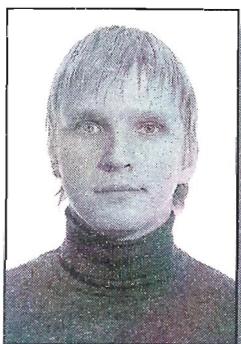


# Диагностирование электромашинного преобразователя электропоезда в условиях эксплуатации



Владимир КОСТЮКОВ  
Vladimir N.KOSTYUKOV

Алексей ЦУРПАЛЬ  
Alexey E.TSURPAL



**Костюков Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО НПЦ «Динамика» (Научно-производственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», Омск, Россия).

**Цурпаль Алексей Евгеньевич** – научный сотрудник ООО НПЦ «Динамика», Омск, Россия.

**Дается оценка существующей системы эксплуатации и ремонта подвижного состава железных дорог. Обозначены основные ее недостатки и способы их устранения, одним из которых является организация надежного мониторинга технического состояния наиболее ответственного оборудования. Приведены описание и особенности функционирования электромашинного преобразователя.**

**Предложена методика диагностирования преобразователя электровоза по параметрам спектра трехфазного переменного тока, в том числе исправного и предаварийного состояния агрегатов. Проверена и подтверждена адекватность методики, это сделано на основе данных, полученных при эксплуатации экспериментальной установки.**

**Ключевые слова:** электровоз, техническая диагностика, электромашинный преобразователь, дисбаланс, спектр переменного тока, бортовая система мониторинга, экспериментальная установка.

Повышение эксплуатационной надежности моторвагонного подвижного состава (МВПС) путем своевременного обнаружения и устранения дефектов на начальной стадии их развития всегда считалось приоритетной задачей системы технического обслуживания и ремонта железнодорожной техники [1].

Существующее положение, при котором подвижной состав поддерживается в надлежащем техническом состоянии за счет системы планово-предупредительных обслуживания и ремонта, предполагает расход большого объема ресурсов на проведение регламентированных работ вне зависимости от фактического состояния того или иного агрегата секции МВПС. Говоря иначе, скрытый характер зарождения дефектов и появления неисправностей приводит к внеплановому ремонту и как следствие – к дополнительным затратам.

Решению обозначенных проблем может помочь бортовая система мониторинга технического состояния, обеспечивающая оценку в реальном времени каждого агрегата и формирование объективной информации о возможности его дальнейшей эксплуатации. Эффективность такой систе-

мы заключается в ее непрерывной работе, то есть постановке диагноза с периодом, во много раз меньшим периода развития неисправности до критического (предельного) состояния [2], что дает возможность ориентироваться на фактическое техническое состояние подвижного состава с уходом от ресурсоемкой планово-предупредительной системы ремонта.

Одной из задач при внедрении упомянутой системы эксплуатации является разработка методики диагностирования технического состояния оборудования вспомогательных цепей МВПС.

Существующие методики функционального диагностирования электрооборудования по параметрам спектра электрического тока предполагают, что в ходе проверки оборудование работает в установленном режиме, а структура электрической цепи не изменяется во времени [3]. Между тем, вспомогательные цепи современных электропоездов обладают сложной топологией и переменной структурой, состоящей из высоковольтной части – цепи постоянного тока с напряжением 3,3 кВ, которая обеспечивает пуск, питание и защиту электромашинного преобразователя, а также питание высоковольтных печей отопления, и низковольтной части – трехфазной цепи переменного тока с линейным напряжением 220 В и частотой 50 Гц, генерируемого электромашинным преобразователем для питания вспомогательного оборудования электропоезда, зарядки аккумуляторной батареи и питания цепей управления.

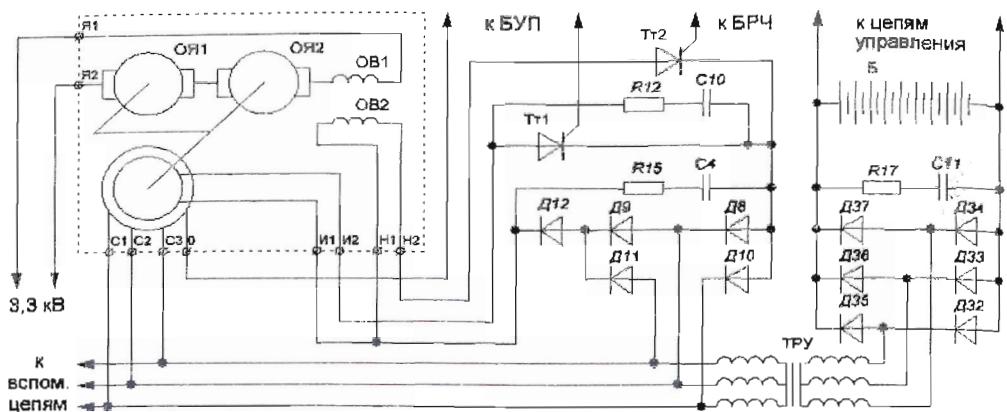
Проведенные исследования [4], а также технический анализ порт, неисправностей и непланового ремонта электропоездов [5] показывают, что в системе вспомогательных цепей постоянного тока, наиболее подверженным внезапным отказам является электромашинный преобразователь (далее – преобразователь).

