

Nº 1(25)

Периодичность - 4 выпуска в год

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

- 1. Овчаренко Сергей Михайлович главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
- 2. Галиев Ильхам Исламович зам. главного редактора, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
- 3. Шантаренко Сергей Георгиевич зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
- 4. Черемисин Василий Титович зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
- 5. Бокарев Сергей Александрович проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
- 6. Глинка Тадеуш доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
- 7. Дёмин Юрий Васильевич профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
- 8. Камаев Валерий Анатольевич зав. кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» ВолгГТУ, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Волгоград).
- 9. Каргапольцев Сергей Константинович проректор по научной работе ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
- 10. Косарев Александр Борисович зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
- 11. Лю Цзянькунь доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
- 12. Сидоров Олег Алексеевич зав. кафедрой «Электроснабжение келезнодорожного транспорта» ОмГУПСа, д.т.н., профессор
- 3. Солоненко Владимир Гельевич профессор кафедры Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
- 14. Файзибаев Шерзод Сабирович проректор по научной работе ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
- 15. Харламов Виктор Васильевич зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.

#### EDITORIAL BOARD

- 1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
- 2. Galiev Ilkham Islamovich deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
- 3. Shantarenko Sergey Georgievich deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
- 4. Cheremisin Vasily Titovich deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
- 5. Bokaryov Sergey Alexandrovich vice-rector for research of SSTU,
- D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).

  6. Glinka Tadeusz Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
- 7. Demin Yury Vasilyevich professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
- 8. Kamaev Valery Anatolyevich head of the department «Systems of AHHОТАЦИИ automated designing» of VSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Volgograd, Russia).
- 9. Kargapoltcev Sergey Konstantinovich vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
- 10. Kosarev Alexander Borisovich deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow,
- 11. Liu Jiankun Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University,
- School of Civil Engineering (Beijing, China).

  12. Sidorov Oleg Alexeevich head of the department «Power supply of
- rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

  13. Solonenko Vladimir Gelyevich professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
- 14. Fayzibaev Sherzod Sabirovich vice-rector for research of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
- (Omsk, Russia).

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### Подвижной состав железных дорог

Анисимов А. С., Чернышков И. В. Моделирование процесса сгорания топлива	
в дизеле тепловоза с использованием уравнения двухфазного тепловыделения	. 2
Галиев И. И., Гателюк О. В., Лукс Д. Ю., Ушак В. Н. Совершенствование динами-	
ческих качеств грузовых вагонов в эксплуатации	10
Гиоев З. Г., Приходько В. М., Козаев В. С. Вибрационное прогнозирование	
технического состояния тяговых электрических машин локомотивов	15
Доронин С. В., Доронина И. И. Управление движением локомотивных тележек	
в кривых	25
Костюков В. Н., Костюков А. В., Казарин Д. В., Басакин В. В. Оценка однородности	
вибрационных параметров однотипных узлов электропоезда	30
Красотина Л. В. Учет совместной работы элементов сборных однослойных оболо-	
чечных конструкций подвижного состава железных дорог	35
Михеев В. А., Сергеев П. Б. Оперативная оценка технического состояния топливной	
системы энергетической установки тепловоза	41
Щелканов А. В. Разработка логико-лингвистической модели пневматической	
системы электропоезда для задач диагностики	48

#### Транспортная энергетика

Кандаев В. А., Пономарев А. В., Авдеева К. В., Колесник А. В. Метод определения	
коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети	54
Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Методология оценки энергети-	
ческой эффективности применения рекуперативного торможения и использования	
энергии рекуперации	60

#### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Альтман Е. А., Ананьева Н. Г., Тихонова Н. А. Применение алгоритмов компьютер-	
ного зрения для детектирования объектов на железнодорожном переезде	O
Афоничев Н. Ю., Шахов В. Г. Метод поиска оптимального и наиболее близких	
к нему маршрутов перевозки грузов	6
Скляр А. В., Чижма С. Н. Сравнительный анализ методов оценки скорости вращения	
ротора асинхронного двигателя по спектру потребляемого тока	1

#### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Псеровская	E.	Д.,	Кагадий	И.	H.	Моделирование	грузовой	работы	станции	во	
взаимолейст	гви	и с п	утами нес	ofin	iero	пользования					91

#### Организация производства на транспорте

базилевич С. В., Васильев С. И., Кузнецов С. М. Минимизация риска при опре-	
елении продолжительности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных машин 96	
убежанский П. Н., Давыдов А. В. Концепция развития локомотиворемонтного	
омплекса «РЖД»	

15. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical Научно-полителний журнили «Ивпосити» Транесиба» machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor Упрединення Омений посущерственный универсинет пуней сообщении 644046, г. Омек, пр. Маркеа, 35

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.424

А. С. Анисимов, И. В. Чернышков

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ ТЕПЛОВОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

В статье описаны различные подходы к определению динамики тепловыделения в дизеле, проанализирована структура уравнения Пугачева, показан способ подбора параметров характеристики тепловыделения, приведены результаты расчета линии сгорания и их сравнение с опытными данными.

В теории двигателей внутреннего сгорания существенное внимание уделяется проблеме математического описания характеристики тепловыделения при решении прямой задачи моделирования рабочего процесса. Развитие этой проблемы имеет богатую историю, и до настоящего времени она не решена окончательно.

Существует множество подходов к расчету скорости тепловыделения в цилиндре поршневого двигателя. В разное время рядом авторов предлагались уравнения для определения закона сгорания, среди них: Б. М. Гончар, Н. С. Акулов, Н. Н. Семенов, Н. В. Иноземцев, В. К. Кошкин, И. И. Вибе, Б. П. Пугачев, Н. Ф. Разлейцев и др. [1].

Наиболее распространенным является закон тепловыделения Вибе [2]:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\ln(1 - x_z)(m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{\ln(1 - x_z) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}},\tag{1}$$

где m — показатель характера сгорания;

 $\phi_z$  – продолжительность сгорания;

 $x_z$  – доля топлива, сгоревшего к моменту условного конца сгорания;

ф – угол поворота коленчатого вала, считая от начала сгорания.

Уравнение Вибе, несложное по структуре и удобное в использовании, позволяет подбором показателя характера сгорания и продолжительности сгорания достичь хорошей сходимости с экспериментальными данными. Помимо этого данное уравнение позволяет абстрагироваться от учета влияния на процесс сгорания различных факторов (закон впрыскивания топлива, количество топлива, поданного за период задержки воспламенения и др.), что является преимуществом, когда не требуется отдельно рассматривать влияние этих факторов на рабочий процесс, но недостатком в обратном случае. Особенностью уравнения (1) является также возможность моделирования только однофазного процесса тепловыделения, поэтому для точного описания ярко выраженного двухфазного сгорания необходимо модифицирование этого уравнения добавлением второй функции [3]:

$$\frac{dx}{d\varphi} = 6,908(m_1 + 1) \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1} e^{-6,908\left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1+1}} + 6,908(m_2 + 1) \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}}\right)^{m_2} e^{-6,908\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}}\right)^{m_2+1}}, \quad (2)$$

где  $m_1$  – показатель характера сгорания первой фазы;

ф1 – угол поворота коленчатого вала, считая от начала первой фазы;

 $\phi_{z1}$  – продолжительность первой фазы;

 $m_2$  – показатель характера сгорания второй фазы;

 $\phi_2$  – угол поворота коленчатого вала, считая от начала второй фазы;

 $\phi_{72}$  – продолжительность второй фазы.

Принципиально другой подход к определению скорости сгорания в цилиндре двигателя разработан Н. Ф. Разлейцевым, который предложил учитывать влияние на характеристику

тепловыделения физико-химических факторов (испарение топлива, диффузия, химические взаимодействия). Для этого используется уравнение, представленное в работе [4]:

$$\frac{dx}{d\varphi} = A\alpha_{\rm T}(\sigma - x)x,\tag{3}$$

где A — коэффициент, определяющийся режимом работы двигателя;

 $\alpha_{\!\scriptscriptstyle T}$  – текущее значение коэффициента избытка воздуха в зоне пламени;

 $\sigma$  – доля впрыснутого в цилиндр топлива.

Применение уравнения (3) позволяет исследовать влияние параметров впрыска топлива (давление впрыска, мелкость распыливания и т. д.) и смесеобразования (движение воздушных потоков в цилиндре, распространение топливного факела и т. д.) на процесс сгорания в дизеле, что отличает его от всех других известных формул. Главным недостатком уравнения (3) является большое количество эмпирических коэффициентов, которые необходимо определять экспериментально или задавать приближенно, что усложняет применение данного уравнения.

Уравнение, предложенное Б. П. Пугачевым, использующее похожий с уравнениями Гончара и Вибе принцип и описывающее двухфазное тепловыделение, содержит два слагаемых соответствующих кинетической и диффузионной фазам [5, 6]:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{x_1}{\varphi_1^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_1^2}} + \frac{x_2}{\varphi_2^2} \varphi e^{-\frac{\varphi^2}{2\varphi_2^2}},\tag{4}$$

где  $x_1$  – доля тепла, выделившегося в первой фазе;

 $x_2$  – доля тепла, выделившегося во второй фазе;

 $\phi_1$  – продолжительность от начала сгорания до момента максимальной скорости тепловыделения в первой фазе;

 $\phi_2$  — продолжительность от начала сгорания до момента максимальной скорости тепловыделения во второй фазе.

Уравнение (4) содержит четыре эмпирических коэффициента, что осложняет, в сравнении с законом Вибе, его применение. Тем не менее с помощью данного уравнения становится возможным моделирование сгорания топлива в дизеле при различных формах характеристики тепловыделения (однофазной или двухфазной, с ярко выраженной кинетической или диффузионной фазой) без необходимости рассмотрения сложных физико-химических процессов.

Известно, что выделение тепла в результате сгорания топлива в цилиндре дизеля проходит в два этапа [7]. Первый этап, так называемая кинетическая фаза, характеризуется быстрым выделением тепла вследствие теплового взрыва, на втором этапе, в диффузионной фазе, наблюдается относительно медленное тепловыделение, лимитируемое скоростью турбулентной диффузии зон, богатых кислородом, с одной стороны, и зон с избытком паров топлива — с другой. Однако у разных типов дизельных двигателей процесс выделения тепла может проходить по-разному: с ярко выраженной кинетической фазой или без нее, в последнем случае тепловыделение можно считать однофазным (рисунок 1).

Тепловозные дизели имеют разнообразную конструкцию и организацию рабочего процесса, а это в свою очередь приводит к наличию разнообразных характеристик тепловыделения. Так, дизель Д50 имеет характеристику тепловыделения с двумя максимумами [8], а дизель Д70 – с одним [9].

Исходя из этого логично предположить, что уравнение (4) можно использовать для моделирования сгорания дизелей как с однофазным, так и с двухфазным тепловыделением. Перед использованием данного уравнения следует проанализировать его структуру.

Так, форма характеристики тепловыделения по формуле Пугачева однозначно определяется четырьмя параметрами  $-x_1$ ,  $x_2$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ .

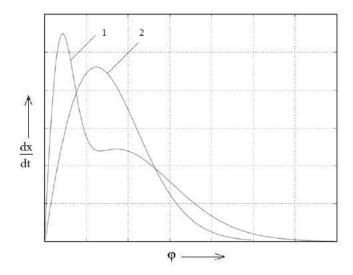


Рисунок 1 – Характеристики тепловыделения: 1 – при двухфазном тепловыделении с ярко выраженной кинетической фазой; 2 – при однофазном тепловыделении

Влияние параметра  $x_1$  на дифференциальную и интегральную характеристики тепловыделения представлено на рисунке 2, а непосредственно на линию сгорания — на рисунке 3. Для анализа влияния параметров уравнения тепловыделения на линию сгорания применялась математическая модель процесса сгорания топлива в дизеле типа Д49, при этом сгорание топлива начиналось за 11  $^{\circ}$ п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ), давление начала сгорания было 6 МПа.

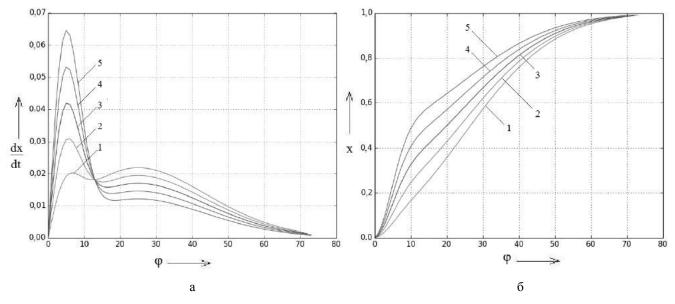


Рисунок 2 — Дифференциальная (а) и интегральная (б) характеристики тепловыделения при  $\varphi_1 = 5$  °п.к.в.,  $\varphi_2 = 25$  °п.к.в. и различных значениях  $x_1$ :  $1 - x_1 = 0,1$ ;  $2 - x_1 = 0,2$ ;  $3 - x_1 = 0,3$ ;  $4 - x_1 = 0,4$ ;  $5 - x_1 = 0,5$ 

Параметр  $x_1$  определяет долю тепла, выделившегося в первой фазе сгорания, к общей доле тепла, выделившегося за весь рабочий цикл. Соответственно при неизменных  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  с ростом  $x_1$  увеличивается средняя скорость тепловыделения в первой фазе, которая существенно влияет на значение максимального давления сгорания и на момент достижения максимального давления. Как видно из рисунка 3, при росте  $x_1$  максимальное давление быстро увеличивается и располагается ближе к ВМТ. Кроме того, следует заметить, что сумма  $x_1$ 

и  $x_2$ , очевидно, всегда будет равна единице, а значит, можно исключить  $x_2$  из уравнения, заменив его на  $1-x_1$ .

На рисунках 4 и 5 проиллюстрировано влияние параметра  $\phi_1$  на дифференциальную и интегральную характеристики тепловыделения и на линию сгорания.

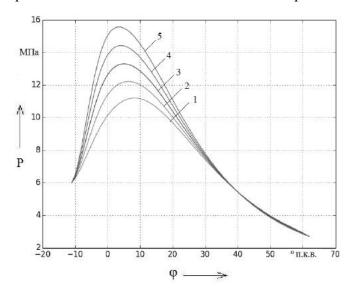


Рисунок 3 — Давление газов в цилиндре в процессе сгорания топлива при  $\phi_1 = 5$  °п.к.в.,  $\phi_2 = 25$  °п.к.в. и различных значениях  $x_1$ :  $1 - x_1 = 0,1$ ;  $2 - x_1 = 0,2$ ;  $3 - x_1 = 0,3$ ;  $4 - x_1 = 0,4$ ;  $5 - x_1 = 0,5$ 

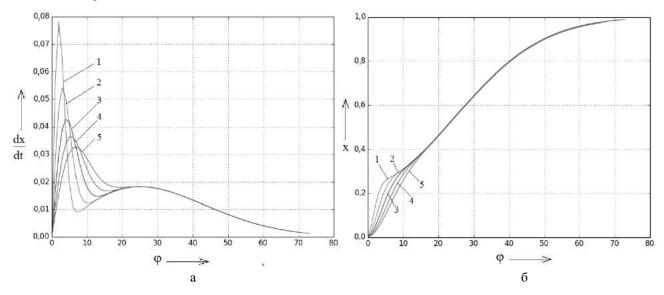


Рисунок 4 — Дифференциальная (а) и интегральная (б) характеристики тепловыделения при  $x_1=0.25$ ,  $\phi_2=25$  °п.к.в. и различных значениях  $\phi_1$ :  $1-\phi_1=2$  °п.к.в.;  $2-\phi_1=3$  °п.к.в.;  $3-\phi_1=4$  °п.к.в.;  $4-\phi_1=4$  °п.к.в.;  $5-\phi_1=6$  °п.к.в.

Параметр  $\phi_1$  в уравнении Пугачева определяет момент достижения максимальной скорости тепловыделения в кинетической фазе. При неизменном  $x_1$  с увеличением  $\phi_1$  максимальная скорость тепловыделения уменьшается, момент ее достижения отодвигается от начала сгорания, а нарастание давления в цилиндре происходит более плавно. На максимальное давление в цилиндре этот параметр не оказывает значительного влияния, как и на дальнейшее развитие сгорания.

Влияние параметра  $\phi_2$  на дифференциальную и интегральную характеристики тепловыделения представлено на рисунке 6, на линию сгорания — на рисунке 7.

Параметр  $\phi_2$  в уравнении Пугачева определяет момент достижения максимальной скорости тепловыделения в фазе диффузионного сгорания. При неизменных  $x_1$  и  $\phi_1$  с увеличением

 $\phi_2$  деление на две фазы становится более выраженным, максимальная скорость тепловыделения во второй фазе уменьшается, значительно снижается максимальное давление в цилиндре и увеличивается продолжительность сгорания.

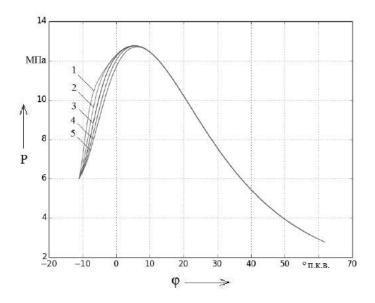


Рисунок 5 — Давление газов в цилиндре в процессе сгорания топлива при  $x_1 = 0.25$ ,  $\varphi_2 = 25$  °п.к.в. и различных значениях  $\varphi_1$ :  $1 - \varphi_1 = 2$  °п.к.в.;  $2 - \varphi_1 = 3$  °п.к.в.;  $3 - \varphi_1 = 4$  °п.к.в.;  $4 - \varphi_1 = 5$  °п.к.в.;  $5 - \varphi_1 = 6$  °п.к.в.

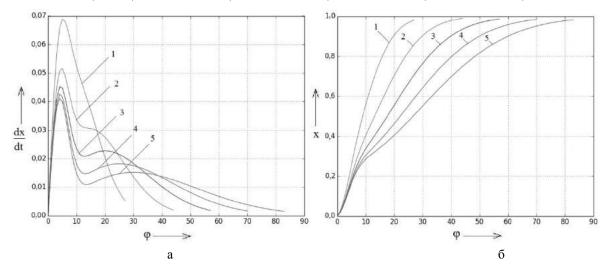


Рисунок 6 — Дифференциальная (а) и интегральная (б) характеристики тепловыделения при  $x_1=0.25$ ,  $\phi_1=4$  °п.к.в. и различных значениях  $\phi_2$ :  $1-\phi_2=10$  °п.к.в.;  $2-\phi_2=15$  °п.к.в.;  $3-\phi_2=20$  °п.к.в.;  $4-\phi_2=25$  °п.к.в.;  $5-\phi_2=30$  °п.к.в.

Исходя из всего изложенного выше ясно, что каждый параметр в уравнении Пугачева оказывает значительное влияние на процесс сгорания и не представляется возможным выделить влияние отдельно взятого параметра на какие-либо характеристики процесса сгорания, т. е. такие характеристики, как продолжительность сгорания, максимальное давление цикла, определяются влиянием только всех трех параметров. Следовательно, разными сочетаниями величин, входящих в уравнение, можно получить одинаковые линии сгорания, следовательно, при моделировании сгорания возникает задача выбора значений параметров уравнения, верно описывающих протекание процесса тепловыделения.

Таким образом, для использования уравнения Пугачева при моделировании сгорания топлива в дизеле необходимо решить две задачи. Первая задача состоит в выборе значений  $x_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , наиболее подходящих для моделируемого режима работы двигателя, вторая задача —

определение продолжительности сгорания, поскольку в уравнении Пугачева такая величина не содержится.

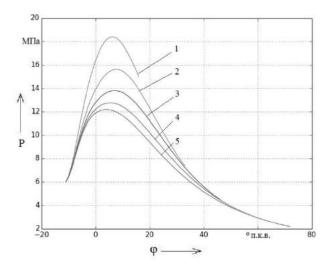


Рисунок 7 — Давление газов в цилиндре в процессе сгорания топлива при  $x_1$  = 0,25,  $\phi_1$  = 4 °п.к.в. и различных значениях  $\phi_2$ : 1 —  $\phi_2$  = 10 °п.к.в.; 2 —  $\phi_2$  = 15 °п.к.в.; 3 —  $\phi_2$  = 20 °п.к.в.; 4 —  $\phi_2$  = 25 °п.к.в.; 5 —  $\phi_2$  = 30 °п.к.в.

