

УДК 629.03-52

Баханович А. Г.

докт. техн. наук, доцент кафедры «Автомобили», проректор по учебной работе Белорусского национального технического университета, Минск, РБ

Кусяк В. А.

канд. техн. наук, доцент кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, Минск, РБ

Ле Ван Нгиа

аспирант кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, Минск, РБ

Гурин А. Н.

аспирант кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета, Минск, РБ

Bakhanovich A. G.

Dr. Sci. Tech., associate professor of Automobiles department, vice-rector for educational activity of Belarusian national technical university, Minsk, RB

Kusyak V. A.

Ph. D., associate professor of Automobiles department, Belarusian national technical university, Minsk, RB

Le Van Nghia

Ph. D. student of Automobiles department, Belarusian national technical university, Minsk, RB

Gurin A. N.

Ph. D. student of Automobiles department, Belarusian national technical university, Minsk, RB

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ТОРМОЗОМ СЕРИИ ПТ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF POWDER ELECTROMAGNETIC BRAKE PT SERIES BASED ON TRANSISTOR SWITCH

Ключевые слова: порошковый электромагнитный тормоз, электронная система, транзисторный ключ, ШИМ-управление, обратная связь, тензометрические датчики.

Аннотация: в статье приводится принципиальная схема электронного управления порошковым электромагнитным тормозом (ПЭТ) с использованием транзисторного ключа. Описывается программно-аппаратная платформа системы управления и стратегия регулирования тормозного момента ПЭТ на основе ШИМ-сигнала с однопараметрической обратной связью по деформации динамометрической скобы. Приводятся результаты расчета требуемого тормозного момента по передачам, а также принципиальные схемы дифференциального и неинвертирующего усилителя сигнала с тензометрического моста.

Keywords: powder electromagnetic brake, electronic system, transistor switch, PWM-signal, feedback, strain-gauges.

Summary: the article presents a schematic diagram of powder electromagnetic brake (PEB) electronic control basing on transistor switch. The hard-software platform and the control strategy of the PEB braking torque based on the PWM-signal with the one-parameter feedback by dynamometric bracket deformation are described. The results of the required braking torque calculation by the transmission steps, as well as the schematic diagrams of the differential and the non-inverting amplifier of the signal from the strain-gauge bridge are given in activity.

При проведении полунатурного эксперимента грузового автомобиля по отладке мехатронной системы управления силовым агрегатом магистрального

автопоезда необходимо имитировать внешние возмущающие факторы, действующие на транспортное средство в реальных условиях эксплуатации. Анализ литературных источников позволил сделать вывод о том, что на современном этапе развития автомобилестроения в качестве имитаторов внешних возмущающих факторов могут быть использованы: двигатели постоянного или переменного тока, работающие по принципу вихревых токов [1, 2, 3]; гидравлические тормоза [4]; порошковые электромагнитные тормоза [5, 6].

Для имитации сопротивления движению на испытательном комплексе, спроектированном на кафедре "Автомобили" Белорусского национального технического университета, использовался нагрузочный порошковый электромагнитный тормоз модели ПТ-250М с номинальным тормозным моментом $2500 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Принцип действия электромагнитных тормозов серии ПТ основан на эффекте возникновения сопротивления сдвигу в свободном ферромагнитном порошке при наложении на него магнитного поля [7]. Величина тормозного момента M_m на рабочем участке статической характеристики изменяется пропорционально намагничивающему току I : от нуля до номинальных значений. Причем статическая характеристика $M_T = f(I)$ тормоза представляет собой гистерезисную петлю, ширина которой зависит от величины и времени наложения магнитного поля на рабочий зазор между статором и ротором.

