

УДК 629.424.4

**В. Н. Шамардина**, канд. техн. наук,  
**Г. И. Яровой**, **С. М. Лемешко**

### АНАЛИЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЗА С ДВУМЯ ДИЗЕЛЯМИ И ОБЩЕЙ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

**Аннотация.** Проведен анализ силовых схем для двухдизельного тепловоза ТЭМ23. Определена оптимальная структура электропередачи и получена ее имитационная модель. Оценка работы системы выполнена в штатных и аварийных режимах, выявлены особенности переходных процессов, полигармонический состав напряжений и токов при работе от одного и двух дизелей на разных частотах и различных углах смещения фаз тяговых генераторов.

**Ключевые слова:** маневровый тепловоз, тяговая электропередача переменного тока, 12-пульсный выпрямитель, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения

**V. Shamardina**, PhD.,  
**G. Iarovi, S. Lemeshko**

### ANALYSIS OF SCHEME DIESEL-ELECTRIC TRANSMISSION SHUNTER WITH TWO DIESEL ENGINES AND COMMON TRACTION LOAD

**Abstract.** In the work carried out an analysis of power schemes of traction electricity transmissions for shunting two-engine diesel locomotive TEM23. Based on the technical requirements for diesel locomotive, the optimal structure of electricity transmission was chosen and the model was obtained. Research of transients and harmonic composition of voltages and currents in normal and emergency mode of operation allowed analyzing a number of features of system working with two engine-generator sets.

**Keywords:** shunting locomotive, traction AC/DC drive, twelve-pulse rectifier, output voltage pulsation coefficient

**В. М. Шамардіна**, канд. техн. наук,  
**Г. І. Яровий**, **С. М. Лемешко**

### АНАЛІЗ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОВОЗА З ДВОМА ДИЗЕЛЯМИ ТА СПІЛЬНИМ ТЯГОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**Анотація.** Проведено аналіз силових схем для дводизельного тепловоза ТЕМ23. Визначено оптимальну структуру електропередачі та отримано її імітаційну модель. Оцінку роботи системи виконано в штатних та аварійних режимах, виявлено особливості перехідних процесів, полігармонічний склад напруг і струмів при роботі від одного та двох дизелів на різних частотах та різних кутах зсуву фаз тягових генераторів.

**Ключові слова:** маневровий тепловоз, тягова електропередача змінно-постійного струму, 12-пульсний випрямляч, коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги

**Введение.** Экономия топлива – весомый аргумент для инвестирования в создание локомотивов на основе новых технологий. По данному направлению наряду с применением экономичных дизелей и гибридных силовых установок идет активное внедрение в локомотивные парки России, Канады и США двухдизельных тепловозов [2, 6 – 10]. В первую очередь современными примерами реализации являются тепловозы ТЭМ14 и ТЭМ33.

**Постановка задачи.** В настоящее время Брянский машиностроительный завод заинтересован в создании четырехосного маневрового тепловоза ТЭМ23 с электропередачей переменного тока и двухдизельной силовой установкой в различных исполнениях:

- 1) с двумя дизелями серии QSX компании “Cummins” равной мощности 2x418 кВт;
- 2) с дизелем мощностью 418 кВт и маломощным дизелем 200 кВт.

© Шамардина В.Н., Яровой Г.И.,  
Лемешко С.М., 2014

**Материалы и результаты исследования.** Опыт участия в разработках электрооборудования для тепловозов ТЭМ14 и ТЭМ33 [1], а также требования по обеспечению тяговых свойств показали необходимость анализа разных структур электропередачи при проектировании силовой электрической схемы:

В1 – с отдельным питанием от каждого из силовых источников половины тяговых электродвигателей (ТЭД) аналогично схеме тепловоза ТЭМ14;

В2 – с питанием от источника большей мощности трех ТЭД, от источника меньшей мощности – одного ТЭД;

В3 – с параллельным соединением тяговых выпрямителей и ТЭД;

В4 – с последовательным соединением тяговых выпрямителей и последовательно-параллельным соединением ТЭД.

Для маневровых тепловозов по условиям работы обеспечение максимального тягового усилия

более важно, чем реализуемая скорость движения [5, 7].

В1 – от одной силовой установки не позволяет обеспечить максимальное тяговое усилие. В2 – не позволяет использовать полную тяговую мощность большего дизеля с учетом питания собственных нужд тепловоза. В3 – требует выравнивания напряжений на выходах выпрямителей при работе двух дизелей, при этом параллельное соединение ТЭД ведет к снижению длительной силы тяги. В4 – универсальный для обоих исполнений тепловоза.

