

- исключен заброс выходного давления в момент включения регулятора;
- подобраны параметры демпфирующих жиклеров, обеспечивающие устойчивость процесса регулирования.

Перспективы дальнейших исследований. В дальнейшем планируется дополнить модель уравнениями, учитывающими волновые процессы в трубопроводах стенда и уточнить методику расчёта сопротивления металлорукава в выходной магистрали. Следует отметить, что при экспериментальной отработке практически невозможно смоделировать параметры магистралей двигателя на испытательном стенде. Поэтому уточнение моделей магистралей необходимо в первую очередь для проверки их правильного математического описания.

Выводы. Разработанная математическая модель, учитывающая разрыв кинематической связи между элементами его подвижной системы, качественно и с приемлемой точностью количественно описывает переходные процессы в регуляторе. Описание входной и выходной магистралей требует уточнения.

Список литературы: 1. Шевченко С.А., Валивахин С.А. Математическая модель регулятора давления газа // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 18 (1061). – С. 195 – 209. 2. Григорьев А.Л., Геворкян Ю.Л. Абсолютная и относительная устойчивость гидромеханических узлов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №2. – С. 88 – 106. 3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. – 708 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shevchenko, S. A., and S. A. Valivakhin. "Matematicheskaja model' reguljatora davlenija gaza." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «KhPI»*. Ser.: *Matematyčne modeljuvannja v tehničii ta tehnologijah*. No. 18 (1061). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 195–209. Print. 2. Grigor'ev, A. L., and Ju. L. Gevorkjan. "Absoljutnaja i otnositel'naja ustojchivost' gidromehaničeskikh uzlov." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «KhPI»*. *Zbirnik naukovykh prac'. Tematyčnij vyputok: Matematyčne modeljuvannja v tehničii ta tehnologijah*. No. 2. Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. 88–106. Print. 3. Vargaftik, N. B. *Spravočnik po teplofizyčeskim svojstvam gazov i zhidkostej*. Moscow: Fizmatgiz, 1963. Print.

Надійшла (received) 09.08.2014

УДК 621.923

В.Г. ШКУРУПІЙ, канд. техн. наук, доц., ХНЕУ, Харків

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ПОЛІРУВАННІ

Обґрунтовані умови зменшення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з фіксованим радіальним зусиллям, які полягають в основному в зменшенні тиску в зоні обробки й збільшенні поверхневої концентрації абразивних зерен на робочій поверхні інструмента. Доведено, що з кі-

© В. Г. Шкурупій, 2014

нематичної точки зору зменшення шорсткості поверхні пов'язане зі зменшенням миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами до мінімально можливого значення, при якому процес різання переходить у процес пружно-пластичного деформування оброблюваного металу.

Ключові слова: абразивне полірування, абразивне зерно, процес різання, шорсткість поверхні, швидкість радіальної подачі, радіальне зусилля.

Вступ. Абразивна обробка є основним методом фінішної обробки деталей машин, які забезпечують високі показники якості, точності й шорсткості оброблених поверхонь. В особливій мірі це відноситься до методів доведення й абразивного полірування, які остаточно формують параметри якості обробки. У зв'язку з появою нових важкооброблених матеріалів і підвищенням вимог до якості обробки деталей машин потрібне постійне вдосконалення методів фінішної абразивної обробки й головним чином за рахунок підвищення показників шорсткості оброблених поверхонь. Тому дана робота присвячена пошуку нових технологічних рішень підвищення ефективності абразивного полірування.

Аналіз останніх досліджень. Теоретичним дослідженням параметрів шорсткості поверхні при абразивній обробці присвячені роботи [1 – 4], у яких розрахунки виконані з урахуванням імовірності участі зерен у різанні. Це дозволило досить об'єктивно оцінити можливості зменшення шорсткості поверхні. Однак ці рішення отримані стосовно до процесів шліфування. Для процесів доведення й абразивного полірування такі дослідження фактично не проводилися.

Враховуючи викладене вище, актуальною є задача аналітичного опису параметрів шорсткості поверхні при абразивному поліруванні, оскільки основним напрямком його вдосконалення є досягнення мінімально можливого значень шорсткості поверхні – на рівні $R_a = 0,001$ мкм і нижче. Рішення даної задачі надзвичайно актуально як при обробці деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя й зношування, так і при створенні світловідбиваючих поверхонь лазерних дзеркал та іншої космічної техніки.

