



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 629.03

А.Г. БАХАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.
проректор по научной работе¹

В.А. КУСЯК, канд. техн. наук, доц.
доцент кафедры «Автомобили»¹

ЛЕ ВАН НГИА, магистр техн. наук
аспирант кафедры «Автомобили»¹
E-mail: nghiaminsk@gmail.com

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 29.12.2017.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ТОРМОЗОМ

Разработана принципиальная схема мехатронной системы управления порошковым электромагнитным тормозом (ПЭТ), входящим в состав испытательного комплекса в качестве имитатора сопротивления для исследования переходных процессов в автоматизированной трансмиссии грузового автомобиля. Программно-аппаратная платформа системы управления имеет CAN-интерфейс, позволяющий подключаться к локальной электронной сети для обмена информацией с другими CAN-модулями по протоколу высокого уровня SAE J1939. Описана стратегия регулирования тормозного момента ПЭТ на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигнала с обратной связью по деформации динамометрической скобы и алгоритм управления ПЭТ в автоматическом режиме работы силового агрегата. Приведены результаты моделирования работы электронной системы управления ПЭТ на основе транзисторного ключа и осциллограммы процесса регулирования тормозного момента в зависимости от управляющего ШИМ-сигнала.

Ключевые слова: порошковый электромагнитный тормоз, мехатронная система, транзисторный ключ, алгоритм управления, имитационное моделирование, полунатурный эксперимент

Введение. Для снижения затрат при натурных испытаниях автотранспортных средств в мировой практике широко используются испытательные комплексы, обеспечивающие соответствие условий проведения полунатурных экспериментов реальному физическому процессу. Одной из важнейших задач при полунатурном испытании мехатронной системы управления силовым агрегатом является имитация внешних возмущающих факторов, воздействующих на транспортное средство в реальных условиях эксплуатации. Обзор литературных источников показал, что в современных испытательных комплексах используют в качестве имитаторов внешних возмущающих факторов такие устройства, как двигатели постоянного или переменного тока [1, 2], гидравлические [3] и по-

рошковые электромагнитные тормоза [4, 5]. Причем независимо от типа имитатора сопротивления тормозной момент регулируется автоматически с использованием микропроцессорных систем управления. Однако в доступных литературных источниках и научно-технической документации имеются лишь общие сведения об используемых электронных системах управления, их элементной базе и аппаратной основе. Такие важнейшие моменты как детальные схемотехнические решения, стратегия управления транзисторными ключами (частотно-импульсная, широтно-импульсная или амплитудно-импульсная модуляция), параметры генерируемых сигналов управления, тип и параметры обратной связи в цепи управления, каскадность и структура схем усиления сигналов, обо-

снование выбора коэффициента усиления и т. д. в литературных источниках описываются очень кратко или вообще отсутствуют, составляя «ноу-хау» фирмы-разработчика.

Для имитации сопротивления движению грузового автомобиля с автоматизированным силовым агрегатом на испытательном комплексе, спроектированном на кафедре «Автомобили» БНТУ, использовался нагрузочный ПЭТ модели ПТ-250М (рисунок 1) с номинальным тормозным моментом 2500 Н·м [6]. Принцип действия электромагнитных тормозов серии ПТ основан на эффекте возникновения сопротивления сдвигу в свободном ферромагнитном порошке при наложении на него магнитного поля [7].

Крутящий момент, развиваемый ПЭТ, пропорционален току возбуждения и изменяется бесступенчато от минимального до максимального значения. Ввиду того, что существует магнитный гистерезис, характеристика крутящего момента в функции тока может изменяться в пределах 5 % в зависимости от возрастания или уменьшения напряжения на обмотках возбуждения. Остаточный крутящий момент, составляющий менее 1 % от номинального, объясняется остаточной намагниченностью контура и трением в подшипниках ротора ПЭТ [8].

Выбор данной модели ПЭТ в качестве имитатора сопротивления движению обусловлен техническими характеристиками (таблица) по развиваемому тормозному моменту и номинальной частоте вращения.

Кроме того, автоматизация системы управления ПТ-250М позволяет ввести обратную связь по деформации динамометрической скобы на электронный блок управления ПЭТ, что дает возможность реализовать концепцию модульной компоновки информационно-динамометрической системы испытательного комплекса и контролировать тормозной момент ПЭТ в автоматическом режиме работы силового агрегата.

Таблица — Основные характеристики ПЭТ серии ПТ-250М

№	Наименование	Величина
1	Максимальной тормозной момент, Н·м	2500
2	Рассеиваемая мощность, кВт	50
3	Момент ПЭТ при номинальной рассеиваемой мощности, Н·м	650
4	Рабочее напряжение, В	48
5	Намагничивающий ток, А	8,7
6	Момент инерции ротора, кг·м ²	1,6
7	Номинальная частота вращения, об/мин	750
8	Максимально допустимая частота вращения, об/мин	2000
9	Номинальная чувствительность динамометра, мм/Н·м	0,002
10	Индуктивность обмоток возбуждения, мН	141
11	Сопротивление обмоток возбуждения, Ом	5,5
12	Масса, кг	423