Если для исполнения 1) рассматривать работу второго дизеля на половинной мощности, то при моделировании этот вариант будет общим для обоих исполнений тепловоза.

Объект моделирования (рис. 1) содержит два дизель-агрегата, последовательно соединенные по выходу выпрямителя (ВУ1, ВУ2) и ТЭД (М1-М4).

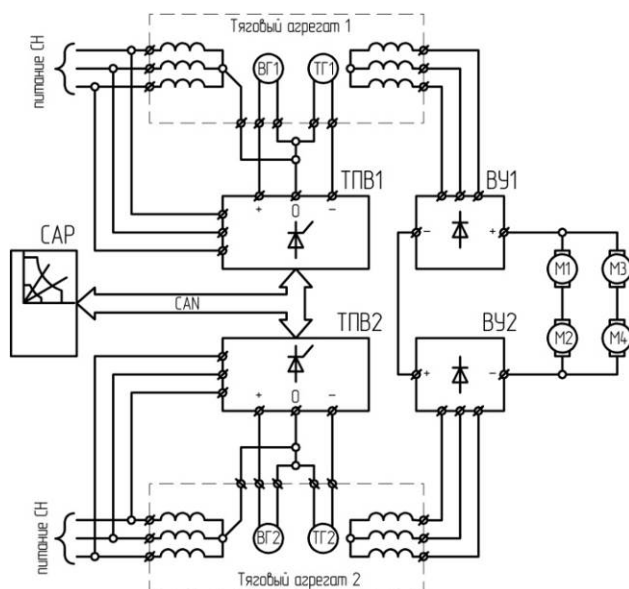


Рис. 1. Функциональная схема силовой схемы электропередачи

Нагрузка (ТЭД) получает питание от тяговых генераторов (ТГ) напряжением 400 В и частотой 100 Гц, начальные фазы напряжений сдвинуты на 30°.

Исследованы режимы работы на два выпрямителя: 1 – одного ТГ; 2 – двух ТГ при  $U_{ЛД1} = U_{ЛД2}$ ; 3 – двух ТГ при  $U_{ЛД1} = 400$  В,  $U_{ЛД2} = 200$  В; 4 – двух ТГ при  $U_{ЛД1} = 400$  В и линейно возрастающем  $U_{ЛД2}$  до значения  $U_{ЛД1}$ .

Режимы 1 и 2 использовались для оценки правильности построения модели, по преобразователям результаты сравнивались с табличными данными 12-пульсного выпрямителя.

В режиме 1 работа схемы аналогична мостовой схеме питания с увеличенным падением напряжения на вентилях; в режиме 2 – аналогична 12-пульсной схеме последовательного типа [4], при этом выпрямленные напряжения суммируются; в режимах 3, 4 при увеличении напряжения на ВУ2 фазные токи выравниваются (табл. 1).

1. Результаты исследований режима 3 (обозначения величин токов и напряжений по [3, 11]).

Точка измерений	Величина	Режим 3
ТГ1, ТГ2	$U_{ЛД1}$ , В	400
	$U_{ЛД2}$ , В	200
	$I_{21}$ , А	329,8
	$I_{22}$ , А	330,1
Модули ВУ1, ВУ2	$I_{VCP}$ , А	134,8
	$I_{VM}$ , А	410,62
	$I_V$ , А	233,2
	$U_{VM1}$ , В	565,28
	$U_{VM2}$ , В	282,46
ТЭД	$U_{d1}$ , В	539,4
	$U_{d2}$ , В	269,3
	$U_{dCUM}$ , В	808,7
	$I_d$ , А	404,3

**Анализ смещения фаз** выполнен по выпрямленному току  $I_d$  и его пульсационным составляющим при питании нагрузки от двух ТГ напряжением 400 В, частотой 100 Гц (табл. 2).

Смещение выпрямленного напряжения  $U_{d1}$  относительно  $U_{d2}$  ведет к образованию 12 пиков в кривой тока  $I_d$  вплоть до наложения фаз напряжений обоих источников. Без смещения фаз и каждые  $(\pi \cdot n)/3$  рад. график тока  $I_d$  ведет себя, как и в схеме трехфазного мостового выпрямителя с коэффициентом пульсаций по 6-ой гармонике  $K_{П6} = 5,715$  %. При смещении фаз на 30° и каждые  $(2n+1) \cdot \pi/6$  рад ток  $I_d$  имеет только 12-ю гармонику, при этом коэффициент пульсаций  $K_{П12} = 1,396$  % и примерно равен 1,399 % по [3].