Для решения первой задачи предлагается следующая последовательность действий. При моделировании процесса сгорания выбирается ряд сочетаний коэффициентов уравнения Пугачева, при которых значение максимального давления цикла попадает в заданный интервал  $p_z \pm \Delta p$ , где значение  $p_z$  определяется экспериментально или задается,  $\Delta p = 0.1$  МПа.

Для каждого набора коэффициентов, т. е. для каждой из выбранных характеристик тепловыделения, определяется отношение максимальной скорости тепловыделения в кинетической фазе к максимальной скорости в диффузионной фазе тепловыделения. В таблице 1 представлены выборка  $x_1$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и отношение скоростей тепловыделения для дизеля 2A-5Д49.

Таблица 1 – Выборка коэффициентов характеристики тепловыделения для дизеля 2А-5Д49 по условию максимального давления сгорания 13±0,1 МПа

Номер выборки	$x_1$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\frac{dx_{1\text{max}}/d\varphi}{dx_{2\text{max}}/d\varphi}$
1	0,03	5	27	0,46
2	0,02	3	26	0,365
3	0,05	3	28	0,67

В работе [6] представлено выражение, полученное по результатам экспериментов, которое позволяет для дизелей с объемным смесеобразованием определить отношение максимальных скоростей тепловыделения:

$$\frac{dx_{1\text{max}}/d\varphi}{dx_{2\text{max}}/d\varphi} = 2.6 + 1.4 \frac{n}{1000} - 0.4 \frac{p_k - p_o}{p_o} - 2.3 \frac{\text{LIY}}{45},\tag{5}$$

где n — частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>;

 $p_k$  – давление наддува, МПа;

 $p_{o}$  – нормальное атмосферное давление, МПа;

ЦЧ – цетановое число топлива.

Выполняя расчет по уравнению (5), получаем для дизеля 2A-5Д49 отношение скоростей 0,64. В таблице 1 находим ближайшие по значению к полученной по уравнению (5) величине отношения скоростей и определяем наиболее подходящие параметры характеристики тепловыделения. Так, ближайшее значение отношения скоростей равно 0,67, что соответствует сочетанию коэффициентов выборки № 3.

Для решения задачи определения продолжительности сгорания предлагается использовать выражение, приведенное в работе [6]:

$$\varphi_{\rm Cr} = 1.5 \left( \frac{x_1}{dx_{1\rm max}/d\varphi} + \frac{x_2}{dx_{2\rm max}/d\varphi} \right), \tag{6}$$

где  $x_1$  – доля тепла, выделившегося в первой фазе;

 $x_2$  – доля тепла, выделившегося во второй фазе;

 $dx_{1 \text{ max}}/d\phi$  – максимальная скорость тепловыделения в первой фазе;

 $dx_{2 \text{ max}}/d\phi$  – максимальная скорость тепловыделения во второй фазе.

Согласно выражению (6) продолжительность сгорания зависит только от формы характеристики тепловыделения, т. е. однозначно определяется параметрами  $x_1$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ . В таблице 2 представлены значения продолжительности сгорания при разных величинах параметров характеристики тепловыделения, полученные по выражению (6).

Таблица 2 – Продолжительность сгорания при различных параметрах характеристики тепловыделения

$x_1$	$\phi_1$	$\varphi_2$	$\phi_{cr}$
0,1	2	15	42
0,1	5	25	70
0,15	2	20	54
0,15	5	25	71
0,2	4	30	84
0,2	3	15	43
0,25	4	10	28
0,25	5	25	73
0,3	6	30	88

На основе приведенных выше зависимостей (4) – (6) были рассчитаны линии сгорания топлива для дизеля 2A-5Д49 на номинальном режиме работы ( $N_e = 2940 \text{ кВт}$ ) и дизеля ПД1М на режиме частичной мощности ( $N_e = 220 \text{ кВт}$ ). Сравнение результатов моделирования с опытными индикаторными диаграммами представлено на рисунках 8, 9.

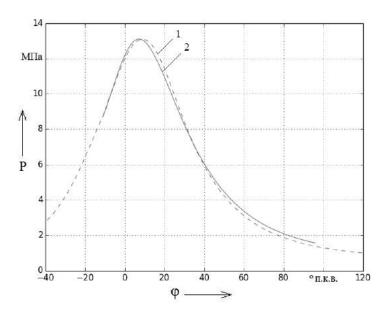


Рисунок 8 – Давление газов в цилиндре дизеля 2A-5Д49 в процессе сгорания: 1 – опытные данные; 2 – расчетные данные

Таким образом, используя уравнение Пугачева при создании математической модели процесса сгорания топлива в цилиндре дизеля, можно учитывать форму характеристики тепловыделения конкретного двигателя.

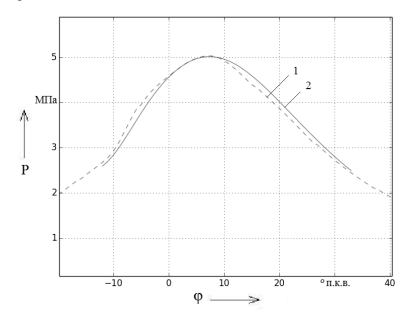


Рисунок 9 — Давление газов в цилиндре дизеля ПД1М в процессе сгорания: 1 — опытные данные; 2 — расчетные данные

Представленный способ подбора параметров уравнения тепловыделения дает удовлетворительную сходимость с опытными данными и может быть использован в первом приближении.

Открытым вопросом остается использование уравнения (5), поскольку требуется дополнительный анализ точности описания этим уравнением характеристик тепловыделения тепловозных дизелей.

#### Список литературы

- 1. Володин, А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации: монография [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 166 с.
- 2. Вибе, И. И. Новое о рабочем цикле двигателей [Текст] / И. И. Вибе. М.-Свердловск,  $1962.-271~\mathrm{c}.$
- 3. Кавтарадзе, Р. 3. Теория поршневых двигателей: Специальные главы: учебник для вузов [Текст] / Р. 3. Кавтарадзе / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 2008. 720 с.
- 4. Разлейцев, Н. Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н. Ф. Разлейцев. Харьков: Высшая школа, 1980. 169 с.
- 5. Коньков, А. Ю. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов: монография [Текст] / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко. Владивосток: Дальнаука, 2014. 365 с.
- 6. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. Х. Дьяченко, А. К. Костин и др. Л.: Машиностроение, 1974. 552 с.
- 7. Двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов [Текст] / В. Н. Луканин, К. А. Морозов и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 479 с.
- 8. Дизели: справочник [Текст] / Б. П. Байков, С. М. Баранов и др. Л.: Машиностроение, 1964.-600 с.
- 9. Ваншейдт, В. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / В. А. Ваншейдт. Л.: Судостроение, 1977. 392 с.

#### References

- 1. Volodin A. I. Complecksny analis termodinamicheskih, economicheskih i ecologicheskih characterictik teplovoznyh dizeley v usloviakh eckspluataciy (Complex thermodynamic, economic, ecologic characteristics analysis of operating locomotive diesels). Omsk: OSTU, 2011, 166 p.
- 2. Vibe I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelei* (New of the working cycle of the engines). Moskow, Sverdlovsk, 1962, 271 p.
- 3. Kavtaradze R. Z. *Teoria porshnevyh dvigatelei* (Piston engines theory). Moskow: MSTU, 2008, 720 p.
- 4. Razleytcev N. F. *Modelirovanie i optimizatcia processa sgorania v dizeliakh* (Diesel combustion process simulating and enhancement). Kharkiv, 1980, 169 p.
- 5. Konkov A. U. *Diagnostirovanie dizelia na osnove identyfikaciy rabochikh processov* (Working cycle identification diesel engine diagnosis). Vladivostok, 2014, 365 p.
- 6. Dyachenko N. H., Kostin A. K., Pugachev B. P. *Teoria dvigatelei vnutrenego sgorania* (Internal combustion engines theory). Leningrad, 1974, 552 p.
- 7. Lucanin V. N. *Dvigateli vnutrenego sgorania* (Internal combustion engines). Moskow, 2005, 479 p.
  - 8. Baikov B. P. Dizely (Diesel engines). Leningrad, 1964, 600 p.
- 9. Wansheidt V. A. *Sudovie dvigateli vnutrenego sgorania* (Marine IC engines). Leningrad, 1977, 392 p.

УДК 629.4.027.2

И. И. Галиев, О. В. Гателюк, Д. Ю. Лукс, В. Н. Ушак

#### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

B статье проведен сравнительный анализ динамической нагруженности полувагона с разными типами тележек в груженом и порожнем режимах движения при различных параметрах геометрических неровностей пути (амплитуды  $\eta_0$  и длины  $L_{\rm H}$ ) с учетом его жесткости.

В работе [1] рассмотрена математическая модель грузовых вагонов с тележками моделей 18-100 и 18-9810, описывающая колебания в вертикальной продольной плоскости при движении по геометрическим неровностям на рельсах.

В настоящей статье ставится задача анализа колебаний грузового вагона с учетом жесткости рельсового основания. Расчетная схема вагона представлена для вертикальной продольной плоскости на рисунках 1, 2.

Для составления математической модели используется уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i; i = 1, 2, \dots, 6.$$
 (1)

Выражения кинетической (T) и потенциальной (П) энергии, а также диссипативной функции ( $\Phi$ ) имеют соответственно вид:

$$\begin{split} T &= \frac{1}{2} M \dot{z}^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} M_7 \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\phi}_1^2 + \frac{1}{2} M_7 \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\phi}_2^2; \\ \Pi_{CT} &= 0; \ \Pi = \frac{1}{2} C_1 \Delta_1^2 + \frac{1}{2} C_1 \Delta_2^2 + \frac{1}{2} C_2 \Delta_3^2 + \frac{1}{2} C_2 \Delta_4^2 + \frac{1}{2} C_2 \Delta_5^2 + \frac{1}{2} C_2 \Delta_6^2; \\ \Phi &= \frac{1}{2} \beta_1 \dot{\Delta}_1^2 + \frac{1}{2} \beta_1 \dot{\Delta}_2^2 + \frac{1}{2} \beta_2 \dot{\Delta}_3^2 + \frac{1}{2} \beta_2 \dot{\Delta}_4^2 + \frac{1}{2} \beta_2 \dot{\Delta}_5^2 + \frac{1}{2} \beta_2 \dot{\Delta}_6^2. \end{split}$$

На расчетной схеме и в дальнейших уравнениях приняты следующие обозначения:

z,  $z_1$ ,  $z_2$  – обобщенные координаты подпрыгивания кузова и тележек (м);

 $\phi$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  – обобщенные координаты галопирования кузова и тележек (рад);

 $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_5$ ,  $M_6$ ,  $M_7$ ,  $M=M_1+M_2\cdot\gamma+2\cdot M_3-$  массы кузова, груза, надрессорной балки, боковой рамы, колесной пары, всей тележки, тележки без надрессорной балки, кузова с грузом (участвующая в колебаниях) соответственно (т);

 $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — коэффициенты условного вязкого сопротивления в подвешивании кузова и пути (кH·c/м);

 $C_1$ ,  $C_2$  — эквивалентные жесткости подвешивания кузова и пути (кH/м);

 $2L_{1}$ ,  $2L_{2}$  – база кузова (м) и тележки соответственно (м);

 $2L_3$  – длина кузова (м);

 $L_4$  – ширина надрессорной балки (м);

 $L_5$  – расстояние от центра масс кузова до любой его точки (м);

 $L_6$  – габарит боковой рамы (м);

 $L_6$  – габарит длины тележки (м);

 $L_{\rm H}$  – длина неровности на рельсах (м);

 $\gamma_1 = 0 \div 1$  – коэффициент загрузки вагона;

 ${\sf J}_{\sf 1},\ {\sf J}_{\sf 2}$  – моменты инерции кузова и тележки (к ${\sf H}\cdot{\sf c}^2\cdot{\sf m}$ );

 $J_1 = (M_1 + M_2 \gamma_1) \frac{L_3^2}{3} + 2M_3 L_1^2$  – момент инерции кузова с учетом груза (ось у);

 $J_2 = M_4 \frac{(L_6)^2}{6} + 2M_5(L_2)^2$  – момент инерции тележки (ось у);

 $J_3 = M_4 \frac{(L_6)^2}{12}$  – момент инерции надрессорной балки (ось у);

 $J_4 = M_4 \frac{(L_6)^2}{6}$  – момент инерции боковой рамы (ось у);

 $\nu$  – скорость движения (м/с);

 $\Delta_{1,2}$  – деформация рессорного подвешивания первой и второй тележек (м);

 $\Delta_{3-6}$  – деформация пути под колесными парами (м);

 $\dot{\Delta}_{1,2}$  – скорости деформации рессорного подвешивания первой и второй тележек (м/с);

 $\dot{\Delta}_{3-6}$  – скорость деформации пути под колесными парами (м/с).

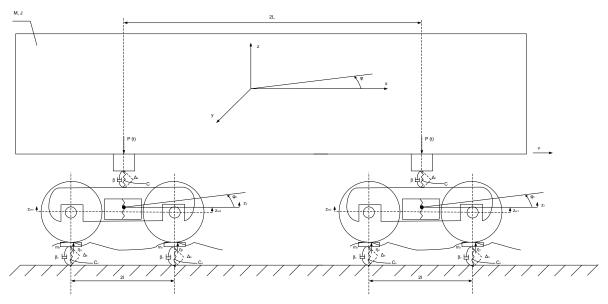


Рисунок 1 – Расчетная схема колебаний вагона с учетом жесткости рельсового основания

Для использования уравнения (1) в качестве обобщенных координат принято:  $q_1=z$ ;  $q_2=\varphi;\ q_3=z_1;\ q_4=\varphi_1;\ q_5=z_2;\ q_6=\varphi_2.$ 

В качестве геометрической неровности принята гармоническая функция с заданной амплитудой в виде  $\eta = \eta_0 \cos \omega t$  , где  $\omega = \frac{2\pi \nu}{L_u}$  – частота внешнего воздействия (рад/с).

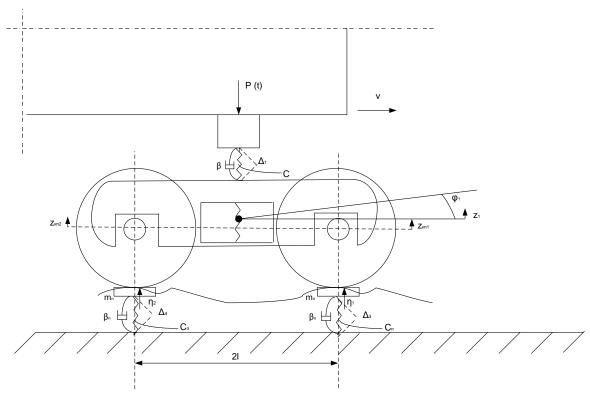


Рисунок 2 – Расчетная схема тележки

При движении вагона наезд каждой колесной пары происходит в разные моменты времени, вследствие чего математическое описание неровностей под колесными парами будет иметь вид:

$$\begin{split} \eta_1 &= \eta_0 \cos \omega t; \eta_2 = \eta_0 \cos (\omega t - \frac{2\pi \cdot 2L_2}{L_{\rm H}}); \\ \eta_3 &= \eta_0 \cos (\omega t - \frac{2\pi \cdot 2L_1}{L_{\rm H}}); \eta_4 = \eta_0 \cos (\omega t - \frac{2\pi \cdot 2(L_1 + L_2)}{L_{\rm H}}). \end{split}$$

Деформации и их производные для рессорных комплектов тележек вычисляются так:

$$\Delta_1 = z + L_1 \phi - z_1; \quad \Delta_2 = z - L_1 \phi - z_2; \quad \dot{\Delta_1} = \dot{z} + L_1 \dot{\phi} - \dot{z}_1; \quad \dot{\Delta}_2 = \dot{z} - L_1 \dot{\phi} - \dot{z}_2.$$

Используя уравнение Лагранжа (1) по обобщенным координатам, с учетом ранее принятых обозначений коэффициентов получим систему уравнений (2):

$$\ddot{z} + 2n_{11}\dot{z} + \omega_{01}^{2}z + n_{12}(\dot{z}_{1} + \dot{z}_{2}) - \omega_{1}^{2}(z_{1} + z_{2}) = 0;$$

$$\ddot{\varphi} + 2n_{21}\dot{\varphi} + \omega_{02}^{2}\varphi - n_{22}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) - \omega_{2}(z_{1} - z_{2}) = 0;$$

$$\ddot{z}_{1} + 2n_{31}\dot{z}_{1} + \omega_{03}^{2}z_{1} - n_{32}(\dot{z} + L\dot{\varphi}) - \omega_{3}^{2}(z + L\varphi) = n_{13}(\dot{\eta}_{1} + \dot{\eta}_{2}) + \omega_{13}^{2}(\eta_{1} + \eta_{2});$$

$$\ddot{\varphi}_{1} + 2n_{41}\dot{\varphi}_{1} + \omega_{04}^{2}\varphi_{1} = n_{14}(\dot{\eta}_{1} - \dot{\eta}_{2}) + \omega_{14}^{2}(\eta_{1} - \eta_{2});$$

$$\ddot{z}_{2} + 2n_{51}\dot{z}_{2} + \omega_{05}^{2}z_{2} - n_{52}(\dot{z} - L\dot{\varphi}) - \omega_{5}^{2}(z - L\varphi) = n_{15}(\dot{\eta}_{1} + \dot{\eta}_{2}) + \omega_{15}^{2}(\eta_{1} + \eta_{2});$$

$$\ddot{\varphi}_{2} + 2n_{61}\dot{\varphi}_{2} + \omega_{06}^{2}\varphi_{2} = n_{16}(\dot{\eta}_{1} - \dot{\eta}_{2}) + \omega_{16}^{2}(\eta_{1} - \eta_{2}),$$
(2)

где 
$$n_{11} = \frac{\beta_1}{M}$$
;  $\omega_{01} = \sqrt{\frac{2C_1}{M}}$ ;  $n_{12} = \frac{\beta_1}{M}$ ;  $\omega_1 = \sqrt{\frac{C_1}{M}}$ ;  $n_{21} = \frac{\beta_1 L_1^2}{J_1}$ ;  $\omega_{02} = \sqrt{\frac{2C_1 L_1^2}{J_1}}$ ;  $n_{22} = \frac{\beta_1 L_1}{J_1}$ ;  $\omega_2 = \frac{C_1 L_1}{J_1}$ ;  $\omega_3 = n_{15} = \frac{\beta_1 + 2\beta_2}{M_7}$ ;  $\omega_4 = n_{16} = \frac{\beta_2 \cdot L_2^2}{J_2}$ ;  $\omega_{03} = \omega_{05} = \sqrt{\frac{C_1 + 2C_2}{M_7}}$ ;  $\omega_{03} = \omega_{05} = \sqrt{\frac{2C_1 \cdot L_2^2}{J_2}}$ ;  $\omega_{13} = n_{15} = \frac{\beta_1}{M_7}$ ;  $\omega_{14} = n_{16} = \frac{\beta_2 \cdot L_2^2}{J_2}$ ;  $\omega_{15} = \frac{\beta_1}{M_7}$ ;  $\omega_{15} =$ 

Решение системы уравнений (2) находим в виде:  $q_i = A_i \cos \omega t + B_i \sin \omega t$ .

Приравняв коэффициенты при  $\cos \omega t$  и  $\sin \omega t$  (после подстановки решений в систему уравнений (2)) друг к другу, получаем систему двенадцати линейных уравнений неизвестных коэффициентов  $A_{1-6}$  и  $B_{1-6}$ . Решение этой системы позволяет получить функциональную зависимость указанных коэффициентов для подстановки в выбранное решение по всем обобщенным координатам.