Преобразователь – это двухмашинный агрегат, состоящий из электрического двигателя постоянного тока и синхронного генератора, расположенных на одном валу. На электропоездах серии ЭД4М начиная с 2011 года выпуска установлен преобразователь 1ПВ.7. Двигатель его представляет собой двухколлекторную машину постоянного тока со смешанным

возбуждением. Одна из обмоток возбуждения (серийная) включена последовательно с обмоткой якоря, другая (независимая) в процессе пуска получает питание от аккумуляторной батареи, а при установленном режиме работы – от выпрямительной установки, питаемой в свою очередь трехфазным напряжением генератора. Генератор преобразователя – четырехполюсная синхронная машина с явно выраженным полюсами, расположенными на валу. Возбуждение генератора – независимое, обмотка возбуждения получает питание аналогично независимой обмотке возбуждения двигателя.

К выводам трехфазной статорной обмотки генератора постоянно подключены выпрямительная установка для питания обмоток возбуждения преобразователя и трехфазный трансформатор, от которого, в свою очередь, получает питание шестипульсовый неуправляемый выпрямитель, обеспечивающий низковольтные цепи управления выпрямленным током напряжением 110 В и заряд аккумуляторной батареи. Остальные потребители пользуются трехфазной цепью переменного тока по необходимости – компрессорный агрегат подключается при падении давления в питательной магистрали электропоезда ниже 6,5 кгс/см<sup>2</sup> и отключается при достижении давления 8 кгс/см<sup>2</sup>, а электрические двигатели вентиляции тамбуров и климатической установки, как и освещение салона и дополнительный обогрев кабины, включаются локомотивной бригадой [6].

Условия работы преобразователя характеризуются существенным колебанием питающего напряжения в пределах от 2,7–4 кВ, а также частым изменением величины нагрузки от 5–7 А на фазу в режиме питания собственных обмоток возбуждения и цепей управления до 170 А в режиме электродинамического торможения, когда ток от генератора преобразователя получает управляемый полупроводниковый выпрямитель, питающий обмотки возбуждения тяговых электродвигателей. На условия работы преобразователя влияют, кроме того, колебания температуры и влажности окружающей среды, значительные знакопеременные динамические нагрузки [7] и, что немаловажно, несоблюдение правил эксплуатации. Наличие перечисленных



*Рис. 1. Схема вспомогательных цепей электропоезда постоянного тока при работе с минимальной нагрузкой.*

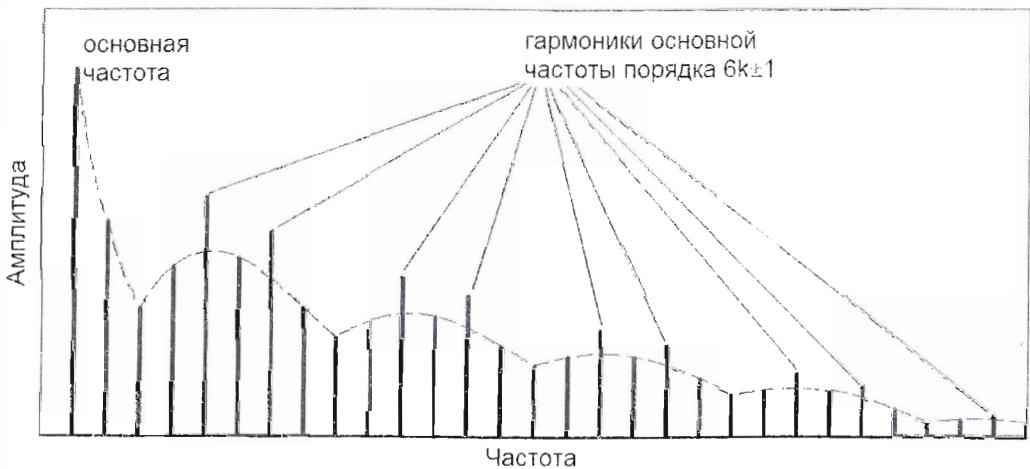
факторов существенно снижает ресурс агрегата и может явиться причиной его преждевременного внезапного выхода из строя и связанных с этим материальных потерь.

