

УДК 629.113-592.5

БОНДАРЕНКО А.І., к.т.н., доц. НТУ “ХПІ”

ОПТИМІЗАЦІЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯТОРА ТИСКУ ЗІ ЗМІННИМИ ПРОХІДНИМИ ПЕРЕТИНАМИ (АБС З ШИРОТНО – ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ)

Выполнена оптимизация основных параметров исполнительного механизма антиблокировочной системы с широтно-импульсной модуляцией - модулятора давления с переменными проходными сечениями. Определены оптимальные параметры проходных сечений модулятора давления, значения коэффициентов чувствительности и пробного воздействия при которых достигается максимальная из возможных для предложенных условий формирования пульсирующего сигнала эффективность торможения, минимальный расход сжатого воздуха, минимальное отклонение от заданной траектории при криволинейном движении.

Вступ. Процес гальмування автомобіля, оснащеного антиблокувальною системою (АБС), характеризується ефективністю гальмування, стійкістю та керованістю, економічністю по витраті запасів робочого тіла. Суттєвим чинником, що впливає на вище перелічені показники є спосіб модуляції тиску в АБС, а також конструктивні параметри модулятора тиску (МТ).

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Оптимальною з точки зору працездатності, адаптивних властивостей та собівартості конструкції є АБС з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) [1].

В роботі [2] доведено, що найменші витрати стислого повітря спостерігаються при застосуванні в якості виконавчої частини АБС з ШІМ - МТ на базі клапана прискореної дії, що має зміни прохідні перетини.

Значення площ прохідних перетинів МТ, а також коефіцієнтів пробної дії та чутливості (показники, які впливають на формування пульсуючого сигналу при ШІМ [3]), при яких досягається максимальна ефективність гальмування, стійкість та керованість, мінімальні витрати запасів робочого тіла, підлягають визначенню.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є визначення оптимальних площ прохідних перетинів МТ, коефіцієнтів пробної дії та чутливості при яких досягається максимальна ефективність гальмування, стійкість, мінімальні витрати запасів робочого тіла. Для досягнення поставленої мети необхідно визначити основні оцінні характеристики, побудувати часткові критерії, ввести обмеження та виконати оптимізацію по узагальненому критерію.

Оптимізація основних параметрів МТ зі змінними прохідними перетинами (АБС з ШІМ). Найбільше практичне значення мають наступні оцінні характеристики: гальмівна ефективність, траєкторна керованість, економічність по витраті запасів робочого тіла.

Траєкторна стійкість (найбільше відхилення від прямої), як оціночний критерій в роботі не розглядається, тому що саме в процесі маневрування, повороту виникають найбільші відхилення від наміченої траєкторії, а цей показник – траєкторна керованість.

Економічність АБС по витраті запасів стислого повітря оцінюється по величині

зниження тиску в ресиверах за одне повне гальмування з включеною АБС, в такому разі вираз для розрахунку часткового критерію – економічності по витраті запасів робочого тіла, доцільно представити у наступному вигляді:

$$K_1(K_n, K_h, f_m) = \frac{1}{1 - \frac{P(K_n, K_h, f_m) - \gamma_{11}}{P}}, \quad (1)$$

де $P(K_n, K_h, f_m)$ – значення тиску в ресиверах після повного гальмування автомобіля з включеною АБС;

K_n – коефіцієнт пробної дії;

K_h – коефіцієнт чутливості;

f_m – площа прохідних перетинів МТ при роботі АБС;

γ_{11} – функція, яка занижує дійсне значення тиску в ресивері в момент початку гальмування для того, щоб знаменник не обертався до 0;

P – тиск в ресиверах перед початком гальмування автомобіля.

Функція γ_{11} записується в наступному вигляді:

$$\gamma_{11} = \begin{cases} 0, & P - P(K_n, K_h, f_m) > 10^{-2}; \\ 10^{-2}, & P - P(K_n, K_h, f_m) \leq 10^{-2}. \end{cases} \quad (2)$$

Витрати стислого повітря найменші при максимальному значенні $K_1(K_n, K_h, f_m)$ (1).