Постановка задачі. У зв'язку з необхідністю урахування імовірності участі абразивних зерен у різанні, у даній роботі запропонований новий теоретичний підхід до розрахунку параметрів шорсткості поверхні при абразивному поліруванні, який дозволить по-новому підійти до обґрунтування його технологічних можливостей і вибору оптимальних умов обробки. Це відкриває нові перспективи пошуку умов підвищення ефективності цього прогресивного методу фінішної обробки. Дана робота є подальшим розвитком робіт [5, 6], присвячених математичному моделюванню закономірностей формування поверхонь і знімання матеріалу при фінішній абразивній обробці.

Математична модель. Шорсткість поверхні оброблюваного зразка в процесі абразивного полірування утворюється в момент переходу від обробки вихідних мікронерівностей до обробки суцільного металу. Тому формування шорсткості поверхні буде здійснюватися зі швидкістю радіальної подачі S_{rad} , що досягається саме в цей момент обробки. Тому одержимо аналі-

тичну залежність для визначення функції $\Phi(y)$, що описує імовірність невилученого металу з поверхні зразка з урахуванням переміщення оброблюваного зразка в радіальному напрямку з фіксованою швидкістю радіальної подачі S_{rad} [5]. Для цього скористаємося аналітичною залежністю для визначення функції $\Phi(y)$, отриманої для процесу доведення зернами однакового розміру, які переміщуються лише в горизонтальному напрямку зі швидкістю $V_{инсп}$ [6]:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

де 2γ – кут при вершині конусоподібної частини ріжучого зерна; n – кількість абразивних зерен, що беруть участь у процесі різання; B – ширина зразка, м; y – координата, відлічувана від вершини ріжучого зерна, м.

Припустимо, що за час переміщення оброблюваного зразка у вертикальному напрямку на величину dy зі зразком проконтактували dn_i зерен:

$$dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy, \quad (2)$$

де n – загальна кількість зерен, які проконтактували за час переміщення зразка зі швидкістю S_{rad} у вертикальному напрямку на величину R_{max} , рівну максимальній висоті мікронерівностей оброблюваної поверхні:

$$n = k \cdot B \cdot V_{инсп} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инсп} \cdot \frac{R_{max}}{S_{rad}}; \quad (3)$$

де k – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхні інструмента, шт./м²; B – ширина оброблюваного зразка, м; $\tau = R_{max} / S_{rad}$ – час обробки, с; $f(y_i) = 1/R_{max}$ – щільність розподілу висот вершин зерен, які проконтактували з оброблюваним зразком і залишили на ньому свої проекції.

Елементарна імовірнісна функція $\Phi_i(y)$, описувана залежністю (1) і утворена від роботи dy зерен із висотою виступання $(y - y_i)$, буде наступною:

$$\Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot dn_i}{B} \cdot (y - y_i)} = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инсп}}{S_{rad}} \cdot (y - y_i) \cdot dy}. \quad (4)$$

З позиції теорії ймовірностей сумарна імовірнісна функція $\Phi(y)$ опишеться [6]:

$$\begin{aligned} \Phi(y) &= \prod_{i=1}^z \Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инсп}}{S_{rad}} \cdot \sum_{i=1}^z (y - y_i) \cdot dy} = \\ &= e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инсп}}{S_{rad}} \cdot \int_0^y (y - y_i) \cdot dy} = e^{-\frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инсп}}{S_{rad}} \cdot y^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Характер зміни функції $\Phi(y)$ за координатою y такий же, як і у випадку обробки нерухливого зразка (тобто для $S_{rad} = 0$), описуваного залежністю

(1). Однак інтенсивність зменшення функції $\Phi(y)$ за координатою y вище, тому що ця координата входить у залежність (5) у другому ступені.