2. Исследования при токе нагрузки 540 А

Смещение фаз	$I_{d6}$ , А	$I_{d12}$ , А	$K_{П6}$ , %	$K_{П12}$ , %
0°	30,81	7,534	5,715	1,397
5°	29,76	6,52	5,52	1,21
10°	26,68	3,672	4,95	0,698
15°	21,78	0,0005	4,041	≈ 0
20°	15,4	3,763	2,857	0,698
25°	7,97	6,52	1,48	1,21
30°	≈ 0	7,524	≈ 0	1,396
45°	21,78	0,0005	4,041	≈ 0
60°	30,81	7,534	5,715	1,398
90°	≈ 0	7,524	≈ 0	1,396

**В опытах с изменением частоты** анализируем форму токов  $I_d$  при изменении напряжения и частоты ТГ2 с коэффициентом 4 В/Гц для: – системы без смещения фаз; – при напряжении и частоте ТГ1 400 В, 100 Гц; – при изменяющихся напряжении (0...400 В) и частоте ТГ2 (0...100 Гц).

При увеличении частоты ТГ2 изменяется во времени набор гармонических составляющих выпрямленных  $U_d$  (рис. 2) и  $I_d$ . Поэтому анализ выполним для заданных моментов времени.

Наиболее неблагоприятным (табл.2) по гармоническому составу  $I_d$  является случай без смещения начальных фаз ТГ1, ТГ2.

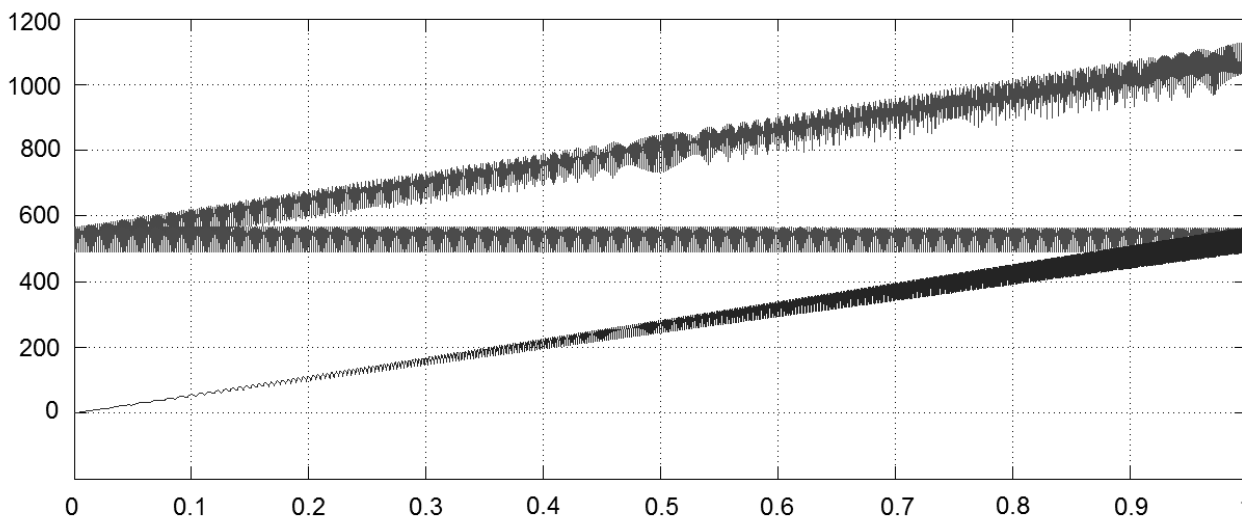


Рис. 2. Полная форма выпрямленных напряжений  $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$ ,  $U_d$ ,  $V$

Гармонический анализ тока нагрузки  $I_d$  для 3-х точек при  $U_{лд1} = 400$  В,  $f_1 = 100$  Гц сведен в табл. 3.

