у виробництві. Таким чином у якості мети для виконання оптимізації керуючих впливів оберемо крайню стійку точку роботи електропневматичного клапана за кривою 2 (рис. 3). В цій точці час-перерізу клапану

становить $t \cdot s \approx 46 \text{ мм}^2 \cdot \text{мс}$. 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 із визначених параметрів, розглянемо методи одномірної оптимізації, які відносяться до методів нульового порядку. Найпростіший з цих методів є метод рівномірного пошуку. Він відноситься до пасивних стратегій (тобто із задалегідь визначеною кількістю ітерацій) [12, 13].

Для попередньої оцінки об'єму обчислень визначимо в 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 в пневматичній магістралі, яку перекидає електропневматичний клапан. За попередніми оцінками під час моделювання роботи електропневматичного клапану у крайніх станах зазначених факторів час тривалості пілотного імпульсу може коливатися у діапазоні від $1,8 \text{ мс}$ до $6,3 \text{ мс}$. Для зручності розрахунків та запасу визначимо діапазон невизначеності для пошуку часу тривалості пілотного імпульсу як $1,5 \dots 6,5 \text{ мс}$. Це відповідає значенню $\Delta t_p = 5 \text{ мс}$. Значення часу пілотного імпульсу визначатимемо з точністю $0,1 \text{ мкс}$ ($0,0001 \text{ мс}$) оскільки саме такий шаг розрахунку в пробних точках моделі призводить до зміни вихідного параметру на $0,01 \text{ мм}^2 \cdot \text{мс}$. Це означає, що відносне зменшення інтервалу невизначеності дорівнюватиме

$$R \approx \frac{5}{0,0001} = 50000 \quad (\text{інтервал потрібно}$$

звужити у п'ятдесят тисяч разів). Визначимо необхідну кількість ітерацій за формулою (2) [12, 13].

$$\frac{1}{R} \approx \frac{2}{N+1} \quad (\text{Ошибка! Текст}$$

указанного стиля в документе отсутствующий.2)

де N – кількість ітерацій.

Таким чином необхідного зменшення діапазону невизначеності для часу тривалості

плотного імпульсу необхідно зробити $N = 100001$ ітерацію, а зменшення діапазону невизначеності для відсотку 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 постійне та знаходиться у визначених межах в залежності від ходу процесу оптимізації [12, 13].

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

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

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

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

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

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

Відповідною поверхнею відтворимо функцію корегування у залежності від температури навколишнього середовища та тиском у пневматичній магістралі біля клапану (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. В цьому випадку визначення температури можливе шляхом отримання даних про температуру процесора, що вбудовано в мікроконтролер.

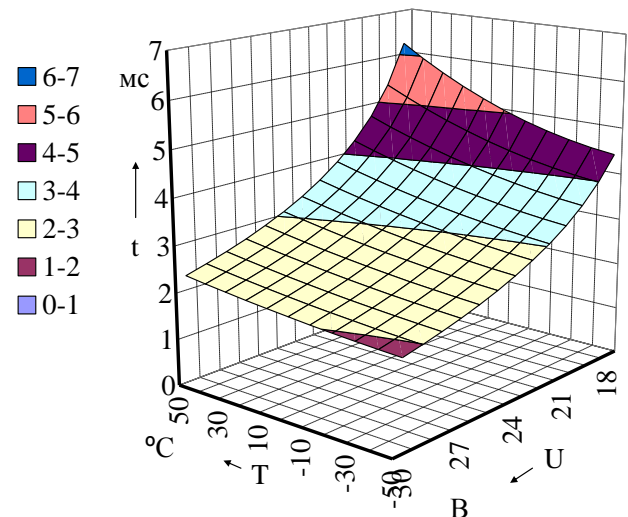


Рис. 5. Поверхня відгуку функції корегування тривалості пілотного імпульсу у координатах температури та напруги

