

УДК 621.3.072.85

Лемешко С. М.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОТИВОБОКСОВОЧНЫХ СВОЙСТВ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА СРЕДСТВАМИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ТЯГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В работе рассматривается маневровый тепловоз ТЭМ23 с электропередачей переменного тока и поосным регулированием силы тяги. Приведено описание работы системы автоматического регулирования тягового генератора. Сформулированы основные подходы к созданию двухканальной системы поосного регулирования тяговых электродвигателей (ТЭД). Проведены испытания системы тяговый генератор – выпрямительная установка – ТЭД.

Ключевые слова: маневровый тепловоз, тяговая электропередача переменного тока, боксование, поосное регулирование, коэффициент тяги, кривая намагничивания.

Лемешко С. М.

ПІДВИЩЕННЯ ПРОТИБОКСОВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА ЗАСОБАМИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Анотація. В роботі розглядається маневровий тепловоз ТЕМ23 з електропередачею змінно-постійного струму і поосним регулюванням сили тяги. Наведено опис роботи системи автоматичного регулювання тягового генератора. Сформульовані основні підходи до створення двоканальної системи поосного регулювання тягових електродвигунів (ТЕД). Проведено випробування системи тяговий генератор - випрямна установка - ТЕД.

Ключові слова: маневровий тепловоз, тягова електропередача змінно-постійного струму, боксування, поосне регулювання, коефіцієнт тяги, крива намагнічування.

Lemeshko S.

IMPROVEMENT OF ANTI-SKID PROPERTIES OF A SWITCHING DIESEL LOCOMOTIVE BY MEANS OF INDIVIDUAL CONTROL OF ELECTRIC POWER TRANSMISSION TRACTION

Abstract. In this work the switching diesel locomotive TEM23 with AC/DC electric power transmission and system of each axle regulation is considered. A description of automatic control system of traction generator is adduced. The basic approaches for the creation of double-loop system to control of traction motors (TM) are formulated. Tests of the traction generator system – rectifier – TM are conducted.

Keywords: shunting locomotive, traction AC/DC drive, wheelslip, individual axle traction control, coefficient of traction, magnetization curve.

Введение. Создание новых или модернизация эксплуатирующихся тепловозов сопровождаются внедрением новых технических решений. Разработки маневровых локомотивов ведутся в связанных между собой направлениях: 1 – повышение топливно-энергетических характеристик; 2 – усовершенствование эксплуатационных показателей; 3 – повышение тяговых и тормозных свойств электропередачи (ЭП) тепловоза.

Реализацией 1-го направления является создание опытных образцов гибридных тепловозов (ТЭМ9Н Synarahybrid, ТЭМ35 и

ТЭМ31Г) с накопителями энергии и асинхронным тяговым приводом [1], а также многодизельных тепловозов (ТЭМ14, ТЭМ33 и модернизированные ЧМЭЗ ЭКО) с работой дизелей в зависимости от требуемой текущей производительности и условий эксплуатации [1,2]. Замена дизелей на более современные позволяет повысить технико-экономические и экологические показатели тепловоза (пример: новые серии маневровых локомотивов ТЭМ18В, ЧМЭЗП и ТМЭ1).

Ко второму направлению в части тяговых электропередач можно отнести:

– системы инверторного запуска дизель-агрегатов [1,3], реализуемые в тепловозах компании GE Transportation; – применение блочно-модульной конструкции, что характерно в новых серийных образцах практически всех маневровых тепловозов; – унификация электрооборудования локомотивов однотипных по роду службы (ТЭМ33, ТЭМ35); – оптимизация и уменьшение используемой контакторной аппаратуры, к примеру, электропередача без ослабления возбуждения ТЭД (один из проектных вариантов ТЭМ23), уменьшение числа переключений тормозных резисторов в режиме электрического торможения (ЭТ). Все чаще находят применение бесколлекторные электрические машины переменного тока – тяговые (ТГ) генераторы (модернизированные ТЭМ2-УГКМ) и асинхронные ТЭД (ТЭМЛТХ, ТМЭЗ, ТЭМ31М).

Разработки в третьем направлении обеспечивают повышение тяговой мощности для перевозки больших составов в длительных режимах, сопровождающихся увеличением вероятности боксования и юза. Естественно, это обуславливает развитие противобоксовочных систем.

