

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА И ТРЕБОВАНИЙ К ЕГО СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

**В.И. Клименко, профессор, к.т.н., Н.Г. Михалевич, ассистент,
ХНАДУ**

Аннотация. Уточнена методика определения ступеней статической характеристики электропневматического тормозного привода с учётом критерия бортовой неравномерности тормозных сил.

Ключевые слова: допустимое замедление, время открытого состояния клапана, электропневматический тормозной привод, модулятор, зона нечувствительности.

Введение

На сегодняшний день пневматический тормозной привод, управляемый электроникой, занимает лидирующие позиции среди тормозных приводов для коммерческих автомобилей зарубежных производителей. Увеличение средней скорости движения и количества автомобилей на дорогах требует быстрой реакции и точности управления не только от водителя, но и от автомобиля. Движение с дистанцией, существенно меньше безопасной, увеличение полной массы автомобилей и автопоездов, а также их скорости движения требует безошибочного контроля над транспортным средством в любой ситуации.

Анализ публикаций

Точность регулирования электропневматического тормозного привода (ЭПП) оценивается количеством ступеней, укладываемых от минимального до максимального рабочего давления в тормозной камере при плавном перемещении педали тормоза.

Для оценки контура ЭПП воспользуемся методикой, предложенной Нужным В.В. [1], в которой, исходя из массовых и геометрических характеристик автотранспортных средств (АТС), предлагается определить

требуемое быстродействие клапанов модулятора. Отправной точкой служит зависимость разностного порога чувствительности к замедлению в зависимости от его исходного значения [1], которое определяется по зависимости (1) и выражается допустимой областью приращения замедления в зависимости от коэффициента замедления (рис. 1).

$$[\Delta j] = 0,07 \cdot (j + 2,5), \quad (1)$$

где $[\Delta j]$ – допустимая ступень замедления, м/с^2 ; j – текущее замедление АТС, м/с^2 .

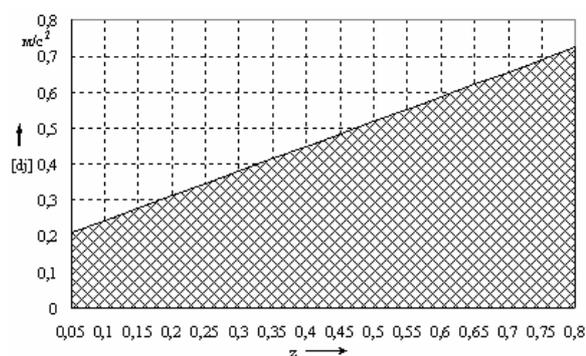


Рис. 1. Зона допустимых приращений замедления

степень давления, соответствующая допустимому приращению замедления [1], определяется по зависимости (2).

$$[\Delta P] = \frac{[\Delta j] \cdot M_c \cdot (P_p - P_n)}{N_{\max}}, \quad (2)$$

где M_c – снаряжённая масса АТС, кг; P_n – начальное давление, до которого тормозная сила отсутствует, МПа; P_p – рабочее давление, соответствующее максимальной тормозной силе, МПа; N_{\max} – максимальная тормозная сила оси, Н.

Откуда допустимое время срабатывания клапана модулятора определяется как

$$t_k = -T \times \ln \left(\frac{1 - 0,2 \cdot M_c \cdot (P_p - 0,7 \cdot M_c \cdot (P_p - P_0)) \cdot (P_p - P_0)}{N_{\max}} \right), \quad (3)$$

где T – постоянная времени контура тормозного привода.

Принимая во внимание допущения, сделанные автором [1], приходим к выводу:

- 1) Скорость перемещения педали водителем превышает скорость изменения давления. При этом пороговый сигнал (граница зоны нечувствительности), при изменении задающего сигнала, опережает сигнал обратной связи (ОС).
- 2) Электромагнитные клапаны модулятора срабатывают мгновенно по истечении времени чистого запаздывания.
- 3) Процесс изменения давления воздуха при истечении через клапан постоянного сечения с достаточной точностью описывается переходной характеристикой апериодического звена 1-го порядка.

Цель и постановка задачи

Можно сделать вывод о необходимости доработки этой методики применительно к контуру ЭПТП с мембранным модулятором давления.

Во-первых, допустимая величина изменения замедления актуальна для статической характеристики ЭПТП. В этом режиме работы скорость изменения задающего сигнала существенно ниже скорости изменения сигнала

ОС, что противоречит первому допущению автора [1].

Во-вторых, Нужным В.В. [1] рассмотрено три варианта установки датчика ОС в контуре ЭПТП с поршневым модулятором на базе ускорительного клапана (УК) (быстродействие которого на порядок ниже мембранного [4]).