Для эффективного диагностирования преобразователя по параметрам спектра трехфазного переменного тока следует осуществлять анализ спектра трехфазного переменного тока при работе преобразователя с минимальной нагрузкой. Это позволяет исключить влияние токов потребителей на форму сигнала переменного тока генератора преобразователя. В данном режиме, как уже отмечалось, почти вся генерируемая мощность расходуется на питание обмоток возбуждения и цепей управления. На рис. I приведена упрощенная электрическая схема вспомогательных

цепей электропоезда при работе с минимальной нагрузкой.

Спектр фазного тока преобразователя при таком режиме (рис. 2) достаточно широк. Присутствуют все гармоники основной частоты, наличие которых вызвано включением в трехфазную цель однополупериодных выпрямителей для питания обмоток возбуждения преобразователя. Их уровень волнообразно убывает с увеличением частоты подобно функции  $|\sin(x)|/x$ . Исключением здесь являются гармоники порядка  $6 \cdot k \pm 1$  ( $k$  – натуральное число), генерируемые трехфазным мостовым выпрямителем, служащим для зарядки аккумуляторной батареи и питания цепей управления.

Физический принцип, положенный в основу спектр-токовой диагностики,



*Рис. 2. Модель спектра фазного тока преобразователя при работе вспомогательных цепей с минимальной нагрузкой.*



Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки.

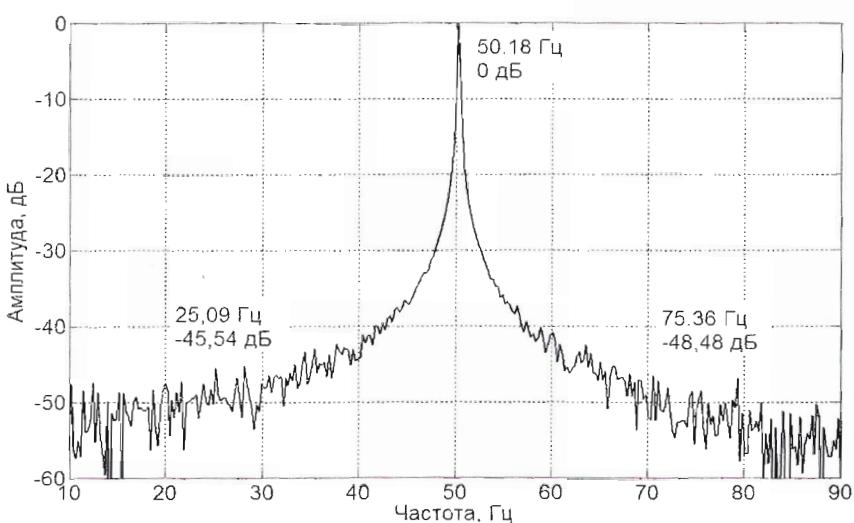


Рис. 4. Спектр фазного тока исправного преобразователя при работе с минимальной нагрузкой.

заключается в том, что любые возмущения в работе электрической и/или механической части электрической машины приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической машины и, следовательно, к модуляции потребляемого или генерируемого тока.

Анализ спектра тока – способ диагностики, при котором в течение заданного интервала времени записывают мгновенные значения токов, потребляемых или генерируемым машиной, производят быстрое преобразование Фурье и выполняют сравнение значений амплитуд на частотах проявления дефектов с уровнем сигнала на основной частоте тока.

Как показывает практика эксплуатации преобразователей, основными причинами выхода их из строя остаются разбалансировка якорей и дефекты подшипников, развитие которых происходит намного быстрее при появлении дисбаланса ротора.

Поэтому для раннего выявления «проблемных» машин стоит уделять особое внимание появлению в спектре тока оборотной частоты в виде модуляции гармоник основной частоты. Так как генератор преобразователя является четырехполюсной машиной, частота вращения вала преобразователя всегда равна половине основной частоты тока, и при наличии дисбаланса ротора в спектре тока должны появиться боковые полосы на расстоянии 25 Гц слева и справа от оборотной и ее гармоник. Таким образом, при вращении вала преобразователя со скоростью 1500 об/мин и соответствующей частоте генерируемого тока 50 Гц надежным диагностическим признаком дисбаланса будет наличие в спектре тока составляющих на частотах 25, 75, 125 Гц и т. д.