Актуальными примерами противобоксовочных систем регулирования являются:

– высокочувствительные системы контроля скольжения колесной пары ВОА компании ZTR и BrightStar фирмы GE Transportation, использование которых позволило улучшить сцепление с рельсами до 44%.

– системы управления крипом колеса в режимах боксования и юза Super Series и EM2000 компании Electro-Motive Diesel с реализованным методом повышения до максимума тягового усилия и тремя ступенями обнаружения боксования и коррекции тягового усилия. Коэффициенты тяги тепловозов с ЭП переменного-постоянного тока SD60 в зависимости от модификации имеют значения 0,25-0,267. Разработке и внедрению систем контроля проскальзывания предшествовали всесторонние исследования характеристик сцепления колеса и рельса в различных условиях.

Целью работы является синтез современной противобоксовочной системы маневрового тепловоза.

Материал и результаты исследования.

Для обеспечения заданных коэффициентов тяги необходимо создание силовых схем и противобоксовочных систем различного рода, обеспечивающих высокие значения коэффициента использования сцепного веса. При этом наиболее эффективны схемы, в которых ТГ и ТЭД имеют жесткие характеристики при нарушении условий сцепления.

В настоящее время на тепловозах используется система жестких динамических характеристик (ЖДХ) ТГ, в основу работы которой положено регулирование по максимальному токовому сигналу, всегда принадлежащему ТЭД небоксующих колесных пар. Это позволяет в начале боксования отдельных колесных пар сохранить неизменными сигналы обратных связей по току и напряжению в системе регулирования (САР), если есть хотя бы один ТЭД небоксующей колесной пары.

Компенсация с помощью электронного регулятора дизеля (ЭРД) недоиспользования при боксовании мощности дизеля, по сути, обеспечивает работу САР с обратной связью по отклонению мощности. При этом динамическая характеристика остается жесткой, пока скорость компенсации отклонения мощности невелика. В ходе исследований установлено, что при одновременном боксовании более двух-трех колесных пар сигнал от ЭРД оказывает недопустимо сильное воздействие и должен быть заблокирован. Это реализовано в тепловозе ТЭМ103.

Однако, для перспективных тепловозов при заданных требуемых коэффициентах тяги этот способ недостаточно эффективен, так как характеристика является жесткой лишь при начале боксования. Кратковременный одновременный срыв или каскадное развитие боксования при наличии разброса электромагнитных характеристик ТЭД на уровне 5-10% приводят к резким броскам напряжения на ТЭД, способствующим развитию разносного боксования всех колесных пар.

Более эффективны системы, динамическая характеристика которых задана независимо от изменения тока ТЭД. Ограничение

скорости нарастания напряжения ТГ в случае реализации больших сил тяги и кратковременном ухудшении сцепления позволяет

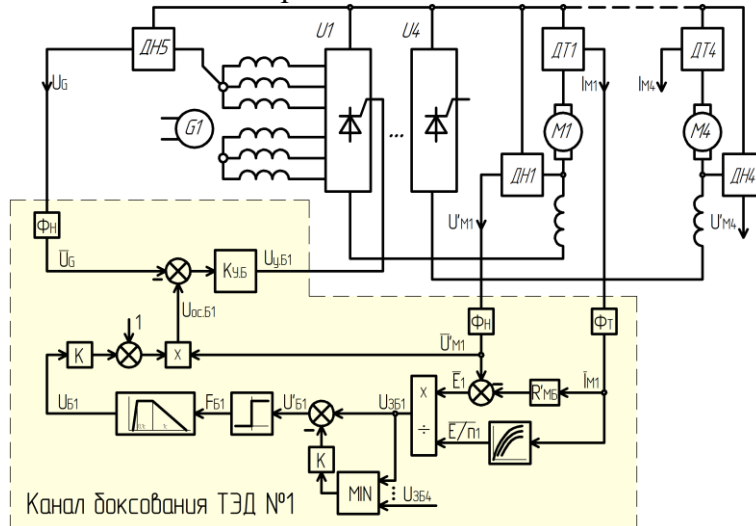


Рис. 1. Канал индивидуального воздействия на мощность ТЭД боксующей оси

удержать на высоком уровне коэффициент жесткости тяговых характеристик, величина которого при постоянном напряжении близка к коэффициенту жесткости характеристики сцепления.