Решение дифференциальных уравнений выполнено для порожнего и груженого режимов полувагонов с различными тележками: 18-100 и 18-9810 [2, 3]. Рабочие точки на силовых характеристиках рессорного подвешивания обеих тележек указаны в работе [1]. Статическая нагрузка на один рессорный комплект для груженого режима – 205,7кH, а для порожнего – 31,6 кH. Жесткость рессорного комплекта в этих точках для тележки 18-9810 является постоянной – 4340 и 1195 кH/м соответственно (силовая характеристика линейная). У тележек 18-100 жесткость рессорного подвешивания на всех режимах составляет 4012 кH/м. Жесткость пути принята равномерной по всей его длине, т. е. рассмотрен равноупругий путь. Результаты решения представлены в виде зависимостей от скорости движения как суммарные значения модулей амплитуд подпрыгивания Z(v) и галопирования  $\varphi(v)$  кузова вагона и тележек  $Z_1(v)$ ,  $\varphi_1(v)$ ,  $Z_2(v)$ ,  $\varphi_2(v)$ , а также динамических сил в рессорном подвешивании (на один комплект)  $P_1(v)$ ,  $P_2(v)$  для обеих тележек. На рисунках 3 – 6 сплошная линия соответствует тележке 18-9810, пунктирная – 18-100.

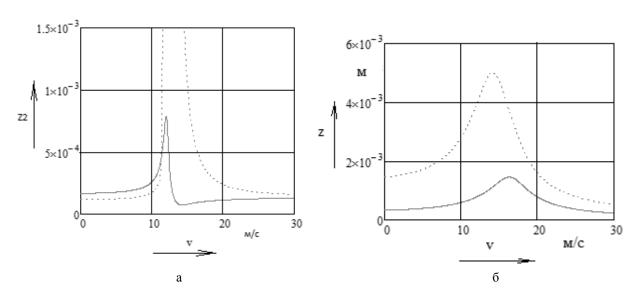


Рисунок 3 – Колебания подпрыгивания второй тележки (a) (груженый режим) и кузова Z (б)

Анализ решений и представленных рисунков позволяет сделать следующие выводы.

- 1. Резонансные режимы при колебаниях подпрыгивания кузова груженого полувагона на тележках 18-9810 (BARBER) и 18-100 находятся в диапазоне 36-44 км/ч и по амплитудам существенно не различаются, как и без учета жесткости пути [1].
- 2. Для порожнего полувагона на тележке 18-9810 резонансный пик находится при скорости V=58 км/ч, а для 18-100 при V=51 км/ч. Максимальная амплитуда для кузова с тележкой 18-9810 составляет 1,5 мм, а для 18-100 5 мм, что является преимуществом для тележки 18-9810 (BARBER).

3. Резонанс в колебаниях галопирования кузова для груженого режима возникает при скорости V=43 км/ч. Среднее значение амплитуды галопирования составляет  $0.4\cdot 10^{-4}$  рад. Для порожнего полувагона резонансные режимы при галопировании кузова возникают на разных скоростях и имеют различные амплитуды: для тележки 18-9810 (BARBER) при V=58 км/ч  $-1.5\cdot 10^{-4}$  рад; а для 18-100 около V=50 км/ч  $-4.5\cdot 10^{-4}$  рад. Для тележек амплитуда галопирования составляет порядка  $(1.1-1.25)\cdot 10^{-4}$  рад, причем резонанс наступает далеко за пределами конструктивных скоростей.

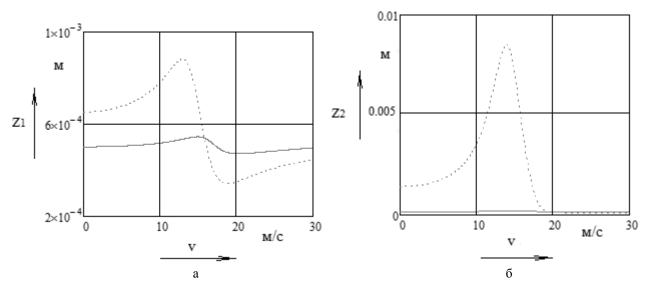


Рисунок 4 – Колебания подпрыгивания первой  $Z_1$  (a) и второй  $Z_2$  (б) тележек (порожний режим)

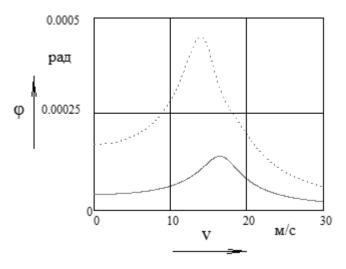


Рисунок 5 – Колебания галопирования кузова ф (порожний режим)

- 4. Результаты расчетов с учетом жесткости пути для порожнего режима подтверждают явное преимущество тележек 18-9810. По всем обобщенным координатам отсутствуют резонансные пики в зоне эксплуатационных скоростей.
- 5. Максимальный уровень сил для порожнего полувагона в каждом рессорном комплекте тележек 18-9810 составляет порядка 4 кН при резонансной скорости около 55 км/ч. Для тележек 18-100 уровень сил при резонансе существенно выше: порядка 25-27 кН. Для груженого полувагона максимальный уровень сил (при резонансе) в каждом рессорном комплекте для обеих тележек практически совпадает и находится в диапазоне скоростей (36-50) км/ч от 25 до 38 кН.

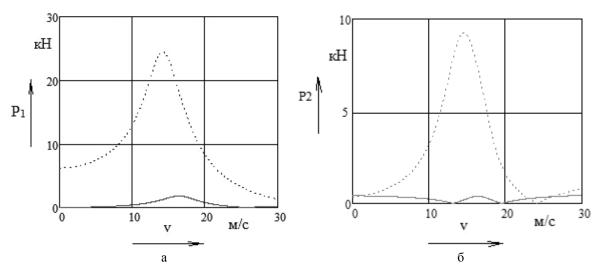


Рисунок 6 — Силы в одном комплекте рессорного подвешивания первой  $P_1$  (a) и второй  $P_2$  (б) тележек (порожний режим)

#### Список литературы

- 1. Сравнительная оценка динамической нагруженности полувагонов с разными типами тележек (18-100 и 18-9810) [Текст] / Галиев И. И., Гателюк О. В. и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2015. № 4 (24). С. 95 103.
- 2. Альбом-справочник пружин рессорного подвешивания № 748-2011 ПКБ ЦВ. М., 2011.
- 3. Нормы расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации [Текст] / ВНИИЖТ, ГосНИИВ. М., 2004. 317 с.

#### References

- 1. Galiev I. I., Gateliuk O. V., Luks D. Iu., Ushak V. N. Comparative evaluation of dynamic loading gondola with different types of trucks (18-100 and 18-9810) [Sravnitel'naia otsenka dinamicheskoi nagruzhennosti poluvagonov s raznymi tipami telezhek (18–100 i 18–9810)] *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 (24), pp. 95 103.
- 2. Al'bom-spravochnik pruzhin ressornogo podveshivaniia № 748-2011 PKB TsV (Album catalog spring suspension springs № 748-2011 PKB CV). Moscow.
- 3. Normy rascheta i proektirovaniia gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm Rossiiskoi Federatsii (The rules of calculation and design of freight cars of railroads 1520 mm Russian Federation). Moscow: VNIIZhT, GosNIIV, 2004, 317 p.

УДК 629.4.03.004.58: 620.178.5:681.3.06

3. Г. Гиоев, В. М. Приходько, В. С. Козаев

#### ВИБРАЦИОННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ

Рассматриваются причины возникновения корпусных вибраций в подшипниках качения в собранной машине, и на основе их измерения и анализа предлагается метод безразборного определения радиальных зазоров в них. Предложен и обоснован алгоритм вибрационного прогнозирования технического состояния подшипников качения в тяговых двигателях локомотивов.

Причиной перехода электромеханического преобразователя (электродвигателя, генератора) локомотива переходить из исправного состояния в неисправное является воздействие на него большого числа внешних и внутренних факторов.

Например, взаимодействие тягового двигателя и рабочего механизма — тягового редуктора и колесной пары с внешней средой носит сложный характер, а его результат почти не поддается контролю. Это ведет к тому, что техническое состояние тягового двигателя не определяется однозначно условиями и сроком его эксплуатации. Два тяговых двигателя, отработавшие одно и то же время в сходных условиях, никогда не будут иметь одинаковых технических состояний. Каждому моменту времени t можно сопоставить не одно определенное техническое состояние тягового двигателя  $w_i$ , а целое множество технических состояний  $W_i$ , в одном из которых тяговый двигатель может находиться. То есть в любой момент времени t в отношении технического состояния электромеханических преобразователей локомотива существует неопределенность, которую можно оценить как

$$H(w_i) = \sum_{i=1}^n P_i \log P_i, \tag{1}$$

где  $P_i$ — вероятность того, что машина находится в технически исправном состоянии  $w_i(1,2,3,...n)$ , где  $w_i \in W_i$ .

Снять эту неопределенность, указать из множества возможных технических состояний одно, в котором действительно находится электромеханический преобразователь, — это и составляет задачу технической диагностики.

По ГОСТ 19919-74 техническим состоянием объекта диагностики машины называется совокупность подтвержденных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект. Признаками технического состояния объекта могут быть качественные и количественные характеристики его свойств. Фактические знание количественных и качественных характеристик определяет техническое состояние объекта диагностики [1].

Техническое диагностирование осуществляется путем измерения и контроля количественных значений номинальных параметров и, возможно, качественных значений признаков, анализа и обработки результатов диагностических измерений.

Для тягового агрегата можно указать множество признаков и параметров, характеризующих его техническое состояние. В зависимости от применяемого метода диагностирования используются те или иные из них, называемые диагностическими признаками или параметрами.

В представленной работе диагностическим параметром является двойная амплитуда ускорений вибрации, измеренная в отдельных контрольных точках агрегата и на характерных частотах его работы (рисунок 8).

Электромеханические преобразователи тягового подвижного состава характеризуются структурой и способом функционирования. Структура механизма — это его детали, соединенные определенным образом в единую систему. Она задается набором параметров  $X_i(x_1,x_2,x_3,...x_n)$ , характеризующих техническое состояние элементов и их сочленения друг с другом, которые называются структурными параметрами (радиальные зазоры, осевые разбеги, натяги и т. д.). Структурные параметры являются переменными величинами. У механизмов, находящихся в процессе изготовления или ремонта, они зависят от различных технологических факторов и в основном от износа.

Износ деталей — это постепенное изменение размеров и форм тела при трении, проявляющееся в отделении с поверхности трения материала. В тяговых электрических машинах происходят механические, молекулярно-механические, коррозионно-механические и другие виды изнашивания. При молекулярно-механическом изнашивании механическое воздействие сопровождается одновременным воздействием молекулярных сил на поверхности деталей. Такое изнашивание происходит, например, в подшипниках качения при высоком контактном давлении тел качения о кольца подшипника и сопровождается переносом мате-

риала износа с одной поверхности на другую с переходом на усталостное изнашивание [2], которое является следствием многократного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин и отделению с поверхности слоев материала. Кроме этого на цапфы в опорных подшипниках якоря тяговой машины действуют динамические силы  $P_A$  и  $P_B$ , постоянные по величине, но переменные по направлению (векторы этих сил вращаются вместе с якорем), и статические силы  $Q_A$  и  $Q_B$ , постоянные по величине и направлению. Поэтому во время вращения неуравновешенного якоря или ротора на его цапфы действуют силы

$$\begin{cases} R_A = P_A + Q_A; \\ R_B = P_B + Q_B, \end{cases}$$
 (2)

где A и B — опорные подшипники.

В зависимости от соотношения динамических и статических сил различают три режима работы подшипников силовых механизмов [3].

При первом режиме, когда  $P_A < Q_A$ , центр цапфы совершает колебательное движение по дуге окружности радиуса  $\delta$ , равного половине радиального зазора в подшипнике (рисунок 1, a).

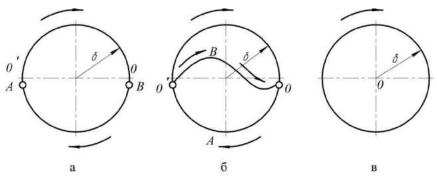


Рисунок 1 — Характер движения цапфы — оси вращения якоря  $0^{'}-0$  в подшипниках с радиальными зазорами  $\delta$ 

Отсюда следует, что контактная точка цапфы совершает колебательное движение по дуге подшипника с двойной угловой амплитудой. Здесь при первом режиме работы подшипника цапфа изнашивается по всей окружности, а элементы подшипника — в пределах дуги AB.

При втором режиме динамическая сила равна статической:  $P_A = Q_A$ . В этом случае цапфа отрывается от подшипника в тот момент, когда ее центр приходит на горизонтальный диаметр подшипника. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что движение центра цапфы после ее отрыва от опоры происходит по некоторой замкнутой траектории OAO'B внутри окружности радиусом  $\delta$  до тех пор, пока цапфа не ударится о подшипник (рисунок 1, б). После удара цапфа скользит по подшипнику и весь цикл повторяется снова. Таким образом, при втором режиме происходят периодические удары цапфы о подшипник с частотой вращения якоря или ротора.

Удары, происходящие в опорных подшипниках качения, возбуждают упругие колебания-вибрации. Во втором режиме импульсного движения подшипник оказывается в наиболее неблагоприятных условиях работы: ухудшается распределение нагрузки между телами качения (см. рисунок 1, б) и повышается динамическая нагрузка.

Каждое тело качения, двигаясь по окружности вместе с сепаратором, проходит ненагруженную зону I и попадает в зону нагружения II (рисунок 2).

По мере движения в этой зоне нагрузка на тела увеличивается от нуля до максимума  $P_{\max}$  и вновь снижается до нуля при подходе к ненагруженной зоне. При этом максимальная величина нагрузки для идеального подшипника определяется по уравнению статического равновесия [4]:

$$P_r = \sum_{i=1}^{z} P_{\text{max}} \cdot (\sin \varphi_i)^{3/2}, \qquad (3)$$

где z — число тел качения, находящихся в зоне нагружения;  $\varphi_i$  — угол положения тел качения.

Как правило, радиальная нагрузка действует на внутреннее кольцо подшипника и не воспринимается всеми телами качения равномерно. Наибольшую нагрузку  $P_{\rm max}$  воспринимает тело качения, центр которого лежит на линии действия силы  $P_r$ .

Динамическая сила при третьем режиме больше статической, т. е.  $P_{\scriptscriptstyle A} > Q_{\scriptscriptstyle A}$  .

Из анализа силы  $P_A$  следует, что ее величина изменяется от минимального значения  $\left(P_A-Q_A\right)$  до максимального  $\left(P_A+Q_A\right)$ , направление в эти моменты времени совпадает с направлением динамической силы  $P_A$ , связанной жестко с цапфой

ротора (рисунок 1, в).

Здесь контактная точка цапфы движется по всей окружности, причем цапфа всегда обращена к подшипнику одной стороной, поэтому при третьем режиме цапфа изнашивается односторонне, а элементы подшипника изнашиваются по всей окружности. По мере износа цапфы увеличивается расстояние от центра массы якоря до оси вращения, вследствие чего возрастает сила  $P_{\scriptscriptstyle A}$ , а это, в свою очередь, увеличивает интенсивность износа элементов подшипника и цапфы.

Таким образом, прогрессивный износ цапфы и элементов подшипника будет расти, особенно сепаратора. Следовательно, наилучшим режимом работы подшипника и цапфы силового агрегата является первый режим.

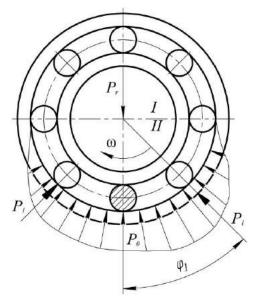


Рисунок 2 — Распределение нагрузки по телам качения при горизонтальном расположении оси подшипника

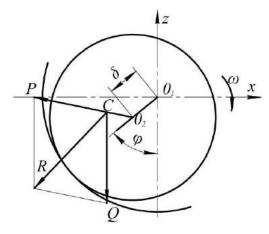


Рисунок 3 — Движение цапфы-шейки вала в подшипнике с зазором

Характер движения цапфы-шейки вала (рисунок 3) при наличии зазора определяется относительным коэффициентом неуравновешенности [8]

$$E = P/Q, (4)$$

где E — относительный коэффициент неуравновешенности; P — динамическая нагрузка на подшипник от неуравновешенных сил инерции; Q — статическая нагрузка на подшипник.

При вращении цапфы в подшипнике качения ролики или шарики увлекаются цапфой в нагруженную зону, катятся по поверхности беговых дорожек колец. При наличии радиального зазора цапфа имеет возможность бокового перемещения (рисунок 4).

Существует большое число дефектов в элементах подшипника качения, которые вызваны кинематическими погрешностями (волнистость беговых дорожек-колец, их овальность, огранность тел качения, нестабильность диаметров тел качения и др.) – соударениями и износом.

Рассмотрим случай, когда техническое состояние бездефектного подшипника качения определяется всего одним параметром — радиальным зазором  $\delta$  (см. рисунок 4).

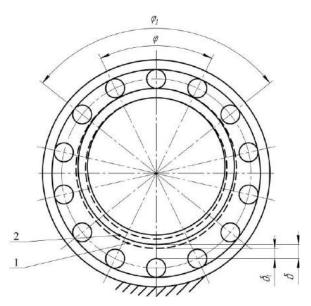


Рисунок 4 — Радиальные зазоры у цилиндрического подшипника

Идеальный подшипник должен обеспечивать положения осью вращения цапфы относительно системы координат, связанный с корпусом подшипника. Если в подшипнике есть радиальный зазор, то появляются дополнительные степени свободы движения цапфы и она, кроме вращения, совершает дополнительные движения.

При движении цапфы в подшипнике качения можно выделить два случая опирания цапфы: 1) цапфа опирается на два тела качения — I и II (рисунок 5, а); ее положение при этом устойчивое; 2) цапфа опирается всего на одно тело качения — II (рисунок 5, б), находится в состоянии падения и заканчивается столкновением с телом III, что вызывает импульсное движение цапфы в подшипнике (см. рисунок 1). Такое движение цапфы вызывает свободные колебания тел качения и ко-

лец подшипника и передающиеся к корпусу упругие колебания-вибрации.

Амплитуда этих колебаний зависит от радиального зазора, скорости вращения цапфы, от величины и состояния смазки и других дефектов, т. е. все дефекты в виде колебаний передаются корпусу.

Выше было сказано, что у идеального механизма параметры  $X_i(x_1, x_2, x_3, ... x_n)$  равны нулю.

Тогда совокупность величин  $X_i(x_1, x_2, x_3, ... x_n)$ , отображающих существенные переменные свойства механизмов и их сочленений, в некоторый момент времени t будет характеризовать техническое состояние тягового агрегата — тяговой электрической машины — при условии, что ее изоляция находится в допустимых пределах.

Обратим внимание на две особенности параметров технического состояния  $X_i$ .

Во-первых, они, как правило, недоступны для непосредственного измерения без разборки объекта диагностики – тягового двигателя.

Во-вторых, улучшение технико-экономических показателей агрегата и повышение его надежности связаны с изменением параметров технического состояния.

Именно с этой целью производят ремонт и регулировку рабочих процессов в тяговых агрегатах. Поэтому параметры технического состояния  $X_i$  выступают в задачах диагностики как искомые неизвестные.

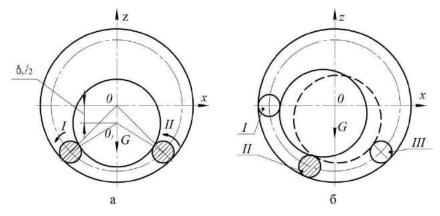


Рисунок 5 – Положение цапфы в подшипнике: а – устойчивое; б – неустойчивое

Параметры состояния могут быть измерены непосредственно на работающем агрегате, без проникновения внутрь устройства [5, 6]. Тогда задача диагностики в зависимости от полученной экспериментальным путем информации формулируется в одной из следующих форм:

по принятому от тягового агрегата вибрационному сигналу  $L_i(\text{м/c}^2)$  нужно определить исправен агрегат или нет;

по принятому вибрационному сигналу требуется определить класс технического состояния, к которому принадлежит состояние диагностируемого агрегата;

путем измерения параметров вибрационного сигнала  $L_i(L_1,L_2,L_3,...L_m)$  определить величину параметра технического состояния  $X_i(x_1,x_2,x_3,...x_m)$ , например, радиальный зазор, не разбирая объект диагностики — тяговый электродвигатель или подшипник буксового узла колесной пары локомотива.

