

УДК 629.36.023.1-597.5

Малиновский Михаил Павлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, ntbmadi@gmail.com

Лукьянов Дмитрий Валерьевич, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, lukyanov.dmitry@list.ru

Петров Андрей Алексеевич, инженер-конструктор,
Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «КБ «Мотор», Россия, 123100, Москва, ул. Сергея Макеева, 7,
r2d2tmod69@gmail.com

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПО ДИАГРАММЕ ФУНКЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПНЕВМАТИЧЕСКОМУ ТОРМОЗНОМУ ПРИВОДУ

Аннотация. Важным этапом при проектировочных и поверочных расчетах колесных транспортных средств специального назначения является оценка их тормозной эффективности. Авторы сформулировали ряд задач, возникающих при определении характеристик пневматического тормозного привода, и применили для их решения диаграмму функций давления, известную из пневмоавтоматики.

Ключевые слова: пневматический тормозной привод; время быстродействия; диаграмма функций давления; ускорительный клапан.

Malinovsky Mikhail P., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, ntbmadi@gmail.com

Lukyanov Dmitry V., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, lukyanov.dmitry@list.ru

Petrov Andrej A., design engineer,
«КБ «Мотор», 7, Sergey Makeyev str., Moscow, 123100, Russia, r2d2tmod69@gmail.com

TASKS TO BE SOLVED BY THE DIAGRAM OF PRESSURE FUNCTIONS APPLIED TO THE PNEUMATIC BRAKE TRANSMISSION

Abstract. An important stage in the design and verification calculations of wheeled special purpose vehicles is to assess their braking performance. The authors have formulated a number of problems that arise while determining the characteristics of a pneumatic brake transmission and applied the pressure functions diagram known from pneumatic automatics to solve those.

Key words: pneumatic brakes; reaction time; diagram of pressure functions; relay valve.

Введение

При проектировании тормозного привода многозвенных транспортных средств специального назначения наиболее актуальной проблемой является определение его быстродействия и иных связанных с ним показателей. При этом применение линейной функции нарастания давления по времени недопустимо ввиду особенностей протекания динамических процессов в газовой среде. Поэтому при расчете различных параметров пневматического тормозного привода, в частности времени его срабатывания, целесообразно использовать диаграмму функций давления, применяемую в пневмоавтоматике [1–3].

Построение тормозной диаграммы

Одной из важнейших задач при проектировании тормозного привода является построение тормозной диаграммы, которая представляет собой зависимость давления в исполнительных устройствах тормозной системы или тормозного усилия на колёсах от времени [4].

Начальное давление в приводе p_0 равно атмосферному давлению $p_a = 0,1$ МПа. Максимальное давление в управляющем контуре принимается $p_m = 0,65$ МПа. Коэффициент расхода для каждого трубопровода:

$$\mu = \sqrt{\frac{1,567}{2,853 + 0,028 \frac{\ell}{d_T}}} = \sqrt{\frac{1,567}{2,853 + 0,028 \frac{\ell}{1,3}}}, \quad (1)$$

где ℓ – длина трубопровода в см, которая для тягача равна L_1 , для соединительного шланга $L_{шл} = 3$ м, для прицепа L_2 ; $d_T = 1,3$ см – диаметр сечения трубопровода.

Сначала рассчитывается отношение начального (ε_0) и каждого расчетного (ε_k) значения давления к максимальному давлению в системе:

$$\varepsilon_0 = \frac{p_a}{p_a + p_m} = \frac{0,1}{0,1 + 0,65} = 0,133, \quad \varepsilon_k = \frac{p_a + p_k}{p_a + p_m},$$

где p_k – расчетное давление.