Таковыми свойствами обладает следящая САР напряжения ТГ в ограниченной зоне регулирования мощности ЭП тепловоза, особенности и алгоритм работы которой приведены в [5].

Канал индивидуального регулирования ТЭД. Для обеспечения высоких значений коэффициента использования сцепного веса в тяговом режиме со стороны САР задействован канал индивидуального воздействия на мощность ТЭД боксующей оси без использования датчиков частоты вращения.

Канал вводится в действие для принятых значений рассогласования между сигналом соотношения ЭДС к току боксующего ТЭД и наименьшим сигналом остальных ТЭД, косвенно ограничивая расчетную допустимую скорость избыточного проскальзывания колесных пар в функции величины скорости движения (рис.1). Вместе с этим обеспечивается стабилизация напряжения ТГ для упреждения снижения силы тяги небоксующих колесных пар.

Канал выравнивания коэффициентов тяги представляет собой взаимосвязанную САР с общим сигналом задания и регулятором выравнивания (ПИ-РВ) (рис.3). В качестве обратной связи по сигналам от датчиков напряжения и тока ТЭД формируется сигнал

электромагнитной мощности (произведение тока на ЭДС), скорректированный с учетом разгрузки-догрузки осей тепловоза. В текущий момент времени сигналом задания служит наименьший из скорректированных сигналов ТЭД. В [7] осуществлен расчет по перераспределению электрических нагрузок между ТЭД в зависимости от реальных вертикальных нагрузок на оси колесных пар. Синтезирован закон управления, обеспечивающий примерное равенство коэффициентов тяги, и определен диапазон регулирования напряжения ТЭД U_M при отсутствии боксования.

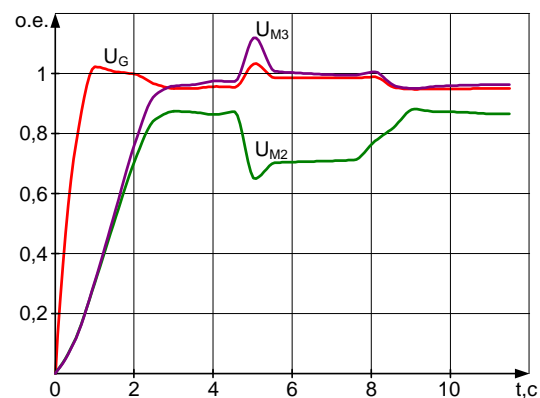


Рис.2. Переходные процессы напряжений ТЭД и ТГ при боксовании ТЭД №2

Рассмотрен также режим работы ТЭД, имеющих наибольшую и наименьшую осевую нагрузку в результате перераспределения сцепного веса. Учитывая расхождения характеристик намагничивания $E = \varphi(I_M)$, выполнено моделирование процессов

для комбинаций ТЭД, находящихся в ях сцепления. наиболее и наименее благоприятных услови-

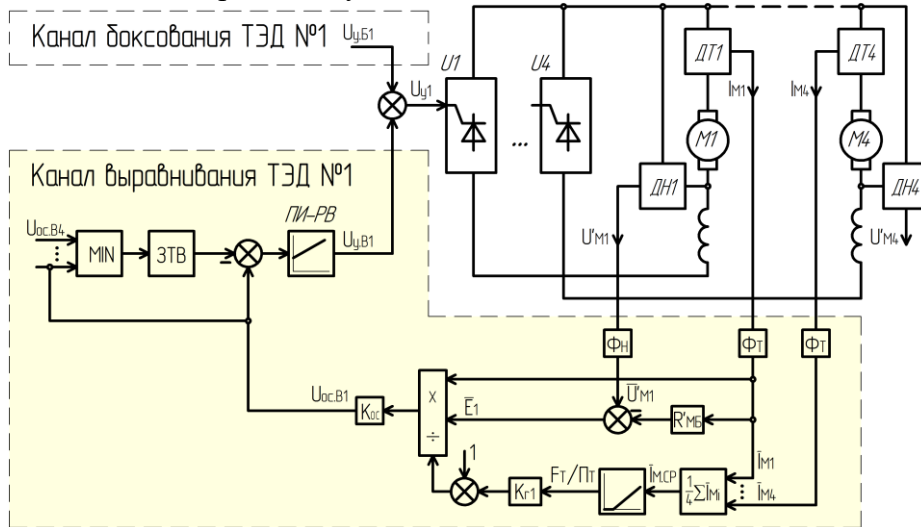


Рис. 3. Канал выравнивания системы регулирования ТЭД № 1

Определение параметров тяговых преобразователей ТЭД с учётом режимов боксования. При работе преобразователей $U_1 \dots U_4$ с общими (+) катодными (КГ) и отдельными (-) анодными группами (АГ), каждый из которых выполнен по схеме трёхфазного полупроводящего моста (рис. 4), регулирование выходных параметров (напряжение U_M , ток I_M) осуществляется изменением угла управления α тиристоров АГ, являющегося функцией сигнала управления U_y .