Число координат  $X_i$ , с помощью которых описывается техническое состояние электромеханического преобразователя, а также конечный набор состояний  $W_i$ , которые различаются при диагностике, определяются целями технического диагноза, для которых составляется диагностическая модель (рисунок 6).

$$\begin{array}{c|c}
Z_{i} = (Z_{1}, Z_{2}, Z_{3}...Z_{n}) \\
\hline
W_{i} = (W_{i}, W_{2}, W_{3}...W_{n})
\end{array}$$

$$\begin{array}{c|c}
Z_{i} = (\xi_{1}, \xi_{2}, \xi_{3}...\xi_{n}) \\
\hline
X_{i} = (x_{1}, x_{2}, x_{3}...x_{n})
\end{array}$$

$$\begin{array}{c|c}
U_{i} = (U_{i}, U_{2}, U_{3}...U_{n})
\end{array}$$

$$Y_{i} = (y_{i}, y_{2}, y_{3}...y_{n})$$

Рисунок 6 — Диагностическая модель процессов, возникающих в i-м конструктивном узле тягового агрегата

На рисунке 6  $U_i(t)$  — выходной сигналнапряжения от вибропреобразователя (датчика), установленного в контрольной точке (мВ или м/с²);  $y_i = (y_1, y_2, y_3, ... y_m)$  — воздействие механических усилий на детали машины в виде ударов, трения и др;  $z_i = (z_1, z_2, z_3, ... z_m)$  — внешние механические воздействия.

Техническое диагностирование начинается с анализа диагностической модели, которая описывается математическими символами технического состояния объекта диагностики в виде выражения:

$$U_i(t) = K \cdot a(t) = \Phi(x_1, x_2, x_3, ... x_n),$$
 (5)

где  $U_i(t)$  – выходной сигналнапряжения от вибропреобразователя (датчика), установленного в контрольной точке (мВ или м/с²); K – коэффициент пропорциональности; a(t) – мгновенное значение ускорения, снятого с определенной контрольной точки.

Таким образом, установлено, что для безразборного определения технического состояния любого электромеханического преобразователя имеются две группы параметров:  $X_i = (x_1, x_2, x_3, ... x_n)$  — 1-я группа и  $L_i = (L_1, L_2, L_3, ... L_n)$  — 2-я.

Параметры 1-й группы недоступны для непосредственного измерения, параметры 2-й группы могут быть измерены чувствительным вибропреобразователемдатчиком, установленным в контрольных точках корпуса механизма (рисунок 7).

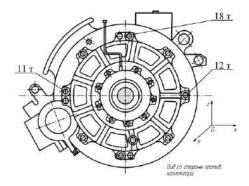


Рисунок 7 — Расположение контрольных точек на тяговом электродвигателе НБ-412К

На рисунке 8, б представлена блок-схема обработки вибросигнала, где 1 – объект диагностики; 2 – вибродатчик типа ДН-4-м1; 3 – усилитель; 4 – полосовой фильтр; 5 – октавный анализатор; 6 – решающее устройство – ЭВМ.

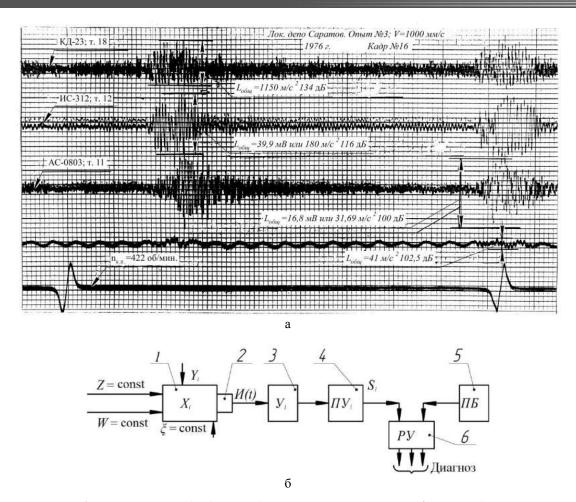


Рисунок 8 – Измерение и обработка вибросигнала: а – характерные формы вибросигнала; б – блок-схема измерения и обработки вибросигнала

В результате обработки вибросигнала методом наименьших квадратов получим экспериментальную зависимость общего уровня вибрации от радиального зазора в подшипнике качения для каждой контрольной точки двигателя (рисунок 9).

Техническое состояние подшипникового узла определяется через радиальный зазор. В дальнейшем прогнозируется изменение величины радиального зазора в зависимости от вибрационных параметров, т. е. двойной амплитуды ускорения вибрации в контрольных точках по рисунку 8, а. Некоторые экспериментальные результаты представлены в таблице, где диагностируются радиальные зазоры в подшипниках тягового двигателя в контрольных точках.

Получены уравнения линейной регрессии в контрольных точках после обработки результатов экспериментов:

$$L_{187} = 18,94\delta_i - 3,06; (6)$$

$$L_{12T} = 2,46\delta_i + 3,11; (7)$$

$$L_{117} = 15,37\delta_i + 0,45. \tag{8}$$

Из уравнений (6) определяются радиальные зазоры в контрольных точках подшипника без разборки:

$$\delta_{18T} = \frac{L_{18T} + 3,06}{18,94} \,; \tag{9}$$

$$\delta_{12T} = \frac{L_{12T} - 3{,}11}{2{,}46};\tag{10}$$

$$\delta_{11T} = \frac{L_{17T} - 0.45}{15.37}. (11)$$

Опытно-экспериментальные нормы на общий уровень вибрации для безразборной диагностики технологических погрешностей до и после ремонта тягового электродвигателя серии НБ-412К электровоза ВЛ-60

		Вибрационные нормы Нормы радиальн									ного		
Конт-		отлично		xope	хорошо		ВЛ.	неудовл.		зазора, мм			
<b>№</b> п/п	роль- ные точки на ТЭД	м/c <sup>2</sup>	дБ	м/c <sup>2</sup>	дБ	м/c <sup>2</sup>	дБ	$M/c^2$	дБ	ОТЛИЧНО	ошодох	удовл.	неудовл.
1	18 т	От	От	От	От	От	От	Свыше	Свыше	От	От	От	Свыше
		2,20	56,0	0,73	66,4	1,80	75,6	4,52	83,5	0,05	0,20	0,25	0,40
		до	до	до	до	до	до			до	до	до	
		0,73	68,0	1,80	76,5	4,52	83,5			0,20	0,25	0,40	
2	12 т	От	От	От	От	От	От	Свыше	Свыше	От	От	От	Свыше
		3,23	80,7	3,60	81,6	3,73	82,0	4,10	83,0	0,05	0,20	0,25	0,40
		до	до	до	до	до	до			до	до	до	
		3,60	81,8	3,73	82,2	4,10	83,0			0,20	0,25	0,40	
3	11 т	От	От	От	От	От	От	Свыше	Свыше	От	От	От	Свыше
		0,32	60,3	2,62	78,5	3,40	81,0	5,70	85,6	0,05	0,20	0,25	0,40
		до	до	до	до	до	до			до	до	до	
		2,62	78,7	3,40	81,0	5,70	85,7			0,20	0,25	0,40	

Примечание: вибропреобразователь типа ДН-4-М1 №2215 чувствительностью 1 мВ/g.

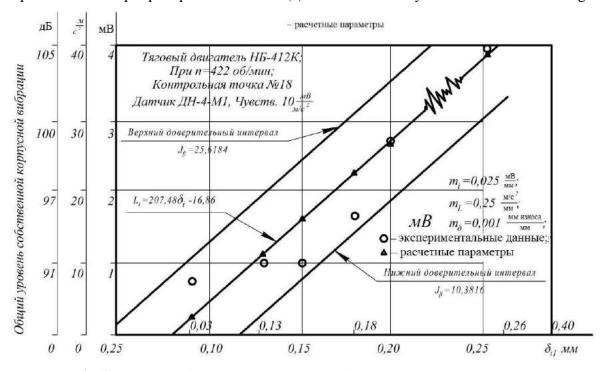


Рисунок 9 – Зависимость общего уровня ускорений вибрации от величины радиального зазора

Вибрационное прогнозирование позволяет предупредить отказы – выход вибрационных параметров за номинальные величины, которые вызываются в силовом агрегате износом и старением деталей, что повышает доремонтную и межремонтную наработку, позволяет предотвратить преждевременные ремонты и значительно уменьшает расходы на содержание тяговых машин путем обоснованной постановки их на ремонт и проведения необходимого и целесообразного объема работ по замене и ремонту изношенных деталей [6].

Вибрационное прогнозирование базируется на результатах вибрационной диагностики и сводится к определению остаточного технического ресурса или гарантированного ресурса

безотказной работы сопряжений, узлов силовых агрегатов до очередной вибрационной диагностики или ремонта.

Остаточный и гарантированный ресурс безотказной работы агрегата или сопряжения определяют по значениям измеренных при вибрационной диагностике параметров (см. рисунок 9, таблицу 1).

Среднестатистический остаточный ресурс  $l_{\text{ост}}$  силового агрегата при вибродиагностике определяется по формуле:

$$l_{\text{oct}} = l_n \alpha \frac{L_{\text{пр}} - L_{\text{нач}}}{L_n - L_{\text{нач}}}, \tag{12}$$

где  $L_n$  — измеренная при диагностике величина параметра — ускорения вибрации на выбранной контрольной точке силового агрегата локомотива;  $L_{\rm пp}$  — предельное значение ускорения вибрации на выбранной контрольной точке тяговой машины;  $L_{\rm нач}$  — начальное значение ускорения вибрации в новой или после капитального ремонта тяговой машине (сопряжении);  $l_n$  — наработка-пробег тяговой машины с начала эксплуатации (или после ремонта) до вибрационной диагностики;  $\alpha$  — показатель степени среднестатистической закономерности изменения параметра.

Если наработка-пробег с начала эксплуатации новой или капитально отремонтированной тяговой машины локомотива неизвестна, то остаточный ресурс сопряжений узла определяют по наработке между двумя проверками (по реализации):

$$l_{\text{oct}} = R \cdot l'_{\text{oct}},\tag{13}$$

где R – коэффициент технического ресурса сопряжения силового агрегата,

$$R = \frac{1}{\sqrt[\alpha]{\frac{L_n - L_{\text{\tiny Hall}}}{L_{m-1} - L_{\text{\tiny Hall}}} - 1}} + 1; \tag{14}$$

$$l'_{\text{oct}} = l_0 \sqrt[\alpha]{\frac{L_{\text{np}} - L_{\text{Haq}}}{L_n - l_{\text{Haq}}}} - 1,$$
(15)

где  $l_0$  – наработка между двумя диагностиками;  $L_n$ ,  $L_{n-1}$  – величины параметра ускорения вибрации в выбранной контрольной точке, измеренные при последней и предыдущей проверках.

Показатели степени среднестатистической закономерности изменения параметра — ускорения вибрации — на выбранной контрольной точке колеблются в пределах 0,85-2,5.

Закономерности изменения параметра — ускорения вибрации по пробегу — выражаются через коэффициент технического ресурса сопряжения силового агрегата *R*:

$$R = 1 - m \cdot l^{\alpha},\tag{16}$$

где l — наработка-пробег тяговой машины от начала эксплуатации нового сопряжения в силовом агрегате.

Параметры m и  $\alpha$  функциональной зависимости (12) определяются по результатам двух диагностик:

$$\begin{cases}
 m = \frac{1 - R_1}{l_1^2}; \\
 \alpha = \frac{l_1 (1 - R_2)}{l_2 (1 - R_1)},
\end{cases} (17)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – пробег локомотива от начала эксплуатации нового силового агрегата до первой и второй диагностики;  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты технического ресурса, определенные по значению параметров вибрации, полученному при первой  $l_1$  и второй  $l_2$  диагностике.

Остаточный ресурс силового агрегата  $l_{\text{ост}}$  с учетом уравнений (13) и (14) из предположения, что в предыдущий период эксплуатации данного силового агрегата техническое состояние не изменяется, рассчитывается по формуле:

$$l_{\text{ост}} = \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - l_2, \text{ (единиц наработки)}. \tag{18}$$

Оценка пробега между ремонтами определяется по вибрационному состоянию силового агрегата. Со временем эксплуатации локомотива корпусная вибрация тяговой машины увеличивается. Это связано, с одной стороны, с постепенным износом подшипников, горловин и подшипниковых щитов тяговой машины, ослаблением стяжных коллекторных болтов и т. д. В результате этого спустя некоторое время вибрация силового агрегата увеличивается и достигает предельно допустимой величины, в этом случае требуется постановка локомотива на ремонт.

Из анализа виброосциллограмм (см. рисунок 8, а) видно, что изменение двойной амплитуды ускорения вибрации в определенной контрольной точке подчиняется закону:

$$2L_{\rm m} = 2L_0 \cdot e^{Cl_{\rm op}}, \tag{19}$$

где  $2L_{\rm np}$  – предельно допустимая величина двойной амплитуды ускорения вибрации по пробегу  $l_{\rm cp}$ .

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов.

- 1. Безразборное вибрационное диагностирование технического состояния осуществляется путем измерения и контроля корпусной вибрации механизма.
- 2. В опорных подшипниках цапфа совершает импульсное движение, которое оканчивается ударом тела качения.
- 3. В зависимости от величины зазора при импульсном движении цапфы ударное взаимодействие усиливается, что повышает уровень корпусных вибраций.
- 4. Удары, происходящие в опорных подшипниках качения силового агрегата, возбуждают упругие колебания корпусные вибрации. При втором режиме импульсного движения подшипник оказывается в наиболее неблагоприятных условиях работы ухудшается распределение радиальной нагрузки между телами качения, что повышает динамическую нагрузку на корпусе силового агрегата, вибрации повышаются.
- 5. Характер движения цапфы шейки вала силового агрегата при наличии радиального зазора определяется коэффициентом неуравновешенности ротора.
- 6. Существует большое количество дефектов в элементах подшипника качения, которые возникают в результате импульсного движения шейки вала-цапфы в подшипниках с зазором, т. е. в результате износа деталей подшипника образуются дефекты (волнистость беговых дорожек-колец подшипника, их овальность, огранность тел качения, нестабильность диаметров тел качения, различные выщербины, микротрещины и др.).
- 7. Импульсное движение цапфы вызывает свободные колебания тел качения и колец подшипника, которые передаются к корпусу машины и приводят их к вибрации. Двойные амплитуды, возникшие на корпусе силового агрегата вибрации, пропорциональны величине радиального зазора.
- 8. На основе определения общего уровня вибраций в контрольной точке, в собранной машине, получен закон изменения корпусной вибрации в зависимости от дефекта например, от радиального зазора. Разработана методика для вибрационного нормирования вибрации.
- 9. На основании вибрационных норм разработаны алгоритмы вибрационного прогнозирования радиальных зазоров в опорных подшипниках силовых агрегатов.

#### Список литературы

- 1. ГОСТ 19919-74. Техническая диагностика. M.: Изд-во стандартов, 1974. 12 с.
- 2. Ахвердиев, К. С. Оценка влияния источника смазки на основные рабочие характеристики подшипника конечной длины при наличии перекоса [Текст] / К. С. Ахвердиев,

- В. М. Приходько, И. С. Морозкин // Вестник РГУПСа / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону. 2012. 1. 2012.
- 3. Щепетильников, В. А. Основы балансировочной техники [Текст] / В. А. Щепетильников. М.: Машиностроение, 1975. 57 с.
- 4. Григорьев, Н. В. Нелинейные колебания элементов машин и сооружений [Текст] / Н. В. Григорьев. М.: Машгиз, 1961. 256 с.
- 5. Гиоев, З. Г. Влияние радиального зазора на шум якорных подшипников тяговых двигателей [Текст] / З. Г Гиоев, В. М. Бондаренко, В. М. Приходько // Труды РИИЖТа. Ростовна-Дону, 1976. Вып. 126. С. 38-44.
- 6. Павлов, Б. В. Акустическая диагностика механизмов [Текст] / Б. В. Павлов. М.: Машиностроение, 1974.-222 с.

#### References

- 1. GOST 19919-74. Technical diagnostics. M., 1974. 12 p.
- 2. Akhverdiev K.S., Prikhodko V.M., Morozkin I.S. Evaluation of the influence of lubrication source on the main operational characteristics of the bearing of finite length in the conditions of the sag [Otsenka vliyaniya istochnika smazki na osnovnyie rabochie kharacteristiki podshipnika konechnoy dliny pri nalichii perekosa]. *Vestnik RGUPS. Bulletin of RGUPS*, 2012, no. 1, pp. 7-15.
- 3. Schepetil'nikov V. A. *Osnovy balansirochnoy tekhniki* (The basics of the balancing machines). Moskow: Mashinostroeniye, 1975, 57 p.
- 4. Grigor'ev N.V. *Nelineynye kolebaniya elementov mashin i sooruzheniy* (Nonlinear oscillations of the machines' and structures' elements). M.: Machgiz, 1961. 256 p.
- 5. Gioev Z. G., Bondarenko V. M., Prikhodko V. M. The influence of the radial clearance on the noise of the traction motors' armature bearings [Vliyaniye radial'nogo zazora na shum yakornikh podshipnokov tyagovikh dvigateley]. *Trudy RIIGT The collected papers of RIIZhT*, 1976, no. 126, pp. 38 44.
- 6. Pavlov B. V. *Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov* (Acoustic diagnostics of mechanisms). Moskow: Mashinostroeniye, 1974, 222 p.

УДК 656.222.052.46

С. В. Доронин, И. И. Доронина

#### УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛОКОМОТИВНЫХ ТЕЛЕЖЕК В КРИВЫХ

В статье рассматривается управляемое движение тележек многосекционных электровозов 2ЭС5К «Ермак» в кривых малого радиуса. Для реализации управления предлагается ввести в состав каждой буксы колесной пары дополнительное звено — специальную каретку. Анализируются два варианта управления положением тележки электровоза в кривых малого радиуса. Приводится вывод об эффективности управления одной передней колесной парой тележки.

Интенсификация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте и внедрение в локомотивный парк новых электровозов позволило осуществить переход на прогрессивные технологии поездной работы, связанные прежде всего с увеличением длины и массы составов. Однако эксплуатация электровозов на перевальных участках дорог с кривыми малого радиуса показала, что вписывание их в такие кривые с тяжеловесными составами сопряжено с увеличением энергозатрат на преодоление сопротивления движению и ростом интенсивности бокового износа гребней колес.

Анализ плана и продольного профиля Забайкальской железной дороги, имеющей участки с затяжными подъемами, показал, что более 30 % общей протяженности дороги состав-

ляют кривые, третья часть которых – кривые малого радиуса. План и продольный профиль Дальневосточной железной дороги во многом идентичны с Забайкальской; здесь выделяются участки Архара – Бира, Уссурийск – Владивосток, Угловая – Находка, Комсомольск – Советская гавань с подъемами до 27 ‰, имеющими протяженность кривых от 45 до 54 %, а среди них кривые малого радиуса составляют более половины.

Ранее выполненными исследованиями [1] установлено, что при проходе локомотивом крутых кривых с постоянной скоростью его тележки занимают на протяжении почти всей кривой фиксированное положение относительно рельсовой колеи. При этом гребень набегающего колеса передней колесной пары каждой тележки прижат к головке наружного рельса, а задняя колесная пара тележки находится в промежуточном положении без прижатия ее гребней к головкам рельса. Как следствие этого, при установившемся движении в крутых кривых отмечается значительный износ гребней колес и головок наружных рельсов. В пологих кривых такое явление не наблюдается. Исследования показывают, что при вписывании серийных электровозов в кривые гребень набегающего колеса передней тележки оказывается прижатым к наружному рельсу в кривых радиусом от 2370 м и менее. То есть к крутым кривым надо относить не только кривые радиусом до 300 м (кривые малого радиуса), но и более пологие.