Використовуючи залежність (5), визначимо параметр шорсткості поверхні R_a . Для цього спочатку встановимо положення середньої лінії $y = a$ (рис. 1), що розділяє мікропрофіль обробленої поверхні на дві частини таким чином, що заштриховані на рис. 1 площі F_1 й F_2 є рівними. У цьому випадку найбільша западина мікропрофілю відповідає значенню $y = 0$, а найбільший виступ мікропрофілю відповідає значенню $y = R_{\max}$. Тоді

$$a = \int_0^{R_{\max}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{\max}} e^{-\frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{\text{інстр}}}{S_{\text{рад}}} \cdot y^2} \cdot dy. \quad (6)$$

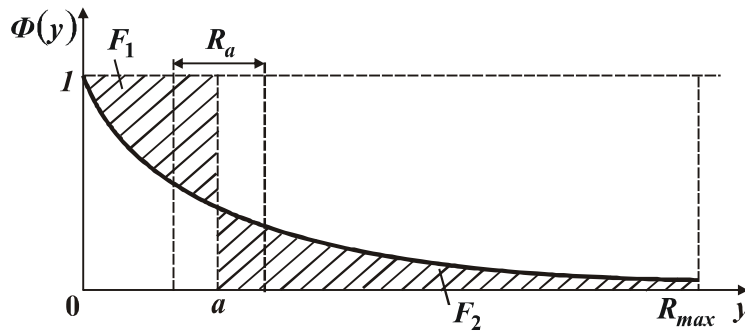


Рис. 1 – Розрахункова схема параметра шорсткості поверхні R_a .

Даний інтеграл можна обчислити за допомогою невласного табличного інтегралу

$$\int_0^{+\infty} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy.$$

Виходячи з рис. 1, це не внесе значних змін при обчисленні інтеграла

$$\int_0^{R_{\max}} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy,$$

тому що при $y \geq R_{\max}$ функція $\Phi(y)$ приймає малі значення. Тому з достатньою для практики точністю можна розглядати табличний інтеграл [7]:

$$\int_0^{+\infty} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha} \quad \text{для } \alpha > 0. \quad (7)$$

У даному випадку $\alpha^2 = (\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{\text{інстр}}) / S_{\text{рад}}$. Тоді

$$a = \int_0^{R_{\max}} e^{-\frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{\text{інстр}}}{S_{\text{рад}}} \cdot y^2} \cdot dy = 0,88 \cdot \sqrt{S_{\text{рад}} / (\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{\text{інстр}})}. \quad (8)$$

Як видно, параметр a тим більший, чим більше швидкість радіальної подачі S_{rad} й менше параметри γ , k і $V_{інстп}$.

Параметр шорсткості поверхні R_a за визначенням дорівнює довжині сторони прямокутника з висотою $\Phi(y) = 1$ (рис. 1), тобто

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{\max}} \Phi(y) \cdot dy = 2 \cdot \int_a^{R_{\max}} e^{-\frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{інстп}}{S_{rad}} \cdot y^2} \cdot dy. \quad (9)$$

Однак обчислити даний інтеграл аналітично в заданих межах (навіть при зміні верхньої межі з R_{\max} до $+\infty$) неможливо. Його можна обчислити лише чисельним методом. Однак це не дає наочності й загального рішення, утрудняє пошук умов зменшення параметра шорсткості поверхні R_a . Тому, виходячи з рис. 1, одержимо спрощене рішення. Очевидно, заштриховану площу F_1 можна визначити як площу трикутника, розглядаючи функцію $\Phi(y)$ в межах зміни координати y від 0 до a у вигляді прямої лінії. Тоді одержимо:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot [1 - \Phi(y = a)], \quad (10)$$

де $\Phi(y = a) = e^{-\frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{інстп}}{S_{rad}} \cdot a^2}$.

З урахуванням залежності (8), маємо:

$$\Phi(y = a) = e^{-\frac{\pi}{4}} = 0,458. \quad (11)$$

Виходячи із залежності (10), площа F_1 остаточно виразиться так:

$$F_1 = 0,24 \cdot \sqrt{\frac{S_{rad}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{інстп}}}. \quad (12)$$

Підставляючи отриману залежність у рівність (9), визначимо параметр шорсткості поверхні R_a :

$$R_a = 2 \cdot F_1 = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{S_{rad}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{інстп}}}. \quad (13)$$