Вариант 1 – в тормозной камере.

Вариант 2 – за модулятором.

Вариант 3 – в управляющей полости УК.

Учитывая необходимое быстродействие клапана ($t_k = 0,003 \dots 0,0035$ с) и первое допущение, эта методика подходит только для третьего варианта установки датчика ОС. При установке датчика ОС по второму варианту закон изменения сигнала ОС не может быть описан переходной характеристикой апериодического звена 1-го порядка (рис. 2), как принято в третьем допущении, а при установке датчика ОС по первому варианту невозможно получить желаемое быстродействие клапана [2].

В-третьих, при определении допустимой ступени давления статической характеристики ЭПТП нельзя пользоваться графиком монотонного наполнения тормозных камер (т.е. динамической характеристикой ЭПТП), поскольку статическая характеристика ЭПТП не является монотонной, а постоянная времени каждой установки статической характеристики отличается от постоянной времени монотонного наполнения в 2...2,5 раза. Это связано с инерционностью, обусловленной объёмом трубопровода, связывающего модулятор с тормозными камерами, а также возникающего по этой же причине времени запаздывания t_0 (рис. 2) в нарастании давления в тормозной камере.

Всё выше сказанное указывает на необходимость доработки методики применительно к контуру с мембранным модулятором.

Статическая точность ЭПТП

Рассмотрим типовую ступень повышения давления, полученную при снятии статической характеристики ЭПТП (рис. 2).

С момента подачи управляющего сигнала на обмотку электромагнита до момента полного

открытия мембранного клапана модулятора проходит время срабатывания t_{cp} . Давление воздуха начинает расти в трубопроводе за модулятором с определённой интенсивностью, равной $tg\beta$. В тормозной камере переходной процесс нарастает с интенсивностью равной $tg\alpha$ спустя время запаздывания t_0 . Так как датчик ОС установлен в полости модулятора, то в электронный блок управления (ЭБУ) поступает информация только о процессе повышения давления за модулятором (рис. 2), изменения давления в трубопроводе за модулятором. В момент времени t_u давление за модулятором будет соответствовать P_{doc} , а в тормозной камере P_{TK} . На практике точно определить момент начала роста давления за модулятором весьма сложно из-за «шума» датчика ОС и колебательных процессов в контуре ЭПТП (рис. 2), поэтому будем вести отсчёт спустя t_{cp} время срабатывания мембраны с момента подачи управляющего импульса $u_{z(-1)}$ на обмотку электромагнита. Рассчитаем t_d (рис. 2) – время между началом роста давления и моментом подачи в ЭБУ сигнала от датчика ОС на закрытие клапана

$$t_d = t_u - t_{cp}, \quad (4)$$

где t_u – время между двумя ближайшими сигналами, поданными ЭБУ на обмотку электромагнита, с; t_{cp} – время срабатывания мембранного клапана, с.

Начальное давление, установленное во время предыдущего повышения давления, и текущее давление в тормозной камере на момент подачи сигнала в ЭБУ определим по зависимостям (5) и (6).

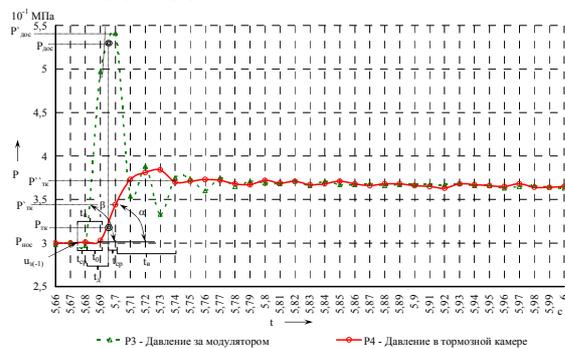


Рис. 2. Типовая ступень повышения давления в контуре ЭПТП

$$P_{нос} = P_{доc} - t_d \cdot tg\beta; \quad (5)$$

$$P_{TK} = P_{нос} + (t_d - t_0) \cdot tg\alpha, \quad (6)$$

где $P_{доc}$ – давление воздуха в трубопроводе в момент принятия ЭБУ решения о закрытии впускного клапана, МПа; $P_{нос}$ – начальное давление воздуха в контуре ЭПТП перед открытием впускного клапана, МПа; t_0 – время запаздывания начала роста давления в тормозной камере по отношению к началу роста давления в трубопроводе, МПа; $tg\alpha$ – темп нарастания давления в тормозной камере, МПа/с; $tg\beta$ – темп давления в трубопроводе между тормозной камерой и модулятором, МПа/с; P_{TK} – давление в тормозной камере в момент подачи ЭБУ команды на закрытие впускного клапана, МПа.