Движение тяжеловесных поездов на перевальных участках с крутыми кривыми обычно осуществляется кратной тягой с подталкиванием. Так, на участке Смоляниново — Находка для продвижения тяжеловесных составов используют до четырех электровозов 2ЭС5К «Ермак» (четыре секции в голове и четыре секции в хвосте состава). При этом все тележки локомотива находятся в фиксированном (перекосном) положении, а токовая нагрузка тяговых двигателей достигает максимально допустимых значений. В результате увеличиваются энергозатраты на преодоление сопротивления движению электровозов и возрастает интенсивность износа гребней колесных пар. Подобный характер вписывания электровозов отмечается и на других участках дорог с крутыми кривыми.

Попытки решения этой проблемы смазыванием контактирующих поверхностей рельсов и гребней колес не дают эффективных результатов, так как не удается подобрать легкодоступную смазку и надежную технологию ее нанесения на боковую поверхность головки рельса или же на рабочую поверхность гребня колеса. Не получило широкого развития и предложение о замене существующего профиля поверхности катания колес криволинейным профилем, характеризующимся большей износостойкостью. Реконструкция пути (увеличение радиусов кривых и уменьшение подъемов) из-за ее большой стоимости в настоящее время также не планируется.

Исследования показывают, что на значительном протяжении полигона дорог имеются «конструктивные» причины, определяющие повышенный износ гребней колесных пар локомотивов. Пути устранения этой проблемы мы видим в модернизации экипажной части и систем управления локомотивами.

Для обеспечения минимальных потерь тягового усилия локомотивов и обеспечения нормативного износа гребней подвижного состава и рельсов в крутых кривых необходимо обеспечить активное управление положением тележек локомотива в рельсовой колее. Необходимо именно управление, а не пассивная радиальная установка колесных пар, которую внедряют на новых локомотивах (2ТЭ25А).

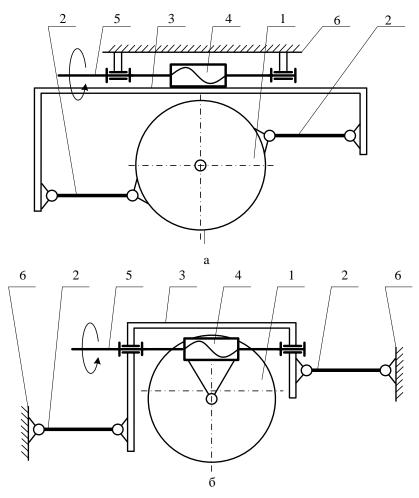
Для реализации активного управления можно прикладывать разворотные моменты отдельно к раме тележки, к ее колесным парам или комбинированно. В исследованиях [5] анализировались различные варианты управления. Анализ проводился для номинального состояния контактирующих поверхностей рельсовой колеи и колесных пар. Установлено, что наиболее простым и эффективным способом управления является управление передней колесной парой тележки. Для обеспечения движения локомотива в двух направлениях необходимо иметь два разворотных устройства, хотя одновременно работать будет одно. Задачей предлагаемого устройства является обеспечение такого расположения тележки в рельсовой

колее криволинейного участка пути, при котором силы бокового давления на наружный рельс гребня набегающего колеса были бы равны нулю (или близки к нему).

В статье [1] сделан вывод о том, что для тележек с «жесткими» поводковыми связями колесных пар с рамой нельзя рекомендовать управляющие устройства, в которых поворот осей колесных пар происходит за счет деформации буксовых поводков. Это обусловлено следующим. Создаваемый таким устройством угол  $\delta$  поворота оси каждой колесной пары пропорционален продольной деформации ее буксовых поводков. Но при нормативном коэффициенте продольной жесткости поводковых связей ж = 78500 кH/м необходимый угол  $\delta$  и соответствующие деформации буксовых поводков могут быть реализованы только недопустимо большим управляющим моментом.

Чтобы устранить влияние продольной жесткости поводковых связей на величину управляющего момента, предлагается ввести в состав каждой поводковой связи дополнительное звено – каретку с возможностью управляемого поступательного смещения ее вдоль продольной оси поводковой связи. Рассматриваются две схемы установки кареток с самотормозящимися винтовыми механизмами.

В первой схеме (рисунок 1, а) букса 1 поводками 2 соединена с кареткой 3, гайка 4 самотормозящего винтового механизма разворачивающего устройства закреплена на каретке 3, винт 5 этого механизма двумя шарнирами присоединен к раме тележки 6 с возможностью вращения вокруг своей оси. При вращении винта 5 гайка 4, смещаясь вдоль оси винта, передвигает каретку 3 и буксу 1 вместе с поводками 2. Буксы на концах оси колесной пары смещаются разворачивающим устройством в противоположных направлениях, вызывая тем самым поворот этой оси относительно рамы тележки [2].



Схемы установки кареток и винтового механизма разворачивающего устройства в поводковой связи буксы с рамой тележки

Во второй схеме (рисунок 1, б) каретка 3 поводками 2 связана с рамой тележки 6; гайка 4 самотормозящего винтового механизма шарниром соединена с расположенным на продолжении оси колесной пары центром буксы 1; винт 5 двумя шарнирами присоединен к каретке 3 с возможностью вращения вокруг своей оси. Перемещение гайки 4 вдоль оси винта 5 приводит к смещению центра буксы 1 относительно каретки 3. Противоположно направленные смещения центров букс на концах оси колесной пары приводят к повороту оси относительно рамы тележки [3].

При движении тележки по прямолинейному участку пути или в пологой кривой гайка 4 винтового механизма находится в среднем фиксированном положении, поводковые связи буксы с рамой тележки работают в нормативных условиях.

В обеих схемах установки кареток поворот оси колесной пары на угол  $\delta$  от ее номинального положения в раме тележки можно считать состоящим из поворота оси колесной пары на угол  $\sigma_1$  за счет смещения гаек 4 при недеформирующихся буксовых поводках и поворота этой оси на угол  $\sigma_2$  за счет продольной деформации поводков. При этом:

$$|\delta| = |\sigma_1| - |\sigma_2|. \tag{1}$$

Разворачивающее устройство винтовым механизмом создает на гайке 4 продольную силу F. Пренебрегая продольными силами инерции каретки 3 и буксовых поводков 2, можно считать, что сила F без изменения своей величины передается на буксу 1, а затем на ось колесной пары. Силы F, приложенные к противоположным концам оси колесной пары, образуют пару сил, момент которой является для колесной пары управляющим моментом  $M = F 2s_6$ , где  $2s_6$  – расстояние между центрами букс одной колесной пары.

Возникающие при передаче сил продольные деформации поводковых связей создаются силами, каждая из которых по модулю равна *F*. При этом выполняется соотношение:

$$M = 2 \operatorname{cm} s_6^2 \sigma_2. \tag{2}$$

В первой схеме установки кареток (см. рисунок 1, а) пара сил с моментом М передается на ось управляемой колесной пары через каретки и буксовые поводки. Во второй схеме установки кареток (см. рисунок 1, б) пара сил с моментом M передается на ось управляемой колесной пары непосредственно от гаек 4 винтовых механизмов, расположенных на концах этой оси.

Вписывание в кривые малого радиуса локомотивных тележек без управляющих устройств согласно мсточникам [1] и [4] характеризуется системой трех дифференциальных уравнений и формулой для определения силы бокового давления на рельс гребня набегающего колеса G:

$$\begin{cases} A_{1}\ddot{\lambda} + A_{2}\ddot{\delta}_{1} + A_{3}\ddot{\delta}_{2} + A_{4}\dot{\lambda} + A_{5}\dot{\delta}_{1} + A_{6}\dot{\delta}_{2} + A_{7}\lambda + A_{8}\delta_{1} + A_{9}\delta_{2} = A_{10} + A_{11}t; \\ B_{1}\ddot{\lambda} + B_{2}\ddot{\delta}_{1} + B_{3}\ddot{\delta}_{2} + B_{4}\dot{\lambda} + B_{5}\dot{\delta}_{1} + B_{6}\dot{\delta}_{2} + B_{7}\lambda + B_{8}\delta_{1} + B_{9}\delta_{2} = B_{10} + B_{11}t; ; \\ C_{1}\ddot{\lambda} + C_{2}\ddot{\delta}_{1} + C_{3}\ddot{\delta}_{2} + C_{4}\dot{\lambda} + C_{5}\dot{\delta}_{1} + C_{6}\dot{\delta}_{2} + C_{7}\lambda + C_{8}\delta_{1} + C_{9}\delta_{2} = C_{10} + C_{11}t; \end{cases}$$
(3)

$$G = F_1 \ddot{\lambda} + F_2 \ddot{\delta}_1 + F_3 \ddot{\delta}_2 + F_4 \dot{\lambda} + F_5 \lambda + F_6 \delta_1 + F_7 \delta_2 + F_8,$$
(4)

где  $\lambda$  — угол перекоса тележки;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — углы разворота продольных осей передней и задней колесных пар относительно рамы тележки;  $A_1$  —  $A_{11}$ ,  $B_1$  —  $B_{11}$ ,  $C_1$  —  $C_{11}$ ,  $F_1$  —  $F_8$  — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров локомотива и рельсовой колеи (формулы приведены в статье [4]); t — время.

В системе дифференциальных уравнений (3) от жесткости буксовых поводков зависят только коэффициенты  $B_8$  и  $C_9$  [4]. Если разворачивающие устройства с каретками установлены на обеих колесных парах тележки, то указанные коэффициенты принимают вид:

$$B_{9}^{0} = 2k*N(1-n_{1}) \ell n_{2}, \qquad C_{9}^{0} = 0,$$
 (5)

где  $B_8^0$  – оставшийся член исходной формулы для коэффициента  $B_8$  [4], характеризующий влияние трения скольжения гребня колеса о головку рельса на изменение угла  $\delta_1$ .

Если же разворачивающее устройство установлено только на передней колесной паре, то коэффициент  $B_8$ , как и в предыдущем случае, надо заменить на  $B^0_8$ , а коэффициент  $C_9$  оставить без изменения, как и в соответствующей исходной формуле [4]. Если управляемой является только задняя колесная пара, то коэффициент  $B_8$  остается без изменения, как в исходной формуле [4], а  $C^0_9 = 0$ .

Управляющие моменты на передней  $(M_1)$  и на задней  $(M_2)$  колесных парах тележки включаются в качестве дополнительных слагаемых в правые части соответственно второго и третьего уравнений системы (3). При этом, как и в статье [5], в круговой кривой управляющие моменты на колесных парах имеют фиксированные значения  $M^*_1$  и  $M^*_2$ , во входной переходной кривой управляющие моменты равномерно увеличиваются от начальных значений до значений  $M^*_1$  и  $M^*_2$ , а в выходной переходной кривой – равномерно от значений  $M^*_1$  и  $M^*_2$  до значений, близких к нулю.

В связи с изменением коэффициентов  $B_8$  и  $C_9$  системы (3) возникает необходимость проверки устойчивости невозмущенного движения тележки в новых условиях. Проверка движения на устойчивость выполнялась по классической методике (Гурвица), этот вопрос подробно рассмотрен в статье [5]. Оказалось, что при наличии разворачивающих устройств с каретками на обеих колесных парах невозмущенное движение тележки в кривой малого радиуса является неустойчивым. Устойчивость этого движения сохранится, если разворачивающее устройство с каретками установлено только на одной какой-либо колесной паре тележки. Поэтому для численного анализа оставлены варианты управления с одним разворачивающим устройством, реализующим задачу управления G=0.

Расчеты выполнялись по методике, приведенной в статье [5], с использованием приведенных выше уравнений (3) и (4) при измененных формулах для коэффициентов  $B_8$  и  $C_9$ . Результаты этих расчетов приведены в таблице.

Управляющие моменты  $M^*_1$ ,  $M^*_2$  и обобщенные координаты  $\lambda^*$ ,  $\delta^*_1$ ,  $\delta^*_2$  движения передней тележки электровоза 29С5К в круговой кривой радиусом 200 м со скоростью 10 м/с

<i>М</i> * <sub>1</sub> , кН·м	<i>М</i> * <sub>2</sub> , кН·м	λ*·10³, рад	δ* <sub>1</sub> ·10³, рад	δ* <sub>2</sub> ·10³, рад
-14,135	0	11,619	-20,791	0,125
0	-5,197	-8,311	0,074	20,503

Затем по формуле (2) были определены значения вторых слагаемых углов  $\delta^*_1$  и  $\delta^*_2$ , входящих в равенство (1):  $\sigma_{21} = 0,000074$  рад,  $\sigma_{22} = 0,000027$  рад. Эти слагаемые на три порядка меньше соответствующих суммарных углов  $\delta^*_1$  и  $\delta^*_2$ .

Вариант управления, когда  $M^*_1 \neq 0$ ,  $M^*_2 = 0$  (см. таблицу), можно рекомендовать для практического использования. Второй вариант ( $M^*_1 = 0$ ,  $M^*_2 \neq 0$ ) не рекомендуется для использования как не удовлетворяющий условию  $\lambda^* \geq 0$ .

#### Список литературы

- 1. Доронин, С. В. Управляемое вписывание электровозов серии 2ЭС5К «Ермак» в кривые малого радиуса [Текст] / С. В. Доронин // Вестник РГУПСа / Ростовский гос. унтпутей сообщения. Ростов-на-Дону, 2009. № 2. С. 21 32.
- 2. Патент 2350499 Российская Федерация, МПК В 61 F 5/48. Буксовый узел локомотивной тележки с регулируемой установкой колесных пар [Текст] / Доронин В. И., Доронин С. В.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. − 2007127955/11; заявл. 20.07.2007; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. − 6 с.

- 3. Патент 72448 Российская Федерация, МПК В 61 F 5/38. Устройство для регулируемой установки оси передней колесной пары локомотивной тележки в кривых [Текст] / Доронин В. И., Доронин С. В.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. -2007147750/22; заявл. 20.12.2007; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. 2 с.
- 4. Доронин, С. В. Вписывание электровозов серии 2ЭС5К «Ермак» в переходные и круговые кривые малого радиуса [Текст] / С. В. Доронин // Вестник РГУПСа / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2009. № 1. C. 39 44.
- 5. Доронин, С. В. Управление тележками в рельсовой колее [Текст] / С. В. Доронин // Мир транспорта / МИИТ. М. 2008. № 1. С. 10 13.
- 6. Доронин, С. В. Невозмущенное движение локомотивной тележки [Текст] / С. В. Доронин // Мир транспорта / МИИТ. М. 2007. № 3. С. 22 24.

#### References

- 1. Doronin S. V. The control passing of electric locomotive 29C5K «Ermak» through small-radius curves [Upravliaemoe vpisyvanie elektrovozov serii 2ES5K «Ermak» v krivye malogo radiusa]. *Vestnik RGUPS Proceedings of RSTU*, 2009, no. 2, pp. 21 32.
  - 2. Doronin V. I., Doronin S. V. Patent RU 2350499, 20.07.2007.
  - 3. Doronin V. I., Doronin S. V. Patent RU 72448, 20.12.2007.
- 4. Doronin S. V. The passing of electric locomotive 29C5K «Ermak» through transition and circular small-radius curves [Vpisyvanie elektrovozov serii 2ES5K «Ermak» v perekhodnye i krugovye krivye malogo radiusa] *Vestnik RGUPS Proceedings of RSTU*, 2009, no. 1, pp. 39 44.
- 5. Doronin S. V. Management of the bogies in the rail track [Upravlenie telezhkami v rel'sovoi kolee]. *Mir transporta World of transport*, 2008, no. 1, pp. 10 13.
- 6. Doronin S. V. The undisturbed motion of a locomotive bogies [Nevozmushchennoe dvizhenie lokomotivnoi telezhki]. *Mir transporta World of transport*, 2007, no. 3, pp. 22 24.

УДК: 629.4.027.2

В. Н. Костюков, А. В. Костюков, Д. В. Казарин, В. В. Басакин

#### ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОТИПНЫХ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Для повышения достоверности распознавания технического состояния узлов механической части рельсового подвижного состава и расчета критических значений параметров выдвинута гипотеза об однородности групп однотипных узлов механической части электропоезда. В рамках эксперимента по проверке данной гипотезы проведен сбор информации о значениях параметров вибрации узлов электропоезда в движении; разработана методика и проведен статистический анализ измеренных параметров вибрации для однотипных узлов.

Применение бортовых систем диагностики технического состояния узлов механической части рельсового подвижного состава позволяет осуществлять диагностирование с интервалом менее 11 минут, что для ответственного оборудования обеспечивает приемлемый уровень динамической ошибки, не превышающий 0.1 % [1-3].

Применение виброакустического метода обнаружения неисправностей роторного механического оборудования в бортовых системах позволяет обнаруживать как зарождающиеся, так и развитые дефекты.

При этом наличие большого числа помех, высокого уровня шумовых составляющих, сопутствующих взаимодействию колеса и рельса, требует разработки способов диагностирования, исключающих или сводящих к минимуму влияние на результат диагностирования внешних факторов.

Решение задач разработки способов диагностирования, позволяющих повысить достоверность распознавания технического состояния узлов механической части рельсового подвижного состава и расчета критических значений параметров, часто требует выдвижения гипотезы об однородности групп однотипных узлов механической части электропоезда: букс моторных и прицепных вагонов, моторно-якорных подшипников тяговых электродвигателей (ТЭД).

Целью данной работы является проверка гипотезы об однородности группы однотипных узлов механической части рельсового подвижного состава по параметрам вибрации, полученным в процессе движения.

Для достижения поставленной цели в работе требуется решить следующие задачи:

- 1 создать экспериментальную установку для сбора информации о значениях параметров вибрации узлов электропоезда в движении;
- 2 провести экспериментальные исследования по записи сигналов вибрации в реальных условиях эксплуатации подвижного состава;
- 3 разработать методику и провести исследование измеренных параметров вибрации для однотипных узлов.

Решению задач 1 и 2 посвящены работы [4, 5].

Анализ полученных сигналов вибрации проводится в соответствии со следующей методикой:

расчет и оценка средних квадратических значений (СКЗ) виброускорения по каждому узлу;

фильтрация данных в группах однотипных узлов для исключения «ложных» значений; расчет эмпирической функции распределения (ЭФР) для каждой группы однотипных узлов  $F^*(x)$ ;

аппроксимация эмпирической функции распределения распределением Вейбулла —  $\Gamma$ неденко F(x) согласно методике, описанной в работе [6]:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - x_0}{T_0}\right)^a},\tag{1}$$

где a — параметр формы;  $T_0$  — параметр масштаба;  $x_0$  — параметр сдвига;

анализ параметров полученных распределений;

установление принадлежности исследуемых параметров вибрации выборочных совокупностей всех однотипных узлов электропоезда к одной генеральной совокупности.

Для установления принадлежности параметров вибрации однотипных узлов к одной генеральной совокупности необходимо объединить в совокупности параметры вибрации однотипных узлов по каждому вагону и сравнить с аналогичными совокупностями по каждому из вагонов.

Согласно утверждению работ [7, 8] наиболее строгим непараметрическим критерием, позволяющим проверить с соответствующей вероятностью ошибки (α) нуль-гипотезу (генеральные совокупности одинаковы – против альтернативной гипотезы: генеральные совокупности имеют различные распределения), является критерий Колмогорова – Смирнова.

Данный критерий включает в себя проверку всех видов различия распределений, в особенности различия средних положений (среднее значение, медиана), рассеяния, асимметрии и эксцесса.

В качестве статистики служит наибольшая разность между ординатами обеих относительных кривых накопленных частот. При этом накопленные частоты  $F_1$  и  $F_2$  делятся на соответствующие объемы выборок  $n_1$  и  $n_2$ . Затем вычисляется разность  $F_1/n_1 - F_2/n_2$ . Максимум абсолютного значения этой разности и есть искомая статистика  $\overline{D}$ :

$$\overline{D} = \max \left| \left( \frac{F_1}{n_1} - \frac{F_2}{n_2} \right) \right|,\tag{2}$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – накопленные частоты выборок 1 и 2;

 $n_1$  и  $n_2$  – объем выборок 1 и 2.