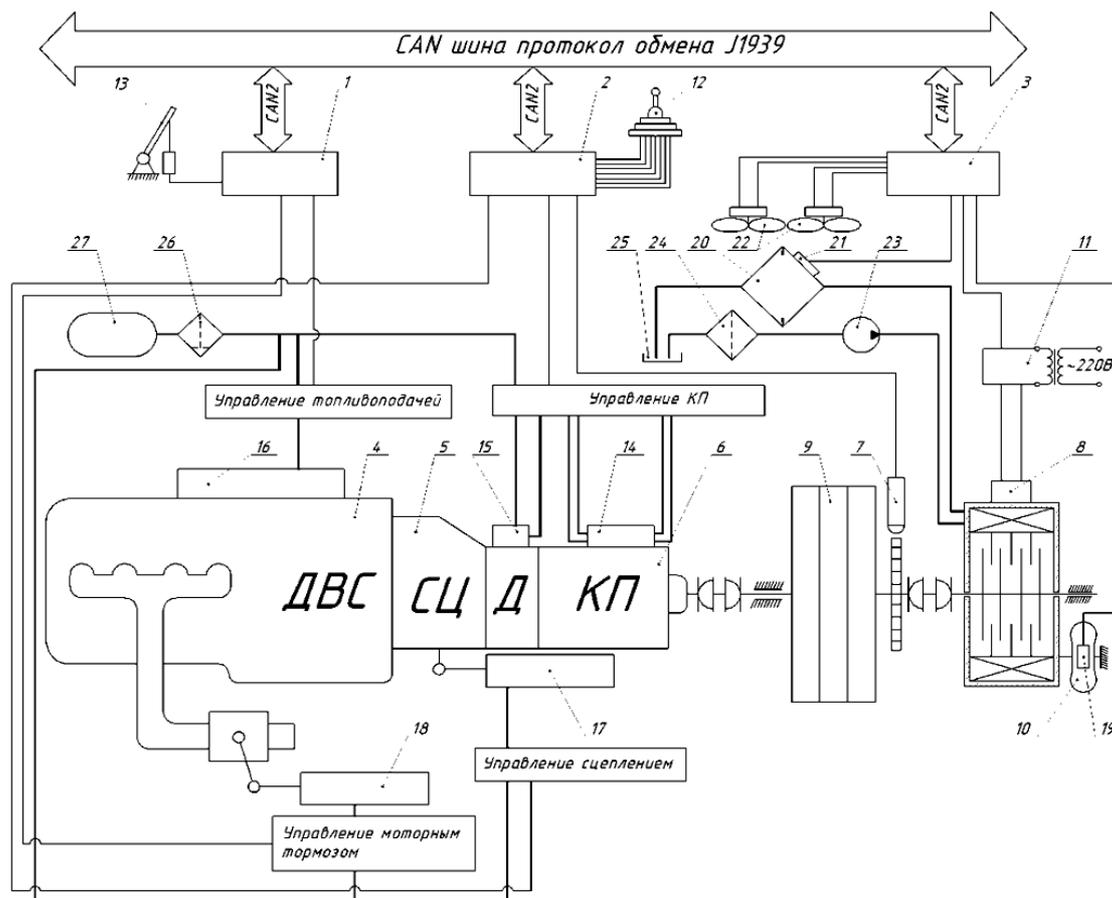
Учитывая тот факт, что на величину остаточного тормозного момента влияют вязкость магнитной смеси и скорость вращения вала ротора ПЭТ, достигающая на высших передачах $334 \text{ рад} / \text{с}$, при проведении испытаний использовалась обедненная ферромагнитная смесь с весовым соотношением железа и масла $2 : 1$ (карбонильное железо со средним размером частиц $1,5\text{-}3,5 \text{ мкм}$).

Выбор данной модели порошкового электромагнитного тормоза в качестве имитатора сопротивления движению обусловлен подходящими техническими характеристиками по развиваемому тормозному моменту и номинальной частоте вращения ротора ПЭТ. Кроме того, автоматизация системы управления ПЭТ позволяет ввести обратную связь по деформации динамометрической скобы на электронный блок управления, что дает возможность реализовать концепцию модульной компоновки информационно-динамометрической системы испытательного комплекса и контролировать тормозной момент ПЭТ в автоматическом режиме работы силового агрегата.

Основу электронной системы управления порошковым электромагнитным тормозом составляет микропроцессорный блок 3 (рис. 1), подсоединенный к CAN-сети испытательного комплекса для обмена данными с другими ЭБУ по протоколу высокого уровня SAE J1939. К входным портам электронного блока управления ПЭТ подключены тензометрические датчики 19 деформации динамометрической скобы 10, переключатель режимов «равнинная / горная местность» и датчик 21 температуры охлаждающей жидкости. Все остальные данные, необходимые для функционирования электронной системы, ЭБУ 3 получает по локальной электронной сети через CAN-шину.

Особенностью проектируемой системы является блок управления 11 (рис. 1), состоящий из трансформатора, выпрямителя и силового транзистора. Входные параметры этого блока регулируются автоматически при подаче сигнала

ла от контроллера 3 на управляющий вход транзисторного ключа (затвор полевого транзистора). При этом, объединенные последовательно обмотки возбуждения порошкового электромагнитного тормоза, запитываются определенным током, величина которого зависит от скорости вращения маховой массы 9. В результате возникновения электромагнитной индукции ферромагнитная смесь попадает в пространство между статором и ротором, создавая сопротивление вращению ротора.