При условии подачи управляющего импульса на обмотку электромагнита в момент времени t_u мембранный клапан закроется спустя время t_{cp} . За это время давление в тормозной камере достигнет значения P'_{TK} , а давление за модулятором значения $P'_{доc}$.

$$P'_{TK} = P_{TK} + t_{cp} \cdot tg\alpha; \quad (7)$$

$$P'_{доc} = P_{доc} + K_{зат} \cdot t_{cp} \cdot tg\beta, \quad (8)$$

где $K_{зат}$ – коэффициент затухания темпа роста давления в процессе закрытия мембранного клапана, обусловленный изменением эффективной площади клапана.

На момент закрытия мембранного клапана в контуре ЭПТП установится разница давлений между тормозной камерой и трубопроводом, равная ΔP

$$\Delta P = P'_{доc} - P'_{TK}. \quad (9)$$

Давление по контуру начинает выравниваться, пока не достигнет какого-то установившегося значения P''_{TK} после закрытия впускного клапана модулятора. Определим это давление, исходя из уравнения (10) [3]. Учитывая, что при наполнении контура $P'_{доc}$ всегда больше P'_{TK}

$$P_{TK}'' = \frac{P'_{\text{дос}} + P'_{TK} \cdot \frac{V_{TK}}{V_M}}{1 + \frac{V_{TK}}{V_M}}. \quad (10)$$

В формуле (10) заменим давление в полости модулятора $P'_{\text{дос}}$ на сумму давлений $\Delta p + P'_{TK}$, а значение давления после его выравнивания – на сумму давлений в тормозной камере и приращение давления после его выравнивания $P'_{TK} + \Delta p_B$

$$P'_{TK} + \Delta p_B = \frac{\Delta p + P'_{TK} + P'_{TK} \cdot \frac{V_{TK}}{V_M}}{1 + \frac{V_{TK}}{V_M}}. \quad (11)$$

Тогда после преобразований получим

$$\Delta p_B = \frac{V_M}{V_M + V_{TK}} \cdot \Delta p = K_B \cdot \Delta p, \quad (12)$$

где K_B – коэффициент выравнивания давления.

Таким образом, в тормозной камере после выравнивания давления в контуре ЭПТП окончательно устанавливается давление P_{TK}'' за время t_B . Определим минимальное время открытого состояния клапана (13) исходя из времени срабатывания мембранного клапана $t_{\text{ср}}$

$$t_{\text{откр_сост}} = t_{\text{дв_м_откр}} + t_{\text{ср_м}} - t_{\text{ср_э}}, \quad (13)$$

где $t_{\text{откр_сост}}$ – время открытого состояния мембранного клапана, с; $t_{\text{дв_м_откр}}$ – время движения мембранного клапана при открытии, с; $t_{\text{ср_м}}$ – время срабатывания мембранного клапана, с; $t_{\text{ср_э}}$ – время срабатывания электромагнитного клапана, с.

$$t_{\text{откр_сост}} = 0,001 + 0,008 - 0,0025 = 0,0065 \text{ с.}$$

Очевидно, что при времени открытого состояния мембранного клапана меньше $t_0 = 0,01$ с впускной клапан закроется ещё до начала роста давления в тормозной камере. Таким образом, величину повышения дав-

ления в тормозной камере будет полностью определять характер изменения давления в трубопроводе между модулятором и тормозной камерой.

Опираясь на вышесказанное, справедливо неравенство (14), ограничивающее величину уставки давления

$$K_B \cdot t_{\text{откр_сост}} \cdot \text{tg}\beta \leq [\Delta P_B], \quad (14)$$

где $[\Delta P_B]$ – допустимая величина уставки давления, МПа.

В свою очередь допустимую величину уставки давления многие авторы стремятся определять, используя какой-либо ключевой критерий [1], [4], что не совсем логично, так как каждое условие, накладывающее ограничение на допустимую степень статической характеристики, доминирует в своём диапазоне нагрузок и замедлений АТС. Рассматривая в основном контуры ЭПТП с одноканальными, осевыми модуляторами, в работах [1], [4] выделяется два основных ограничения при определении допустимых ступеней статической характеристики ЭПТП.