По диаграмме [2] определяются значения функций давления ψ_2 и ψ_1 для каждого ε . Затем, исходя из конструктивных особенностей конкретного тормозного привода, составляются зависимости времени нарастания до заданного значения давления p_k для тягача и прицепа:

$$t_1(p_k) = \tau_{л1} + \frac{2,53 \cdot \Psi_2}{10^4} \cdot \frac{L_1}{\mu_1} + \frac{3,62 \cdot \Psi_1}{10^5 \cdot 1,327} \cdot \frac{L_1 \cdot 1,327 + k_1 \cdot V_{K1}}{\mu_1}, \text{ с};$$

$$t_2(p_k) = \tau_{л1} + \frac{2,53 \cdot \Psi_2}{10^4} \left(\frac{L_1}{\mu_1} + \frac{L_{шпл}}{\mu_{шпл}} + \frac{L_2}{\mu_2} \right) + \frac{3,62 \cdot \Psi_1}{10^5 \cdot 1,327} \cdot \frac{L_2 \cdot 1,327 + k_2 V_{K2}}{\mu_2}, \text{ с},$$

где $\Psi_2 = [\psi_2(\varepsilon_k) - \psi_2(\varepsilon_0)]/\psi_2(\varepsilon_k)$, $\Psi_1 = \psi_1(\varepsilon_k) - \psi_1(\varepsilon_0)$.

Задав шаг по оси ординат (например, 5% от p_m), по приведенным зависимостям определяют время нарастания до каждого промежуточного давления и строят тормозную диаграмму (рис. 1).

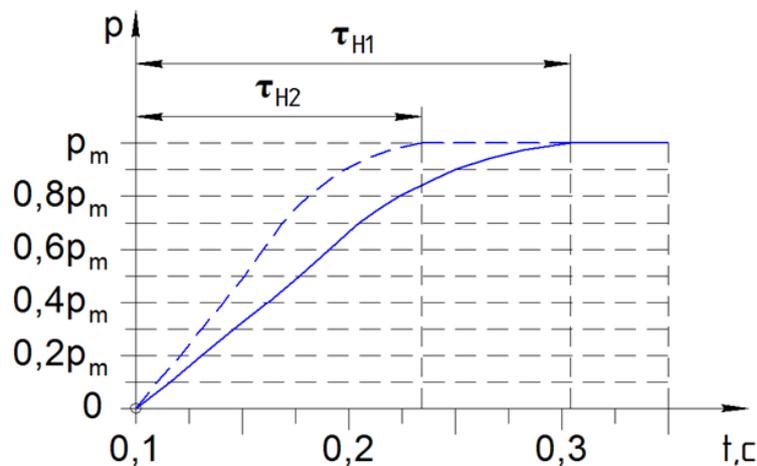


Рис. 1. Тормозная диаграмма

Таким образом, построение тормозной диаграммы является обратной задачей относительно основной, прямой задачи – определения времени срабатывания тормозной системы.

Уточнения традиционного метода

Традиционный (интегральный) метод расчета таких важных параметров, характеризующих тормозную эффективность, как тормозной путь и время торможения, не учитывает целый ряд особенностей [5]:

- а) реальные габариты звеньев автопоезда;
- б) перераспределение веса при торможении;
- в) влияние коэффициента сцепления на время срабатывания;
- г) влияние загрузки на параметры торможения;
- д) разное время срабатывания передних и задних тормозных механизмов каждого звена автопоезда;
- е) нелинейный характер нарастания давления в пневматическом тормозном приводе.

Применение диаграммы функций давления позволяет рассмотреть каждую ось звена автопоезда в отдельности и тем самым учесть перечисленные выше особенности. При этом для упрощения проектировочных расчётов допускается аппроксимировать нелинейную зависимость давления от времени к нескольким линейным участкам (рис. 2).

