

В. Н. ШАМАРДИНА, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С. М. ЛЕМЕШКО, ст. научн. сотр. ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков;
Г. И. ЯРОВОЙ, зав. отделом ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков

СИСТЕМА ВЫРАВНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЯГИ ПО ОСЯМ ТЕПЛОВОЗА

Введение. Одним из самых массовых локомотивов из ныне производимых на территории стран СНГ является магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ116У и его модификации. Таких локомотивов с 2008 года по настоящее время Луганским тепловозостроительным заводом построено более 400 единиц. Электропередача тепловоза оснащена микропроцессорной системой управления типа МСУ-ТП с поосным регулированием касательной силы тяги [1]. МСУ-ТП контролирует скорость вращения и ускорение каждой колесной пары и при обнаружении превышения их по отношению к минимальной скорости или уставке по ускорению обеспечивает снижение напряжения на соответствующем тяговом электродвигателе (ТЭД). При проскальзывании 2-х и более колесных пар система производит плавное снижение мощности тягового генератора с заданным темпом, реализуя принцип индивидуального и группового воздействия на электропередачу.

На большинстве украинских и зарубежных локомотивов [2,3] обнаружение боксования фиксируется по факту появления избыточной разницы между токами, напряжениями или частотами вращения ТЭД боксующих и небоксующих колесных пар.

Повышение тяговых и противобоксовочных свойств еще более актуально для маневровых тепловозов, что определяется особыми условиями их эксплуатации. При маневровых передвижениях локомотивы работают в специфических режимах: для трогания состава с места и разгона требуются большая сцепная масса и значительные тяговые усилия при ограниченном перемещении; подъездные и станционные пути имеют криволинейный характер, что увеличивает сопротивление движению локомотива и провоцирует срывы в боксование.

Постановка задачи. Известно, что при движении грузового состава вертикальная нагрузка от экипажа на оси колесных пар передается неравномерно, поэтому колесные пары тепловоза находятся в неодинаковых потенциальных сцепных условиях [4]. Так как схема (рис. 1) позволяет индивидуально управлять мощностью, подводимой к каждому ТЭД, предлагается перераспределить электрические нагрузки между двигателями в зависимости от реальных вертикальных нагрузок на оси колесных пар. Подвод мощности к ТЭД в соответствии с нагрузками на оси позволит реализовать равные коэффициенты тяги для всех колесных пар.

Предлагается систему индивидуального воздействия на ТЭД, реализованную на тепловозах 2ТЭ116У, дополнить функцией выравнивания коэффициентов тяги в штатном поездном режиме работы и в нестационарных режимах. Замкнутая система автоматического регулирования (САР) каждого ТЭД является системой стабилизации определенного параметра с двумя каналами: 1) косвенной оценки разности частот вращения ТЭД и формирования жестких характеристик ТЭД при боксовании; 2) выравнивания коэффициентов тяги по осям тепловоза. В статье рассмотрен синтез второго канала для перспективного маневрового тепловоза ТЭМ23 с электропередачей переменного-постоянного тока (технические характеристики в табл. 1).

Материалы и результаты исследования. В режиме тяги питание ТЭД осуществляется от тягового генератора (ТГ) через две выпрямительные установки (рис. 1). Для реализации поосного регулирования силы тяги каждая выпрямительная установка состоит из двух несимметричных управляемых трёхфазных мостов якорных преобразователей с общими по плюсу катодными (КГ) и отдельными анодными группами (АГ). К каждой АГ подключён один ТЭД. При управлении тиристорами АГ осуществляется поосное регулирование. В расчётах характеристик электропередачи использованы каталожные данные тягового электродвигателя ЭД133 при мощности на клеммах $P_{\text{КЛ}} = 333$ кВт. На рис.2 получены расчетные рабочие характеристики электропередачи $U_{\text{Г}}, x, F_{\text{T}} = \varphi(I_{\text{M}})$ при подводимой мощности к ТЭД $P_{\text{КЛ}} = 190$ кВт. Штриховой линией показан длительный режим при токе ТЭД $I_{\text{M}} = 890$ А.

При решении задачи выравнивания коэффициентов тяги по осям система поосного регулирования обеспечивает искусственную неравномерность токораспределения ТЭД с учетом заданной неравномерности осевых нагрузок, обусловленной явлениями разгрузки-догрузки осей (до примерно $\pm 10\%$), возникающими при тяговой нагрузке тепловоза.