Для оцінки гальмівної ефективності зручно використовувати в якості показника гальмівний шлях. Більшість дослідників оцінюють ефективність гальмування шляхом порівняння величин гальмівних шляхів при заблокованих колесах і при включеній АБС. На слизьких дорогах АБС не повинна знижувати ефективність гальмування в порівнянні з гальмуванням при заблокованих колесах, а на дорожніх покриттях з високим коефіцієнтом зчеплення допускається збільшення гальмівного шляху, але не більше, ніж на 5%. Виходячи з чинних вимог гранично допустима величина гальмівного шляху задається в наступному вигляді:

$$S_T^* = S_t, \quad (3)$$

де S_t – гальмівний шлях при гальмуванні із заблокованими колесами.

З погляду підвищення ефективності гальмування (мінімізації гальмівного шляху) відносно прослизання доцільно підтримувати рівним S^* , що відповідає максимальному коефіцієнту зчеплення.

Оптимальні значення прохідних перетинів МТ – f_m та коефіцієнтів пробної дії - K_n , чутливості - K_h дозволяють здійснити максимальне наближення до значення відносного прослизання S^* . У такому випадку вираз для розрахунку часткового критерію ефективності гальмування має наступний вигляд:

$$K_2(K_n, K_h, f_m) = 1 - \frac{S_T(K_n, K_h, f_m)}{S_T^*}, \quad (4)$$

де $S_T(K_n, K_h, f_m)$ – дійсна величина гальмівного шляху.

Ефективність гальмування найліпша при максимальному значенні $K_2(K_n, K_h, f_m)$ (4).

Траєкторну керованість можна оцінювати по величині відхилення автомобіля Δ від заданої траєкторії. При визначенні траєкторної керованості автомобіля в якості тестової траєкторії була прийнята крива, по якій автомобіль може рухатися без поперечних відхилень при заданій початковій швидкості, постійному куту установки керованих коліс і гальмуванні з АБС. Граничне значення Δ^* для оцінки відхилення автомобіля, при допущенні, що до початку гальмування автомобіль рухався строго по середині смуги руху, знаходиться з виразу:

$$\Delta^* = 0,5(B_{II} - B_a), \quad (5)$$

де B_{II} – ширина смуги руху, регламентована для даної категорії доріг;

B_a – габаритний розмір автомобіля, зміряний по перпендикуляру до його подовжньої осі, яка проходить через точку, що максимально відхилилася від початкової траєкторії.

Вираз для розрахунку часткового критерію – траєкторна керованість представлено в наступному вигляді:

$$K_3(K_n, K_h, f_m) = 1 - \frac{\Delta(K_n, K_h, f_m)}{\Delta^*}, \quad (6)$$

де $\Delta(K_n, K_h, f_m)$ – величина відхилення автомобіля Δ від заданої траєкторії після повного гальмування автомобіля з включеною АБС.

Найменше відхилення від заданої траєкторії буде спостерігатися при максимальному значенні $K_3(K_n, K_h, f_m)$ (6).

При такій побудові часткових критеріїв можлива оптимізація по узагальненому критерію:

$$K_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot K_i + \sum_{j=1}^m Z_j \cdot P_j, \quad (7)$$

де Z_i, Z_j – вагові коефіцієнти;

P_j – штрафна функція, яка знижує значення узагальненого критерію при виході варійованого параметра за межі допустимих значень.

Кожна з варійованих величин K_n, K_h, f_m має діапазон, в межах якого може змінюватися. Вихід за межі допустимих значень призведе до отримання недостовірних результатів. Для вияву моменту виходу в процесі оптимізації за гранично допустимі межі значень K_n, K_h, f_m вводяться штрафні функції P_j .

Діапазон, в межах якого можуть змінюватися площі прохідних перетинів f_m

МТ, обумовлений перш за все конструктивними особливостями модулятора. Тому слід зазначити, що змінні площі прохідних перетинів МТ повинні варіюватися в межах $1,963 \cdot 10^{-7} \dots 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (відповідно, діаметр отвору $0,5 \dots 10 \text{ мм}$). В такому випадку штрафну функцію, що враховує зміну площ прохідних перетинів МТ f_m , можна записати в наступному вигляді:

$$P_{f_{y1m}}(f_m) = \begin{cases} 1 - \frac{f_{m\min}}{f_m}, & f_m < f_{m\min}; \\ 0, & f_{m\min} \leq f_m \leq f_{m\max}; \\ 1 - \frac{f_m}{f_{m\max}}, & f_m > f_{m\max}. \end{cases} \quad (8)$$