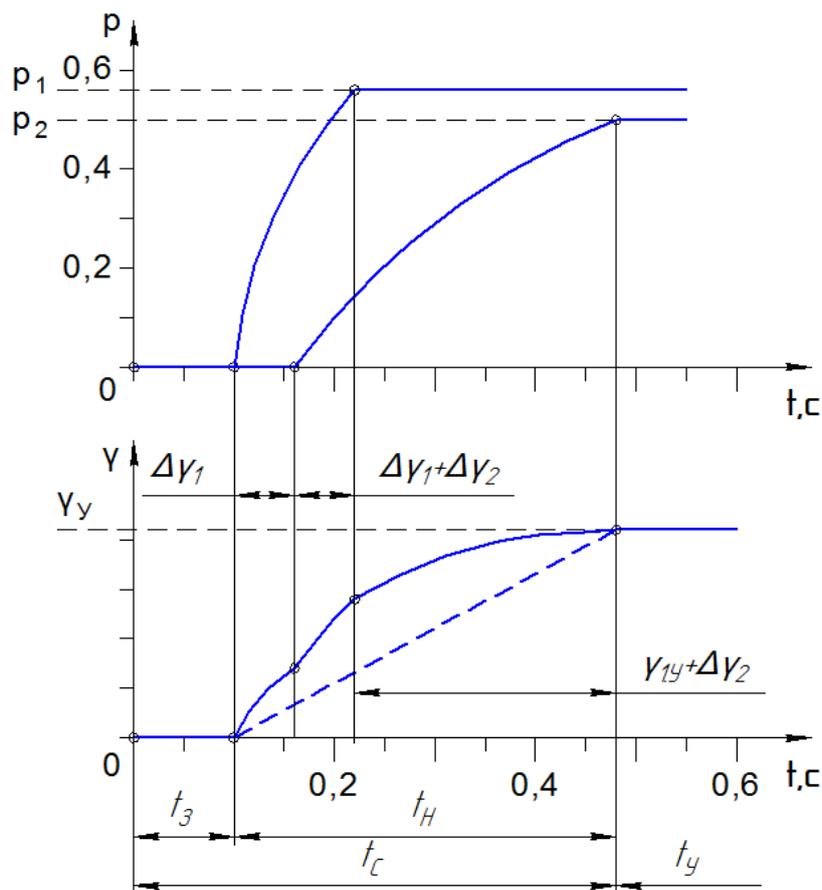


Рис. 2. Аппроксимация тормозной диаграммы

При большой базе звена L ошибка при аппроксимации может быть весьма значительной, но она идёт в запас, так как расчётный путь получится больше, чем действительный. Чем больше объём тормозных камер, тем более пологим получается аппроксимированный график.

Расчет ускорительных каскадов

Одним из наиболее перспективных на сегодняшний день направлений по решению проблемы быстродействия тормозного привода для автопоездов большой длины является замена пневматических управляющих контуров электронными [6–9]. Однако на транспортных средствах специального назначения не всегда целесообразно использовать электропневматический привод. В этом случае применяют ускорительные клапаны [10].

Для расчёта необходимого количества каскадов ускорения при большой длине магистрали также можно применить диаграмму функций давления [2].

Время срабатывания магистрали длиной $k \cdot \ell$ не равно сумме времени срабатывания k магистралей длиной ℓ . Во всех подобных случаях корректным является большее значение времени.

Быстродействие трубопровода до давления открытия ускорительного клапана составляет 0,03...0,045 МПа [11, с. 46], то есть примерно 5% от p_m или 0,0325 МПа.

Введём обозначения:

L_K – длина последнего трубопровода, подводящего к тормозным камерам;

L_i – длина иных трубопроводов, кроме последнего;

i – количество иных трубопроводов, кроме последнего.

Коэффициент расхода трубопровода определяется по формуле (1), где длина трубопровода ℓ равна L_i или L_K .

Время срабатывания ускорительного каскада рассчитывается как сумма времени срабатывания магистрали до 100% плюс время наполнения трубопровода до 5%:

$$t_y = \frac{2,53 \cdot \Psi_2(\varepsilon_m)}{10^4} \cdot \frac{L_i}{\mu_i} + \frac{3,62 \cdot \Psi_1(\varepsilon_{5\%})}{10^5 \cdot f_{\text{вх}}} \cdot \frac{L_i \cdot f_m}{\mu_i}, \text{ с,}$$

где длина магистрали ℓ подставляется в см.