Таблица 1 – Технические данные тепловоза ТЭМ23

Мощность тепловоза по дизелю, кВт	800
Сила тяги, кН	
– при трогании с места, максимальная	294,2
– длительного режима при скорости 10,4 км/ч	215,7
Конструкционная скорость, км/ч	100
Служебный вес тепловоза P_{T} , кН, не более	$900 \pm 3\%$
Осевая формула	$2_0 - 2_0$

© В.Н. Шамардина, С.М. Лемешко, Г.И. Яровой, 2015

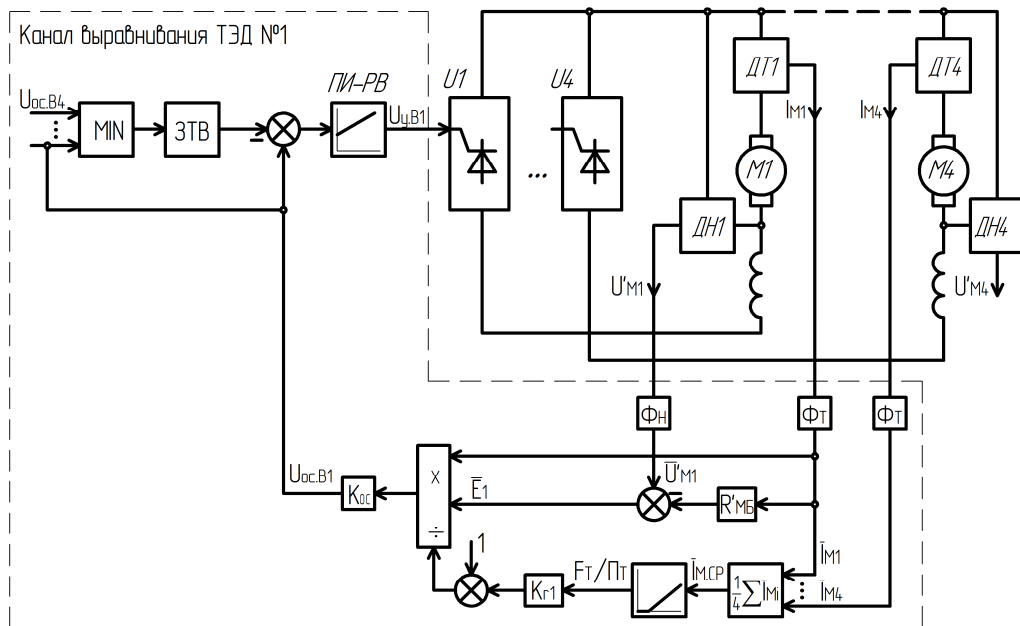


Рис. 1 Функциональная схема канала выравнивания системы регулирования ТЭД

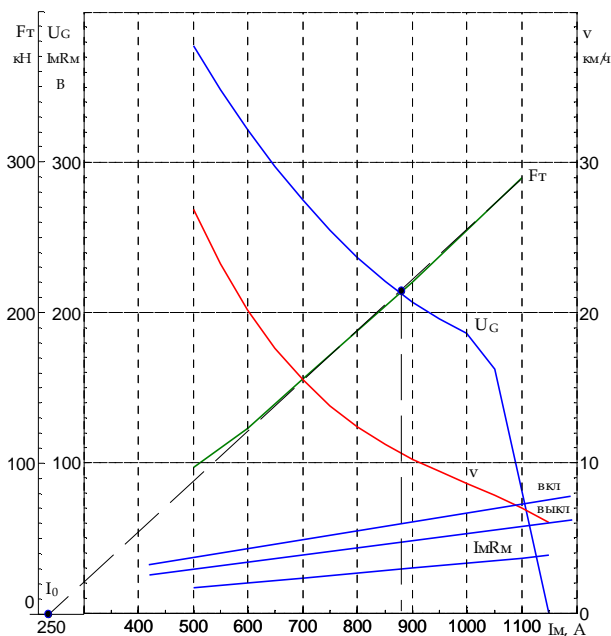


Рис.2 Характеристики электропередачи

Таблица 2

K_{p1}	K_{p2}	K_{p3}	K_{p4}
1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось
-0,12	-0,362	0,362	0,12

K_{pi} – коэффициенты разгрузки/догрузки расчетных суммарных изменений нагрузок колесных пар на рельсы в долях от силы тяги, приходящейся на колесную пару. Характер перераспределения сцепного веса при тяге такой, что половина осей догружается, другая половина разгружается при сохранении неизменной общей величины сцепного веса. Отрицательные значения определяют разгрузку колесной пары,

положительные – догрузку. При изменении направления движения перераспределение осевых нагрузок меняется на обратное.