Для значення коефіцієнта пробної дії K_n встановлена лише нижня межа: $K_n > (1 - S^*)$, а для коефіцієнта чутливості K_h взагалі не встановлено обмежень, тобто $-\infty < K_h < \infty$. В такому випадку P_{K_n} має наступний вигляд:

$$P_{K_n}(K_n) = \begin{cases} 1 - \frac{K_{n\min}}{K_n}, & K_n \leq K_{n\min}; \\ 0, & K_n > K_{n\min}. \end{cases} \quad (9)$$

При гальмуванні автомобіля узагальнений критерій має вигляд:

$$K_{\Sigma}(K_n, K_h, f_m) = Z_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{P(K_n, K_h, f_m) - Y_{11}}{P}} + Z_2 \cdot \left(1 - \frac{S_T(K_n, K_h, f_m)}{S_T^*} \right) + Z_3 \cdot \left(1 - \frac{\Delta(K_n, K_h, f_m)}{\Delta^*} \right) + Z_{f_m} \cdot P_{f_m}(f_m) + Z_{K_n} \cdot P_{K_n}(K_n). \quad (10)$$

Згідно роботи [4] вимоги до настройки АБС для отримання мінімального гальмівного шляху при мінімальному курсовому відхиленні автомобіля знаходяться в суперечності. При мінімізації курсових відхилень збільшується гальмівний шлях, при мінімізації гальмівного шляху збільшується курсове відхилення.

В зв'язку з тим, що значна частина гальмувань виконується спільно з маневруванням, необхідно більшу увагу приділяти не зниженню гальмівного шляху, а мінімізації курсових відхилень. За даними, що наведені в роботі [4], кількість гальмувань на повороті досягає 52% від загального числа гальмувань.

Процес оптимізації обмежується розглядом тільки двох граничних режимів: гальмування ненавантаженого автомобіля на дорозі з найменшим коефіцієнтом зчеплення і гальмування автомобіля з повною масою на дорозі з коефіцієнтом зчеплення, при якому ще можливе блокування коліс.

Оптимальні значення K_n і K_h будуть виявлені для різних умов руху (прямолінійне, криволінійне), ваги автомобіля, умов зчеплення з опорною поверхнею.

Для вирішення поставленого завдання оптимізації основних параметрів МТ можливе використання одного з методів багатовимірної оптимізації [5]: симплекс метод, симплекс на “жалі”, Хука – Дживса, градієнтний метод.

В роботі при пошуку оптимальних значень прохідних перетинів f_m і коефіцієнтів K_n та K_h використовувався метод Хука – Дживса, тому що даний метод є досить ефективним і завжди, як правило, приводить до знаходження максимуму або мінімуму функції. Пошук складається з послідовних кроків дослідницького пошуку навколо базисної точки, за якою, в разі успіху, слідує пошук по зразку [5].

Результати, отримані в процесі оптимізації, зведено до табл. 1 Під криволінійним рухом в табл. 1 мається на увазі фіксування керованих коліс на рівні 10^0 одразу після початку гальмування зі швидкості 40 км/год. Похибки при знаходженні оптимальних значень: коефіцієнт $K_n = 0,01$; $K_h = 0,05$; діаметри прохідних перетинів – 0,01 мм.

Таблиця 1 – Результати розрахунків ($K_n = 1,435$, $K_h = 19,7875$, діаметр змінних прохідних перетинів 1,17 мм)

Параметр	Рух прямолінійний		Рух криволінійний	
	Дорожні умови – сніг, вага автомобіля мінімальна	Дорожні умови – асфальт сухий, вага автомобіля максимальна	Дорожні умови – сніг, вага автомобіля мінімальна	Дорожні умови – асфальт сухий, вага автомобіля максимальна
Зниження тиску в ресиверах за повне гальмування ΔP , МПа	0,04607	0,04195	0,046065	0,04194
Гальмівний шлях S_T , м	41,40	10,61	44,33	10,78
Найбільше відхилення від наміченої траєкторії Δ , м	–	–	0,33	0,14
Час гальмування, с	7,68	1,852	8,39	1,87
K_Σ	0,309	0,276	1,056	1,179

Суттєво на значення узагальненого критерію та величин K_n , K_h , f_m впливає величина вагових коефіцієнтів. Це обумовлено перш за все тим, що часткові критерії K_i та штрафні функції P_j змінюються в різних діапазонах: $1 \leq K_1(K_n, K_h, f_m) < \infty$, $-\infty < K_2(K_n, K_h, f_m) < 1$, $-\infty < K_3(K_n, K_h, f_m) \leq 1$, $-\infty < P_{f_m}(f_m) \leq 0$, $-\infty < P_{K_n}(K_n) \leq 0$.