Основная часть. Разработанная электронная система управления ПЭТ имеет автономный микропроцессорный блок 3 (рисунок 2), подсоединенный к локальной электронной сети испытательного комплекса для обмена данными с другими CAN-модулями по протоколу высокого уровня SAE J1939. В процессе отработки алгоритма управления ПЭТ, микропроцессорный блок 3 обрабатывает сигналы от тензометрических датчиков 19 деформации динамометрической скобы 10, переключателя 26 режимов «равнинная / горная местность» и датчика 21 температуры охлаждающей жидкости, поступающие к соответствующим входным портам. Все остальные данные, необходимые для функционирования

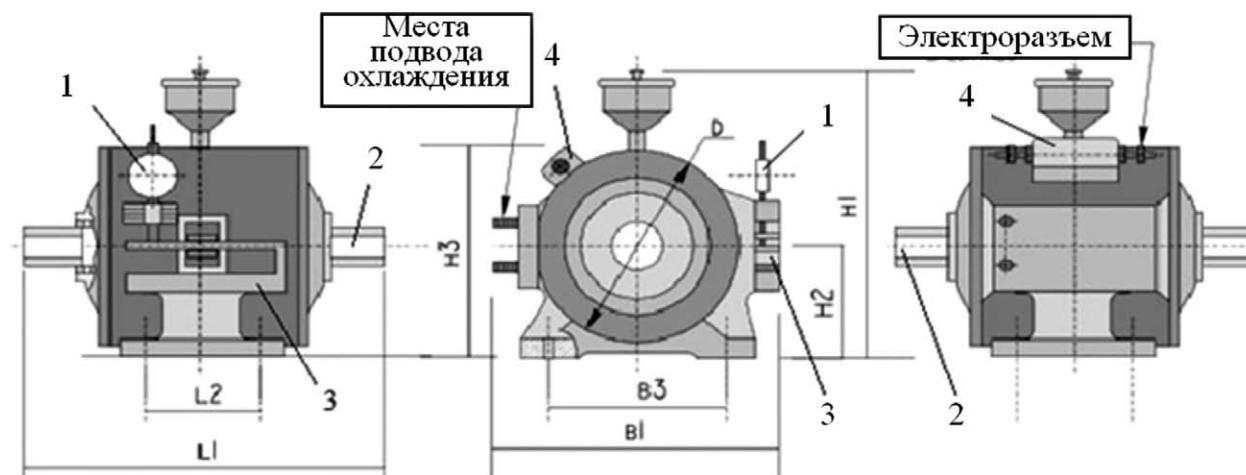


Рисунок 1 — Порошковый электромагнитный тормоз модели ПТ-250М: 1 — часовой индикатор; 2 — вал ротора ПЭТ; 3 — динамометрическая скоба; 4 — клеммная коробка; L, B, H — габаритные и присоединительные размеры