Точка 1 – при  $t = 0,5$  с,  $U_{лд2} = 200$  В,  $f_2 = 50$  Гц. С одной стороны при разных частотах период основной гармоники  $I_d$  получается двухгармонический, с другой стороны раскладывание сигнала в ряд Фурье берется из расчета, что функция на периоде ведет себя однообразно. Если принять за базовую частоту  $f_6 = 50$  Гц, то на частоте 300 Гц гармоника будет 6-ой, если  $f_6 = 100$  Гц – то 3-ей. Спектрограмму построим, исходя из частот, на которых гармоники проявляются. На рис. 3 показаны наиболее проявляемые гармоники на частотах  $6 \cdot f_6$ : 300 и 600 Гц.

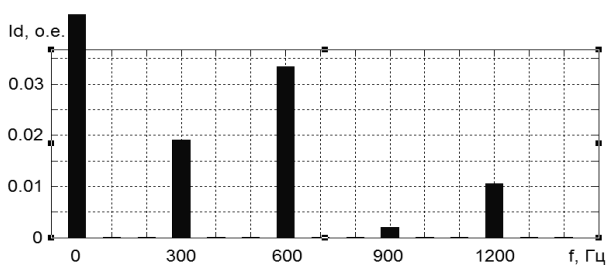


Рис. 3. Спектрограмма выпрямленного тока  $I_d$  для точки 1

Точка 2 – при  $t = 0,7$  с,  $U_{лд2} = 280$  В,  $f_2 = 70$  Гц. Сложение двух напряжений  $U_{d1}$  и  $U_{d2}$  приводит к сложному набору гармоник. Для частот 70 и 100 Гц базовой является частота  $f_6 = 10$  Гц.

Точка 3 – при  $t = 1$  с,  $U_{лд2} = 400$  В,  $f_2 = 100$  Гц. Параметры питания соответствуют режиму 2.

В табл. 3 указаны амплитуды 6-й и 12-й гармоник, оказывающих наибольшее воздействие на форму выпрямленного тока, их коэффициенты пульсаций. Для выделения таких гармоник из полигармонических сигналов следует рассматривать условия их возникновения отдельно от ТГ1 и от ТГ2.

### 3. К гармоническому анализу тока $I_d$

t, с	$U_{лд1}$ , В	$f_1$ , Гц	$U_{лд2}$ , В	$f_2$ , Гц	$I_d$ , А	f, Гц (на стороне АС)			
						300	600	1200	–
0,5	400	100	200	50	404	1,91	3,34	1,05	–
						К <sub>П6</sub>	К <sub>П6</sub>	К <sub>П12</sub>	–
0,7	400	100	280	70	458	2,35	3,36	0,58	0,82
						К <sub>П6</sub>	К <sub>П6</sub>	К <sub>П12</sub>	К <sub>П12</sub>

### Список использованной литературы

1. Иванов В. А. Современные решения ГП завод «Электротяжмаш» в области тяговых электропередач тепловозов и дизель-поездов / В. А. Иванов, С. М. Лемешко // Локомотив-информ. – 2013. – № 8. – С. 17 – 21.
2. Яровой Г. И. Исследование гибридного тягового подвижного состава с выбором оптимального накопителя электрической энергии / Г. И. Яровой, С. М. Лемешко, Р. В. Канунников // Проблемы тягового подвижного состава. – 2010. – № 1. – 25 с.
3. Справочник по преобразовательной технике: под ред. И. М. Чиженко. – К. : Техника, 1978. – 447 с.
4. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники / И. М. Чиженко, В. С. Руденко и др. – М. : Высшая школа, 1974. – 430 с.
5. Маневровые тепловозы: под ред. Л. С. Назарова. – М. : Транспорт, 1977. – 408 с.
6. Kai L.C., Li P.Y., and Xia J.C., (2010), Control Oriented Modeling and System Identification of a Diesel Generator set (genset), *American Control Conf.*, pp. 950 – 955.
7. Asaei B., and Amiri M., (2007), High Efficient Intelligent Motor Control for a Hybrid Shunting Locomo-

tive, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007*, pp. 405 – 411.

8. Hoimoja H., Roasto I., and Keskuila A., (2010), Design Concepts for a Hybrid Diesel Electric Shunting Locomotive Powertrain, *Electronics Conference (BEC), 12th Biennial Baltic*, pp. 293 – 296.

9. Koerner O., Brand J., and Rechenberg K., (2005), Energy Efficient Drive System for a Diesel Electric Shunting Locomotive, *Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications*, 10 p.

10. Кручек В. В. Двухдизельная силовая установка для маневрового тепловоза / В. В. Кручек // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 62 – 69.

