

УДК 629.03

А.В. БЕЛЕВИЧ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

О.С. РУКТЕШЕЛЬ, д-р техн. наук; В.А. КУСЯК, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МАРЕ ПРИ ВЫБОРЕ АППРОКСИМИРУЮЩЕГО ПОЛИНОМА ОЦЕНКИ ШИРИНЫ ДИАПАЗОНА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСМИССИЙ

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик исполнительных механизмов топливоподдачи дизельного двигателя и фрикционного сцепления автоматизированной механической трансмиссии. Управление исполнительными механизмами осуществлялось на основе модулированного широтно-импульсного сигнала с частотой до 250 Гц. В ходе проведения полунатурного эксперимента исследовано влияние частоты ШИМ-сигнала на диапазон управления исполнительными механизмами, выявлена закономерность изменения диапазона управления от параметров генерируемого сигнала, а также получены аналитические зависимости, позволяющие с погрешностью не более 0,1 % оценивать диапазон ШИМ-управления. Обоснование выбора степенных рядов полученных полиномиальных зависимостей проводилось на основе критерия наименьших модулей (критерия МАРЕ).

Ключевые слова: автоматизированная трансмиссия, мехатронная система, исполнительный механизм, широтно-импульсная модуляция, диапазон управления, полунатурный эксперимент, аппроксимирующий полином, критерий МАРЕ

Введение. Важнейшей научно-технической задачей автомобильной промышленности Республики Беларусь на ближайшие 10 лет является электронизация продукции автомобилестроения. Автоматизация механических ступенчатых трансмиссий, имеющих более высокий КПД, меньшую массу и более низкую себестоимость изготовления по сравнению с гидромеханической передачей, способствует повышению конкурентоспособности мобильных машин и открывает новые возможности для улучшения их эксплуатационных характеристик. Высокая эффективность мехатронных систем управления силовым агрегатом транспортного средства обусловлена реализацией прецизионного управления исполнительными механизмами ДВС, фрикционного сцепления и механической коробки передач. Прецизионность управления [1] требует от проектировщиков обеспечения максимально возможного диапазона управления электромагнитными клапанами, ширина которого зависит не только от согласованности геометрических параметров исполнительных механизмов с характеристиками электрических компонентов аппаратной платформы, но и от параметров генерируемого сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Однако в доступной технической литературе информации и практических рекомендаций по выбору рабочей частоты ШИМ-сигнала для пропорционального управления электромагнитными клапанами исполнительных механизмов не приводится, что затрудняет проектирование мехатронных систем.

Основная часть. В рамках работ по заданию ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» на 2010–2015 годы специалисты Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и кафедры «Автомобили» БНТУ спроектировали автоматизированную систему управления силовым агрегатом магистрального автопоезда и провели комплексное исследование характеристик ее пневматических исполнительных

механизмов (ИМ). В частности, в ходе проведения полунатурного эксперимента с помощью средств визуализации CoDeSys V2.3 были получены характеристики исполнительных механизмов топливоподдачи дизельного двигателя и фрикционного сцепления, определены зоны управления пропорциональных клапанов, а также исследовано влияние частоты генерируемого сигнала на ширину диапазона ШИМ-управления. Данная величина, с одной стороны, характеризует оптимальность характеристик выбранных аппаратных средств и рассчитанных геометрических параметров силовой части автоматизированного привода. С другой стороны, от ее величины напрямую зависит качество управления и точность регулирования [2].

Для исследования влияния частоты ШИМ-сигнала на диапазон управления было разработано программное обеспечение, позволяющее инициализировать генератор сигналов и в автоматическом режиме обеспечивать подачу ШИМ-сигнала различной скважности (но определенной частоты) с выходного порта смарт-контроллера 1 (рисунок 1) на обмотки пропорционального электромагнитного клапана 4, управляющего исполнительным механизмом топливоподдачи дизельного двигателя. В результате перемещения штока силового пневмоцилиндра 7 рычаг регулятора ТНВД поворачивался на некоторый угол, регулируя величину подачи топлива. Диапазон управления, т. е. диапазон изменения скважности управляющего сигнала при котором срабатывал исполнительный механизм топливоподдачи, определялся на основе анализа сигнала с потенциометрического датчика 6 угловых перемещений рычага ТНВД при частотах до 250 Гц (таблица 1). Графическое представление результатов полунатурного эксперимента (рисунок 2) производилось с помощью средств визуализации CoDeSys V2.3 [3, с. 6–65], обеспечивающих отображение информации в виде осциллограмм.