Методика диагностирования преобразователей, опирающаяся на анализ спектра трехфазного переменного тока, в данный



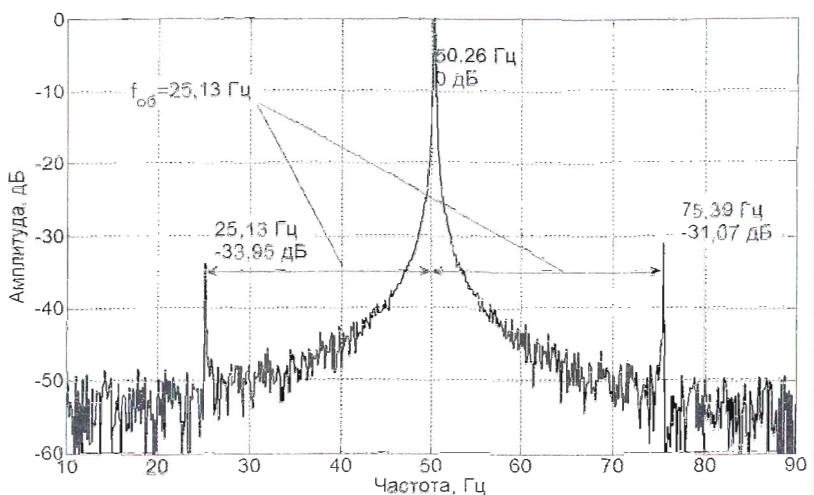


Рис. 5. Спектр фазного тока предаварийного преобразователя при работе с минимальной нагрузкой.

момент реализована в виде экспериментальной установки (рис. 3), состоящей из трансформаторных преобразователей тока, подключенных к аналоговым входам измерительного модуля на базе 8-канального 16-битного дельта-сигма-АЦП и объединенного с ним в локальную сеть ноутбука со специализированным программным обеспечением.

С целью получения экспериментальных данных были записаны сигналы трехфазных переменных токов преобразователей на стадии ввода в эксплуатацию и преобразователей, отработавших от одного до двух лет, в том числе и находившихся в предаварийном состоянии.

В качестве примера на рис. 4 приведена спектrogramма фазного тока исправного преобразователя, а на рис. 5 – преобразователя, находящегося в предаварийном состоянии. Из рис. 5 видно, что в спектре тока предаварийного преобразователя ярко выражены составляющие с частотой 25 и 75 Гц – это модуляция основной частоты, вызванная частотой вращения вала преобразователя. Наличие такой составляющей говорит о дисбалансе ротора [2] преобразователя. Причем в результате осмотра выяснилось, что причиной дисбаланса явилась разбандажировка якорной обмотки двигателя преобразователя.

## ВЫВОДЫ

- Наиболее частой причиной выхода из строя электромашинных преобразо-

вателей является разбандажировка якоря и дефекты подшипников.

- В спектре тока генератора однозначно выделяется оборотная частота.

- Установлено, что при наличии дисбаланса ротора электромашинного преобразователя в спектре трехфазного переменного тока появляются составляющие на оборотной частоте в виде модуляции гармоник основной частоты.

## ЛИТЕРАТУРА

- Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация МВПС на основе мониторинга в реальном времени / В.Н. Костюков, С. В. Сизов, В. П. Аристов, А. В. Костюков // Наука и транспорт. – 2008 (спец. выпуск). – С. 8–13.
- Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
- Петухов В. С., Соколов В. А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 50–52.
- Цурпаль А. Е. Анализ неисправностей вспомогательных машин моторвагонного подвижного состава с целью их диагностирования // Наука, образование, бизнес: Материалы Всерос. науч. – практ. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2011. – С. 222–223.
- Технический анализ порт, неисправностей и нештатного ремонта электропоездов за 2008 год. Управление пригородных пассажирских перевозок Департамента пассажирских сообщений ОАО «РЖД». – М., 2009.
- Просвирин Б. К. Электропоезд постоянного тока с электрическим торможением. – М.: Трансиздат, 2000. – 328 с.
- Федюков Ю. А., Марченко Е. А., Фошкина С. В. Режимы работы и диагностика вспомогательных машин электровозов переменного тока // Локомотив. – 2011. – № 7. – С. 32–33.

## **TROUBLESHOOTING OF TRANSVERTER OF ELECTRIC TRAIN UNDER OPERATION CONDITIONS**

**Kostyukov, Vladimir N.** – D. Sc. (Tech), professor, Director General of LLC RPC «Dynamics» (Research and Production Center «Diagnostics, reliability of machines and integrated automation»), Omsk, Russia.  
**Tsurpal, Alexey E.** – researcher of LLC RPC «Dynamics», Omsk, Russia.

## ABSTRACT

The authors assess the existing system of operation and maintenance of railway rolling stock in Russia; identify its main disadvantages and challenges. They argue that it is crucial to organize reliable monitoring of technical state of the most critical equipment. Following the description of the features of transverter of electric train, they suggest a method of its troubleshooting which is based on monitoring of parameters of spectrum of three-phase alternating current. The method refers to both operational and pre-accident conditions of devices. Adequacy of the procedure is tested and confirmed on the basis of data obtained during the operation of the experimental plant.