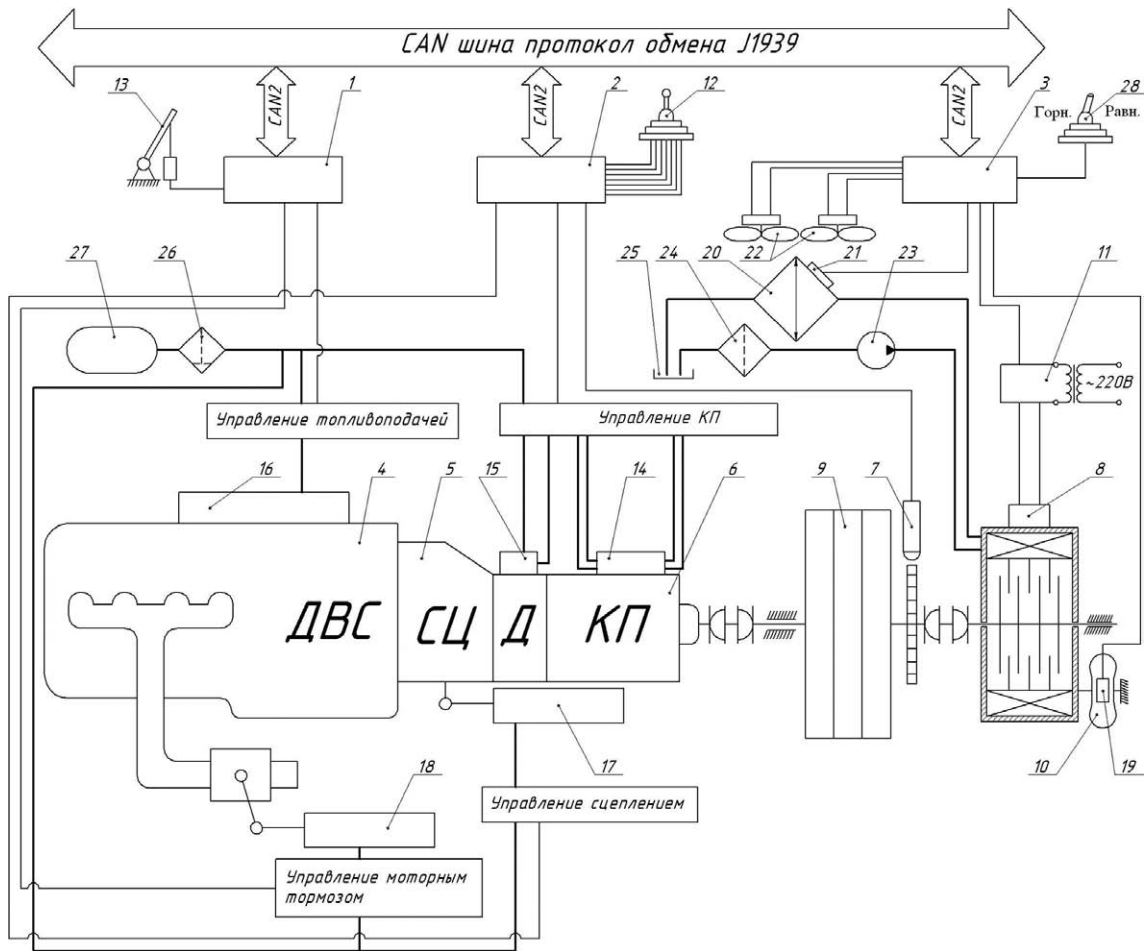


Рисунок 2 — Принципиальная схема испытательного комплекса с электронной системой управления порошковым тормозом:
 1, 2, 3 — ЭБУ двигателем, трансмиссией и порошковым тормозом соответственно; 4 — дизельный двигатель; 5 — фрикционное сцепление; 6 — составная коробка передач; 7 — датчик частоты вращения; 8 — клеммная коробка ПЭТ; 9 — маховая масса; 10 — динамометрическая скоба; 11 — модуль управления ПЭТ; 12 — селектор режимов; 13 — электронная педаль «газа»; 14, 15, 16, 17, 18 — исполнительные механизмы коробки передач (КП), делителя (Д), ДВС, сцепления (СЦ) и моторного тормоза соответственно; 19 — комплект тензометрических датчиков; 20 — радиатор; 21 — датчик температуры; 22 — вентиляторы системы охлаждения; 23 — насос; 24 — фильтрующий элемент; 25 — водяной бак; 26 — фильтр-осушитель воздуха; 27 — ресивер сжатого воздуха; 28 — переключатель режимов

электронной системы, ЭБУ получает по локальной электронной сети, обеспечивая регулирование тормозного момента в автоматическом режиме.

Основными элементами модуля управления 11 (см. рисунок 2) проектируемой мехатронной системы являются трансформатор, выпрямитель и силовой транзистор. Выходные параметры указанного модуля регулируются автоматически при подаче ШИМ-сигнала от микропроцессорного блока 3 на затвор полевого транзистора. При этом объединенные последовательно обмотки возбуждения ПЭТ запитываются определенным током, величина которого зависит от угловой скорости вращения маховой массы 9 и номера включенной передачи в трансмиссии.

Для обеспечения требуемого момента сопротивления электромагнитного тормоза необходимо точно и плавно регулировать напряжение на его обмотках возбуждения. Для этой цели целесообразно использовать электронную схему на основе транзисторного ключа (рисунок 3). При этом

в качестве управляющего используется цифровой сигнал с широтно-импульсной модуляцией, позволяющий изменять среднее значение напряжения на нагрузке путем изменения скважности импульсов.

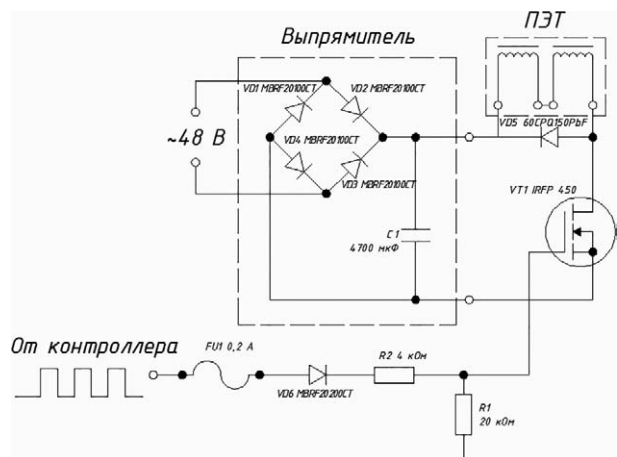


Рисунок 3 — Схема транзисторного привода ПЭТ

Разработанная схема управления ПЭТ позволяет регулировать напряжение на активной нагрузке в пределах от 0 до 48 вольт. Основными элементами электронного привода ПЭТ (см. рисунок 3) являются транзистор IRFP450, двухполупериодный мостовой выпрямитель на базе диодов MBRF20100CT и конденсатор, выполняющий функцию фильтра. Требуемое напряжение на обмотках возбуждения ПЭТ устанавливается посредством изменения скважности ШИМ-сигнала, управляющего затвором транзисторного ключа.

Необходимость введения автономной системы охлаждения (см. рисунок 2, позиции 20–25) обусловлена нагревом рабочей смеси во время работы ПЭТ. С целью повышения эффективности штатной системы в контур водяного охлаждения дополнительно установлены радиатор 20, два вентилятора 22 и насос 24. В зависимости от температуры охлаждающей жидкости, фиксируемой датчиком 21, микропроцессорный блок 3 управляет оборотами вентиляторов 22, подавая ШИМ-сигнал на соответствующий транзисторный ключ (рисунок 4). В качестве ключа используется транзистор IRF540, в качестве шунтирующего диода — диод 60CPQ150PbF. Если температура охлаждающей жидкости ПЭТ превысит 40 °С, микропроцессорный блок подает широтно-импульсный сигнал с максимальным коэффициентом заполнения площади на затвор полевого транзистора первого вентилятора (см. рисунок 2). При достижении верхнего порогового значения температуры в контуре охлаждения микропроцессорный блок ПЭТ подает 100 % ШИМ-сигнал на затвор полевого транзистора второго вентилятора. После охлаждения жидкости до определенного уровня микропроцессорный блок формирует управляющий сигнал на выключение второго вентилятора.