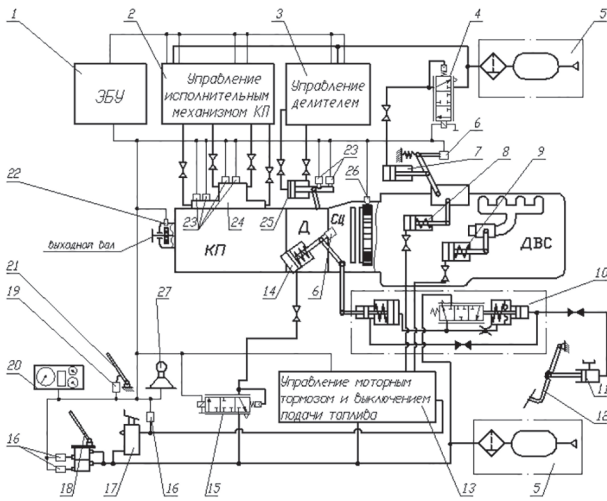


Рисунок 1 — Принципиальная схема мехатронной системы управления силовым агрегатом: 1 — электронный блок; 2, 3, 13 — блок ЭМК; 4, 15 — пропорциональные ЭМК; 5 — питающая часть пневмопривода; 6, 19 — датчики перемещения; 7, 8, 9, 14, 24, 25 — исполнительные механизмы; 10, 11, 12 — гидропривод сцепления; 16 — датчики давления; 17 — кран моторного тормоза; 18 — тормозной кран; 20 — панель приборов; 21 — педаль акселератора; 22, 26 — датчики частоты вращения; 23 — концевые выключатели; 27 — селектор режимов

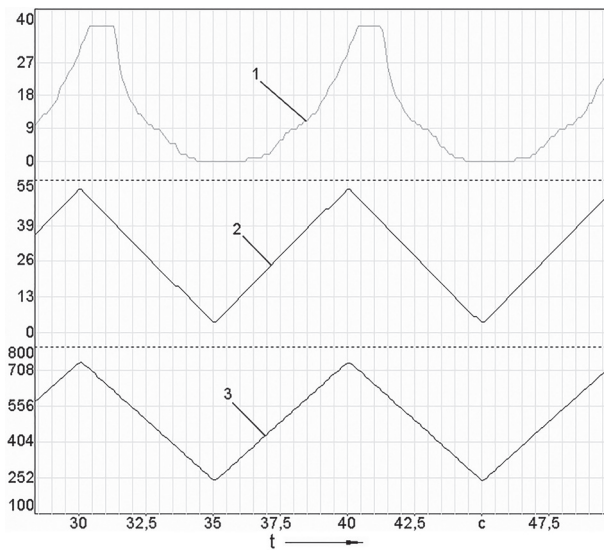


Рисунок 2 — Осциллограмма процесса управления ТНВД при $\nu = 200$ Гц: 1 — перемещение рычага регулятора ТНВД, град; 2 — ШИМ-сигнал, %; 3 — ток ПЭМК ДВС, мА

Результаты исследования характеристики исполнительного механизма двигателя в зоне управления при частоте 200 Гц представлены на рисунке 3, из которого видно, что в пределах 10 % ШИМ обратного хода рычаг регулятора ТНВД в течение 680 мс (см. рисунок 2) остается неподвижным. Эффект «залипания» объясняется явлением самоиндукции в обмотке пропорционального электромагнитного клапана ДВС. Поэтому с целью увеличения быстродействия системы на фазе перехода от режима максимальной топливоподачи на режим средних нагрузок в алгоритм управления целесообразно ввести фрагмент компенсации гистерезиса исполнительного механизма [1, с. 11, рисунки 5, 6, 13], что положительно скажется на качестве управления в целом.