Первое – обеспечение комфортабельности служебных торможений, используя чувствительность человеческого организма к минимальному приращению замедления (рис. 1) (может быть выражена линейной либо степенной зависимостью), которое выражается уравнением (15) [1]

$$[\Delta F_{Ti}] = [\Delta P_i] \cdot K_{Ti} = m \cdot [\Delta j], \quad (15)$$

где $[\Delta F_{Ti}]$ – допустимое изменение тормозной силы i -той оси АТС, вызывающее допустимое изменение замедления, Н; $[\Delta P_i]$ – допустимое изменение давления в i -том контуре тормозного привода, МПа; $K_{Ti} = \frac{F_{Ti}(\varphi_{\text{max}})}{P_p - P_H}$ – коэффициент преобразования тормозного механизма i -той оси, Н/МПа; m – масса АТС, кг.

Второе – обеспечение возможности регулирования давления при движении на льду с минимальным коэффициентом сцепления колёс с дорогой $\varphi_{\text{min}} = 0,05$. По рекомендациям коллектива авторов [4] эта уставка

определяется как разница между давлением блокировки колёс при минимальном сцеплении с дорогой и давлением начала роста тормозного момента.

С другой стороны, применение одноканальных, осевых модуляторов не позволяет реализовать функции антиблокировочной системы (АБС) высшей категории, а также систем курсовой устойчивости и устойчивости против опрокидывания. Для реализации функций упомянутых систем в комплексных системах управления торможением АТС, на сегодня, используются двухканальные, осевые модуляторы в тормозном приводе тягача и прицепных звеньев. Для такой компоновочной схемы контура ЭППП необходимо ввести *третье ограничение* – обеспечение допустимой бортовой неравномерности давления для любой оси [5] не должна превышать 25% от большей величины в диапазоне от 2 м/с² и более, а также не превышать значение, соответствующее 25%, при замедлении 2 м/с² и менее.

Результаты расчётов ступеней статической характеристики для грузового автомобиля КамАЗ-5325 согласно всем трём критериям будут иметь вид (рис. 3).

Рассчитаем реальный уровень приращения замедления (16), соответствующий практически достигнутому уровню открытого состояния впускного клапана (13).

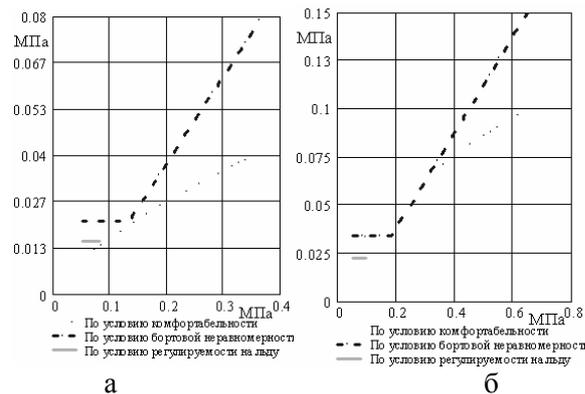


Рис. 3. Допустимые значения ступеней давления для передней оси: а – порожнего автомобиля; б – гружёного автомобиля

$$\Delta j_i = \frac{t_{\text{откр_сост}} \cdot K_{\beta i} \cdot K_{\alpha i} \cdot K_{T i}}{m}, \quad (16)$$

а с учётом наполнения тормозной камеры (при $t_{\text{откр_сост}} > t_0$)

$$\Delta j_i = \frac{\left[(t_{\text{откр_сост}} \cdot K_{\beta i} - t_{\text{откр_сост}} \cdot K_{\alpha i}) \cdot K_{\alpha i} + (t_{\text{откр_сост}} - t_{0 i}) \cdot K_{\alpha i} \right] \cdot K_{T i}}{m}. \quad (17)$$

Оценить степень комфортабельности служебного торможения можно по кривым, характеризующим приращение замедления в зависимости от интенсивности торможения. При расчёте соответствующих кривых учтём в уравнении (17) изменение коэффициентов $K_{\alpha i}$ и $K_{\beta i}$, а также увеличение времени срабатывания мембранного клапана по мере наполнения контура ЭППП и выразим их через коэффициент торможения $z = j/g$ (рис. 4). Снижение быстродействия впускного, мембранного клапана связано с увеличением противодавления на мембрану из контура по мере его заполнения. Стоит также отметить, что при увеличении темпа перемещения педали тормоза для сохранения точности регулирования необходимая степень замедления достигается меньшим числом ступеней давления. Этим обусловлен их выход за пределы допустимых границ по условию комфортабельности, и водитель может ощущать колебания в процессе торможения.