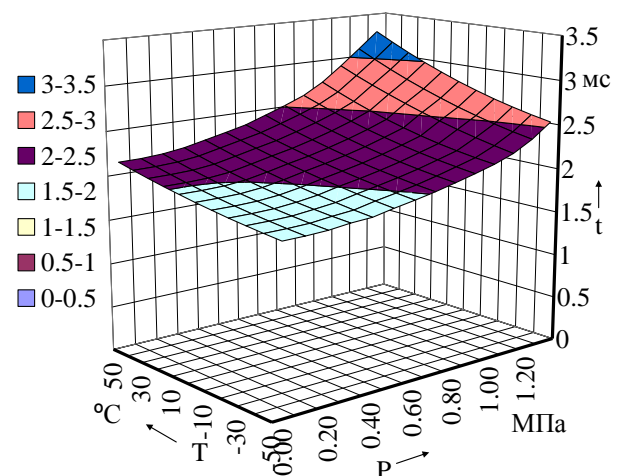


Рис. 6. Поверхня відгуку функції корегування тривалості пілотного імпульсу у координатах температури та тиску

При вимірюванні напруги живлення в електронному блоці керування використовується дванадцяти 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 у 0,006 В у перерахунку на вимірювальну величину у 24 В. Таким чином отримуємо можливість відтво-

ривати теоретичну залежність, що зображено на рисунку **Ошибка! Источник ссылки не найден.** 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 в межах робочого діапазону можливо використовувати статичну характеристику електропневматичного приводу зчеплення (рис. 7) [14].

З причини наявності гістерезису має сенс для визначення орієнтовного тиску використовувати верхню (зворотну) гілку характеристики. Так похибка у визначенні тиску на прямій гілці статичної характеристики може складати значення, що наведені на рисунку 8. В той час похибка встановлення тривалості пілотного імпульсу на зворотній гілці становитиме нулю, а на прямій гілці визначатиметься залежністю, що наведена на рисунку **Ошибка! Источник ссылки не найден.**9. Відповідно до досліджень, актуальний хід виконавчого пристрою керування зчепленням впродовж якого відбувається керування крутним моментом двигуна (на холодному зчепленні) складає біля 5 мм (рис. 7). Відповідно на цьому ході і є найбільш важливим 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 1% у перерахунку на вихідний параметр електропневматичного клапана ($t \cdot s$).

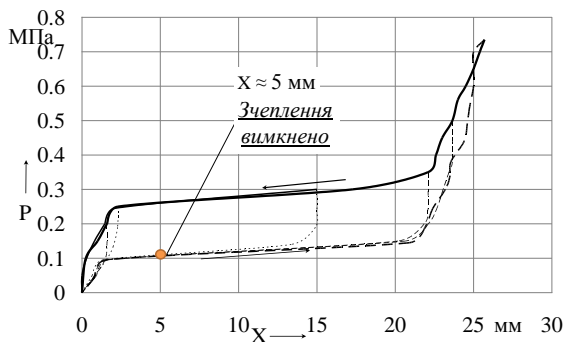


Рис. 7. Статична характеристика зчеплення з периферійними пружинами та виконавчого пристрою керування ним [14]

Функція для визначення надлишкового тиску в порожнині випускного клапана пропорційна положенню штоку виконавчого пристрою. Яке, в свою чергу, повністю повторює характеристику натискної пружини (або пружин) із врахуванням зношування накладок веденого диску зчеплення. Впро-

довж зношування накладок зусилля, а з ним і тиск у порожнині випускного електропневматичного клапана змінюється. Зростає у випадку застосування діафрагмової натискної пружини і зменшується у випадку застосування циліндричних периферійних натискних пружин.