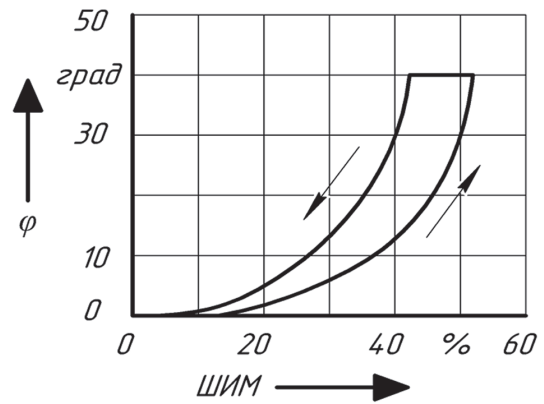


Рисунок 3 — Характеристика ИМ топливоподачи ДВС при $\nu = 200$ Гц: φ — угол поворота рычага регулятора ТНВД; ШИМ — коэф. заполнения площади ШИМ-сигнала, %

Как показали результаты экспериментов, диапазон ШИМ-сигнала при частоте 150 Гц составил 57,9 % (см. рисунок 2 и таблицу 1). Экспериментально определено, что с повышением частоты наблюдается устойчивая тенденция к сужению диапазона управления [7]. Так, уже при 200 Гц диапазон управления уменьшился на 11,9 % и составил 49,1 % ШИМ. При частоте 250 Гц диапазон уменьшился на 18,5 % и составил 39,5 % ШИМ. Вышеописанная зависимость изменения диапазона управления от частоты ШИМ-сигнала проиллюстрирована на рисунке 4 и представлена в аналитическом виде аппроксимирующим полиномом 2-го порядка (формула 1) коэффициенты которого получены обработкой экспериментальных данных с помощью функции Polyfit [8, с. 379] в пакете MATLAB:

$$D_{\text{ШИМ}} = 67,837 - 0,0204 \nu - 0,000367 \nu^2, \quad (1)$$

где $D_{\text{ШИМ}}$ — диапазон ШИМ-управления исполнительным механизмом топливоподачи ДВС, %; ν — частота управляющего ШИМ-сигнала, Гц

Обоснование выбора степени полинома проводилось на основе критерия наименьших модулей или так называемого критерия MAPE (Mean Absolute Percentage Error) [9, с. 1104, формула 2], позволяющего оценить ошибку аппроксимации (см. рисунок 5) полиномиальной моделью по формуле:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{h} \sum_j^h \left| \frac{e_j}{y_j} \right| \cdot 100\% = \frac{1}{h} \sum_j^h \left| \frac{y_j - y_j^p}{y_j} \right| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где e_j — ошибка на прогнозном шаге; Y_j, Y_j^p — фактическое и прогнозное значение точки тренда (диапазона ШИМ-управления, %); h — число узловых точек.

Результаты сравнительного анализа аппроксимирующих полиномов различных порядков представлены в таблице 2.

Как показали результаты экспериментов, диапазон изменения тока (силовой фактор) на обмотках пропорционального электромагнитного клапана 4 (см. рисунок 1) в процессе управления топливоподачей остается постоянным и не зависит от частоты управляющего сигнала (см. таблицу 1). Экспериментально установлено, что при электронном управлении топливоподачей силовой фактор варьируется от 0,31 до 0,74 А, т. е. рабочий диапазон по току составляет 0,43 А. Исходя из рабочей характеристики электромагнитного пропорционально-

Таблица 1 — Результаты обработки полунатурного эксперимента

Частота ШИМ-сигнала, Гц	Величина*, задающая частоту ШИМ-сигнала, HEX	Ток ПЭМК, мА		Верхняя граница диапазона ШИМ-сигнала, бит	Нижняя граница диапазона ШИМ-сигнала, бит	Диапазон ШИМ-сигнала, бит	Диапазон ШИМ-сигнала, %
		$I_{нач}$	$I_{кон}$				
150	FFFF	310	740	2500	40500	38000	57,9
200	C350	310	740	1800	34000	32200	49,1
250	9C40	310	740	2100	28000	25900	39,5

Примечание: * – частота ШИМ-сигнала, генерируемая контроллером, задавалась на программном уровне специальным аргументом Reload (Hex) функционального блока PWM [4, раздел 9, с. 7] и рассчитывалась по формуле: $10\text{МГц} / \text{Reload_Value}$