На рис. 5 приведена характеристика выхода $U_M/U_{M0} = (1 + \cos \alpha)/2$,

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

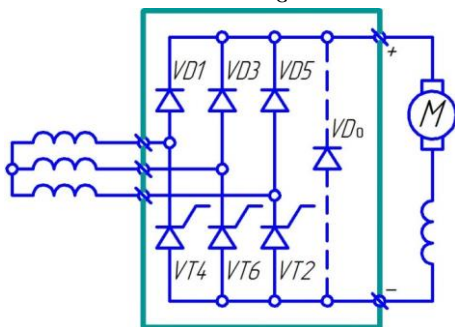


Рис. 4. Тяговый выпрямитель

Упрощённые (без учёта коммутации фазных токов) графики линейных напряжений звезды ТГ $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} = \varphi(\omega t)$ и выпрямленного напряжения $U_M = \varphi(\omega t)$ одного

из ТЭД имеют вид, показанный на рис. 6. Для данного случая выпрямленный ток I_M принимаем идеально сглаженным благодаря индуктивности цепи ТЭД.

Для соответствующей ветви 2 характеристики получаем:

$$U_M/U_{M0} = \varphi_1(\alpha) - \varphi_2(\alpha) = [\cos \alpha + \cos(\alpha - 60^\circ)]/2 = \sqrt{3}/2 \cos(\alpha - 30^\circ),$$

где $\varphi_1(\alpha) = (1 + \cos \alpha)/2$,
 $\varphi_2(\alpha) = [1 - \cos(\alpha - 60^\circ)]/2$ при $\alpha > 60^\circ$.

VD_0 обтекается током при $\alpha > 60^\circ$. При $\alpha = 90^\circ$ средневыврямленное значение этого тока равно $I_{VD0} = 30^\circ/120^\circ I_M = 0,25 I_M$.

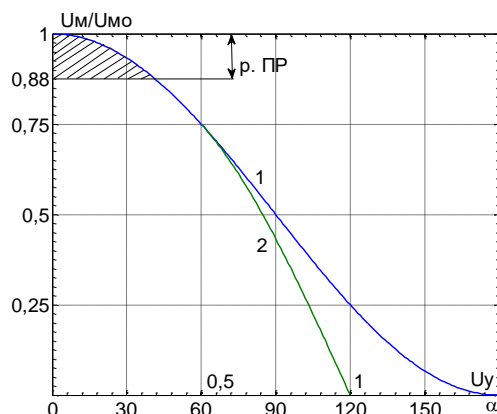


Рис. 5. Регулировочная характеристика с шунтирующим диодом VD_0 (1) и без (2)

В режиме работы без боксования по данным [7], соответствующим случаю наибольшего снижения напряжения ТЭД, находим:

$$U_M / U_{M0} = U_{M2} / U_{M3} = 0,88, \text{ где } U_{M2}, U_{M3} \\
 \text{– напряжения ТЭД №2,3,}$$