## **ENGLISH SUMMARY**

**Background.** Improvement of operational reliability of multiple units (hereinafter referred to as MU) by early detection and elimination of defects has always been a priority task for maintenance and repair system of railway technics [1].

The current situation, in which the rolling stock is maintained in good technical condition due to the system of preventive maintenance and repair, involves a large amount of resources spent to carry out regulated works, regardless of the actual state of a device of MU section. In other words, the hidden nature of nucleation of defects and malfunctions leads to unplanned repairs and as a consequence – to additional costs.

The identified problems can be solved with the help of on board monitoring system of technical condition, providing real-time evaluation of each device and compiling of objective information about possibility of its further operation. The effectiveness of such a system is ensured by its continuous operation, i. e. diagnosing with the period, which is many times smaller than the period of development of the fault to the critical (limiting) state [2], which makes it possible to focus on the actual technical condition of the rolling stock instead of resource-intensive planning and preventative repair system.

**Objective.** The objective of the authors is to introduce a method of diagnosing the parameters of transverter of electromotive rolling stock with the help of data obtained during the operation of experimental plant.

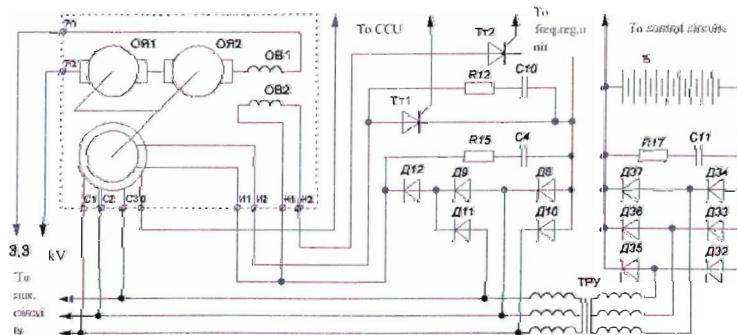
**Methods.** The authors used mathematical method, analysis and experimental method using special experimental plant.

**Results.** One of the tasks for the implementation of the mentioned system of operation is the development of methods of troubleshooting of the technical condition of equipment of MU auxiliary circuits.

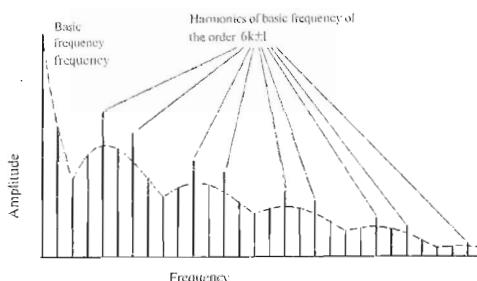
Existing techniques for functional troubleshooting of electrical equipment based on parameters of the spectrum of an electric current imply that during the inspection equipment is operating in a steady mode, and the structure of the electrical circuit does not change over time [3]. Meanwhile, auxiliary circuits of modern trains have a complex topology and variable structure, consisting of a high-voltage part – DC circuit with 3,3 kV voltage, which provides start, supply and protection of a rotary converter, as well as supply of high-powered heating furnaces and a low-voltage part – three-phase AC circuit with linear voltage of 220 V and frequency of 50 Hz generated by rotary converters or transverters for electric power supply of auxiliary equipment, battery charging and supply of drive circuits.

Studies [4], as well as technical analysis of spoilage, malfunctions and unplanned repairs of electric trains [5] show that in the system of auxiliary DC circuits rotary converter or transverter (hereinafter - converter) is the most susceptible to sudden failures.

Converter is a two-machine unit, composed of a DC electric motor and a synchronous generator disposed on the same shaft. Electric trains of ED4M series are equipped with converter 1.PV.7 since 2011. Its engine is a double-collector DC machine with compound excitation. One of drive windings (series) is connected consistently with the armature winding and the other (independent) during start is powered by a battery, and at a steady mode of operation – from the rectifier unit, powered in turn by three-phase



**Pic. 1.** Auxiliary circuit diagram of an DC electric train during operation with a minimum load.

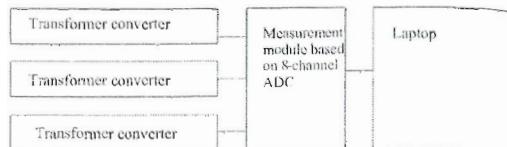


**Pic. 2. Model of phase current spectrum of the converter during operation of auxiliary circuits with minimal load.**

voltage of the generator. Generator of a converter is a four-pole synchronous machine with salient poles located on the shaft. Excitation of the generator is independent; drive winding is powered similarly to independent drive winding of the engine.