11. Яровой Г. И. Система питания бортовой сети для модернизации тепловозов 2ТЭ10М / Г. И. Яровой, С. М. Лемешко, В. Н. Шамардина // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Тематич. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – 2013. – № 36 (1009). – С. 183 – 185.

Получено 18.07.2014

#### References

1. Ivanov V.A. Sovremennye reshenija GP zavod "Jelektrotjazhmash" v oblasti jelektroperedach teplovozov i dizel'-poezdov [Modern Solutions SE Plant "Electrotjazhmash" in Electric Transmission of Diesel Locomotives and DMUs], (2013), *Lokomotiv-Inforn Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 8, pp. 17 – 21 (In Russian).

2. Jarovoj G.I. Issledovanie gibridnogo tjagovogo podvizhnogo sostava s vyborom optimal'nogo nakopitelja jelektricheskoj jenerгии [Hybrid Traction Electrical Equipment Researches with the Selection of Optimum Electric Energy Hoarder], (2010), *Problemy Tjagovogo Podvizhnogo Sostava. Rolling Stock Publ.*, Sevastopol, Ukraine, Vol. 1, 25 p. (In Russian).

3. Spravochnik po preobrazovatel'noj tehnike. Pod. red. I.M. Chizhenko [Handbook of Converters: Ed. I. Chizhenko], (1978), Kiev, Ukraine, *Tehnika Publ.*, 447 p. (In Russian).

4. Chizhenko I.M., Rudenko V.S i dr.. Osnovy preobrazovatel'noj tehniki [Fundamentals Converters], (1974), Moscow, Russian Federation, *Vyssh. Shkola Publ.*, 430 p. (In Russian).

5. Manevroye teplovozy. Pod. red. L.S. Nazarova [Shunting Locomotives: Ed. L. Nazarov], (1977), Moscow, Russian Federation, *Transport Publ.*, 408 p. (In Russian).

6. Kai L.C., Li P.Y., and. Xia J.C, (2010), Control Oriented Modeling and System Identification of a Diesel Generator set (genset), *American Control Conf.*, pp. 950 – 955.

7. Asaei B., and Amiri M., (2007), High Efficient Intelligent Motor Control for a Hybrid Shunting Locomotive, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007*, pp. 405 – 411,

8. Hoimoja H., Roasto I., and Keskuila A. (2010), Design Concepts for a Hybrid Diesel Electric Shunting

Locomotive Powertrain, *Electronics Conference (BEC), 2010 12th Biennial Baltic*, pp. 293 – 296.

9. Koerner O., Brand J., and Rechenberg K., (2005), Energy Efficient Drive System for a Diesel Electric Shunting Locomotive, *Proc. of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications*, 10 p.

10. Kruchek V.V. Dvukhdizel'naya silovaya ustanovka dlya manevrovogo teplovoza [Two-engine Propulsion for Switcher], (2011), *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta Putei Soobshcheniya Publ.*, St.Petersburg, Russian Federation, Vol. 3(28), pp. 62 – 69 (In Russian).

11. Yarovoi G.I. Sistema pitaniya bortovoi seti dlya modernizatsii teplovozov 2TE10M [On-board Power Supply System for Modernization Diesel Locomotives 2TE10M], (2013), *Sbornik Nauchnykh Trudov: Problemy Avtomatizirovannogo Elektroprivoda. Vestnik NTU "KhPI" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 36 (1009), pp. 183 – 185 (In Russian).



Шамардина  
Вера Николаевна,  
канд. техн. наук, проф.  
Нац. технического ун-та  
«Харьковский политехни-  
ческий ин-т», декан немец-  
кого технического факультета,  
г. Харьков.  
Тел.: (057) 707-69-74;  
E-mail:  
shamardina@kpi.kharkov.ua



Яровой  
Геннадий Иванович,  
зав. отделом тяговых элект-  
ропередатч ГП завода  
«Электротязмаш»,  
г. Харьков.  
Тел.: (057) 727-51-35;  
E-mail:  
tjaga@spetm.com.ua



Лемешко  
Сергей Михайлович,  
научный сотрудник отдела  
тяговых электропередатч  
ГП завода «Электротяз-  
маш», аспирант НТУ  
«ХПИ».  
г. Харьков.  
Тел.: (066) 361-85-88;  
E-mail:  
sergii.lemeshko@i.ua