Слід зазначити, що найліпші результати стосовно гальмівного шляху та відхилення від заданої траєкторії спостерігаються при наступних значеннях вагових коефіцієнтів: $Z_1 = 10^{-2}$, $Z_2 = 1$, $Z_3 = 1$, $Z_{f_m} = 1$, $Z_{P_{K_n}} = 1$, при цьому значення гальмівного шляху

зменшилося на 28,1%, а відхилення від заданої траєкторії зменшилося на 31,2% в порівнянні з випадком, коли $Z_1=Z_2=Z_3=Z_{f_m}=Z_{P_{K_n}}=1$.

Час адаптації до зміни дорожніх умов, тобто за який час відбувається налаштування на $\varphi_{x_{\max}}$ при переїзді з сухого асфальту на сніг та навпаки, при визначених значеннях K_n , K_h , f_m складає 0,3 – 0,36 с.

Результати теоретичного дослідження довели, що витрати стислого повітря при гальмуванні автотранспортного засобу з АБС з ШІМ (МТ зі змінними прохідними перетинами на базі клапана прискореної дії) відповідають чинним правилам ЄЕК ООН №13 (запасу стислого повітря повинно вистачати на роботу АБС при гальмуванні з початкової швидкості не менше 50 км/год на поверхні, що має коефіцієнт зчеплення не більше 0,3 протягом проміжку часу не менше 15 секунд. Потім при зупиненому транспортному засобі чотири рази підряд натискають повністю на педаль робочого гальма, при п'ятому натисненні на гальмівну педаль автотранспортний засіб повинен загальмувати з ефективністю, що відповідає аварійному гальмуванню навантаженого автотранспортного засобу). В якості об'єкта дослідження виступав процес гальмування автомобіля (дорожні умови – лід ($\varphi_{x_{\max}}=0,1$), вага автомобіля максимальна, гальмування відбувається з початкової швидкості 60 км/год), в процесі моделювання процесу гальмування було виявлено, що автомобіль з АБС загальмував за 19,2 с і після виконання вимог правил ЄЕК ООН №13 повітря вистачило на загальмування з ефективністю, що відповідає аварійному гальмуванню навантаженого автотранспортного засобу.

Висновки

При значеннях $K_n=1,435$, $K_h=19,7875$ та діаметрах змінних прохідних перетинів, рівних 1,17 мм, досягається максимальна з можливих для запропонованих умов формування пульсуючого сигналу ефективність гальмування, мінімальні витрати стислого повітря, мінімальне відхилення від заданої траєкторії при криволінійному русі. Однак при цьому зменшується здатність адаптуватися до зміни дорожніх умов (час до встановлення середнього тиску, що відповідає новим умовам зчеплення, досягає – 0,36 с.), що обумовлено низькою частотою спрацювання МТ – 7 Гц та малими прохідними перетинами МТ.

Список літератури: 1. *Бондаренко А.І.* Вибір способу модуляції тиску в пневматичному гальмівному приводі / *А.І. Бондаренко* // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. “Механізація сільськогосподарського виробництва”. – 2008. – Т. 1, № 75.– С. 360 –365. 2. *Гецович Е.М.* Влияние схемы установки и проходных сечений модулятора давления на расход запасов сжатого воздуха в пневматическом тормозном приводе / *Е.М. Гецович, А.И. Бондаренко* // Вісник національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: зб. наук. праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. – 2006. – № 26. – С. 81 – 86. 3. *Гецович Є.М.* Вплив змінних коефіцієнтів чутливості та пробної дії на ефективність гальмування, керованість та стійкість / *Є.М. Гецович, А.І. Бондаренко, В.В. Шелудченко* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 1/5 (37).– С. 4 –6. 4. *Пчелин И.К.* Динамика процесса торможения автомобиля: автореф. дис. на соискание уч. степени доктора техн. наук: спец. 05.05.03 “Автомобили и тракторы” / *И.К. Пчелин.* – М., 1984. – 39 с. 5. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс: [пер. с англ. О.В. Шихеевой]; под. ред. В.А. Волынского. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.