В автоматическом режиме работы силового агрегата требуемый момент ПЭТ регулируется ми-

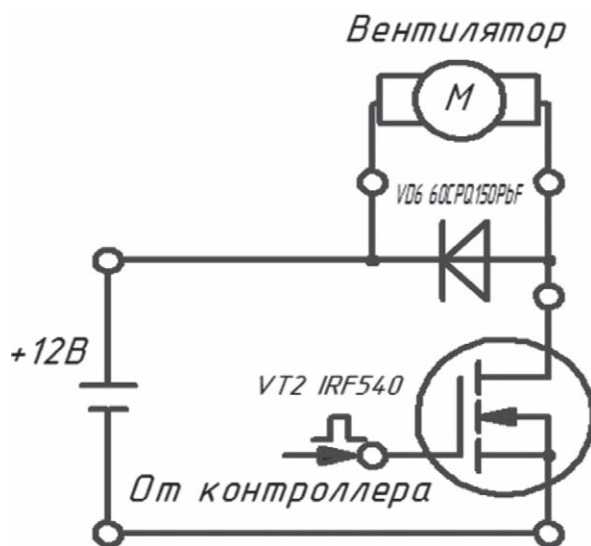


Рисунок 4 — Транзисторный привод вентиляторов ПЭТ

кропроцессорным блоком 3 (см. рисунок 2). В основу алгоритма управления транзисторным ключом (рисунок 5) модуля 11 положена зависимость тормозного момента ПЭТ от скорости движения грузового автомобиля по передачам, т. е. $M_T = f(V_a, N)$.

Расчет момента сопротивления поршневых электромагнитного тормоза 8 (см. рисунок 2) в зависимости от скорости вращения маховой массы 9 по передачам производился с учетом сил сопротивления воздуху M_B и момента сопротивления движению M_Ψ автомобиля. Ввиду того, что на испытательном стенде нагрузочный был установлен непосредственно за коробкой передач (КП), моменты сопротивлений M_Ψ и M_B были приведены к выходному валу КП, базирясь на условии равенства работ приведенных и приводимых моментов [10]:

$$M_\Psi = (f + i) \cdot G_a \cdot r_k / U_0 \cdot \eta = \Psi \cdot G_a \cdot r_k / U_0 \cdot \eta_0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M_B &= K_B \cdot A_b \cdot V_a^2 \cdot r_k / (U_0 \cdot \eta_0) = \\ &= K_b \cdot \alpha' \cdot B_r \cdot H_r \cdot \omega_m^2 \cdot r_k^3 / (U_0^3 \cdot \eta_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где U_0 — передаточное число ведущего моста; η_0 — общее КПД трансмиссии; ω_m — угловая скорость маховика, эквивалентная поступательно-движущейся массе автотранспортного средства; Ψ — коэффициент сопротивления дороги; f — коэффициент сопротивления качению; $i = \sin \alpha$ — уклон, характеризующий крутизну профиля дороги; K_B — коэффициент сопротивления воздуха, Н·с²/м⁴. Для грузовых автомобилей принимается $K_B = 0,25 \dots 0,4$ [10]; A_b — площадь лобового сопротивления, м²; α' — коэффициент заполнения лобовой площади автомобиля; $\alpha' = 0,75 \dots 0,9$; B_r, H_r — наибольшая ширина и высота автомобиля соответственно, м, $B_r \times H_r = 2,55 \times 4,0$ м².

Как известно из теории движения автомобиля, коэффициент сопротивления качению существенно изменяется при скоростях свыше 50 км/ч. При определении коэффициента f использовалась формула [10]:

$$f = f_0 \cdot [1 + (0,006 \cdot V_a)^2] = f_0 \cdot [1 + (0,006 \cdot \omega_m \cdot r_k)^2], \quad (3)$$

где f_0 — коэффициент сопротивления качению при малой скорости, $f_0 = 0,009$ [10].

Результаты расчета требуемого тормозного момента [9], произведенного по вышеуказанным формулам (1)–(3) для каждой передачи, использовались при программировании микропроцессорного блока ПЭТ для его функционирования по разработанному алгоритму (см. рисунок 5).