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

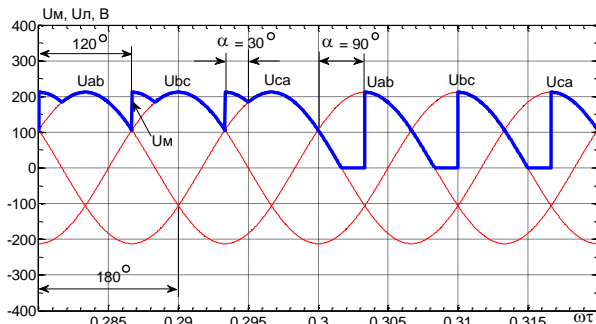


Рис. 6. Напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и U_M

Для определения граничного угла работы полууправляемой схемы выпрямителя были проведены испытания системы ТГ – выпрямитель – ТЭД («Протокол испытаний выпрямительной установки ВУТГ-6600/800-У2 по проверке идентичности напряжений на тяговых электродвигателях ЭД-133УХЛ1, питающихся от полностью управляемого и полууправляемого выпрямителей. ТХ.218.1270»). Определены границы использования при обеспечении ограничений по качеству тока и коммутации. По ГОСТ степень снижения напряжения ТЭД ограничена допускаемыми пульсациями по току на уровне 10% и степени искрения (1½ балла). При испытаниях степень искрения двигателя во всех режимах при углах открытия полууправляемого выпрямителя в диапазоне $\alpha = 0...50^\circ$ не превысила 1¼ балла, коэффициент пульсаций тока $K_{ПТ}$ не превысил 6,37%, что существенно меньше допустимого значения.

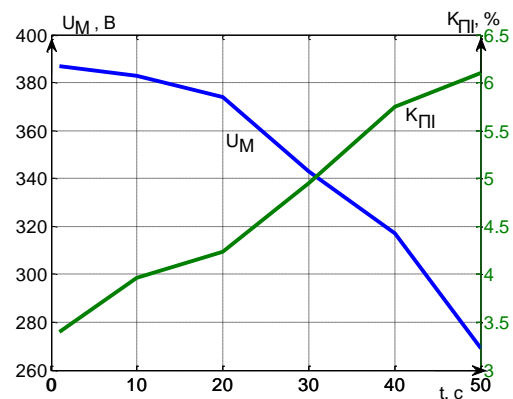


Рис. 7. U_M и коэффициент пульсаций тока при $U_G = 330 \text{ В}, f_G = 100 \text{ Гц}, I_M = 780 \text{ А}$

Принимаем с учётом режимов работы защиты от боксования диапазон регулирования $U_M / U_{M0} = 1...0,75$ и $\alpha = 0...60^\circ$. В результате, при принятом рабочем диапазоне $\alpha \leq 60^\circ$ участок характеристики $\varphi_2(\alpha)$ в работе не используется, при этом диод VD₀ все время заперт, и надобность в нем отпадает.

Заключение. Реализован алгоритм управления для синтеза системы поосного регулирования, позволяющей повысить противобоксовочные свойства локомотива, снизить расходы песка, увеличить весовые нормы перевозимых грузов. С минимальными программными изменениями такая система может быть реализована и на других маневровых и грузовых тепловозах с управляемыми тяговыми выпрямителями.

Список использованной литературы

1. Иванов В. А. Современные решения ГП завод «Электротяжмаш» в области тяговых электропередач тепловозов и дизель-поездов [Текст] / В. А. Иванов, С. М. Лемешко // Локомотив-інформ. – 2013. – № 8. – С. 17–21.
2. Шамардина В. Н. Анализ схемы электропередачи тепловоза с двумя дизелями и общей тяговой нагрузкой / В. Н. Шамардина, Г. И. Яровой, С. М. Лемешко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка, 2014. – № 15 (91). – С. 136–139.
3. Яровой Г. И. Система инверторного запуска тепловозного дизеля тяговым синхронным генератором [Текст] / Г. И. Яровой, Р. В. Канунников и др. // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. Володимира Даля.

– Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – № 5 (176). – Ч. 1. – С. 161–163.

4. Яровой Г. И. Система питания бортовой сети для модернизации тепловозов 2ТЭ10М [Текст] / Г. И. Яровой, С. М. Лемешко, В. Н. Шамардина // *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 36 (1009). – С. 183–185.

6. Шамардина В. Н. Следящий канал регулирования напряжения тяговой электропередачи тепловоза [Текст] / В. Н. Шамардина, С. М. Лемешко // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Зб. наук. пр. XIV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, 14–15 квітня 2016 р.* – Кременчук : КрНУ, 2016. – С. 75–76.

7. Шамардина В. Н. Система выравнивания коэффициентов тяги по осям тепловоза [Текст] / В. Н. Шамардина, С. М. Лемешко, Г. И. Яровой // *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 12 (1121). – С. 199–203.

8. Анучин А. С. Системы управления электроприводов: учебник [для вузов] / А. С. Анучин – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. : ил. – ISBN 978-5-383-00918-5.