У підсумку прийшли до досить простої залежності для визначення параметра шорсткості поверхні R_a , з якої випливає, що зменшити R_a можна зменшенням швидкості радіальної подачі S_{rad} й збільшенням параметрів γ , k і $V_{інстп}$. Зважаючи на те, що при абразивному поліруванні швидкість радіальної подачі S_{rad} залежить від радіального зусилля P_y , яке визначається залежністю [4]:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot S_{rad}}{K_{піз} \cdot V_{інстп}}, \quad (14)$$

параметр шорсткості поверхні R_a остаточно виразиться так:

$$R_a = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{K_{різ} \cdot P_{нит}}{\sigma \cdot \text{tg} \gamma \cdot k}}, \quad (15)$$

де σ – умовне напруження різання, H/m^2 ; $K_{різ} = P_z / P_y$ – коефіцієнт різання; P_z, P_y – тангенціальна й радіальна складові сили різання, Н; $P_{нит} = P_y / F$ – питомий тиск у зоні обробки, H/m^2 ; F – фактична площа контакту оброблюваного зразка з інструментом, m^2 .

Результати досліджень. Із залежності (15) випливає несподіваний результат, пов'язаний з тим, що в залежність не входить швидкість переміщення абразивного інструмента $V_{інстр}$. З фізичної точки зору це пов'язане з особливостями абразивної обробки при фіксованому радіальному зусиллі P_y .

Як випливає із залежності (15), основною умовою зменшення параметра шорсткості поверхні R_a є зменшення питомого тиску $P_{нит} = P_y / F$ в зоні обробки й збільшення поверхневої концентрації k абразивних зерен на робочій поверхні інструмента. Залежність (15) може бути представлена по-іншому, якщо виразити $P_z = K_{різ} \cdot P_y$, а $S_{мит} = P_z / \sigma$, тоді

$$R_a = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{S_{мит}}{F \cdot \text{tg} \gamma \cdot k}}, \quad (16)$$

де $S_{мит}$ – миттєва сумарна площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами, m^2 .

У цьому випадку параметр шорсткості поверхні R_a залежить, головним чином, від миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами $S_{мит}$, яка є змінною величиною процесу абразивного полірування й визначається умовами обробки: чим менше $S_{мит}$, тим менше параметр R_a . Отже, при абразивному поліруванні величину $S_{мит}$ необхідно зменшувати до мінімально можливого значення, при якому здійсимо процес різання (процес стружкоутворення). Іншими словами, на заключному етапі абразивного полірування необхідно забезпечити умови переходу від процесу різання до процесу пружно-пластичного деформування оброблюваного металу. Це дозволить за рахунок пластичного відтискування металу і його перерозподілу в зоні обробки одержати мінімально можливе значення параметра шорсткості поверхні R_a .

Із залежності (16) також випливає, що домогтися зменшення параметра R_a можна за рахунок збільшення кута 2γ при вершині конусоподібного зерна, тобто при обробці ефективно використовувати сферичні й овалізовані абразивні зерна.

Необхідно відзначити, що залежності (15) і (16) справедливі для всіх процесів абразивної обробки, здійснюваних з фіксованим радіальним зусил-

лям P_y . Із залежності (15) випливає, на перший погляд, суперечливий результат, пов'язаний з тим, що зі зменшенням відношення σ / K_{pi3} , тобто з підвищенням ріжучої здатності абразивного інструмента, параметр шорсткості поверхні R_a збільшується. З фізичної точки зору це можна пояснити тим, що зі зменшенням відношення σ / K_{pi3} при фіксованому радіальному зусиллі P_y збільшується продуктивність обробки й відповідно швидкість радіальної подачі $S_{рад}$. Безсумнівно, це приведе до збільшення параметра шорсткості поверхні R_a . Тому на фінішних операціях абразивної обробки, коли потрібно забезпечити зменшення параметрів шорсткості поверхні, немає необхідності зменшувати умовне напруження різання σ за рахунок підвищення гостроти ріжучих абразивних зерен. Навпаки, слід зменшувати гостроту абразивних зерен, збільшуючи тим самим умовне напруження різання σ й відповідно відношення σ / K_{pi3} .

Перспективи подальших досліджень. Автор вважає перспективним напрямки досліджень, пов'язані зі створенням математичної моделі визначення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з урахуванням утворення на зернах площадок зношування й відомого відношення товщини зрізу до радіуса абразивного зерна, яке визначає умови переходу від процесу різання до процесу пружно-пластичного деформування оброблюваного металу. Це дозволить виявити нові технологічні можливості зменшення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з позиції енергоємності обробки.