ЭБУ получает и обрабатывает сигналы от датчиков частоты вращения входного и промежуточного валов КП, положения рычага вилки выключения сцепления, а также сигнал от тензометрического датчика деформации скобы ПЭТ (см. рисунок 5). Затем производится расчет номера текущей передачи N и линейной скорости автомобиля V_a . По заложенным в электронный блок

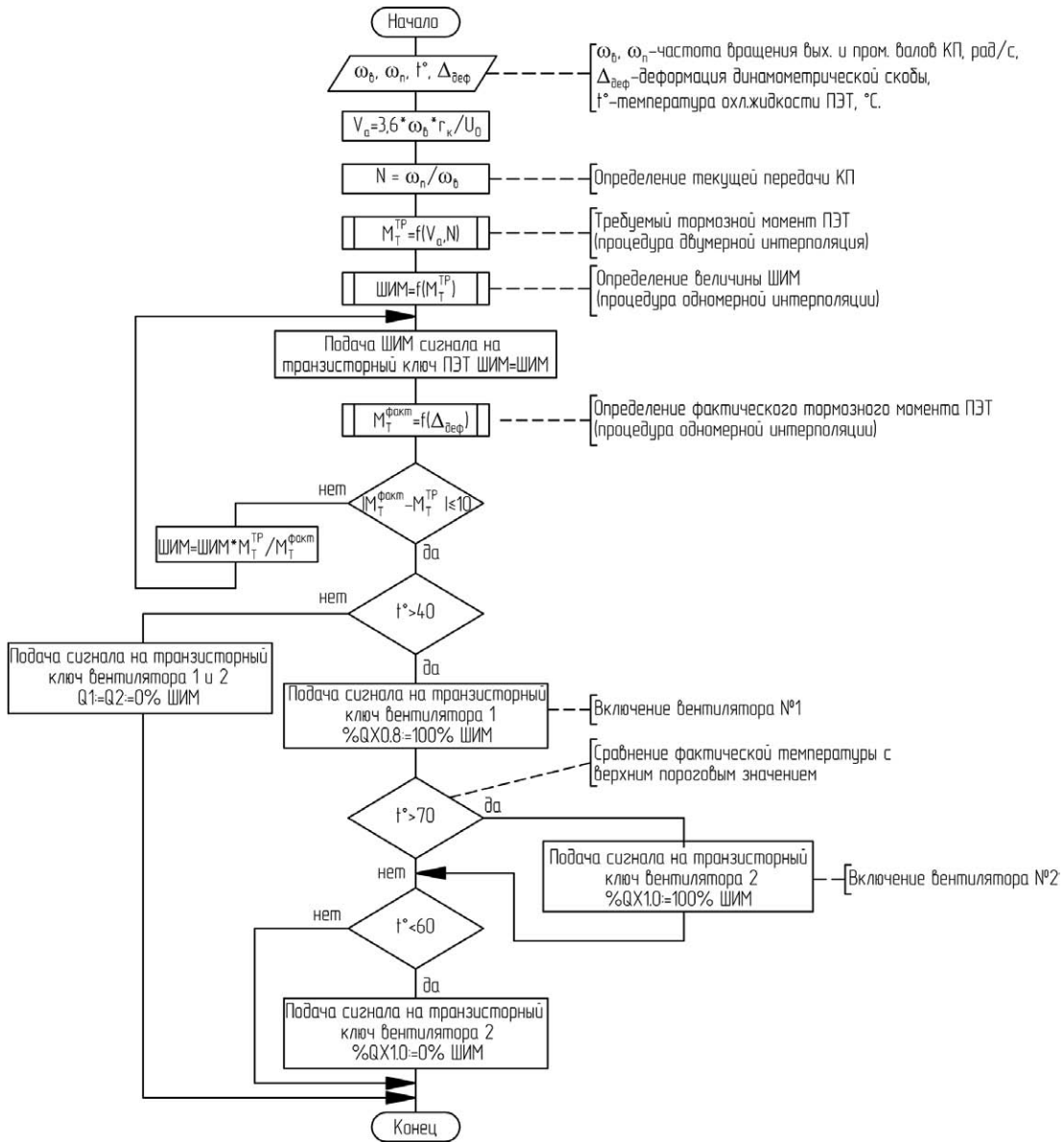


Рисунок 5 — Блок-схема алгоритма управления ПЭТ: Q0 (%QX0.0), Q1 (%QX0.8), Q2 (%QX1.0), Q3 (%QX1.8) — адреса выходных портов микропроцессорного блока

характеристикам микропроцессор рассчитывает требуемый тормозной момент M_T^{TP} порошкового тормоза методом двумерной интерполяции и сопоставляет его с фактическим тормозным моментом M_T , определенным на основе деформации динамометрической скобы (рисунок 6). При расхождении сопоставляемых моментов более чем на 10 Нм, происходит изменение коэффициента заполнения площади ШИМ-сигнала, управляющего затвором полевого транзистора IRF540 (см. рисунок 3). Напряжение на обмотках возбуждения ПЭТ уменьшается или увеличивается, а, следовательно, изменяется момент сопротивления электромагнитного тормоза.

Обратная связь по моменту сопротивления ПЭТ обеспечивается комплектом из четырех тензометрических датчиков 19 (см. рисунок 2), соединенных по мостовой схеме и установленных на

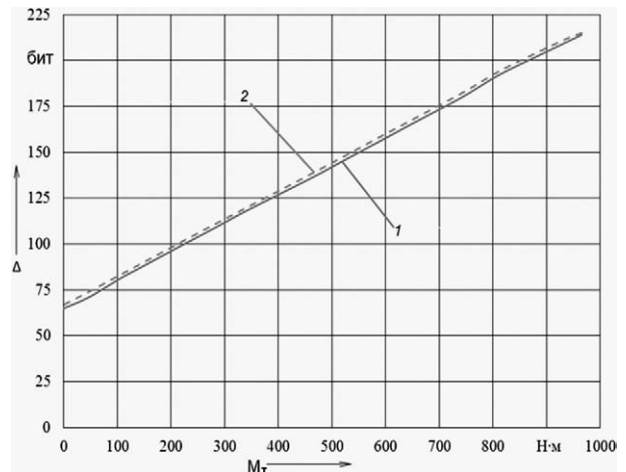


Рисунок 6 — Зависимость деформации динамометрической скобы от тормозного момента ПЭТ: 1 — нагружение; 2 — разгружение