Время срабатывания последней магистрали:

$$t_K = \frac{2,53 \cdot \Psi_2(\varepsilon_m)}{10^4} \cdot \frac{L_K}{\mu_K} + \frac{3,62 \cdot \Psi_1(\varepsilon_m)}{10^5 \cdot f_{\text{вх}}} \cdot \frac{L_K \cdot f_m + k \cdot V_K}{\mu_K}, \text{ с,}$$

где $k = 2$ – количество тормозных камер на данной оси; $V_K = 1037,43 \text{ см}^3$ – объём тормозной камеры (для типа 24" с ходом штока 6,7 см); $f_T = f_{\text{вх}} = 1,327 \text{ см}^2$ – площадь сечения трубопровода и входного отверстия тормозной камеры.

Значения μ для различной длины трубопровода приведены в табл. 1, значения функций давления – в табл. 2.

Таблица 1

Зависимость μ от ℓ

ℓ	6 м	8 м	12 м	16 м	24 м
μ	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17

Таблица 2

Зависимость функций ε , ψ_2 , Ψ_1 от давления p

p , МПа	$p_a = 0,1$	$p_{5\%} = 0,033$	$p_{10\%} = 0,065$	$p_{75\%} = 0,488$	$p_m = 0,65$
ε	$\varepsilon_0 = 0,133$	$\varepsilon_{5\%} = 0,177$	$\varepsilon_{10\%} = 0,22$	$\varepsilon_{75\%} = 0,784$	$\varepsilon_m = 1$
$\psi_2(\varepsilon)$	0,77	0,79	0,81	0,97	1,05
$\Psi_2 = [\psi_2(\varepsilon_K) - \psi_2(\varepsilon_0)]/\psi_2(\varepsilon_K)$	–	0,025	0,049	0,206	0,267
$\psi_1(\varepsilon)$	0,13	0,18	0,22	0,76	1,3
$\Psi_1 = \psi_1(\varepsilon_K) - \psi_1(\varepsilon_0)$	–	0,05	0,09	0,63	1,17

Суммарное время срабатывания:

$$t = i \cdot t_y + t_K, \text{ с.}$$

Расчетные значения суммарного времени срабатывания для различных схем размещения ускорительных клапанов (рис. 3) приведены в табл. 3.