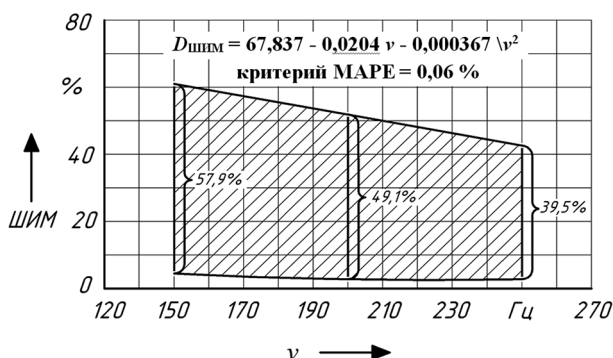


Рисунок 4 — Зависимость диапазона управления ИМ от частоты ШИМ-сигнала: ν — частота управляющего ШИМ-сигнала, Гц; ШИМ — коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала, %

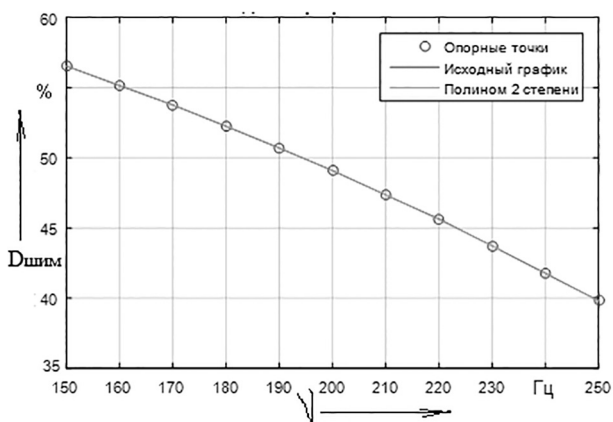


Рисунок 5 — Результаты аппроксимации функции $D_{\text{ШИМ}} = f(\nu)$ полиномом 2-го порядка

го клапана VER 3121-1 [10] и с учетом зоны его устойчивой работы (рисунок 6), это составляет 64,2 % от общего диапазона, что является достаточным для качественного управления процессом топливоподачи на всех рабочих режимах двигателя.

Исследование характеристики и определение зоны управления исполнительным механизмом сцепления проводилось при частотах ШИМ-сигнала от 150 до 250 Гц (рисунки 7 и 8). Как показали результаты экспериментов, диапазон ШИМ-сигнала при частоте 150 Гц оказался наибольшим и составил 40,7 %. С повышением частоты тенденция к сужению диапазона управления сохраняется: при 200 Гц диапазон управления уменьшился на 26,1 % и составил 30,1 % ШИМ; при частоте

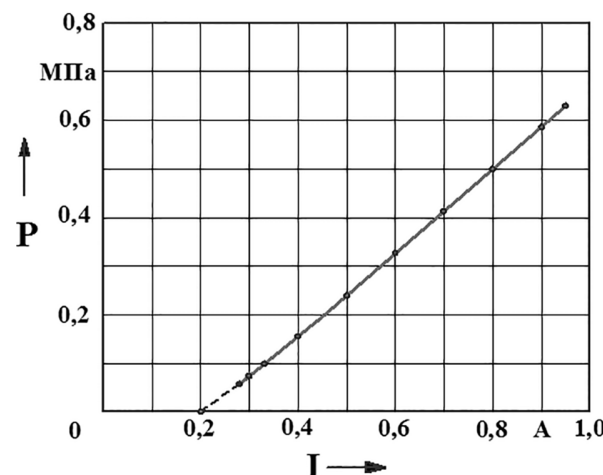


Рисунок 6 — Характеристика «ток — давление» ПЭМК SMC VER3121-1

Таблица 2 — Результаты анализа погрешности аппроксимирующего полинома

Коэффициенты	Степень аппроксимирующего полинома				
	I	II	III	IV	V
b_0	82,15436364	67,83709091	70,0153636	106,7025455	-93,306
b_1	-0,167238182	-0,020394359	-0,054082925	-0,81192092	4,354852348
b_2	—	-0,00036711	-0,000196131	0,005609886	-0,0473329
b_3	—	—	-2,85E-07	-1,98E-05	0,000249165
b_4	—	—	—	2,44E-08	-6,53E-07
b_5	—	—	—	—	6,78E-10
Критерий MAPE, %	0,599	0,058	0,059	0,601	1,889