Искомая статистика  $\overline{D}$ , вычисленная на основании двух выборок, сравнивается с критическим значением  $D_{(\alpha)}$ .

При больших объемах выборок  $(n_1+n_2>35)$  критическое значение  $D_{(\alpha)}$  определяется по выражению:

$$D_{(\alpha)} = K_{\alpha} \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}},\tag{3}$$

где  $K_{\alpha}$  – постоянная, зависящая от вероятности ошибки  $\alpha$  (при  $\alpha$  = 0,05  $K_{\alpha}$  = 1,36).

Если вычисленное  $\overline{D}$  равно или превосходит критическое значение  $D_{(\alpha)}$ , нуль-гипотеза отвергается, т. е. между относительными кривыми накопленных частот имеется значимое различие.

В качестве экспериментальной установки для исследования параметров вибрации узлов колесно-моторных блоков электропоезда в процессе эксплуатации принята распространенная на сети железных дорог бортовая система мониторинга технического состояния оборудования электропоезда КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-3 [9].

Экспериментальные исследования проводились на реально эксплуатирующемся электропоезде десятивагонной составности, находящемся в эксплуатации несколько месяцев.

По полученным в результате экспериментальных исследований сигналам вибрации рассчитаны СКЗ виброускорения по каждому узлу.

Получен массив данных свыше 10000 значений, характеризующих изменение виброускорения узлов в процессе движения, что обеспечивает ошибку выборки при доверительной вероятности 0,99 менее 1 %.

Для дальнейшего анализа используются значения СКЗ виброускорения, полученные в режиме движения электропоезда «Выбег». Данные значения приведены к скорости движения электропоезда на основе установленных зависимостей для снижения влияния скорости движения на величину значений СКЗ виброускорения [4].

Параметры вибрации сгруппированы по всем однотипным узлам: буксам прицепных и моторных вагонов, подшипникам ТЭД. Для каждого типоузла проведена фильтрация данных в группах для исключения «ложных» значений, промахов.

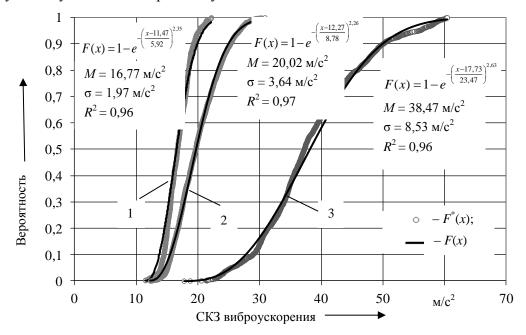
Рассчитаны эмпирические функции распределения  $F^*(x)$ , проведена аппроксимация эмпирической функции распределения распределением Вейбулла – Гнеденко F(x) (рисунок).

По графикам эмпирических функций распределения видно, что распределения для подшипников ТЭД, букс моторных и прицепных вагонов имеют одномодальный характер. Данный факт с учетом длительности нахождения электропоезда в эксплуатации, не превышающей одного года, позволил выдвинуть гипотезу об отсутствии неисправных узлов.

Уровни значений СКЗ виброускорения для различных групп однотипных узлов значительно различаются. Математическое ожидание СКЗ виброускорения для подшипника ТЭД составляет  $16,77 \text{ м/c}^2$ , для букс моторных вагонов  $-20,02 \text{ м/c}^2$ , для букс прицепных вагонов  $-38,47 \text{ м/c}^2$ . Различие связано с тем, что ТЭД имеет опорно-рамное подвешивание, поэтому он защищен от влияния взаимодействия колеса и рельса, а наличие на тележке моторного вагона больших необрессоренных масс создает высокую инерционность по сравнению с тележкой прицепного вагона.

Полученные параметры распределений Вейбулла – Гнеденко показывают, что параметр формы ( $\alpha$ ) для всех групп однотипных узлов лежит в пределах 2,26 – 2,63. Значения параметра  $\alpha$  свидетельствуют о том, что полученные распределения являются переходными между нормальным законом распределения ( $\alpha$  = 3,3) и распределением Рэлея ( $\alpha$  = 2), а также ука-

зывают на достаточно однородное техническое состояние узлов в группах и подтверждают гипотезу об отсутствии неисправных узлов.



Эмпирические и теоретические функции распределения СКЗ виброускорения: 1 – подшипники ТЭД; 2, 3 – буксы моторных и прицепных вагонов

Статистические параметры и результаты проверки гипотезы об однородности группы однотипных узлов механической части электропоезда по критерию Колмогорова — Смирнова приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Проверка однородности параметров вибрации подшипников ТЭД по критерию Колмогорова – Смирнова

Номер вагона			$\overline{\overline{D}}$			$Mx$ , $M/c^2$	$\sigma$ , $M/c^2$	$v_{\sigma}$	
томер вагона	2	4	6	8	10	171X, W/C	0, M/C	<b>ν</b> σ	
2		0,05	0,19	0,18	0,18	18,63	1,17	0,06	
4	+		0,17	0,15	0,19	16,20	2,63	0,16	
6	+	+		0,10	0,05	15,52	1,01	0,07	
8	+	+	+		0,1	16,69	1,25	0,07	
10	+	+	+	+		16,82	1,80	0,11	

Примечание: (+) — гипотеза подтверждается  $\overline{D} < D_{(0,05)}$ , (–) — гипотеза отвергается  $\overline{D} \ge D_{(0,05)}$ .

Таблица 2 – Проверка однородности параметров вибрации букс моторных вагонов по критерию Колмогорова – Смирнова

Номер вагона			$\overline{\overline{D}}$			$Mx$ , $M/c^2$	$\sigma$ , $M/c^2$	$v_{\sigma}$
тюмер вагона	2	4	6	8	10	IVIX, IVI/C	0, M/C	νσ
2		0,11	0,12	0,11	0,06	19,07	1,75	0,09
4	+		0,13	0,15	0,13	19,18	2,09	0,11
6	+	+		0,14	0,13	21,44	2,62	0,12
8	+	+	+		0,15	19,63	1,56	0,08
10	+	+	+	+		18,68	1,59	0,09

Примечание: (+) — гипотеза подтверждается  $\overline{D} < D_{(0,05)},$  (—) — гипотеза отвергается  $\overline{D} \ge D_{(0,05)}.$ 

В результате проверки установлено, что с вероятностью ошибки  $\alpha=0.05$  гипотеза об однородности группы однотипных узлов механической части рельсового подвижного по параметрам вибрации, полученным в процессе движения, подтверждается.

Таблица 3 – Проверка однородности параметров вибрации букс прицепных вагонов по критерию Колмогорова – Смирнова

Номер вагона			$\overline{\overline{D}}$			$Mx$ , $M/c^2$	σ, м/с <sup>2</sup>	$v_{\sigma}$
помер вагона	1	3	5	7	9	1712, 1717		
1		0,06	0,12	0,10	0,18	41,34	3,40	0,08
3	+		0,18	0,10	0,18	40,14	5,30	0,13
5	+	+		0,13	0,18	47,32	5,90	0,12
7	+	+	+		0,13	42,17	4,72	0,11
9	+	+	+	+		47,30	3,55	0,07
		L	$Q_{(0,05)} = 0.217$		•		•	•

Примечание: (+) – гипотеза подтверждается  $\overline{D} < D_{(0.05)}$ , (–) – гипотеза отвергается  $\overline{D} \ge D_{(0.05)}$ .

На основании изложенного можно сделать выводы.

- 1. В результате проведенных исследований установлено, что буксы моторных и прицепных вагонов и моторно-якорные подшипники ТЭД существенно различаются по уровням СКЗ виброускорения и составляют индивидуальные группы однородных узлов.
- 2. Результаты проведенных исследований показывают, что СКЗ виброускорения однотипных узлов электропоезда относятся к одной генеральной совокупности.
- 3. Проведенный анализ подтвердил возможность группирования вибрационных параметров для однотипных узлов всего электропоезда.
- 4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых способов и совершенствовании существующих алгоритмов диагностирования технического состояния узлов электропоезда по параметрам вибрации.

#### Список литературы

- 1. Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация МВПС на основе мониторинга в реальном времени [Текст] / В. Н. Костюков, С. В. Сизов и др. // Наука и транспорт / ООО «Т-Пресса». СПб, 2008. С. 8-13.
- 2. Костюков, В. Н. Мониторинг безопасности производства [Текст] / В. Н. Костюков. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
- 3. Непрерывный мониторинг состояния мотор-вагонного подвижного состава [Текст] / С. В. Сизов, В. П. Аристов и др. // Железнодорожный транспорт. 2008. № 6. С. 41, 42.
- 4. Костюков, А. В. Исследование вибрационной активности узлов механической части рельсового подвижного состава [Текст] / А. В. Костюков, А. Е. Цурпаль, В. В. Басакин // Доклады XX всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике / РОНКТД. М., 2014. С. 353 355.
- 5. Костюков, А. В. Исследование вибрационной активности узлов механической части рельсового подвижного состава [Текст] /А. В. Костюков, А. Е. Цурпаль, В. В. Басакин // Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM-MFPT 2014 // Сб. материалов XI междунар. конф. Манчестер, 2014. C. 15 18.
- 6. Костюков, В. Н. Методика нормирования диагностических признаков электрических цепей электропоездов [Текст] / В. Н. Костюков, А. В. Костюков, Д. В. Казарин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 110 116.
  - 7. Закс, Л. Статистическое оценивание [Текст] / Л. Закс. М.: Статистика, 1976. 598 с.
- 8. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. М.: Наука, 1983.-416 с.
- 9. Пат. 2386563 Российская Федерация, МПК В 61 L 3/00, В 61 L 25/00. Система мониторинга электропоездов [Текст] / Костюков В. Н., Костюков А. В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «НПЦ «Динамика». № 2008139837/11; заявл. 07.10.2008; опубл. 20.04.2010.

#### References

- 1. Kostiukov V. N., Sizov S. V. A safe resource-saving operation MVPS based on monitoring in the re-cial time [Bezopasnaia resursosberegaiushchaia ekspluatatsiia MVPS na osnove monitoringa v re-al'nom vremeni]. *Nauka i transport Science and Transportation*, 2008, pp. 8 13.
- 2. Kostiukov V. N. *Monitoring bezopasnosti proizvodstva* (Production safety monitoring). Moscow: Mashinostroenie, 2002, 224 p.
- 3. Sizov S. V., Aristov V. P. Continuous monitoring of the state of the motor-car rolling stock [Nepreryvnyi monitoring sostoianiia motor-vagonnogo podvizhnogo sostava]. *Zheleznodorozhnyi* transport Rail, 2008, no. 6, pp. 41 42.
- 4. Kostiukov A. V., Tsurpal' A. E., Basakin V. V. [Issledovanie vibratsionnoi aktivnosti uzlov mekhanicheskoi chasti rel'sovogo po-dvizhnogo sostava]. *Doklady XX Vserossiiskaia nauchnotekhnicheskaia konferentsiia po nerazrushaiushchemu kontroliu i tekhnicheskoi diagnostike* (Conference papers of XX Russian Scientific-Technical Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics). Moscow, 2014, pp. 353 355.
- 5. Kostiukov A. V., Tsurpal' A. E., Basakin V. V. Investigation vibratory activity units of the mechanical part of rail rolling stock [Issledovanie vibratsionnoi aktivnosti uzlov mekhanicheskoi chasti rel'sovogo podvizhnogo sostava]. *Sbornik XI mezhdunarodnoy konferencii «Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM-MFPT 2014»* (Collection of XI International conference «Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM-MFPT 2014»). Manchester, 2014, pp. 15 18.
- 6. Kostiukov, V. N., Kostiukov A. V., Kazarin D. V. Methods of standardization of diagnostic signs of electrical circuits, electric [Metodika normirovaniia diagnosticheskikh priznakov elektricheskikh tsepei elektropoezdov]. *Materialy konferentsii «Ekspluata-tsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tiagi poezdov»* (Conference materials «Exploitation Zion reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction»). Omsk, 2012, pp. 110 116.
  - 7. Zaks L. Statisticheskoe otsenivanie (Statistical estimation). Moscow: Statistika, 1976, 598 p.
- 8. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* (Tables of Mathematical Statistics). Moscow: Nauka, 1983, 416 p.
  - 9. Kostiukov V. N., Kostiukov A. V. Patent RU 2386563, 20.04.2010.

УДК 624.042.062

#### Л. В. Красотина

# УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СБОРНЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В настоящей работе представлен вариант учета податливости стыков посредством математического моделирования сборных однослойных цилиндрических геометрически ортотропных оболочек на основе контактной краевой задачи конструкционного типа.

В различных областях техники в последнее время часто применяются конструкции в виде тонкостенных оболочек или их фрагментов, например, котел цистерны для перевозки жидких и газообразных грузов, конструкции локомотивных и вагонных депо в виде ангаров, складские помещения и в ряде других искусственных сооружений [1, 2].

Сборные однослойные профилированные бескаркасные несущие цилиндрические оболочки — обширный класс оболочек, представляющих большой практический интерес. В современных условиях возобновление интереса к указанным конструкциям связано с совер-

шенствованием технологий производства, появлением новых материалов, существенно улучшающих их прочностные и эксплуатационные характеристики, а развитие вычислительной техники позволило по-новому взглянуть на проблемы проектирования сборных оболочек.

Сборные однослойные профилированные бескаркасные несущие цилиндрические оболочки имеют ряд конструктивных особенностей, таких как поперечная гофрировка (рисунки 1, 2), они выполнены из заготовок трапециевидного сечения (являются геометрически ортотропными) и состоят из ряда стыкуемых цилиндрических заготовок (рисунок 2).

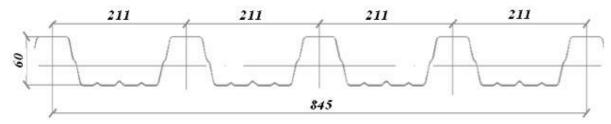


Рисунок 1 – Пример поперечного сечения одной заготовки для однослойной цилиндрической оболочки

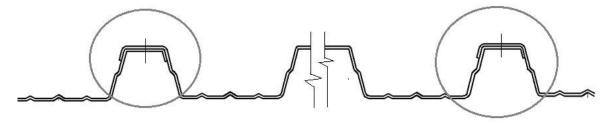


Рисунок 2 – Места соединения заготовок (выделены удвоение толщины профиля, соединительные элементы)

Поскольку ширина цилиндрических заготовок варьируется от 500 до 900 мм, в зависимости от типа поперечного сечения профиля, количество периодических поперечных стыков в проектируемых оболочках может быть значительным.

Рассматриваемые оболочки тонкие, следовательно, на их статическую работу значительное влияние оказывают геометрические характеристики поперечного сечения (топология) профилей. За счет наличия стыков появляются периодические участки с двойной толщиной верхних несущих полок профиля (см. рисунок 2), что приводит к увеличению жесткости оболочки. В расчетах необходимо учесть трение и возможное проскальзывание контактирующих поверхностей, влияние шага расстановки соединительных элементов на прочность стыков. Обычно в расчетной практике подобные оболочки рассматриваются как сплошные, не имеющие стыков.

Для эффективного использования сборных однослойных профилированных бескаркасных несущих цилиндрических оболочек при их проектировании необходимо учесть все указанные выше особенности [2].

Для исследования влияния поперечных стыков на напряженно-деформированное состояние сборных однослойных профилированных бескаркасных несущих цилиндрических оболочек и выявления напряженного состояния соединительных элементов создан ряд конечно-элементных моделей оболочек. Один из вариантов конечно-элементной модели (КЭМ) оболочки приведен на рисунке 3, фрагмент оболочки в опорной зоне поперечного стыка — на рисунке 4.

Подготовка КЭМов (геометрической и дискретной моделей объекта), данные по внешнему воздействию, граничные условия, визуализация и обработка результатов анализа проводилась с использованием PRE/POST processor FEMAP. Для расчетов был применен ряд универсальных блоков программного комплекса «NX NASTRAN».

Конструктивной особенностью поперечных стыков сборных оболочек является использование соединительных элементов, размещенных вдоль стыков с заданным шагом, поэтому стык под нагрузкой имеет переменную площадь контакта (рисунок 5), что также необходимо учитывать в расчетах.

Для данной краевой контактной задачи характерно наличие зон контакта переменной конфигурации. В расчетах учитывалось, что координаты узлов конечно-элементных (КЭ) контактирующих поверхностей верхней заготовки должны быть всегда больше координат нижней, что физически обозначает исключение взаимопроникновения поверхностей контактирующих арочных заготовок. При создании конечно-элементных моделей использовался метод формирования возможных зон контакта типа «поверхность – поверхность» с помощью регионов контакта при следующих условиях их моделирования:

- 1) в конечно-элементных моделях цилиндрических оболочек из двух и более заготовок расстояние между серединными поверхностями контактирующих элементов принималось равным толщине профиля;
- 2) контактирующие узлы (кроме соединительных элементов) и конечные элементы оболочки заранее не известны;
- 3) трение между заготовками моделировалось в соответствии с законом трения Кулона в классической формулировке;
  - 4) задача решалась в упругой области;
- 5) появление и исчезновение контактных зон (пар узлов, соединений) может иметь любую последовательность;
- 6) возможно изменение условий сопряжения стыка от натяга до зазора и обратно на каждой из пар контактирующих поверхностей в процессе нагружения оболочки;
  - 7) моделировались сцепление и проскальзывание заготовок.

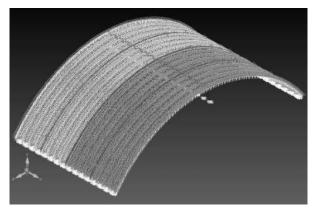


Рисунок 3 – Пример расчетной схемы и КЭМ сборной однослойной цилиндрической оболочки из четырех заготовок, профиль АН60

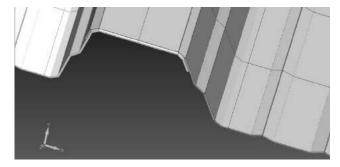


Рисунок 4 – Фрагмент стыка заготовок внахлест

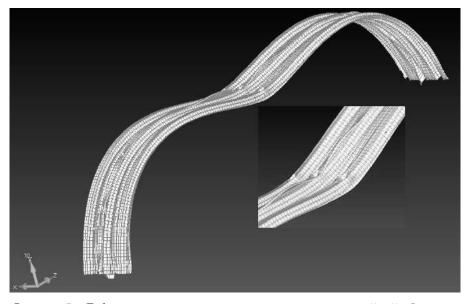


Рисунок 5 – Деформированная схема стыка заготовок однослойной оболочки

Для получения корректных результатов потребовалось модифицировать сетку КЭ в зоне (пятне) контакта.

Моделировался ряд оболочек сортамента ООО «Монтажпроект» (г. Омск) с отношением стрелы подъема к пролету от 0,1 (пологие незамкнутые оболочки) до 0,25 с градацией через 0,01 для всех рассмотренных типов оболочек. Рассмотрены возможные варианты их нагружения. Полученные результаты расчетов проанализированы и систематизированы.

Проектирование сборных однослойных профилированных бескаркасных несущих цилиндрических оболочек сопряжено с рядом проблем. На этапе эскизного проектирования таких конструкций необходимо учесть большое количество параметров:

- геометрию конструкции (радиус кривизны, тип профиля, толщину профиля);
- технологические возможности изготовления конструкции;
- внешнюю нагрузку и ее вариации (сочетания);
- наличие поперечных стыков и совместную работу заготовок в этих стыках;
- диаметр и шаг соединительных элементов в поперечных стыках.

Учитывая большое количество входных параметров, сложный и длительный процесс моделирования сборных профилированных оболочек, значительное время расчета конечно-элементных моделей, считаем, что проводить вариантные расчеты для выявления оптимальной конструкции методом конечных элементов (МКЭ) сложно и неэффективно.