1, 2, 3 – ЭБУ соответственно двигателем, трансмиссией и порошковым тормозом;
 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 – блок управления ПЭТ; 12 – селектор режимов; 13 – электронная педаль «газа»; 14, 15, 16, 17, 18 – исполнительные механизмы соответственно коробки передач, делителя (Д), ДВС, сцепления (СЦ) и моторного тормоза; 19 – комплект тензометрических датчиков; 20 – радиатор; 21 – датчик температуры; 22 – вентиляторы системы охлаждения; 23 – насос; 24 – фильтр; 25 – водяной бак

Рисунок 1 – Принципиальная схема испытательного комплекса с электронной системой управления порошковым электромагнитным тормозом

Для создания 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 (рис. 2). При этом в качестве управляющего использу-

ется цифровой сигнал с широтно-импульсной модуляцией [8, 10], позволяющий изменять среднее значение напряжения на нагрузке путём изменения скважности импульсов.

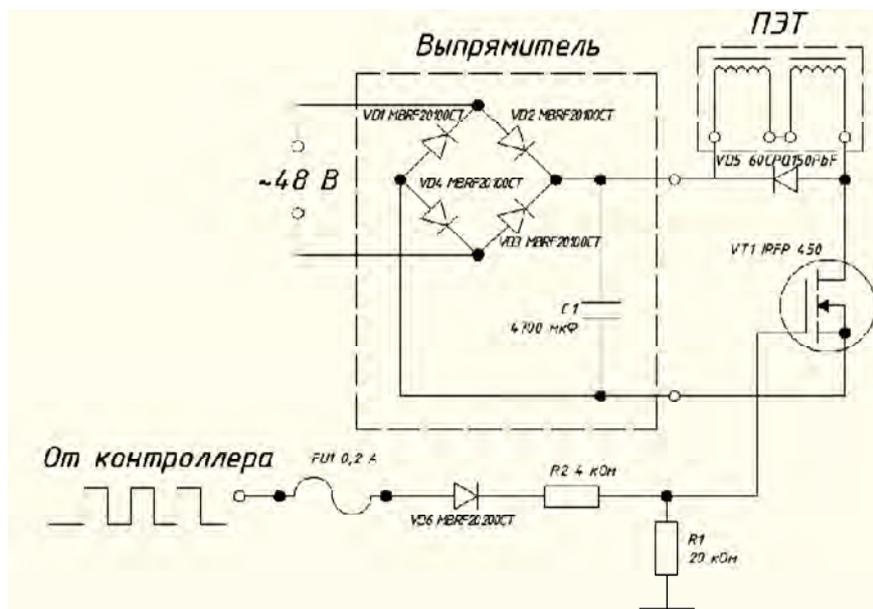


Рисунок 2 – Схема транзисторного привода ПЭТ

Разработанная схема позволяет регулировать напряжение на активной нагрузке в пределах от 0 до 48 вольт. Основными элементами электронного привода ПЭТ являются транзистор IRFP450 (рис. 2), 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 током базы транзистора (электронного ключа).

Напряжение полного открытия транзистора составляет 20 В, а напряжение на выходе контроллера - 24 В. Для предотвращения пробоя транзистора в силовую цепь выходного порта ЭБУ установлен делитель напряжения, понижающий выходное напряжение до 20 В. Кроме того, для исключения протекания тока в контроллер в случае пробоя транзистора в выходную цепь контроллера включены диод MBRF20200CT и плавкий предохранитель. За счет установки транзистора и диодного моста на алюминиевые радиаторы с вентиляторами мощность нагрузки может достигать 1500 Ватт.

Таким образом, в автоматическом режиме работы силового агрегата момент порошкового электромагнитного тормоза 8 (рис. 1) регулируется транзисторным приводом 11, имеющим электронное управление от контроллера 3. В основу алгоритма управления транзисторным ключом положена зависимость тормозного момента ПЭТ от скорости движения автомобиля по передачам, т. е. $M_T = f(V_A, N)$. Результаты расчета момента сопротивления порошкового электромагнитного тормоза, произведенные с учетом сил сопротивления воздуха и качению ведущих колес автомобиля, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Тормозной момент ПЭТ по передачам