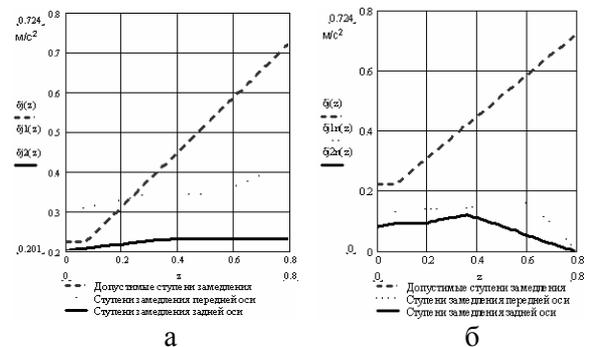


Рис. 4. Приращение замедления: а – порожнего автомобиля; б – гружёного автомобиля

Оценочной характеристикой для обобщения всех введенных критериев можно считать время открытого состояния клапана, которое обеспечивает соответствующее повышение давления в тормозной камере. Пользуясь данной методикой, можем вычислить граничные значения этого времени, обеспечивающие соответствие модулятора данному АТС с контуром ЭППП (рис. 5, 6).

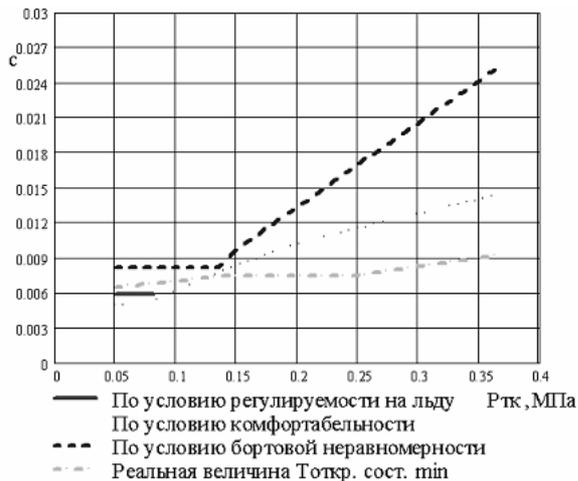


Рис. 5. Максимально допустимое время открытого состояния клапана для контура передней оси АТС со снаряжённой массой

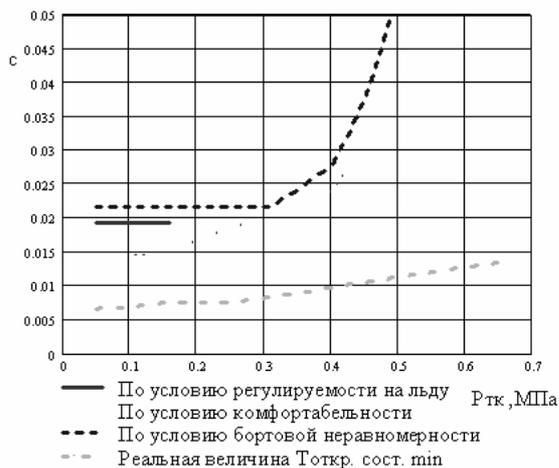


Рис. 6. Максимально допустимое время открытого состояния клапана для контура задней оси АТС с полной массой

Заключение

Анализируя результаты расчётов, можно сделать вывод о недопустимости подхода к определению ступенчатости статической характеристики ЭППП только с позиции одного из критериев [4]. Необходим комплексный подход, учитывающий особенности компоновки как автомобиля, так и тормозного контура, так как для разной степени загрузки оси и замедления АТС все три критерия поочерёдно занимают доминирующую позицию в наложении ограничения на ступени статической характеристики. Некоторую

сложность в отношении обеспечения комфортабельности торможения представляет передняя ось АТС (рис. 5). Для неё не всегда удаётся обеспечить условие (15). Этим объясняется применение в тормозных системах фирмы WABCO в качестве модулятора задней оси одного релейного электропневматического модулятора, а для управления передней осью комбинации из квазипропорционального модулятора ЭППП и релейных модуляторов АБС [6].

Литература

1. Нужный В.В. Разработка электропневматического тормозного привода автотранспортного средства: Дис. ... канд. тех. наук: 05.22.02. – Донецк, 1996. – 220 с.
2. Гецович Е.М. Адаптивные тормозные системы армейских колёсных машин. – Т. 1. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 185 с.
3. Метлюк Н.Ф., Автушко, В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
4. Туренко А.Н., Алёкса Н.Н., Клименко В.И., Серый А.А., Черков С.В. Определение характеристик статической точности электропневматического тормозного привода // Автомобильный транспорт: Сб. науч. тр. – 2001. – №6. – С. 35 – 37.
5. ДСТУ UN/ECE R 13-07,08:2002 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и О в отношении торможения. – К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та технічної політики, 2002. – 180 с.
6. A Division WABCO Standart GmbH. EBS (EPB) – Electronically Controlled Breaking System Description of system and Function. 2003 edition.

Рецензент: О.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 5 июня 2009 г.