The ends of three-phase generator stator winding are permanently connected with rectifier unit to power drive windings and three-phase transformer, from which 6-pulse uncontrolled rectifier is powered, which provides low-voltage control circuits with rectified current of 110 volts and the battery charge. Other consumers use three-phase AC circuit as needed – compressor unit turns on with a pressure drop in the feed network of electric train below  $6,5 \text{ kgf/cm}^2$  and it turns off when the pressure reaches  $8 \text{ kgf/cm}^2$ . Electric motors of enclosed platforms' ventilation and air conditioning system, as well as interior lighting and additional cabin heating, are turned on by locomotive crew [6].

Working conditions of a converter are characterized by a significant variation in feed voltage in the range of 2,7–4 kV, as well as frequent changes in the load from 5–7 A per phase in the mode of feeding of own drive windings and control circuits up to 170 A in the electrodynamic braking mode when controlled semiconductor rectifier receives the current from converter's generator, feeding thus drive windings of traction motors. Working conditions of a converter are influenced, moreover, by fluctuations in temperature and humidity of the environment, significant alternating dynamic loads [7] and, importantly, mishandling. The presence of these factors significantly reduces the resource of a device and may cause its premature sudden failure and related material losses.



**Pic. 3. Block diagram of experimental plant.**

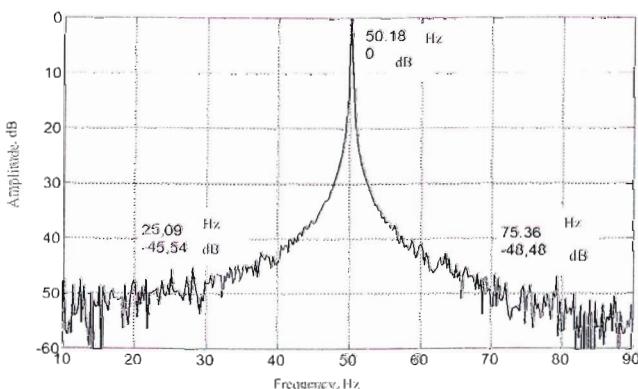
To effectively diagnose the converter within the framework of the parameters of the spectrum of three-phase alternating current, analysis of three-phase alternating current should be carried out when converter operates with a minimum load. It allows to exclude influence of consumers' currents on the AC waveform of a converter's generator. In this mode, as already noted, almost all of generated power is spent on power supply of drive windings and control circuits. Pic. 1 shows a simplified circuit diagram of auxiliary circuits of an electric train with minimal load.

Spectrum of phase current of a converter in this mode (Pic. 2) is quite wide. There are all harmonics of the basic frequency, the presence of which is caused by inclusion of a single-wave rectifier in a three-phase circuit for power supply of converter's drive windings. Their level decreases wavy with increasing frequency similar to function  $|\sin(x)|/x$ . The exceptions here are harmonics of the order  $6 \cdot k \pm 1$  ( $k$  is a natural number) generated by a three-phase bridge rectifier, which serves to charge the battery and supply control circuits.

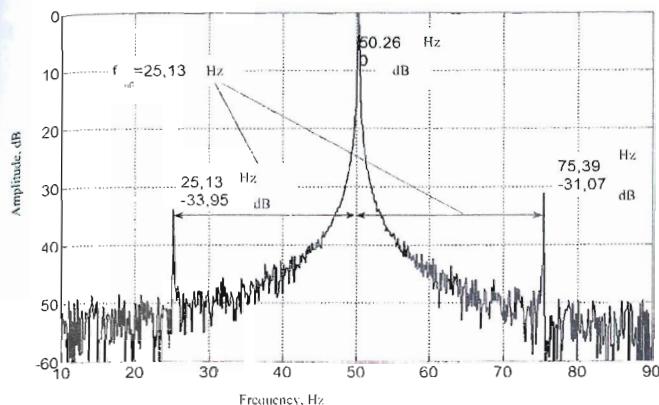
The physical principle as a principle of spectrum-current diagnosis, is that any disturbance in operation of electrical and / or mechanical part of the electric machine leads to changes in magnetic flux in the gap of the electric machine, and consequently to a modulation of the current consumed or generated.

Current spectrum analysis is a diagnostic method in which within the specified time interval instantaneous values of currents, consumed or generated by the machine, are recorded. A fast Fourier transform is produced and the values of the amplitudes at frequencies of defects' appearance are compared with the signal level at current's basic frequency.