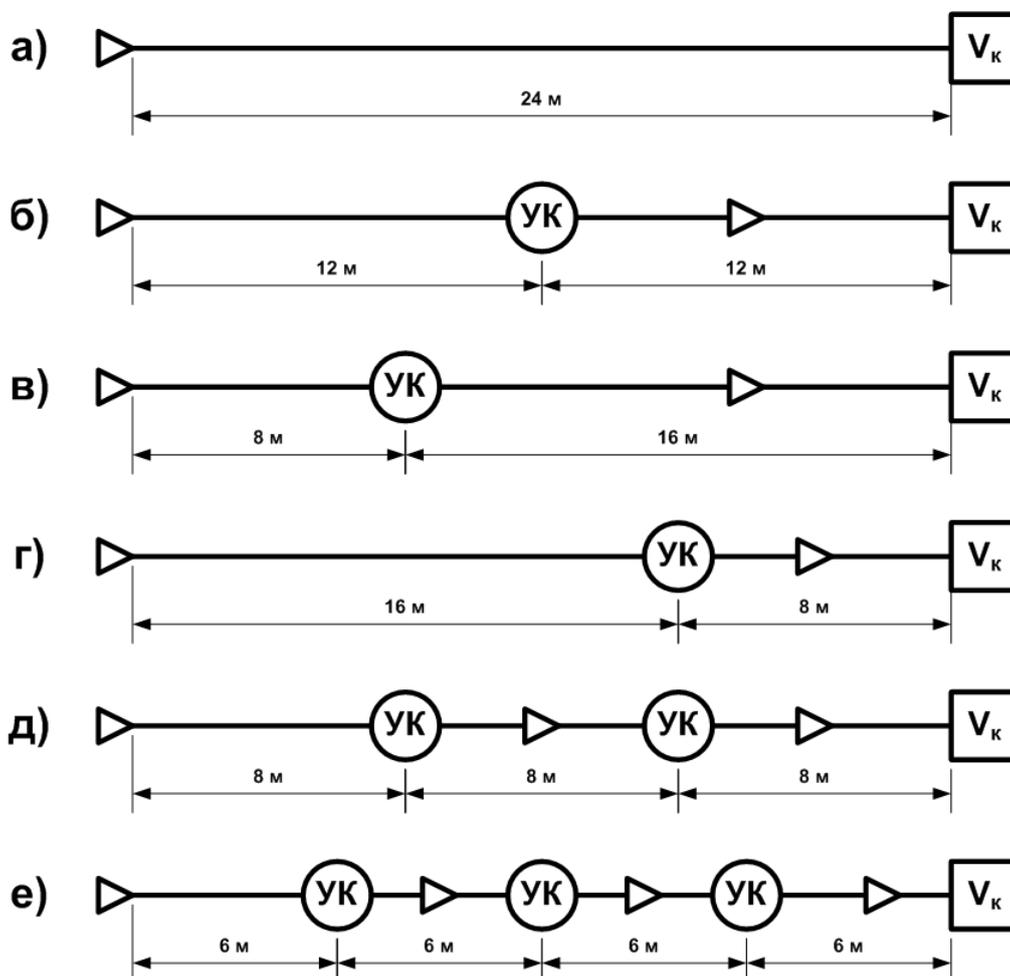


Рис. 3. Ускорительные каскады

Таблица 3

Результаты сравнения различных схем размещения ускорительных клапанов

Схема	i	$L_i, \text{ м}$	$L_K, \text{ м}$	$t_y, \text{ с}$	$t_K, \text{ с}$	$t, \text{ с}$
а	0	–	24	–	4,85	4,85
б	1	12	12	1,42	1,95	3,37
в	1	8	16	0,78	2,87	3,65
г	1	16	8	2,18	1,16	3,34
д	2	8	8	0,78	1,16	2,72
е	3	6	6	0,53	0,84	2,43

Таким образом можно определить не только необходимое количество ускорительных клапанов, но и подобрать их оптимальное размещение по длине магистрали.

Косвенные задачи

При проектировании пневматического тормозного привода возникает необходимость определить проходные сечения различных аппаратов, например, при расчёте корректирующих устройств [12].

Выведем уравнение суммарного времени срабатывания в общем виде:

$$t_y = \left[\frac{2,53 \cdot \Psi_2}{10^4} + \frac{3,62 \cdot \Psi_1 \cdot 1,327}{10^5 \cdot f_{вх}} \right] \cdot \frac{L}{\sqrt{\frac{1,567}{2,853 + 0,0215 \cdot L}}}$$

Тогда при заданном времени срабатывания управляющей магистрали t_y можно подобрать длину трубопровода L или площадь входного отверстия $f_{вх}$.

Заключение

В настоящей статье авторы предлагают использовать диаграмму функций давления для решения следующих задач:

- 1) построение тормозной диаграммы;
- 2) уточнение традиционного метода;
- 3) расчет ускорительных каскадов;
- 4) расчет параметров пневмоаппаратов при заданном быстродействии.

Указанные зависимости можно применять при расчете любых элементов тормозного привода. Данный подход позволяет с минимальными затратами времени проводить оценочные, проектировочные и поверочные расчеты различных устройств, входящих в состав пневматического тормозного привода, широко применяемого на колесных транспортных средствах специального назначения.

Список литературы

1. Кулешова, Н.А. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Пневматические средства автоматики». Ч. 1 / Н.А. Кулешова; МАДИ (ГТУ). – М., 2006. – 27 с.
2. Малиновский, М.П. Расчет быстродействия пневматического тормозного привода на колесных транспортных средствах специального назначения / М.П. Малиновский // Вестник МАДИ. – 2016. – Вып. 4. – С. 68–74.
3. Буренин, В.В. Силовые пневмоцилиндры технических средств пневмоавтоматики и силового пневмопривода машин и механизмов / В.В. Буренин // Автоматизация. Современные технологии. – 2013. – № 1. – С. 003–008.
4. Малиновский, М.П. Экспериментальное исследование характеристик систем управления транспортных средств: учеб. пособие / М.П. Малиновский; МАДИ. – М., 2011. – 123 с.
5. Петренко, А.М. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теория специальных транспортных средств». Ч. 1 / А.М. Петренко; МАДИ. – М., 2003. – 54 с.
6. Гладов, Г.И. Устойчивость криволинейного движения многозвенного автопоезда / Г.И. Гладов, Л.А. Пресняков. – М., 2004. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 30.09.2004, № 1538-В2004.
7. Ерусланкин, С.А. Результаты моделирования и обоснования выбора параметров автономных вентильно-индукторных приводов при электрическом торможении полуприцепа экспериментального автопоезда / С.А. Ерусланкин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2014. – № 2. – С. 20.
8. Солнцев, А.Н. Разработка математической модели движения экспериментального образца автопоезда большой грузоподъемности, состоящего из четырехосного тягача и активного полуприцепа / А.Н. Солнцев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2014. – № 2. – С. 11.