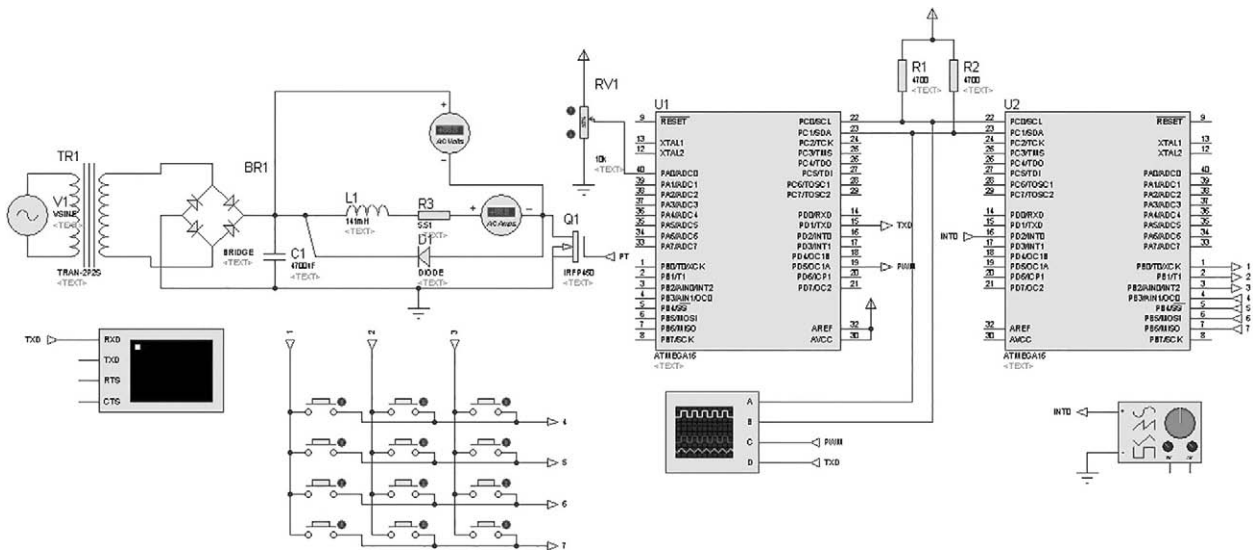


Рисунок 7 — Модель электронной системы управления ПЭТ в пакете Proteus

динамометрической скобе 10 порошкового тормоза. Для усиления сигнала выходы металлических тензметров датчика заведены на микрочип с двумя операционными усилителями (ОУ), работающими по каскадной схеме [9].

Для оценки работоспособности алгоритма на стадии проектирования разработана имитационная модель системы управления ПЭТ в пакете Proteus Design Suite (рисунок 7).

Входные параметры имитационной модели (скорость вращения коленвала ДВС, номер передачи, фактический момент ПЭТ) задаются с помощью виртуального интерфейса. После расчета требуемого тормозного момента и сопоставления его с фактическим (см. рисунок 5) микропроцессор в соответствии с алгоритмом формирует управляющий ШИМ-сигнал на транзисторный ключ, в результате чего происходит запитывание обмоток возбуждения определенным током. Отдельные результаты моделирования представлены на рисунке 8. В окне визуализации отображены численные значения оборотов ДВС, выходного вала КП, номера включенной передачи, линейной скорости автомобиля, требуемого и фактического моментов сопротивления, скважности ШИМ-сигнала на затворе транзистора и тока в обмотках возбуждения ПЭТ.

Работоспособность разработанной электронной системы управления ПЭТ подтверждена результатами полунатурного эксперимента на испытательном комплексе (рисунок 9). Представленная осциллограмма отображает процесс изменения тормозного момента в зависимости от коэффициента заполнения площади ШИМ-сигнала, подаваемого на транзисторный ключ. После уменьшения скважности импульсов момент сопротивления остается постоянным в течение 1,92 с, что объясняется явлением самоиндукции в катушках ПЭТ.

Учитывая тот факт, что тормозной момент ПЭТ зависит не только от параметров генерируемого ШИМ-сигнала, но и от скорости вращения ротора и вязкости ферромагнитной смеси, в цепь управления транзисторным ключом привода ПЭТ был введен программный ПИД-регулятор непрерывного действия с уставкой по требую-

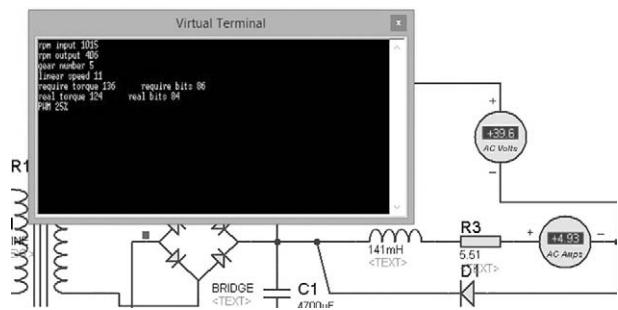


Рисунок 8 — Окно визуализации при моделировании электронной системы управления ПЭТ