Принятые при анализе указанных оболочек допущения (деформации и углы поворота малы, а материал изотропен и подчиняется закону Гука) позволяют свести задачу расчета оболочки к решению линейной двумерной краевой задачи. Очевидно, что сужается круг рассматриваемых задач, но подавляющее большинство тонкостенных конструкций, используемых в судо- и авиастроении, химическом машиностроении, строительстве и других отраслях, удовлетворяют сформулированным условиям.

В связи с изложенным предложена инженерная методика предварительного расчета сборных профилированных несущих оболочек по критериям прочности и жесткости с учетом их основных конструктивных особенностей. В основе предложенной методики лежит известная математическая модель Кирхгофа — Лява, представляющая собой систему дифференциальных уравнений.

Для создания инженерной методики проведено сравнение значений перемещений и напряжений, определенных по модели Кирхгофа – Лява, и МКЭ для всех рассмотренных типов оболочек сортамента ООО «Монтажпроект» (г. Омск) [3] и возможных вариантов их нагружения.

Выявлены существенные расхождения в определении перемещений и напряжений по этим двум методикам. Это связано с тем, что при расчете напряжений и перемещений по модели Кирхгофа — Лява невозможно учесть наличие гофрировки профиля и поперечных стыков между заготовками, совместную работу заготовок в стыке, наличие соединительных элементов и ряд других факторов.

Для приведения в соответствие перемещений и внутренних сил, определенных МКЭ и по модели Кирхгофа – Лява, в модель Кирхгофа – Лява введен коэффициент  $k_1 = F(\varphi)$ , корректирующий значения радиальных перемещений, представляющий собой кусочнонепрерывную функцию.

Так, например, для сборной оболочки с отношением стрелы подъема к пролету 0,2 из профиля АН60 [3] коэффициент  $k_1 = F(\varphi)$ , корректирующий изменение радиальных перемещений, представляет собой кусочно-непрерывную функцию:

При 
$$0^{\circ} \le \phi \le 4,5^{\circ}$$

 $k_1 = -357177921,439\phi^6 + 104187086,905\phi^5 - 12246254,785\phi^4 + 763117,701\phi^3 - 24764,895\phi^2 + 442,851\phi - 2,816;$ 

при 
$$4.5^{\circ} \le \phi \le 21.1^{\circ}$$

$$k_1 = -3405, 731\phi^6 + 4214, 892\phi^5 - 2217, 767\phi^4 + 630, 527\phi^3 - 103, 662\phi^2 + 8, 607\phi + 0, 511;$$
 при  $21, 1^\circ \le \varphi \le 25, 2^\circ$  
$$k_1 = -304079056, 082\phi^6 + 731128253, 258\phi^5 - 732283854, 734\phi^4 + 391063545, 244\phi^3 - -1174397056, 082\phi^2 + 18804165, 720\phi - 1254149, 561;$$
 при  $25, 2^\circ \le \varphi \le 27, 2^\circ$  
$$k_1 = 213021943, 692\phi^4 - 392214869, 31\phi^3 + 270732172, 021\phi^2 - 83034138, 25\phi + 9547442, 993;$$
 при  $27, 2^\circ \le \varphi \le 38, 2^\circ$  
$$k_1 = 364646, 219\phi^6 - 1292822, 43\phi^5 + 1907469, 653\phi^4 - 1499241, 363\phi^3 + 662137 / 97\phi^2 - -155820, 687\phi + 15268, 651;$$
 при  $38, 2^\circ \le \varphi \le 40, 6^\circ$  
$$k_1 = -594, 7\phi^5 + 2015, 05\phi^4 - 2754, 916\phi^3 + 1900, 076\phi^2 - 662, 176\phi + 94, 338.$$

Предложен табличный способ определения корректирующих коэффициентов  $k_1 = F(\varphi)$  для любого типа сечения оболочек сортамента OOO «Монтажпроект» [3].

Значения коэффициентов  $k_1$  для корректировки радиальных перемещений, определенных по модели Кирхгофа — Лява

$\varphi$	$k_{1}$	$\varphi$	$k_1$	$\varphi$	$k_{1}$	$\varphi$	$k_{1}$
0,406	-0,686	10,558	0,728	20,710	0,409	30,862	1,075
0,812	0,164	10,964	0,721	21,117	0,375	31,268	1,046
1,2183	0,464	11,371	0,715	21,523	0,349	31,675	1,020
1,624	0,579	11,777	0,707	21,929	0,306	32,081	0,997
2,031	0,650	12,183	0,700	22,335	0,248	32,487	0,975
2,437	0,707	12,589	0,693	22,741	0,184	32,893	0,956
2,843	0,741	12,995	0,685	23,147	0,099	33,299	0,939
3,249	0,752	13,401	0,677	23,553	-0,020	33,705	0,924
3,655	0,760	13,807	0,668	23,959	-0,183	34,111	0,910
4,061	0,781	14,213	0,660	24,365	-0,422	34,517	0,899
4,467	0,779	14,619	0,651	24,772	-0,848	34,923	0,888
4,873	0,783	15,025	0,642	25,178	-1,730	35,329	0,879
5,279	0,784	15,431	0,632	25,583	-4,822	35,735	0,869
5,685	0,783	15,838	0,622	25,990	-0,323	36,142	0,859
6,091	0,782	16,244	0,611	26,396	4,434	36,548	0,849
6,497	0,779	16,650	0,600	26,802	2,749	36,954	0,838
6,904	0,776	17,056	0,588	27,208	2,116	37,360	0,828
7,310	0,772	17,462	0,575	27,614	1,778	37,766	0,821
7,716	0,767	17,868	0,561	28,020	1,585	38,172	0,817
8,122	0,763	18,274	0,545	28,426	1,441	38,578	0,806
8,528	0,758	18,680	0,528	28,832	1,335	38,984	0,799
8,934	0,752	19,086	0,510	29,238	1,255	39,390	0,791
9,340	0,746	19,492	0,489	29,645	1,195	39,797	0,784
9,746	0,740	19,898	0,465	30,051	1,147	40,201	0,776
10,152	0,734	20,305	0,439	30,457	1,108	40,609	0,768

Значения коэффициентов  $k_1 = F(\varphi)$  в таблице 1 приведены только для половины оболочки. Остальные значения коэффициентов  $k_1 = F(\varphi)$  при необходимости могут быть определены с учетом осевой симметрии.

Откорректированная математическая модель имеет вид:

$$k_1'(\varphi) \cdot W - \frac{d[k_1(\varphi) \cdot V]}{d\varphi} = r \cdot \theta; \qquad \frac{d}{d\varphi} [k_1'(\varphi) \cdot W] + k_1(\varphi) \cdot V = 0;$$

$$M_{x}^{*} = \frac{EJ_{x}}{r^{2}} \left\{ \frac{d[(k_{1})_{\varphi}^{\prime} \cdot W]}{d\varphi} - \frac{d^{2}[k_{1} \cdot V]}{d\varphi^{2}} \right\}; \qquad Q_{y}^{*} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dM_{x}^{*}}{d\varphi};$$

$$N^{*} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d^{2}M_{x}^{*}}{d\varphi^{2}} + q_{y} \cdot r; \quad \frac{dN^{*}}{d\varphi} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{dM_{x}^{*}}{d\varphi} - q_{z} \cdot r.$$

Для выявления достоверности расчетов сборных профилированных цилиндрических несущих оболочек по предложенной инженерной методике проведена серия натурных испытаний

Расхождение в результатах расчетов по предложенной методике с экспериментальными данными не превышает 12-15%, что достаточно для инженерных расчетов. Следовательно, предложенную методику допустимо использовать для предварительных расчетов сборных однослойных профилированных бескаркасных несущих цилиндрических оболочек по критериям прочности и жесткости.

Разработанная с помощью предложенной методики кровля здания в г. Омске по ул. Нефтезаводской, д. 8 в виде сборной однослойной профилированной несущей цилиндрической оболочки безаварийно эксплуатируется более пяти лет [4].

Предложена инженерная методика предварительного расчета сборных профилированных несущих оболочек по критериям прочности и жесткости с учетом их основных конструктивных особенностей.

В дальнейшем предполагается провести комплекс теоретических, экспериментальных и проектных работ по созданию нормативных рекомендаций по расчету и конструированию предлагаемых систем.

### Список литературы

- 1. Соколов, М. М. Динамическая нагруженность вагона [Текст] / М. М. Соколов, В. Д. Хусидов, Ю. Г. Минкин. М.: Транспорт, 1981. 207 с.
- 2. Третьяков, А. В. Метод исследования напряженно-деформированного состояния экипажа с резервуаром для перевозки жидких грузов [Текст] / А. М. Соколов, А. А. Битюцкий, А. В. Третьяков / ЛИИЖТ. Л., 1991. 39 с.
- 3. Технические условия 1122-001-49529858-2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами / СибНИИстрой. Новосибирск, 2005. 18 с.
- 4. Красотина, Л. В. Использование арочного профнастила при реконструкции зданий [Текст] / Л. В. Красотина, Ю. В. Краснощеков, Ю. М. Мосенкис // Вестник СибАДИ / Сибирская гос. автомобильно-дорожная академия. Омск. 2009. № 4 (14). С. 41 45.

### References

- 1. Sokolov M. M., Husydow V. D., Minkin J. G. *Dinamicheskaia nagruzhennost' vagona* (Dynamic loading of wagon). Moscow: Transport, 1981, 207 p.
- 2. Tretyakov A. V., Bityutsky A. A., Tretyakov A. V. *Metod issledovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia ekipazha s rezervuarom dlia perevozki zhidkikh gruzov* (Method study of stress-strain state of the crew with the tank for transportation of liquid loads). Leningrad: liizht, 1991. 39 p
- 3. Tekhnicheskie usloviia 1122-001-49529858-2005. Profili stal'nye gnutye arochnye s trapetsievidnymi goframi (Technical specifications 1122-001-49529858-2005. Steel bent profile, arched with trapezoidal corrugations). Novosibirsk, SibNIIstroy, 2005, 18 p.
- 4. Krasotina L. V., Krasnoshchekov Y. V., Mosenkis Y. M. Using arch sheeting for reconstruction [Ispol'zovanie arochnogo profnastila pri rekonstruktsii zdanii]. *Vestnik SibADI SibADI Bulletin*, 2009 no. 4 (14), pp. 41 45.

УДК 629.424.1

В. А. Михеев, П. Б. Сергеев

# ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

В статье рассматривается подход к оперативной оценке технического состояния функциональных подсистем энергетической установки тепловоза в составе комплексных микропроцессорных систем управления. Представлен подход к оперативной оценке технического состояния топливной системы. По результатам анализа граф-модели топливной системы выделена совокупность контрольных параметров, разработан алгоритм, позволяющий установить причины выхода контролируемых параметров за допустимые пределы.

Эффективность эксплуатации тепловозов во многом зависит от качества функционирования подсистем дизельной энергетической установки – топливной, масляной и охлаждения, эффективность которых в процессе эксплуатации снижается, что приводит к работе дизеля при повышенной температуре теплоносителей и деталей, к снижению надежности цилиндропоршневой группы, ограничению мощности силовой установки и, как следствие, к ухудшению топливной экономичности дизельной энергетической установки и тепловоза в целом [1]. Кроме того, практика эксплуатации тепловозов выявила значительные вариации ресурсов узлов и деталей функциональных подсистем, что свидетельствует о необходимости осуществления непрерывного оперативного контроля их технического состояния в условиях эксплуатации.

Важным звеном в задаче оперативной оценки и управления техническим состоянием тепловозов являются комплексные микропроцессорные системы управления (МСУ) со встроенными подсистемами диагностики, которыми в настоящее время оборудуется все серийно выпускаемые локомотивы. МСУ имеют возможность осуществлять непрерывное измерение и регистрацию значений достаточно большого числа аналоговых и дискретных параметров работы оборудования. Однако получаемые МСУ данные в связи с непродолжительным опытом их эксплуатации и отсутствием параметрических методик обработки регистрируемой информации практически не используются для оперативной оценки технического состояния функциональных подсистем энергетической установки. Расширение функциональных возможностей встроенных подсистем диагностики МСУ являются эффективным и малозатратным способом оперативной оценки технического состояния основных подсистем и узлов дизельной энергетической установки тепловоза.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методик обработки информации, регистрируемой МСУ, которые позволяли бы оперативно выявлять факт отклонения технического состояния функциональных подсистем от нормального. Для этого необходимо последовательно решить следующие взаимосвязанные задачи: во-первых, сформировать совокупность контрольных параметров в подсистемах диагностики МСУ; во-вторых, разработать методику обработки контрольных параметров с целью оперативной оценки технического состояния функциональных подсистем энергетической установки.

Наиболее строгим подходом к определению совокупности контрольных параметров является путь, основанный на построении и анализе модели исследуемого объекта. Использование конкретной модели обусловливается спецификой рассматриваемого объекта. Функциональные подсистемы энергетической установки относятся к классу непрерывных объектов и характеризуются многоэлементной блочной структурой, большим числом входных и выходных параметров, упорядоченностью связей и разнородностью процессов функционирования. Одним из путей математического описания подобных сложных объектов представляется путь составления граф-модели [2 – 5]. Функционирующий сложный объект представляется топологическим пространством и изображается в виде графа, отображающего существенные свойства функционирования объекта и множество взаимосвязей его параметров. Под тополо-

гическим пространством понимается пара  $T=(X,\Theta)$ , где X – конечное абстрактное множество  $X=\{x_1,...,x_l\}$ ,  $\Theta$  – топология, определенная в множестве X заданием на нем бинарного отношения  $\Phi$ , связывающего две точки –  $x_i(x_i \in X)$  и  $x_j(x_j \in X)$ , причем  $x_i \neq x_j$  [2, 6]. Реализацию предлагаемого подхода рассмотрим на примере топливной системы.

Функциональная блок-схема топливной системы тепловозного дизеля [7] представлена на рисунке 1, где  $T_{\rm O}$  – температура окружающей среды;  $T_{\rm TE}$  – температура топлива в топливном баке (ТБ);  $h_{\text{ТБ}}$  – уровень топлива в ТБ;  $G_{\text{ТБ}}$  – количество топлива, забираемого из ТБ;  $H_{\Phi\Gamma}$  – давление потока топлива после фильтра грубой очистки ( $\Phi\Gamma$ O);  $G_{\Phi\Gamma}$  – количество топлива, проходящего через  $\Phi \Gamma O$ ;  $T_{\Phi \Gamma}$  – температура топлива после  $\Phi \Gamma O$ ;  $n_{\text{TH}}$  – частота вращения вала топливоподкачивающего насоса (ТПН);  $P_{\mathrm{TH}}$  – давление топлива перед фильтром тонкой очистки ( $\Phi$ TO);  $T_{\text{TH}}$  – температура топлива после ТПН;  $G_{\text{TH}}$  – количество топлива, подведенного к  $\Phi$ TO;  $P_{\Phi T}$  – давление топлива после  $\Phi$ TO;  $T_{\Phi T}$  – температура топлива перед  $\Phi$ TO;  $G_{\Phi T}$  – количество топлива, прошедшего через  $\Phi$ TO;  $P_{KT}$  – давление топлива в надплунжерном пространстве ТНВД;  $T_{\rm KT}$  – температура топлива в топливный коллектор (КТ);  $G_{\rm KT}$  – количество топлива, подведенного к ТНВД;  $l_{\rm P}$  – выход реек топливного насоса высокого давления (ТНВД);  $n_{\rm II}$  – частота вращения коленчатого вала дизеля;  $P_{\rm HII}$  – давление топлива в трубопроводах высокого давления на входе в топливную форсунку  $\Phi$ ;  $G_{\rm HI}$  – цикловая подача топлива ТНВД;  $T_{\rm HД}$  – температура топлива после ТНВД;  $P_{\rm T}$  – давление впрыскиваемого в цилиндр топлива;  $q_{\rm II}$  – цикловая подача топлива;  $T_{\rm T}$  – температура впрыскиваемого

 $P'_{\rm KT}$  — давление топлива в КТ;  $G'_{\rm KT}$  — количество топлива, поступающего в КТ;  $P'_{\rm TH}$  — давление топлива после ТПН;  $G'_{\rm TH}$  — производительность ТПН;  $G_{\rm ПК}$  — количество топлива, сливаемого через предохранительный клапан (ПК);  $G_{\rm ПрK}$  — количество топлива, сливаемого через перепускной клапан (ПрК);  $T'_{\rm T\Pi}$  — температура топлива на входе в топливоподогреватель (ТП);  $G_{\rm B\Pi}$  — количество воды, проходящей через ТП;  $P_{\rm B\Pi}$  — давление потока воды на входе в ТП;  $T_{\rm B\Pi}$  — температура воды на выходе из ТП;  $P'_{\rm B\Pi}$  — давление воды на выходе из ТП;  $F'_{\rm B\Pi}$  — количество топлива, сливаемого в ТБ из ТП;  $F'_{\rm T\Pi}$  — температура топлива на выходе из ТП.

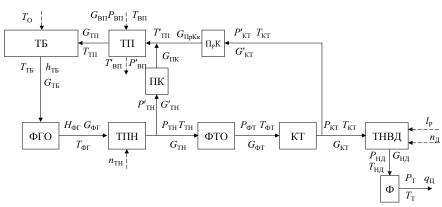


Рисунок 1 – Функциональная блок-схема топливной системы

Составление модели функционирования топливной системы (TC) тепловозного дизеля  $G_{\text{TC}}(X,U)$  с использованием метода граф-описания предполагает задание в топологическом пространстве конечного множества функциональных параметров, образующих конечное множество вершин графа X, соответствующих причинно-следственных связей между ними, образующих конечное множество ребер U ( $X \cap U = \emptyset$ ), и трехместного предиката  $P(x,u,y),\ x,y\in X$  и  $u\in U$  [2, 6].

В работе [2] к выделению рекомендованы следующие конечные множества параметров: входные параметры (множество K) — параметры воздействия других объектов или окружающей среды; выходные параметры (множество R) — параметры рассматриваемого объекта,

воздействующие на другие объекты и системы; параметры процесса функционирования (множество F) — характеристики множества подпроцессов, составляющих основной процесс функционирования топливной системы; структурные параметры (множество E) и дефекты (множество D). Выделим параметры указанных множеств на основе рассмотрения физических процессов, отражающих сущность функционирования топливной системы и работоспособность ее структурных элементов.

В качестве входных параметров (множество K) в соответствии с функциональной блоксхемой (см. рисунок 1) рассматриваются температура окружающего воздуха  $T_{\rm O}$ ; выход рейки топливного насоса и частота вращения коленчатого вала дизеля  $l_{\rm P}$  и  $n_{\rm H}$ ; температура, давление и расход воды ТП  $T_{\rm B\Pi}$ ,  $P_{\rm B\Pi}$  и  $G_{\rm B\Pi}$ ; частота вращения привода ТПН  $n_{\rm TIIH}$ . Основными выходными характеристиками процесса функционирования топливной системы (множество R) служат цикловая подача, температура и давление впрыска топлива  $q_{\rm B\Pi}$ ,  $T_{\rm B\Pi}$  и  $P_{\rm B\Pi}$ .

Параметры множества F выделим на основе анализа подпроцессов функционирования. Межблочные взаимосвязи функциональных элементов топливной системы низкого давления можно охарактеризовать уравнением Бернулли для реальной жидкости, которое для рассматриваемой системы запишется в виде [8, 9]:

$$z_{ri} + P_{ri} / (\rho_{r}g) + (\alpha_{i} v_{ri}^{2}) / (2g) = z_{rj} + P_{rj} / (\rho_{r}g) + (\alpha_{j} v_{rj}^{2}) / (2g) + h_{i-j},$$
(1)

где  $z_{\text{т}i}$ ,  $z_{\text{т}j}$  — высота расположения центра тяжести соответственно i-го и j-го сечений потока над плоскостью сравнения (напор положения или уровень жидкости);  $P_{\text{т}i}/(\rho_{\text{т}}g)$  — напор давления потока топлива;  $(\alpha_i \upsilon_{\text{т}i}^2)/(2g)$  — скоростной напор потока топлива;  $h_{i\text{-}j}$  — потерянная удельная энергия потока или потеря напора топлива на участке i-j (гидравлические потери напора);  $\upsilon_{\text{т}} = G_{\text{т}}/\omega_{\text{т}}$  — средняя скорость топлива на участке;  $P_{\text{т}}$  — давление в центре тяжести рассматриваемого сечения;  $G_{\text{т}}$  — расход (поток) топлива;  $\omega_{\text{т}}$  — живое сечение потока топлива;  $\rho_{\text{т}}$  — плотность жидкости;  $\rho_{\text{т}}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока.