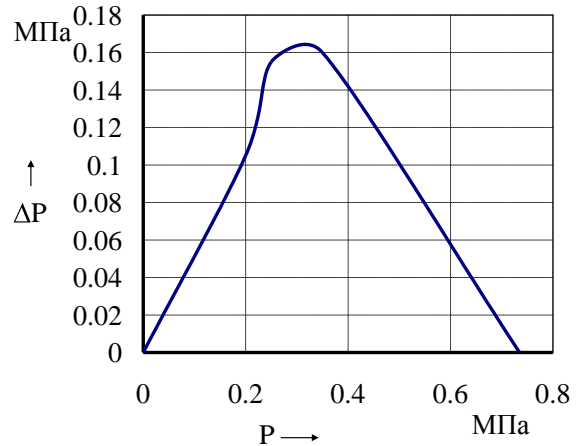


Рис. 8. Похибка у визначенні тиску за зворотною гілкою статичної характеристики

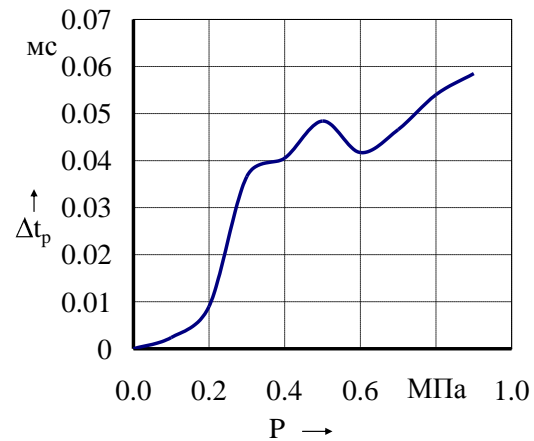


Рис. 9. Похибка у встановленні тривалості пілотного імпульсу на прямій гілці статичної характеристики

Так матриця, що використовується для визначення тиску у 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 силевому циліндрі виконавчого пристрою але пов'яза-

ний з ним зворотною пропорційністю та визначається матрицею (6).

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

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

З огляду на те, що тиск у живлячій магістралі змінюється у межах, що визначає регулятор тиску доцільно, у якості його постійного значення, 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 впускного клапану. Тому в якості аварійного 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 клапану 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 клапану в режимі забезпечення максимальної точності позиціонування штоку 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 клапану.

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

Література

1. ГОСТ 14254-96 Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP). 2008.
2. ДСТУ ISO 7588-2:2007 Колісні транспортні засоби. Пристрої перемикальні електричні/електронні. Частина 2. Пристрої електронні (ISO 758802^1998, IDT).

3. Denton T., Automobile Electrical and Electronic Systems. Third edition. Elsevier. 2004. 463 p.
4. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – Москва. Энергия. 1970. 376 с.
5. 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. <https://doi.org/10.1177/1687814019828564>
6. 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). <https://doi.org/10.1117/12.828036>
7. Байбузов А.В., Букашев Ф.И. Принципы проектирования электромагнитных клапанов с форсированным электромагнитом. Вестник новгородского государственного университета №50. 2009. с. 51-52.
8. Рыжих Л. А. Особенности рабочих процессов пневматического тормозного привода автомобиля при низких температурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Библиотека ХНАДУ. Харьков. 1987.
9. Баранюк Р. А. Системы теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Бібліотека НТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Баранюк Роман Андрійович Київ. 2017.
10. 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" 16-18 вересня Харків. 2020 р. С. 25 – 28.
11. Ряшенцев Н.П, Тимошенко Е.М. О расчёте тягового усилия электромагнита. Известия Томского политехнического института том 129 1965. с. 162 – 172.
12. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие. 2-е изд., исправл. Москва. Высш. шк. 2005. 544с.
13. Северин В. П. Методы одномерного поиска. учебно-метод. пособ. по курсу «Ме-

тоды оптимизации» В. П. Северин. Харьков. НТУ «ХПИ». 2012. 112 с.

14. Ярыта О. О. Вдосконалення електропневматичного приводу зчеплення великовантажних автомобілів та автобусів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.02 (274) / Бібліотека ХНАДУ. Харків. 2017.