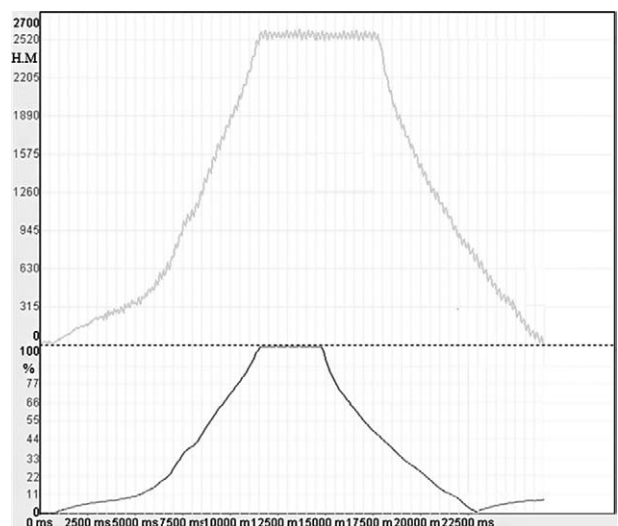


Рисунок 9 — Результаты полунатурного эксперимента по оценке работоспособности ПЭТ

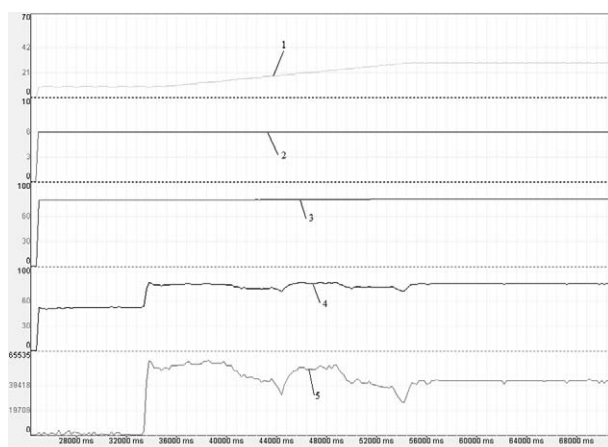


Рисунок 10 — Оциллограмма процесса разгона на VI передаче с ПИД-регулятором в цепи управления ПЭТ:

1 — скорость движения автомобиля, км/ч; 2 — номер передачи; 3, 4 — требуемый и фактический момент сопротивления ПЭТ, бит; 5 — числовое значение ШИМ-сигнала, бит

му тормозному моменту в функции от скорости движения, а в программное обеспечение микропроцессорного блока — фрагмент компенсации электромагнитного гистерезиса. Оциллограмма процесса управления порошковым электромагнитным тормозом при имитации разгона грузового автомобиля общей массой 20 тонн на VI передаче со скорости от 9 до 29 км/ч изображена на рисунке 10.

Как видно из представленной оциллограммы, разработанная электронная система управления ПЭТ на основе транзисторного привода с использованием стратегии высокочастотной широтно-импульсной модуляции полностью работоспособна и позволяет осуществлять качественное регулирование тормозного момента порошкового нагружателя, обеспечивая соответствие стендовых испытаний реальным условиям эксплуатации транспортного средства.

Заключение. Анализ результатов имитационного моделирования и полунатурного эксперимента подтвердил работоспособность электронной системы управления ПЭТ при изменении внешних возмущающих факторов и функциональность предложенного алгоритма управления.

BAKHANOVICH Alexander G., D. Sc. in Eng., Prof.
Vice-rector for Research¹

KUSYAK Viktor A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Assistant Professor of the Department “Automobiles”¹

LE VAN NGHIA, Mas. Techn. Sc.
Ph. D. student of the Department “Automobiles”¹
E-mail: nghiaminsk@gmail.com

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

В ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований установлено, что тормозной момент ПЭТ практически линейно зависит от скважности подаваемого на транзисторный привод ШИМ-сигнала, а точность его регулирования составляет ± 10 Нм, что подтверждает адекватность условий проведения полунатурного эксперимента реальным условиям эксплуатации транспортного средства.