Таблица 3 — Результаты анализа погрешности аппроксимирующего полинома

Коэффициенты	Степень аппроксимирующего полинома				
	I	II	III	IV	V
b_0	59,91281818	118,1773636	142,5556	177,362515	161,286182
b_1	-0,140970909	-0,738555991	-1,115583178	-1,83458	-1,4192847
b_2	—	-0,001493963	0,003407483	0,008915932	0,00466
b_3	—	—	-3,19E-06	-2,17E-05	-1,22E-07
b_4	—	—	—	2,32E-08	-3,13E-08
b_5	—	—	—	—	5,45E-11
Критерий МАРЕ, %	3,630	0,224	0,088	1,328	0,117

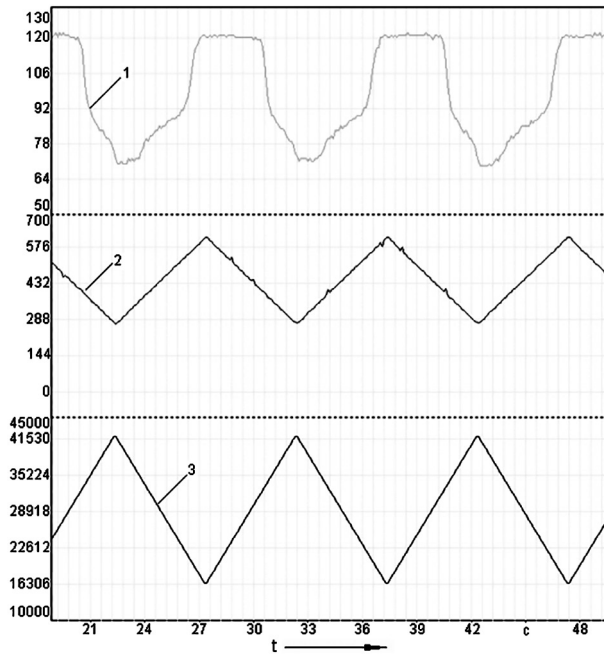


Рисунок 7 — Оциллограмма процесса управления сцеплением при $\nu = 150$ Гц: 1 — перемещение рычага сцепления, бит; 2 — ток ПЭМК сцепления, мА; 3 — ШИМ-сигнал, бит

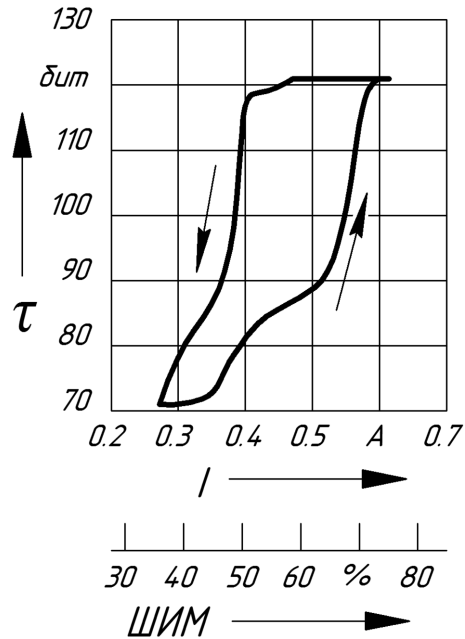


Рисунок 8 — Характеристика ИМ сцепления при $\nu = 150$ Гц: τ — перемещение рычага выключения сцепления, бит; I — ток ПЭМК сцепления, А; ШИМ — коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала, %

250 Гц диапазон уменьшился на 34,2 % и составил 26,8 % ШИМ (рисунок 9).

Экспериментально подтверждено, что вариация частоты ШИМ-сигнала не оказывает влияния на рабочий диапазон по току. При срабатывании исполнительного механизма сцепления величина силы тока на обмотках электромагнитного клапана изменяется от 0,272 до 0,614 А (см. рисунок 7), т. е. рабочий диапазон по току равен 0,342 А, что с учетом рабочей характеристики электромагнитного клапана (см. рисунок 6) составляет 51,1 %.

Обоснование выбора степени аппроксимирующего полинома проводилось также на основе критерия МАРЕ (см. формулу 2), результаты расчета которого для различных степенных рядов представлены в таблице 3.