Из (1) и (2) получаем

$$F_i = F_T / 4 (1 + K_{pi} F_T / \Pi_T) \quad (3)$$

Производя замену

$$F_i = \eta_{MM} \eta_P P_{Эли} / v, \quad (4)$$

Основные уравнения алгоритма регулирования ТЭД

Из условия получения коэффициента тяги K_F одинаковым для всех осей в рассматриваемом режиме движения имеем

$$K_F = F_i / \Pi_i = F_T / \Pi_T, \quad (1)$$

где Π_i – нагрузка на ось колёсной пары в тяговом режиме с составом,

F_T, F_i – соответственно, касательная сила тяги тепловоза и одной оси, $i=1 \div 4$ – порядковый номер оси колёсной пары и соответствующего ей ТЭД.

Имеем также

$$\Pi_i = \Pi_T / 4 + \Delta \Pi_i = \Pi_T / 4 (1 + K_{pi} F_T / \Pi_T), \quad (2)$$

где $\Delta \Pi_i = K_{pi} F_T / 4$ – величина изменения нагрузки на ось, обусловленная режимом тяги,

$$\sum_{i=1 \div 4} \Delta \Pi_i = 0.$$

$$F_T/4 = \eta_{MM}\eta_P (P_{ЭЛ.Т}/v)/4, \quad (5)$$

где v – скорость тепловоза,

η_{MM} – к.п.д., учитывающий магнитные и механические потери тягового электродвигателя,

η_P – к.п.д. тягового редуктора,

$$P_{ЭЛ.Т} = \sum_{i=1+4} P_{ЭЛi}, \quad (6)$$

где $P_{ЭЛ}$ – электромагнитная мощность тяговых электродвигателей тепловоза,

получаем закон регулирования

$$P_{ЭЛi}/(1 + K_{pi} F_T/\Pi_T) = P_{ЭЛ.Т}/4, \quad (7)$$

обеспечивающий примерное равенство коэффициентов тяги по осям тепловоза.

На основе выражения (7) реализуется взаимосвязанная САР ТЭД. В качестве обратной связи по сигналам датчиков напряжения и тока ТЭД формируется сигнал по электромагнитной мощности (произведение тока на ЭДС), скорректированный с учетом разгрузки-догрузки осей тепловоза. Сигналом задания служит наименьший в рассматриваемый момент времени из скорректированных сигналов ТЭД.

Реализация в САР закона (7) для канала регулирования i -го якорного преобразователя осуществляется по рассогласованию сигналов задания и обратной связи:

$$U_{oci} = K_{oc} P_{ЭЛi}/(1 + K_{pi} F_T/\Pi_T), \quad (8)$$

$$U_3 = (1 + \delta_1) \min U_{oci} + \delta_2. \quad (9)$$

Для ТЭД с минимальным значением U_{oci} канал регулирования закрыт, так как для него $U_3 > U_{oci}$ согласно (9), и его сигнал U_{oci} определяет сигнал U_3 для остальных (ведомых) ТЭД, то есть данный ТЭД выполняет функцию ведущего регулирования. При этом напряжение на ведущем ТЭД определяется напряжением тягового генератора.

Определяем величину F_T в формуле (7) в соответствии с графиком на рис. 2:

$$F_T = K_{FT} \left(\sum_{i=1+4} I_{Mi}/4 - I_0 \right). \quad (10)$$

Принимая далее

$$K_{F\Pi} = K_{FT}/\Pi,$$

получаем выражение знаменателя в формуле (7) в функции тока I_M

$$1 + K_{pi} F_T/\Pi_T = 1 + K_{pi} K_{F\Pi} (I_M - I_0). \quad (11)$$

Определяем величину $P_{ЭЛi}$ в формуле (7)

$$P_{ЭЛi} = E_i I_{Mi} \cdot 10^{-3} = (U_{Mi} - I_{Mi} R_{Mi}) I_{Mi} \cdot 10^{-3} \approx (U_{Mi} - I_{Mi} R_M) I_{Mi} \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

где I_M, U_M, E – соответственно, ток, напряжение, ЭДС тягового электродвигателя,

$R_{Mi} \approx R_M$ – полное сопротивление цепи тягового двигателя в нагретом его состоянии при 115°C.