References

1. GOST 14254-96 (2008) Stepeni zashchity, obespechivaemye obolochkami (kod IP) [Degrees of protection provided by enclosures (IP code)]. [in Russian]
2. DSTU ISO 7588-2:2007 (2007) Kolisni transportni zasoby. Prystroj peremykalni elektrychni/elektronni. Chastyna 2. Prystroj elektronni. [Wheeled vehicles. Electrical / electronic switching devices. Part 2. Electronic devices]. (ISO 758802^1998, IDT). [in Ukraine]
3. Denton T. (2004). Automobile Electrical and Electronic Systems. Third edition. Elsevier. 463 p.
4. Bins K., Laurenson P. (1970) Analiz i raschet ehlektricheskikh i magnitnykh polej. Moskva. Ehnergiya. 376 s.
5. 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>
6. 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>
7. 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]. №50, с. 51-52. [in Russian]
8. Ryzhih 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 / Biblioteka KHNADU. Khar'kov. [in Russian]
9. Baraniuk R. A. (2017). Systemy teplovoho zakhystu napivprovodnykovykh peretvori-

uvachiv elektroenerhii [Thermal protection systems for semiconductor power converters]: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.12 / Biblioteka NTU «KPI im. Ihoria Sikorskoho» Baraniuk Roman Andriiovych Ky-iv. [in Ukraine]

10. Mykhalevych M.H., Dziubenko O.A., Yaryta O.O. (2020). Doslidzhennia vplyvu temperatury na robotu elektromahnitnoho klapana. [Investigation of the influence of temperature on the operation of the solenoid valve]. *Naukovi pratsi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii prysviachenoj 90-richchju Kharkivskoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu ta 90-richchju avtomobilnoho fakultetu "Suchasni tendentsii rozvytku avtomobilnoho transportu ta haluzevoho mashynobuduvannia"* 16-18 veresnia Kharkiv 2020 r. S. 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 instituta* tom 129 s. 162 – 172. [in Russian]
12. Panteleev A.V., Letova T.A. (2005). *Metody optimizacii v primerakh i zadachakh*. [Optimization methods in examples and problems] Ucheb. posobie. 2-e izd., ispravl. Moskva. Vyssh. shk. 544с. [in Russian]
13. Severin V. P. (2012). *Metody odnomernogo poiska*. [One-dimensional search methods]. uchebno-metod. posob. po kursu «Metody optimizacii» V. P. Severin. Khar'kov. NTU «KHPI». 112 s. [in Russian]
14. Yaryta O. O. (2017). Vdосkonalennia elektropnevmatychnoho pryvodu zchepлення velykovantazhnykh avtomobiliv ta avtobusiv [Improvement of the electropneumatic actuator of clutch in heavy trucks and buses]: dys. ... kandydata tekhn. nauk: 05.22.02 (274) / Biblioteka KhNADU. Kharkiv. [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.

Оптимизация управляющих воздействий на электропневматический клапан исполнительного устройства управления сцеплением

Аннотация. Ключевым элементом электропневматической системы управления сцеплением

являются электропневматические клапаны. При изменении условий работы электропневматического клапана также изменяются его выходные параметры вплоть до потери работоспособности. Целью работы является формирование зависимостей, определяющих параметры управляющего сигнала для системы управления сцеплением транспортных средств категорий М3 и N3 в условиях изменения напряжения питания, перепада давления на клапане и температуры окружающей среды. На основе расчетных данных установлены характерные участки работы электропневматического клапана и определены цели для процесса оптимизации. Путем моделирования работы электропневматического клапана построены поверхности отклика величины управляющего импульса в зависимости от таких параметров как напряжение питания бортовой сети, температура окружающей среды и перепад давления на электропневматическом клапане. Предложен способ определения перепада давления на электропневматическом клапане. Способ учитывает изменение давления в течение эксплуатации системы управления сцеплением по причине износа фрикционных накладок. Оценена погрешность при обеспечении продолжительности управляющего импульса за счет наличия гистерезиса в работе сцепления и исполнительного устройства управления им.

Ключевые слова: электропневматическая система управления сцеплением, электропневматический клапан, пилотный импульс, поверхность отклика, влияние температуры.

Михалевич Николай Григорьевич¹, к.т.н., доц. каф. автомобилей, mkolyag@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9890-3838.

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, м. Харьков, ул. 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.

Keywords: electropneumatic clutch control system

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.