Заключение. При теоретическом и экспериментальном исследовании характеристик исполнительных механизмов автоматизированного силового агрегата установлено, что основным фактором, влияющим на ширину диапазона управления исполнительными механизмами, является частота модулированного широтно-импульсного сигнала. Показано, что при прочих равных условиях проведения эксперимента с повышением частоты

ШИМ-сигнала наблюдается устойчивая тенденция к сужению диапазона управления: изменение частоты на 50 Гц приводит к изменению диапазона управления по ШИМу в зависимости от специфических особенностей мехатронных систем на 4,2–10,6 %. Разработанные полиномиальные аналитические зависимости позволяют с погрешностью не более 0,1 % определять диапазон управления исполнительными механизмами автоматизированных механических трансмиссий в зависимости от частоты генерируемого ШИМ-сигнала.

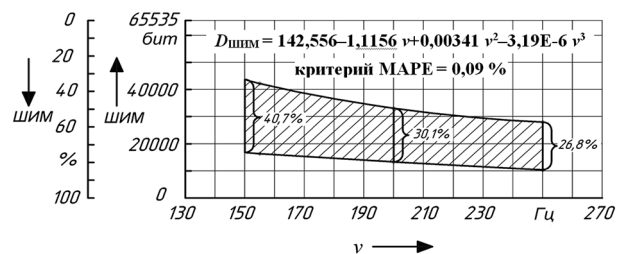


Рисунок 9 — Зависимость диапазона управления ИМ сцепления от частоты ШИМ-сигнала: ν — частота управляющего ШИМ-сигнала, Гц; ШИМ — коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала, %

Список литературы

1. Красневский, Л.Г. Прецизионное управление автоматическими трансмиссиями: итоги 50 лет развития / Л.Г. Красневский, С.Н. Поддубко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 4(33). — С. 5–13.
2. Красневский, Л.Г. Бортовая система управления верхнего уровня гусеничного трактора с электрической трансмиссией: структура и особенности функционирования / Л.Г. Красневский, А.В. Белевич, В.А. Коробкин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — 2012. — Вып. 1. — С. 151–154.
3. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3 / ПК «Пролог». — Copyright: 3S - Smart Software Solutions GmbH, 2008. — 452 с.
4. System manual ecomat mobile Controller R360 for CoDeSys from V2.3 and Target versions V04.xx.xx/ifm electronics gmbh, Germany, 2006. — 184 p.
5. Адаптивный алгоритм трогания с места в автоматическом режиме управления силовым агрегатом автопоезда / О.С. Руктешель [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2014. — Вып. 3. — С. 106–110.
6. Кусяк, В.А. Алгоритм электронного управления дизельным двигателем стандарта Euro-2 / В.А. Кусяк // Изобретатель. — 2014. — № 7–8 (175–176). — С. 33–41.
7. Реализация концепции электронного управления при автоматизации дизельного двигателя с механической топливopодачей / А.Г. Баханович [и др.] // Новости науки и технологий. — 2015. — № 1(32). — С. 11–18.
8. Ануфриев, И.Е. Самоучитель Matlab 5.3/6x / И.Е. Ануфриев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 720 с.
9. Романов, А.А. Применение метода F-преобразования для прогноза тренда и числового представления временного ряда / А.А. Романов // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2011. — № 4(4), Т. 13. — С. 1103–1109.
10. SMC Corporation — пневматика, гидравлика, вакуумная техника, контроллеры / Устройства для регулирования давления и расхода [Электронный ресурс] / SMC Corp., 2006. — Режим доступа: <http://www.smc-pneumatic.ru/seach.php?logic=org.seach=smc&tp>. — Дата доступа: 31.06.2012.

Belevich A.V., Rukteshel O.S., Kussyak V.A

MAPE criterion usage at the approximate polynoma selection for control range width estimation of the automated transmission actuators

The article presents the experimental research results of the diesel engine fuel supply and frictional clutch actuators characteristics of an automated mechanical transmission. Actuators control was carried out on the basis of a modulated pulse-width signal with a frequency of up to 250 Hz. During the semi-natural experiment, the effect of the PWM signal frequency on the actuators control range was investigated, the regularity of the control range variation from the generated signal parameters was revealed, and analytical dependencies were obtained that allowed us to estimate the PWM control range with not more than 0,1 % error. The justification of the power series choice of obtained polynomial dependences was based on the smallest modules criterion (MAPE criterion).

Поступила в редакцию 02.08.2017.