Диапазон регулирования величины U_M при отсутствии боксования

По формулам (7) – (12) осуществлен синтез САР канала выравнивания и представлен на рис.1.

Рассмотрим по внешней характеристике (рис. 2) режим работы при отсутствии боксования при учете перераспределения сцепного веса по осям тепловоза, обусловленного тяговым режимом. Важно отметить, что дополнительные положительные и отрицательные осевые нагрузки пропорциональны величине тягового усилия, в нашем случае – величине тока двигателей.

Введём следующие понятия:

сильный ТЭД	}	–	потребляющий, соответственно, наибольший или наименьший ток якоря при равных напряжениях питания и частотах вращения ТЭД
слабый ТЭД			
тяжелая ось	}	–	имеющая, соответственно, наибольшую или наименьшую осевую нагрузку в результате перераспределения сцепного веса тепловоза между осями при тяговом режиме
легкая ось			

Наибольший диапазон изменения угла управления α якорного преобразователя достигается в случае комбинации «слабый» ТЭД на «тяжёлой» оси ($\alpha = 0$) и «сильный» ТЭД на «лёгкой» оси ($\alpha = \alpha_{max}$), при этом в результате регулирования поддерживается приблизительное равенство коэффициентов тяги по осям тепловоза. Полученный в дальнейшем результат (значение параметра U_{M2}/U_{M3}) относится к данному случаю.

С использованием пакета MATLAB выполнено моделирование режима работы на максимальной тяговой позиции контроллера машиниста в точке на внешней характеристике ТГ $I_M = 1030 \text{ А}$, $U_G = 186 \text{ В}$, соответствующей точке включения канала регулирования мощности САР ТГ.

В соответствии с табл. 2 считаем 2-ю и 3-ю оси в качестве «лёгкой» и «тяжёлой» осей. В ходе моделирования исследованы два взаимосвязанных канала выравнивания с ТЭД №3 и ТЭД №2 с общим сигналом задания U_3 и ПИ-регулятором выравнивания коэффициентов тяги.

В случае рассогласования, сформулированного по (11), было получено уменьшение электромагнитной мощности $P_{ЭЛ2}$ относительно $P_{ЭЛ3}$ на 20 %, при этом отклонение ЭДС ТЭД №2 составило 6,7%, что соответствует точке 2 на рис. 3-6.

Далее с учетом уменьшения $P_{ЭЛ2}$ ТЭД №2, находящегося на «лёгкой» оси, введено расхождение характеристик намагничивания $E = \varphi(I_M)$ рассматриваемых ТЭД. Для рассматриваемого режима при насыщенных ТЭД принято допустимое расхождение на уровне $\delta E = 0,07$. При сохранении мощности $P_{ЭЛ2}$ это приводит к дополнительному уменьшению ЭДС ТЭД №2 до значения E_2 по гиперболической характеристике в режиме, соответствующем точке 3 на рис. 3 по сравнению с режимом в точке 2.

По полученным данным (рис.4) находим величину наибольшего снижения напряжения ТЭД №2. В результате имеем искомое значение

$$U_M / U_{M0} = U_{M2} / U_{M3} = 164 / 186 = 0,88,$$

где U_{M0} – выходное напряжение при $\alpha = 0$, равное выпрямленному напряжению ТГ U_G .