Список литературы

1. Промышленные приводы АББ для испытательных стендов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/48624c757e38393fc12570bc00299a8f/\\$file/abb_industrial_drives_for_test_bench_applications_rev_b_ru.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/48624c757e38393fc12570bc00299a8f/$file/abb_industrial_drives_for_test_bench_applications_rev_b_ru.pdf). — Дата доступа: 24.03.2013.
2. Стенд испытания двигателей внутреннего сгорания «Контур-СИД» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dap.keravt.com/products/stend-ispytaniya-dvs-kontur-sid>. — Дата доступа: 24.03.2013.
3. Стенд для динамических испытаний силовых установок транспортных средств: пат. RU 2330257C1, МПК G01M17/007 / А.Г. Мурыгин, П.Н. Молин, А.Ф. Дубровский, С.А. Дубровский. — Заявл. 29.12.06; опубл. 23.03.07.
4. Стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания: пат. RU 2059217C1, МПК G01M15/0007 / Ю.М. Чикуннов. — Заявл. 03.03.93; опубл. 27.04.96.
5. Стенды для измерения крутящего момента [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mix-eng.ru/stati/izmerenie-krutyaschego-momenta/stend-dlya-ispytaniya-dvigatelye.html>. — Дата доступа: 24.03.2013.
6. Кусяк, В.А. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов: монография // В.А. Кусяк, О.С. Руктепель. — Минск: БНТУ, 2015. — 296 с.
7. Электромагнитные порошковые нагруженные тормоза серии ПТ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.stancons.ru/index.php?id=11&Itemid=16&option=com_content&view=article. — Дата доступа: 20.10.2016.
8. Татур, О.Н. Электромагнитные порошковые тормоза серии ПТ. Руководство по эксплуатации / О.Н. Татур, А.Н. Арапов, В.А. Жиганов. — М.: ЭНИМС, 1985. — 20 с.
9. Электронная система управления порошковым электромагнитным тормозом на основе транзисторного ключа // А.Г. Баханович [и др.] // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных и энергосберегающих технологий: сб. науч. тр. / Воронежский гос. лесотехнич. ун-т. — Воронеж, 2016. — № 5, ч. 3 (25–3). — С. 199–205.
10. Сазонов, И.С. Теория автомобиля: учеб. пособие / И.С. Сазонов, В.А. Ким, Ки Йонг Чой. — Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. — 164 с.

Received 29 December 2017.

OPERABILITY INVESTIGATION OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF POWDER ELECTROMAGNETIC BRAKE

The paper presents a schematic diagram of the mechatronic control system of the electromagnetic powder brake (PET), which is part of the test complex as a resistance simulator for studying transient process in the truck automated transmission. The soft-hardware platform of the control system has a CAN interface that allows connecting to the local electronic network for information exchange with other CAN modules via the SAE J1939 high-level protocol. The strategy of the PET braking torque control based on the PWM-signal with feedback on the dynamometric bridge deformation and the electromagnetic powder brake control algorithm in automatic mode of the power unit operation are described. The operation modeling result of the PET electronic control system based on a transistor switch and the oscillograms of the braking torque depending on the control signal are presented.

Keywords: electromagnetic powder brake, mechatronic system, control algorithm, semi-natural experiment, simulation

References

1. *Promyshlennyye privody ABB dlja ispytatelnyh stendov* [Industrial drives ABB for test benches]. Available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/48624c757e38393fc12570bc00299a8f/\\$file/abb_industrial_drives_for_test_bench_applications_rev_b_ru.pdf/](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/48624c757e38393fc12570bc00299a8f/$file/abb_industrial_drives_for_test_bench_applications_rev_b_ru.pdf/) (accessed 24 March 2016).
2. *Stend ispytaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya "Kontur-SID"* [Test bench for internal combustion engines "Circuit-SID"]. Available at: <http://dap.keravt.com/products/stend-ispytaniya-dvs-kontur-sid/> (accessed 24 March 2016).
3. Murygin A.G. [et al.] *Stend dlja dinamicheskikh ispytanij silovykh ustanovok transportnykh sredstv* [Stand for dynamic testing of vehicles power unit]: Patent RF, no. 2330257C1, MPK G01M17/007, 2007.
4. Chikunov Ju.M., *Stend dlja ispytaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Test bench for internal combustion engines]: Patent RF, no. 2059217C1, MPK G01M15/0007, 1996.
5. *Stendy dlja izmerenija krutjashhego momenta* [Stands for torque measurement]. Available at: <http://www.mix-eng.ru/stati/izmerenie-krutyaschego-momenta/stend-dlya-ispitaniya-dvigateley.html/> (accessed 24 March 2016).
6. Kussyak V.A., Ruktshel O.S. *Proektirovanie avtomatizirovannykh mehatronnykh sistem upravlenija silovym agregatom gruzovykh avtomobilej i avtopoezdov* [Designing of automated mechatronic control systems for the trucks and road trains power unit]. Minsk, BNTU, 2015. 296 p.
7. *Jelektromagnitnye poroshkovyye nagruzochnyye tormoza serii PT* [Electromagnetic powder loading brakes PT series]. Available at: http://www.stancons.ru/index.php?id=11&Itemid=16&option=com_content&view=article/ (accessed 20 October 2016).
8. Tatur O.N., Arapov A.N., Zhiganov V.A. *Jelektromagnitnye poroshkovyye tormoza serii PT. Rukovodstvo po jekspluatacii* [Electromagnetic powder brakes PT series. Manual]. Moscow, ENIMS, 1985. 20 p.
9. Bakhanovich, A.G., Kussyak V.A., Le Van Nghia, Gurin A.N. *Jelektroonnaja sistema upravlenija poroshkovym jelektromagnitnym tormozom na osnove tranzistornogo kljucha* [Electronic control system of powder electromagnetic brake based on transistor wrench]. *Trudy Vserossijskoj NTK "Problemy jekspluatacii avtomobil'nogo transporta i puti ih reshenija na osnove sovremennykh informacionno-kommunikacionnykh i jenergosberegajushchih tehnologij"* [Proc. All-Russian STC "Problems of the road transport operation and ways to solve them on the basis of modern information-communication and energy-saving technologies"], Voronezh, 2016, no. 5, pp. 199–205.
10. Sazonov I.S., Kim V.A., Ki Jong Choj *Teorija avtomobilja* [Vehicle theory]. Mogilev, Belorusko-Rossijskij universitet, 2017. 164 p.