9. Анучин А. С. Мифы и легенды современного электропривода [Текст] / А. С. Анучин // *Труды VIII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 : в 2 т.* – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 42–45.

Получено 12.05.2016

References

1. Ivanov V.A., Lemeshko S.M. *Sovremennye resheniya GP zavod “Elektrotyazhmash” v oblasti tyagovykh elektroperedach teplovozzov i dizel'-poezdov* [Modern solutions SE plant “Elektrotyazhmash” in electric transmission of diesel locomotives and DMUs], (2013), *Lokomotiv-inform Publ.*, Kharkiv, Ukraine, № 8, pp. 17–21 (In Russian).

2. Shamardina V.N., Jarovoj G.I., Lemeshko S.M. *Analiz shemy jelektroperedachi teplovoza s dvumja dizeljami i obshhej tjugovoj nagruzkoj* [Analysis of scheme diesel-electric transmission shunter with two diesel engines and common traction load], (2014),

5. 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 // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 3 (19). – С. 313–315. *Elektrotehnicni ta komp'juterni sistemi*, Kyiv, Ukraine, № 15 (91). pp 136–139 (In Russian).

3. Jarovoj G.I., Kanunnikov R.V. *Sistema invertornogo zapuska teplovoznogo dizelja tjugovym sinhronnym generatorom* [The inverter system startup diesel synchronous traction generator], (2012), *Visnik Shidnoukrains'kogo nac. universitetu im. Volodimira Dalja*, Lugans'k, Ukraine, *vid-vo SNU im. V. Dalja Publ.*, № 5 (176), Vol. 1, pp. 161–163 (In Russian).

4. Jarovoj G. I., Lemeshko S.M., Shamardina V.N. *Sistema pitaniya bortovoj seti dlja modernizacii teplovozzov 2TJe10M* [On-board power supply system for modernization diesel locomotives 2TE10M], (2013), *Visnik Nac. tehn. un-tu “Hark. politehn. in-t”*, Kharkiv, Ukraine, *NTU “HPI” Publ.*, Vol. 36 (1009), pp. 183–185 (In Russian).

5. Shamardina V.N., Lemeshko S.M. *Issledovanie raboty kontura dinamicheskogo regulirovaniya naprjazhenija tjugovogo generatora jelektroperedachi teplovoza 2M62UK pri imitacii nestacionarnyh rezhimov raboty* [Research of dynamic control voltage loop of the diesel locomotive 2M62UK traction generator by non-stationary conditions imitation], (2012), *Elektromekhanicni i energozberigayuchi sistemi*, Kremenchuk, Ukraine, *KrNU Publ.*, Vol. 3 (19), pp. 313–315 (In Russian).

6. Shamardina V.N., Lemeshko S.M. *Sledjashhij kanal regulirovaniya naprjazhenija tjugovoj jelektroperedachi teplovoza* [Voltage control tracking channel of a diesel-electric locomotive traction drive], (2016), *Elektromekhanicni ta energeticni sistemi, metodi modeljuvannja ta optimizacii*, Kremenchuk, Ukraine, April 14–15, *KrNU Publ.*, 2016, pp. 75–76 (In Russian).

7. Shamardina V.N., Lemeshko S.M., Jarovoj G.I. *Sistema vyravnivaniya koeficientov tjugi po osjam teplovoza* [System of traction coefficients alignment on axles], (2015), *Visnik Nac. tehn. un-tu “Hark. politehn. in-t”*,

Kharkiv, Ukraine, *NTU "HPI" Publ.*, Vol. 12 (1121), pp. 199–203 (In Russian).

8. Anuchin A.S. *Sistemy upravlenija jelektroprivodov* [Control systems of electric drives], (2015), Moscow, Russia, *Izdatel'skij dom MJeI Publ.*, 408 p. (In Russian).

9. Anuchin A.S. *Mify i legendy sovremennogo jelektroprivoda* [Myths and Legends of Modern Electric Drive System], (2014), *Trudy VIII Mezhdunar. konf. po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP-2014*, Saransk, Russia, *Izd-vo Mordov. un-ta Publ.*, Vol. 1, pp. 42–45 (In Russian).



Лемешко Сергей Михайлович, с. н. с. Отдела тяговых электропередач ГП «Завод «Электротяжмаш», 61089, г. Харьков, пр. Московский, 299, к.т.: (066) 361-85-88, E-Mail: sergii.lemeshko@i.ua