Принимаем в тяговом режиме работы граничный угол регулирования канала выравнивания (рис.7):

$$\alpha = \cos^{-1}(2 \cdot 0,88 - 1) \approx 40^\circ.$$

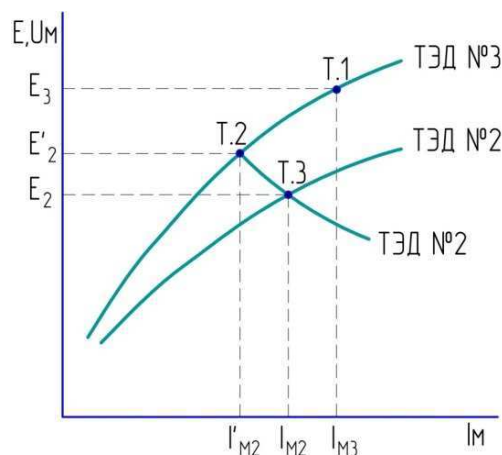


Рис. 3 Характеристики намагничивания ТЭД №2 и №3 и гиперболическая ТЭД №2

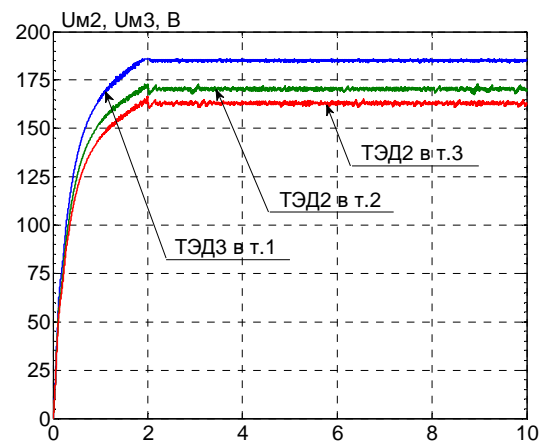


Рис. 4 Напряжения ТЭД №2 и ТЭД №3

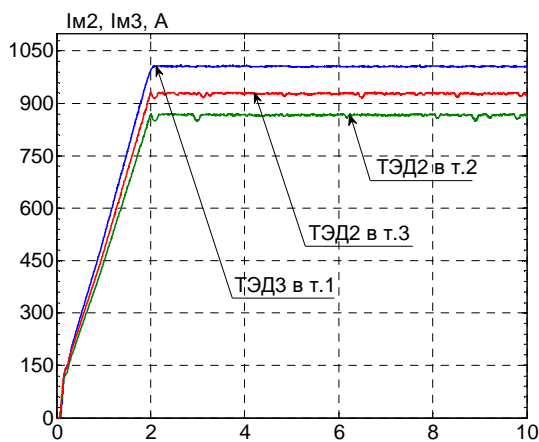


Рис. 5 Токи ТЭД №2 и ТЭД №3

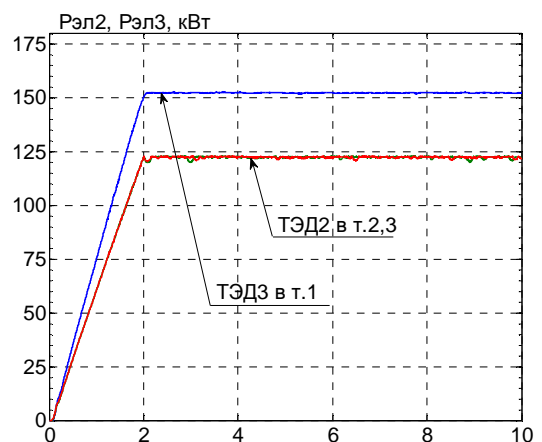


Рис. 6 Электромагнитная мощность ТЭД №2 и ТЭД №3

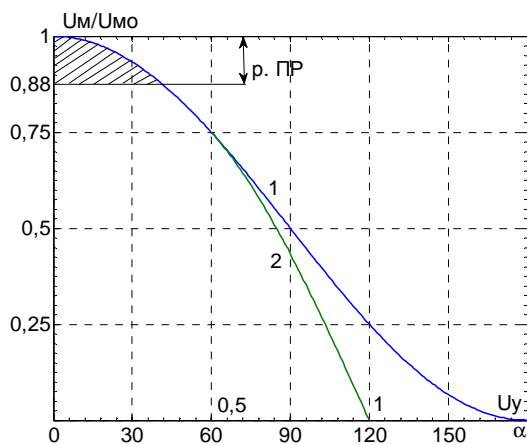


Рис. 7 Регулировочная характеристика с шунтирующим диодом на выходе выпрямителя (ШД) (1) и без ШД (2)

Выводы. Для системы регулирования ТЭД:

- предложен алгоритм выравнивания коэффициентов тяги в системах поосного регулирования без внесения изменений в электрическую схему силовой части существующих магистральных тепловозов 2ТЭ116У и 2ТЭ25К с управляемыми выпрямительными установками;
- учтено влияние расхождения электромагнитных характеристик ТЭД и неравномерности осевых нагрузок;
- выполнено моделирование работы САР с каналом выравнивания при работе в штатных и в нештатных режимах, при наличии боксования и включения в работу соответствующего канала индивидуального воздействия на мощность ТЭД боксующей оси тепловоза действие канала выравнивания стабилизирует свой управляющий сигнал;
- при работе канала определен диапазон регулирования тяговых выпрямителей $\alpha = 0 \div 40^\circ$, при котором шунтирующий диод в схеме выпрямителя все время заперт, и надобность в нем отпадает;
- внедрение каналов выравнивания совместно с работой САР ТГ позволило увеличить коэффициент тяги, что актуально для особых условий эксплуатации маневровых тепловозов.

Список литературы: 1. Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116У / С.В. Сергеев, А.В. Пархонин [и др.] // Локомотив. – 2009. – № 6. – С. 22-25. – ISSN 0869-8147. 2. Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе / И.К. Колесник, Т.Ф. Кузнецов, В.И. Липовка. – М.: Транспорт, 1978. – 149 с. 3. Барский В. А. О модернизации системы противобоксовочной защиты эксплуатируемых тепловозов / В.А. Барский, А. Е. Фришман, Р. В. Афеенченко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 36 (1009). – С.175-176. 4. Теория и конструкция локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Г.С. Михальченко, В.Н. Кашиников, В.С. Коссов [и др.]; под ред. Г.С. Михальченко. – М.: Маршрут, 2006. – 584 с. 5. Федяева Г.А. Моделирование нестационарных режимов перспективного магистрального тепловоза / Г.А. Федяева, В. Н. Федяев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 178-181. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vdnuzt_2007_17_40.pdf. 6. Костюкевич А.И., Кравченко Е.А., Гундарь В.П. [и др.] // Целевая функция для оценки резерва реализации силы тяги локомотива. Вісник СНУ ім. В. Даля – № 4 (158) – Частина 2 – 2011. 7. Шамардина В.Н. Исследование работы контура динамического регулирования напряжения тягового генератора электропередачи тепловоза 2М62УК при имитации нестационарных режимов работы / В.Н. Шамардина, С.М. Лемешко // Електромех. і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 3. – С. 313-315.

Bibliography (transliterated): 1. Sergeev, S.V., et al. «Jelektricheskaja shema teplovoza 2TJe116U.» *Lokomotiv* 6 (2009): 22-25. Print. 2. Kolesnik, I.K., T.F. Kuznecov and V.I. Lipovka. *Jelektroperedachi teplovozzov na peremennopostojannom toke*. Moscow: Transport, 1978. Print. 3. Barskij, V. A., A. E. Frishman and R. V. Afenchenko «O modernizacii sistemy protivoboksovochnoj zashchity jekspluatiruemyh teplovozzov.» *Vestnik Nac. tehn. un-ta «HPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda*. No. 36 (1009). Kharkiv: NTU «HPI», 2013. 175-176. Print. 4. Mihal'chenko, G.S., et al. *Teorija i konstrukcija lokomotivov: Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta*. Moscow: Marshrut, 2006. Print. 5. Fedjaeva, G.A., and V. N. Fedjaev. «Modelirovanie nestacionarnyh rezhimov perspektivnogo magistral'nogo teplovoza.» *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu imeni akademika V. Lazarjana*. No. 17. 2007. 178-181. Web. 29 July 2015 <http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vdnuzt_2007_17_40.pdf>. 6. Kostjuevich, A.I., et al. «Celevaja funkcija dlja ocenki rezerv realizacii sily tjagi lokomotiva.» *Visnik SNU im. V. Dalja*. No. 4 (158). 2011. 20-26. Print. 7. Shamardina, V.N., and Lemesko S.M. «Issledovanie raboty kontura dinamicheskogo regulirovanija naprjazhenija tjagovogo generatora jelektroperedachi teplovoza 2M62UK pri imitacii nestacionarnyh rezhimov raboty.» *Elektromeh. i energozberigajuchi sistemi* 3 (2012): 313-315. Print.

Поступила (received) 19.08.2015