For early detection of «problem» machines special attention should be paid to the appearance of rotational frequency in the current spectrum in the form of modulation of harmonics of the basic frequency. Since the converter's generator is a four-pole machine, speed of converter shaft is always equal to half of the basic frequency of current



**Pic. 4. Spectrum of phase current of a converter in working order during operation with minimal load.**



**Pic. 5. Spectrum of phase current of a converter in pre-accident state during operation with minimal load.**

and if there is an imbalance of the rotor, sidebands should appear in the current spectrum at 25 Hz on the left and right of the rotational frequency and its harmonics. Thus, when converter shaft rotates at 1500 rev / min and the corresponding frequency of generated current is 50 Hz, reliable diagnostic feature of the imbalance is the presence in the current spectrum of components at frequencies of 25, 75, 125 Hz, etc.

Technique of converters' troubleshooting, based on spectrum analysis of three-phase alternating current, is currently implemented in the form of experimental plant (Pic. 3), consisting of transformer converters connected to the analog inputs of the measurement module based on 8-channel 16-bit delta-sigma ADC and a laptop within a local network with specialized software

In order to obtain experimental data signals of three phase alternating current of converters were recorded at the commissioning stage, as well as the signals of the converters, which were in operation

from one to two years, including those, which were in pre-accident state.

As an example, Pic. 4 shows spectral recording of the phase current of a converter in working order, and Pic. 5 does the same for a converter in pre-accident state. Studying Pic. 5 one can easily see the pronounced components of a pre-accident converter with a frequency of 25 Hz and 75 Hz. It is the basic frequency modulation due to the frequency of rotation of the converter. The presence of such a component confirms rotor unbalance [2] of the converter.

**Conclusions.** 1. The most common cause of failures of rotary converters is connected to rotor and bearing defects.

2. Rotational frequency is clearly identified within the current spectrum of the generator.

3. It is established that if there is a rotor imbalance of a converter, then one can observe components at rotational frequency within the three-phase current spectrum in the form of modulation of basic frequency harmonics.

**Keywords:** electromotive, technical diagnostics, troubleshooting, transverter, imbalance, AC spectrum, on board monitoring system, experimental plant.

## REFERENCES

1. Kostyukov, V. N., Sizov, S. V., Aristov, V. P., Kostyukov, A. V. Safe resource efficient operation of multiple unit based on real-time monitoring [Bezopasnaya resursosberegayushchaya ekspluatatsiya MVPS na osnove monitoringa v real'nom vremeni]. Nauka i transport, 2008, pp. 8–13.
2. Kostyukov, V.N., Naumenko, A. P. Fundamentals of diagnosis and monitoring of machines: machines. Tutorial [Osnovy diagnostiki i monitoringa mashin: uchebnoe posobie]. Omsk, OmGTU publ., 2011, 360 p.
3. Petuhov, V.S., Sokolov, V. A. Troubleshooting of the state of electric motors. Spectral analysis of current consumption [Diagnosika sostoyaniya elektrorodigateley. Metod spektral'nogo analiza potrebylaemogo toka]. Novosti elektrotehniki, 2005, No.1, vol.31, pp.50–52.
4. Tsurpal, A. E. Fault analysis of auxiliary machines of multiple units for the purpose of troubleshooting [Analiz neispravnostey vspomogatel'nyh mashin motorvagonnogo podvizhnogo sastava s tsel'yu ih diagnostirovaniya]. In: Science, education,
- business. Works of Russian scientific and practical conference [Nauka, obrazovanie, biznes: Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf.]. Omsk, OmGTU publ., 2011, pp. 222–223.
5. Technical analysis of spoilage, malfunctions and unplanned repairs of electric trains in 2008. Commuter services administration of passenger traffic department of JSC Russian Railways [Tehnicheskiy analiz poruch, neispravnostey i neplanovogo remonta elektropoezdov za 2008 god. Upravlenie prigorodnyh passazhirskih perevozok Departamenta passazhirskih soobscheniy OAO «RZhD»]. Moscow, 2009.
6. Prosvirin, B.K. DC electric trains with electric braking [Elektropoezda postoyannogo toka s elektricheskim tormozheniem]. Moscow, Transizdat publ., 2000, 328 p.
7. Fedyukov, Yu.A., Marchenko, E.A., Foshkina, S. V. Modes of operation and diagnostics of auxiliary machines of AC locomotives [Rezhimy raboty i diagnostika vspomogatel'nyh mashin elektrovozov peremennogo toka]. Lokomotiv, 2011, No. 7, pp. 32–33.