9. Солнцев, А.Н. Совершенствование процесса торможения автопоезда большой габаритной длины: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Н. Солнцев; МАДИ (ГТУ). – М., 2004. – 167 с.
10. Конструкции многоцелевых гусеничных и колесных машин: учебник / Г.И. Гладов, А.В. Вихров, С.В. Зайцев, В.В. Кувшинов, В.В. Павлов; под ред. Г.И. Гладова. – М.: Академия, 2010. – 400 с.
11. Испытание тормозных пневматических приборов автомобилей КамАЗ: лабораторный практикум / сост. Л.Н. Бухаров. – Омск: СибАДИ, 2011. – 88 с.
12. Саломатин, П.А. Системы управления транспортных средств: Тормозные системы: учеб. пособие / П.А. Саломатин; МАДИ. – М., 1984. – 95 с.

References

1. Kuleshova N.A. *Metodicheskie ukazanija k laboratornym rabotam po kursu «Pnevmaticheskie sredstva avtomatiki»* (Guidelines for laboratory works on discipline «Pneumatic means of automation»), Moscow, MADI, 2006, 27 p.
2. Malinovskij M.P. *Vestnik MADI*, 2016, no. 4, p. 68–74.
3. Burenin V.V. *Avtomatizacija. Sovremennye tehnologii*, 2013, no. 1, p. 003–008.
4. Malinovskij M.P. *Jeksperimental'noe issledovanie harakteristik sistem upravlenija transportnyh sredstv* (Experimental study of control systems characteristics of vehicles), Moscow, MADI, 2011, 123 p.
5. Petrenko A.M. *Metodicheskie ukazanija k laboratornym rabotam po discipline «Teorija special'nyh transportnyh sredstv»* (Guidelines for laboratory works on discipline «Theory of special vehicles»), Moscow, MADI, 2003, 54 p.
6. Gladov G.I., Presnjakov L.A. *Ustojchivost' krivolinejnogo dvizhenija mnogozvennogo avtopoezda* (Stability of the curvilinear motion of a multi-tiered articulated vehicle), Moscow, 2004, 8 p. Dep. to VINITI 30.09.2004, № 1538-V2004.

7. Eruslankin S.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2014, no. 2, p. 20.
8. Solncev A.N. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2014, no. 2, p. 11.
9. Solncev A.N. *Sovershenstvovanie processa tormozhenija avtopoezda bol'shoj gabaritnoj dliny* (Improvement of the braking process of the long-sized articulated vehicle), PhD thesis, Moscow, MADI, 2004, 167 p.
10. Gladov G.I., Vihrov A.V., Zajcev S.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Konstrukcii mnogocelovyh gusenichnyh i kolesnyh mashin* (Designs for multi-purpose caterpillar and wheeled vehicles), Moscow, Akademija, 2010, 400 p.
11. Buharov L.N. *Ispytanie tormoznyh pnevmaticheskikh priborov avtomobilej KamAZ* (Testing of brake pneumatic devices of KamAZ vehicles), Omsk, SibADI, 2011, 88 p.
12. Salomatin P.A. *Sistemy upravlenija transportnyh sredstv: Tormoznye sistemy* (Vehicle control systems: Brake systems), Moscow, MADI, 1984, 95 p.