№ передачи	$U_{кп}$	M_{ψ} , Н·м	M_{ψ} , Н·м	M_{Σ} , Н·м	$M_{торм}$, Н·м	$n_{двс}$, об/мин	$n_{вых}$, об/мин
I	7,82	164,51	3,15	167,66	167,66	2600	332,48
II	6,38	164,92	4,73	169,65	169,65	2600	407,52
III	4,03	166,74	11,86	178,60	178,60	2600	645,16
IV	3,29	168,26	17,79	186,05	186,05	2600	790,27
V	2,5	171,60	30,81	202,41	202,41	2600	1040,00
VI	2,04	175,56	46,27	221,83	221,83	2600	1274,51
VII	1,53	184,79	82,26	267,04	267,04	2600	1699,35
VIII	1,25	195,29	123,24	318,53	318,53	2600	2080,00
IX	1	213,06	192,56	405,62	405,62	2600	2600,00
X	0,85	238,01	289,90	527,91	527,91	2600	3190,18

$n_{двс}$, $n_{вых}$ – частота вращения соответственно коленвала ДВС и выходного вала КП;
 M_{ψ} – момент сопротивления дороги в приведении к выходному валу КП из расчета движения без преодоления автомобилем уклонов;
 M_{Σ} – суммарный приведенный момент аэродинамического сопротивления и сопротивления дороги;
 $M_{торм}$ – тормозной момент, развиваемый порошковым электромагнитным тормозом

ЭБУ получает и обрабатывает сигналы от датчиков частоты вращения входного и промежуточного валов КП, положения рычага вилки выключения сцепления, а также сигнала от комплекта тензометрических датчиков 19 деформации скобы ПЭТ (рис. 1). Затем производится расчет номера N текущей передачи и линейной скорости V_A автомобиля. По заложенным в электронный блок характеристикам микропроцессор рассчитывает методом двумерной интерполяции требуемый тормозной момент порошкового тормоза, сопоставляет его с фактическим тормозным моментом M_m и при обнаружении расхождения более чем на 10 Нм изменяет скважность ШИМ-сигнала, управляющего затвором полевого транзистора IRFP450 (рис. 2). При этом происходит увеличение или уменьшение напряжения на обмотках возбуждения ПЭТ, а, следовательно, изменяется и момент сопротивления электромагнитного тормоза.

Обратная связь по моменту сопротивления ПЭТ обеспечивается комплектом из четырех тензометрических датчиков 19 (рис. 1), соединенных по мостовой схеме и установленных на динамометрической скобе 10 порошкового тормоза. Для усиления сигнала выводы металлических тензометров датчика заведены на микрочип с двумя операционными усилителями (ОУ), работающими по каскадной схеме (рис. 3).

Сигнал с тензометрического моста (рис. 3) колеблется в пределах 6-8 мВ, а питание операционного усилителя составляет 12 В, то есть результирующий сигнал по амплитуде не должен превышать 12 В. Следовательно, усиливать сигнал с моста необходимо не более чем в 1500 раз. Исходя из вышеизложенного, в схеме использовался операционный усилитель постоянного тока LM 358 в корпусе DIP-8.

Сигнал с тензометрического моста, пройдя первый каскад на базе дифференциального усилителя [9], увеличивался в 100 раз. Формула, описывающая выходной сигнал дифференциального усилителя:

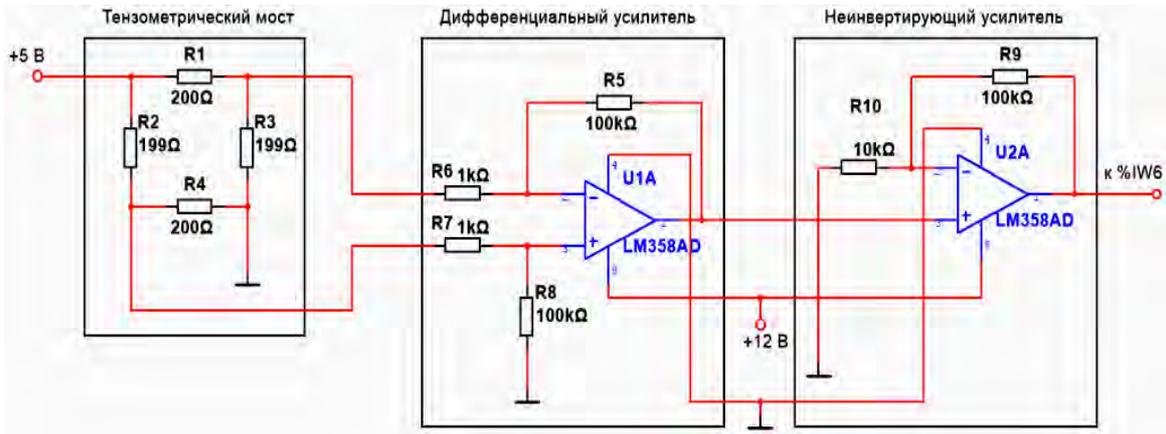


Рисунок 3 – Схема усилителя сигнала тензометрического моста

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{v+} \cdot \left(\frac{(R_5 + R_6) \cdot R_8}{(R_8 + R_7) \cdot R_6} \right) - U_{v-} \cdot \left(\frac{R_5}{R_6} \right), \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходной сигнал усилителя; U_{v+} – сигнал на положительном входе ОУ; U_{v-} – сигнал на отрицательном входе ОУ.