Координаты авторов (contact information): Костюков В. Н. (Kostyukov, V.N.), Цурпаль А. Е. (Tsurpal, A.E.) – post@dynamics.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 10.04.2014

Принята к публикации / article accepted 15.06.2014

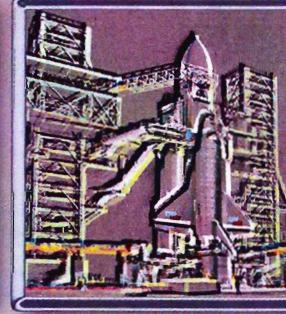
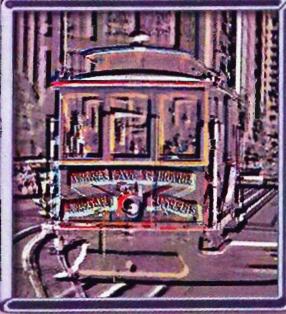
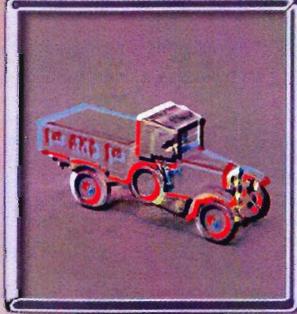
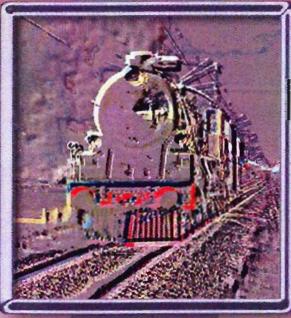
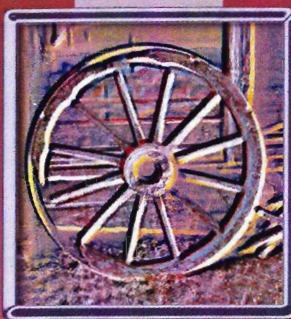
# Транспорт

# TRANSPORT

4 2014

•ТЕОРИЯ•ИСТОРИЯ  
•КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

КОНКУРЕНЦИЯ ТРЕБУЕТ  
ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ



Стр. 76

# Транспорт

•ТЕОРИЯ •ИСТОРИЯ  
•КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

4 2014  
(53)

## СОДЕРЖАНИЕ

### Учредитель:

Московский  
государственный  
университет путей  
сообщения (МИИТ)

### Редакционный совет:

**Б. А. Лёвин** – доктор технических наук, профессор МИИТ – председатель совета

**Б. В. Гусев** – член-корреспондент РАН – заместитель председателя совета

**В. И. Галахов** – доктор технических наук, профессор МИИТ – ответственный секретарь совета

**И. С. Беседин** – кандидат технических наук

**Ф. С. Гоманков** – кандидат технических наук, профессор МИИТ

**А. А. Горбунов** – доктор политических наук, профессор МИИТ

**Н. А. Духно** – доктор юридических наук, профессор МИИТ

**Д. Г. Евсеев** – доктор технических наук, профессор МИИТ

**Л. А. Карпов** – кандидат технических наук, профессор МИИТ

**В. И. Колесников** – академик РАН, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения

**К. Л. Комаров** – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного университета путей сообщения

**Б. М. Лапидус** – доктор экономических наук, профессор

**В. П. Мальцев** – доктор технических наук, профессор МИИТ

**Л. Б. Миротин** – доктор технических наук, профессор Московского автодорожного государственного технического университета (МАДИ)

**Н. П. Терёшина** – доктор экономических наук, профессор МИИТ

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

*Александр КОГАН, Ирина ПОЛЕЩУК*

Оценка вибрации пути при высоких скоростях движения . . . . . 6

*Юрий ЧЕРНОВ, Максим ГАВРИЛОВ*

Многопроводные тяговые сети переменного тока . . . . . 16

*Марина ЗОТОВА*

О законе распределения вероятностей случайной величины . . . . . 24

*Ирина САФОНОВА, Яков ГОЛДОВСКИЙ, Борис ЖЕЛЕНКОВ*

Моделирование СУБД с ограниченной циркуляцией сегментов . . . . . 32

## НАУКА И ТЕХНИКА

*Владимир КОСТИКОВ, Алексей ЦУРПАЛЬ*

Диагностирование электромашинного преобразователя электропоезда в условиях эксплуатации . . . . . 46

*Виктор НАЗАРОВ*

Работоспособность жестких покрытий зоны приземления самолетов . . . . . 54

*Алексей КУБРАК*

Эксплуатационная надежность пассажирских станций . . . . . 60

*Александр ЗОЛКИН, Роман ФИСЮРЕНКО*

Конструкция электровоза с поворотной рамой . . . . . 66

## ЭКОНОМИКА

*Ирина КАРАПЕТЯНЦ, Сергей САЗОНОВ*

Приоритеты китайских скоростей . . . . . 76

*Гаяхар КЕНЖЕБАЕВА, Салтанат БАДАМБАЕВА*

Мультимодальная сеть Казахстана: проектирование этапного развития . . . . . 88

*Владилен ТЕГИН, Борис УСМАНОВ*

Краудфандинг как стратегия инвестирования в инновации . . . . . 98