Висновки. У роботі запропонований теоретичний підхід до розрахунку параметрів шорсткості при абразивному поліруванні з фіксованим радіальним зусиллям. Це дозволило обґрунтувати умови зменшення шорсткості поверхні, які полягають в основному в зменшенні питомого тиску в зоні обробки й збільшенні поверхневої концентрації абразивних зерен на робочій поверхні інструмента. Доведено, що з кінематичної точки зору зменшення шорсткості поверхні пов'язане зі зменшенням миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами до мінімально можливого значення, при якому процес різання (стружкоутворення) переходить у процес пружно-пластичного деформування оброблюваного металу (без утворення стружки).

Список літератури: 1. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, – 1975. – 212 с. 2. *Хусу А.Н., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). – М.: Изд-во «Наука», – 1975. – 344 с. 3. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, – 1979. – 232 с. 4. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты». – Одесса, – 1995. – 36 с. 5. *Новиков Ф.В., Шкурутий В.Г.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. – Х.: НТУ «ХП». – 2004. – № 44. – С. 140 – 149. 6. *Новиков Ф.В., Нежебовський В.В., Шкурутий В.Г.* Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці // Вісник НТУ «ХП».

Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5 (979). – С. 199 – 210. 7. Бронштейн И.Н., Семедьяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., – 1986. – 544 с.

Bibliography (transliterated): 1. Korolev, A. V. *Issledovanie processov obrazovanija poverhnostej instrumenta i detali pri abrazivnoj obrabotke*. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. Print. 2. Husu, A. N., U. R. Vitenberg and V. A. Pal'mov. *Sherohovatost' poverhnostej (teoretiko-verojatnostnyj podhod)*. Moscow: Izd-vo «Nauka», 1975. Print. 3. Novoselov, J. K. *Dinamika formoobrazovanija poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke*. Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1979. Print. 4. Novikov, F. V. *Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovanija. Avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni d-ra tehn. Nauk*. Odessa, 1995. Print. 5. Novikov, F. V., and V. G. Shkurupij. "Issledovanija sherohovatosti poverhnosti pri almazno-abrazivnoj obrabotke metodami teorii verojatnostej." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'*. No. 44. Kharkiv: NTU «KhPI», 2004. 140–149. Print. 6. Novikov, F. V., V. V. Nezhebovs'kyj and V. G. Shkurupij. "Matematychna model' vyznachennja shorstkosti poverhni pry abrazyvnyj obrobci." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Matematychno modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah*. No. 5 (979). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 199–210. Print. 7. Bronshtejn, I. N., and K. A. Semendjaev. *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhijhsja vuzov. 13-e izd., ispravlenoe*. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986. Print.

Надійшла (received) 06. 08.2014

УДК 629.017:681.532.58

С.Н. ШУКЛИНОВ, д-р техн. наук, доц, ХНАДУ, Харьков

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ АВТОМОБИЛЯ С ЧАСТИЧНО АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ТОРМОЗНЫМ ПРИВОДОМ

Приведены результаты моделирования процесса торможения автомобиля с адаптивной автоматизированной системой управления в случае частично автоматизированного тормозного привода. Дана оценка изменения замедления автомобиля при действии возмущающих внешних и внутренних факторов в случаях с адаптивным управлением и без адаптивного управления при заданном усилии на педали тормоза. Представлены зависимости изменения корректирующего воздействия на поршне управления вакуумного усилителя тормозного привода, сформированного исполнительным устройством адаптивной системы управления, при торможении груженого автомобиля и при отказе одного тормозного контура во время торможения. Результаты моделирования показывают, что адаптивное управление в частично автоматизированном тормозном приводе обеспечивает инвариантное управление торможением автомобиля при действии возмущающих факторов.

Ключевые слова: автомобиль, система, тормозное управление, замедление, усилие на педали тормоза, давление жидкости.

Введение. Характер процесса управления торможением в автоматизированной системе управления задает водитель. Для улучшения эргономических параметров и повышения качества управления торможением автомоби-

© С. Н. Шуклинов, 2014