В частном случае, при $R_6 = R_7 = 1$ кОм и $R_5 = R_8 = 100$ кОм коэффициент усиления дифференциального усилителя (1):

$$K_{\text{ус}}^{\text{диф}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{(U_{v+} - U_{v-})} = \frac{R_5}{R_6} = \frac{100}{1} = 100.$$

Выходной сигнал дифференциального усилителя являлся входным для неинвертирующего усилителя (рис. 3), который преобразовывал его ещё примерно в 10 раз. Выходной сигнал неинвертирующего усилителя [9] описывается выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{v+} \cdot \left(1 + \frac{R_9}{R_{10}} \right). \quad (2)$$

Откуда, при $R_9 = 100$ кОм и $R_{10} = 10$ кОм, коэффициент неинвертирующего усилителя:

$$K_{\text{ус}}^{\text{неинв}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{v+}} = 1 + \frac{R_9}{R_{10}} = 1 + \frac{100}{10} = 11.$$

Полный коэффициент усиления всей схемы (1, 2):

$$K_{\text{ус}} = K_{\text{ус}}^{\text{диф}} \cdot K_{\text{ус}}^{\text{неинв}} = 100 \cdot 11 = 1100 < 1500.$$

Таким образом, соотношение плеч резисторов двухкаскадной усилительной схемы подобраны таким образом, что суммарный коэффициентом усиления составляет 1100 раз, что, с учетом напряжения питания операцион-

ного усилителя, является вполне допустимым.

Выход неинвертирующего операционного усилителя сигнала от тензометрического моста деформации скобы порошкового тормоза заведен на аналоговый вход электронного блока управления ПЭТ.

Таким образом, вышеописанная программно-аппаратная платформа управления порошковым электромагнитным тормозом, позволяет осуществлять интеграцию спроектированной системы в архитектуру локальной электронной сети, а также регулировать тормозной момент ПЭТ путем изменения коэффициента заполнения площади ШИМ-сигнала, подаваемого на затвор полевого транзистора. Предлагаемая стратегия управления, наряду с использованием в цепи управления ПЭТ обратной связи по деформации динамометрической скобы, дает возможность имитировать переменное сопротивление движению транспортного средства в стендовых условиях с точностью до 10 Н·м, что способствует приближению условий проведения полунатурного эксперимента к реальным условиям эксплуатации.

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). – Загл. с экрана.
- 2 Стенд обкатки и диагностики двигателей внутреннего сгорания: пат. RU 2209987C23, МПК F02B79/00, G01M15/007 В. А. Бондаренко, Е. В. Бондаренко, К. Ф. Дурнев, В. В. Цыбакин ; заявл. 10.04.2003 ; опубл. 10.08.2003.
- 3 Стенд испытания двигателей внутреннего сгорания «Контур-СИД» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dap.keravt.com/products/stend-ispitaniya-dvs-kontur-sid>. – Загл. с экрана.
- 4 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. 29.12.2006 ; опубл. 23.03.2007.
- 5 Стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания : пат. RU 2059217C1, МПК G01M15/0007 Ю. М. Чикунов ; заявл. 03.03.1993 ; опубл. 27.04.1996.
- 6 Стенды для измерения крутящего момента [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mix-eng.ru/stati/izmerenie-krutyaschego-momenta/stend-dlya-ispitaniya-dvigatelay.html>. – Загл. с экрана.
- 7 Электромагнитные порошковые нагрузочные тормоза серии ПТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.stancons.ru/index.php?id=11&Itemid=16&option=com_content&view=article. – Загл. с экрана.
- 8 Euzeli dos Santos, Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages / Euzeli dos Santos, Edison R. da Silva, ISBN : 978-1-118-88094-4, Wiley-IEEE Press, January 2015 – 376 pages.
- 9 Применение операционных усилителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Применение_операционных_усилителей. – Загл. с экрана.
- 10 Croitoru, B. Microcontroller-based multiple-platform PWM signal generation procedures for industrial use / Croitoru B., Tulbure A., Abrudean M., IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, ISBN:978-1-4799-3732-5, Cluj Napoca-Romania, May 22-24, – 2014.