Производительность ТПН является одним из важнейших параметров топливной системы тепловозного дизеля, которая характеризуется количеством массовой подачи топлива, проходящего через систему в единицу времени:

$$G_{\rm TH} = \mu_{\rm TH} C_{\rm TH} \rho_{\rm T} n_{\rm TH}, \qquad (2)$$

где  $\mu_{\text{TH}}$  – коэффициент подачи насоса;  $C_{\text{TH}}$  – постоянная для данного типа насоса;  $\rho_{\text{т}}$  – плотность топлива, которая представляется функцией рабочей температуры топлива в ТБ;  $n_{\text{TH}}$  – частота вращения привода ТПН.

Фильтры тонкой и грубой очистки топлива ФТО и ФГО как элементы гидравлической цепи представляют собой местные сопротивления, для которых на основании уравнения Бернулли можно записать [8, 9]:

$$P_{\rm TO} = P_{\rm TH} - \xi_{\rm TO} \, \rho_{\rm T} v_{\rm TO}^2 / 2, \tag{3}$$

где  $\xi_{\text{Т}\Phi}$  – коэффициент гидравлического сопротивления фильтра;  $P_{\text{T}H}$ ,  $P_{\text{T}\Phi}$  – соответственно давление до и после фильтра;  $\rho_{\text{T}}$  – плотность топлива;  $\upsilon_{\text{T}\Phi}$  – средняя скорость топлива в фильтре.

Клапаны ПрК и ПК топливной системы представляют собой подпружиненные шарики, закрывающие отверстия для перепускания топлива. Потери напора на клапанах представляют собой потери в местных сопротивлениях [8, 9]:

$$h_{\rm kr} = \xi_{\rm rrp} \, \rho_{\rm r} \upsilon_{\rm rp}^2 / 2 \,. \tag{4}$$

Процесс формирования закона подачи топлива в топливной системе высокого давления определяется следующими основными параметрами:  $P_{\rm T}$ ,  $u_{\rm T}$ ,  $\rho_{\rm T}$  – давление, скорость движения и плотность топлива;  $d_{\rm TBД}$  – внутренний диаметр нагнетательного трубопровода;  $c_{\rm II}$  – ско-

рость плунжера;  $f_{\rm u}$  – площадь поперечного сечения иглы форсунки;  $\tau_{\rm o}$  – время движения плунжера на активной части хода; z – жесткость пружины иглы форсунки;  $P_{\rm u}$  – давление топлива под иглой при ее отрыве от седла;  $P_{\rm o}$  – давление среды в цилиндре дизеля;  $f_{\rm k}$  – площадь поперечного сечения нагнетательного клапана; y – величина подъема нагнетательного клапана;  $\mu_{\rm B}$  – коэффициент расхода для всасывающего окна;  $\mu_{\rm o}$  – коэффициент расхода отсечного окна;  $\mu_{\rm c}$  – коэффициент расхода эффективного сечения распылителя форсунки. Параметры  $c_{\rm n}$ ,  $\tau_{\rm o}$ ,  $P_{\rm o}$  определяют режим работы дизеля,  $f_{\rm k}$ ,  $\mu_{\rm b}$ ,  $\mu_{\rm o}$ ,  $\mu_{\rm c}$  – техническое состояние ТНВД, а  $f_{\rm u}$ ,  $t_{\rm o}$ ,  $t_{\rm o}$  – техническое состояние форсунки ( $\Phi$ ).

Исходя из изложенного выше основной цикл работы топливной системы отображаем множеством взаимосвязанных функциональных параметров (множество F), представляющих давление ( $P_{\text{TH}}$ ,  $P_{\Phi \text{T}}$ , ...,  $P_{\text{KT}}$ ), температуру ( $T_{\Phi \Gamma}$ ,  $T_{\text{TH}}$ , ...,  $T_{\text{KT}}$ ) и скорость движения сред ( $\upsilon_{\Phi \text{T}}$ , ...,  $\upsilon_{\Phi \Gamma}$ ), расход рабочих сред ( $G_{\text{TH}}$ ,  $G_{\text{ПК}}$ , ...,  $G_{\text{KT}}$ ) и гидравлические потери напора ( $h_{\Phi \Gamma}$ ,  $h_{\Phi \text{T}}$ , ...,  $h_{\Pi \text{K}}$ ), оказывающих наибольшее влияние на процесс течения потока топлива и его параметры.

Выделенные выше параметры соответствуют режиму нормального функционирования, поэтому для распознавания возможных неисправностей необходимо ввести структурные параметры (множество E) и дефекты (множество D).

Глубина исследования в нашем случае распространяется до агрегатов и отдельных узлов топливной системы и не рассматривает ее отдельных элементов, поэтому описание структурных параметров подмножества E здесь и далее реализуем в терминах теории размытых категорий [2]:  $E_{\Phi\Gamma}$  – техническое состояние  $\Phi\Gamma$ O;  $E_{\Pi\Pi}$  – техническое состояние  $\Pi$ H;  $E_{\Phi\Gamma}$  – техническое состояние  $\Phi$ TO;  $E_{\Pi K}$  и  $E_{\Pi p K}$  – техническое состояние  $\Pi$ K и  $\Pi$ PK;  $E_{KT}$  – техническое состояние  $\Pi$ T;  $E_{HQ}$  – техническое состояние  $\Pi$ H и  $\Pi$ PK;  $\Pi$ PK и  $\Pi$ PK

Параметры  $E_i$  выделили по следующим соображениям. Основываясь на анализе функциональной схемы и ее содержательного описания, можно констатировать, что в целом снижение давления на входе в ТНВД в эксплуатации может произойти вследствие увеличения перепада давления на ФТО в результате загрязнения фильтрующего элемента ( $E_{\phi\tau}$ ), уменьшения производительности и давления, создаваемого топливоподкачивающим насосом, из-за износа его деталей ( $E_{\text{ТПН}}$ ), загрязнения ФГО ( $E_{\Phi\Gamma}$ ), а также из-за нарушений в работе клапанов ПК и ПрК ( $E_{\Pi K}$  и  $E_{\Pi p K}$ ). Техническое состояние топливной подсистемы высокого давления характеризуется техническим состоянием ТНВД и Ф ( $E_{HД}$  и  $E_{\varphi}$ ). Возникающие в них неисправности ведут к изменению закона топливоподачи, что в конечном счете сказывается на надежности и экономичности тепловозного дизеля.

Каждый структурный параметр представляется возможным состоянием — дефектом, под которым понимаем несоответствие группы структурных параметров допустимым значениям. Число дефектов в структурных элементах топливной системы принимаем конечным и будем рассматривать как один обобщенный, влияющий на параметры  $E_{\rm i}$ .

Составленная методом граф-описания модель нормального функционирования топливной системы тепловозного дизеля представлена на рисунке 2. Ориентированный граф  $G_{\text{тс}}$  в пространстве параметров является конечным и содержит вершины трех видов: стоковые (только входящие ребра), истоковые (только исходящие ребра) и смешанные (как входящие, так и исходящие ребра).

Полученная граф-модель топливной системы в пространстве параметров позволяет осуществить процедуру выбора контрольных параметров технического состояния. Для анализа полученных граф-моделей и установления наиболее рационального подмножества контрольных параметров (множества B) был применен метод покрытия таблицы расстояний [2, 3], который базируется на оценке элементов модели, упорядочивании вершин в соответствии со значением принятого показателя эффективности, нахождении маршрутов отображения дефектов в графе. Математически задача выделения совокупности контрольных параметров технического состояния решена нахождением внешне устойчивого подмножества (ВУПа) – T

ориентированного двудольного графа, такого, что  $T \subseteq X$  и истинно логическое высказывание  $\forall_x [x \in X, x \notin T(\Gamma_x \cap T \neq \emptyset)]$ , где  $\Gamma_x$  – подмножество, образованное отображением вершины x в множестве X;  $\forall$  – квантор общности [2]. В результате получили схему покрытия в виде двудольного графа (рисунок 3), представляющую собой искомое множество контрольных параметров топливной системы.

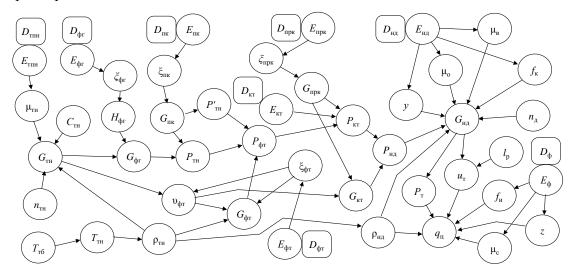


Рисунок 2 – Граф-модель топливной системы  $G_{TC}$ 

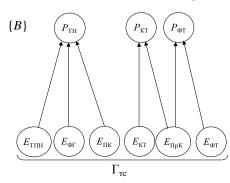


Рисунок 3 – Двудольный граф соответствия топливной системы

При разработке методики обработки контрольной информации в составе встроенных подсистем диагностики МСУ особый интерес представляет разработка способа оценки технического состояния функциональной подсистемы, допускающего возможность формализации и автоматизации логических и вычислительных операций, в частности — вычисление контролируемых параметров и их отклонений, локализация отказов по соответствующим алгоритмам.

В разработанной методике регистрации подвергается совокупность контрольных параметров  $B = \{P_{\text{тн}}, P_{\text{кт}}, P_{\phi \text{т}}\}$  при установившемся номинальном режиме работы тепловоза; позиции расположения контрольных точек в топливной системе представлены на рисунке 4.

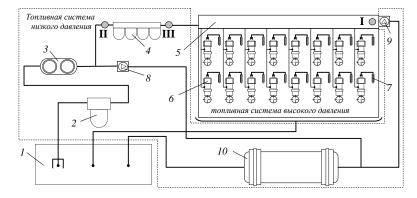


Рисунок 4 — Позиции расположения контрольных точек в топливной системе:  $1-\text{ТБ}; 2-\Phi\Gamma\text{O}; 3-\text{ТПH}; 4-\Phi\text{TO}; 5-\text{KT}; 6-\text{ТНВД}; 7-\Phi; 8-\text{ПК}; 9-\text{ПрК}; 10-\text{ТП};$  I — давление топлива в КТ  $P_{\text{KT}};$  II — давление топлива до  $\Phi\text{TO}$   $P_{\text{TH}};$  III — давление топлива после  $\Phi\text{TO}$   $P_{\Phi\text{T}}$ 

На основе выполненных измерений формируются контролируемые параметры, представленные в таблице, допустимые значения которых принимаются согласно технической документации и опыту эксплуатации.

Контролируемые параметры

Наименование, обозначение параметра, ед. измерения	Допустимые значения
Давление топлива в КТ $P_{\text{KT}}$ , МПа	$0.11 \le P_{\rm KT} \le 0.13$
Давление топлива до $\Phi$ TO $P_{\text{TH}}$ , МПа	$0.26 \le P_{\mathrm{TH}} \le 0.35$
Перепад давления топлива на $\Phi TO \Delta P_{\Phi T}$ , МПа	$\Delta P_{\Phi T} = P_{TH} - P_{\Phi T}, \Delta P_{\Phi T} \le 0.15$

Разработка алгоритма оперативной оценки технического состояния функциональных подсистем предполагает задание логических условий с использованием допустимых значений контролируемых параметров (максимальных и минимальных):

$$P_{\mathrm{KT}}^{(\mathrm{min})} \le P_{\mathrm{KT}} \le P_{\mathrm{KT}}^{(\mathrm{max})}; \tag{5}$$

$$P_{\rm KT} < P_{\rm KT}^{\rm (min)}; \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{TH}}^{(\mathrm{min})} \le P_{\mathrm{TH}} \le P_{\mathrm{TH}}^{(\mathrm{max})}; \tag{7}$$

$$\Delta P_{\Phi T} \le \Delta P_{\Phi T}^{(\text{max})}; \tag{8}$$

$$P_{\rm TH} > P_{\rm TH}^{\rm (max)} \,. \tag{9}$$

Выполнение условия (5) означает исправное состояние топливной системы низкого давления. Невыполнение условия (5) при выполнении условий (6) – (8) означает неисправность перепускного клапана, наличие утечек в топливном коллекторе. Невыполнение условий (5) и (4) и выполнение условия (6) означает неисправность фильтра грубой очистки топлива, предохранительного клапана, топливоподкачивающего насоса, наличие утечек на участке трубопровода. Невыполнение условий (5) и (8) при выполнении условий (6) и (7) означает неисправность фильтра тонкой очистки топлива. Невыполнение условий (5) и (6) при выполнении условия (9) означает неисправность предохранительного клапана, топливоподкачивающего насоса. Невыполнение совместно трех условий – (5), (6) и (9) – означает неисправность перепускного клапана.

По результатам контроля формируется отчет, содержащий заключение о техническом состоянии исследуемой системы.

Разработанный алгоритм, представленный на рисунке 5, позволяет оперативно оценить техническое состояние топливной системы и, при необходимости, установить причины выхода контролируемых параметров за допустимые пределы.

Методику обработки контрольных параметров предполагается использовать в виде дополнения к программному обеспечению серийных подсистем диагностики МСУ, при таком подходе исключается необходимость интегрировать в состав МСУ дополнительные аппаратные средства и менять регламент работы.

Подводя итог изложенному, можно сказать, что разработанные методики и алгоритмы помимо оперативной оценки функциональных подсистем энергетической установки можно использовать

для интегральной оценки технического состояния каждого тепловоза по отклонениям параметров работы его функциональных подсистем;

выявления динамики изменения технического состояния основного оборудования во времени с целью прогнозирования остаточного ресурса.

В целом применение разработанных подходов позволит сократить временные и материальные затраты на техническое обслуживание и ремонт тепловозного парка, повысить его

эффективность и эксплуатационную надежность, соответственно уменьшив потери в эксплуатационной работе.

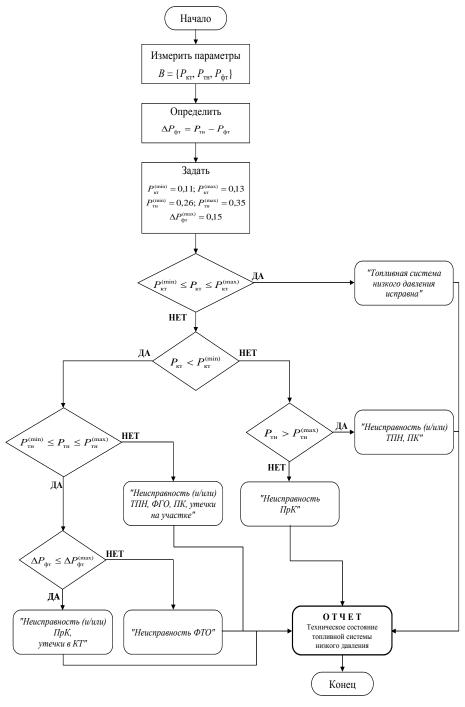


Рисунок 5 – Алгоритм оперативной оценки технического состояния топливной системы

### Список литературы

- 1. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст] / В. И. Бервинов / УМК МПС РФ. М., 1998. 193 с.
- 2. Осис, Я. Я. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис. М.: Транспорт, 1991. 244 с.
- 3. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2002. 233 с.

- 4. Сковородников, Е. И. Моделирование процессов функционирования дизель-генераторной установки тепловоза с целью оптимизации количества параметров контроля [Текст] / Е. И. Сковородников, В. А. Михеев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург. 2009. № 1 (20). С. 59 62.
- 5. Анисимов, А. С. Методы исследования взаимовлияния параметров функционирования тепловоза [Текст] / А. С. Анисимов, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2010. № 1 (1). С. 2 8.
- 6. Лекции по теории графов [Текст] / В. А. Емеличев, О. И. Мельников и др. М.: Наука, 1990.-383 с.
- 7. Тепловоз 2ТЭ116 [Текст] / С. П. Филонов, А. И. Гибалов и др. М.: Транспорт, 1996. 334 с.
- 8. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / Под ред. М. О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
  - 9. Чиняев, И. А. Судовые системы [Текст] / И. А. Чиняев. М.: Транспорт, 1984. 216 с.

### References

- 1. Bervinov V. I. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie lokomotivov* (Technical diagnosing of locomotives). Moscow: UMK Ministry of Railways of the Russian Federation, 1998, 193 p.
- 2. Osis Ia. Ia. *Diagnostirovanie na graf-modeliakh: Na primerakh aviatsionnoi i avtomobil'noi tekhniki* (Diagnosing on graph models: On examples aviation and automotive vehicles). Moscow: Transport, 1991, 244 p.
- 3. Kharlamov V. V. *Metody i sredstva diagnostirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia kollektorno-shchetochnogo uzla tiagovykh elektrodvigatelei i drugikh kollektornykh mashin posto<i>iannogo toka* (Methods and tools for diagnosing technical condition number of reflex-brush assembly traction motors and other collector cars post-direct current). Omsk: OSTU Printing House, 2002, 233 p.
- 4. Skovorodnikov E. I., Mikheyev V. A. Modelling of processes functioning of diesel locomotive power for the purpose of optimization the number of control parameters [Modelirovanie protsessov funktsionirovaniia dizel'-generatornoi ustanovki teplo-voza s tsel'iu optimizatsii kolichestva parametrov kontrolia]. *Transport Urala The Urals Transport Bulletin*, 2009, no. 1 (20), pp. 59 62.
- 5. Anisimov A. S., Mikheyev V. A., Grishina Yu. B Methods of interference locomotive functioning parameters [Metody issledovaniia vzaimovliianiia parametrov funktsionirovaniia teplovoza]. *Izvestiia Transsiba The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 1 (1), pp. 2 8.
- 6. Emelichev V. A. *Lektsii po teorii grafov* (Lectures on graph theory). Moscow: Science, 1990, 383 p.
  - 7. Filonov S. P. Teplovoz 2TE116 (Locomotive 2TE116). Moscow: Transport, 1996, 334 p.
- 8. Ed. Steinberg M. O. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam* (Handbook of hydraulic resistance). Moscow: Mechanical engineering, 1992, 672 p.
  - 9. Chinyaev I. A. Sudovye sistemy (Ship systems). Moscow: Transport, 1984, 216 p.

УДК 629.4.066

### А. В. Щелканов

### РАЗРАБОТКА ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ

В данной статье автором представлена логико-лингвистическая модель, обеспечивающая достаточную глубину и полноту диагностирования с соблюдением всех требуемых инструкцией проверок и норм. Для построения данной модели были определены диагностические признаки с учетом каждой из требуемых прове-

рок. Результаты разработки диагностической модели применены и прошли успешные испытания на различных типах электросекций.

Как показали исследования, существующие методики диагностирования пневматической системы электропоезда не обладают достаточными достоверностью, полнотой и глубиной диагностирования [1-3]. Наибольшей полнотой диагностирования обладает методика на основе инструкции по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог [4] ЦТ-ЦВ-ЦЛ-ВНИИЖТ/277, однако даже она не способна обеспечить достаточную глубину диагностирования, т. е. не способна распознавать неисправности с точностью до узла [5].

Таким образом, возникает задача разработки диагностической модели, обеспечивающей достаточные глубину и полноту диагностирования с соблюдением всех требуемых инструкцией проверок и норм.

Для построения диагностической модели определим для каждой из требуемых проверок диагностические признаки. Данное соответствие приведено в таблице.

Проверки пневматической системы и соответствующие им признаки

<b>№</b> п/п	Проверка	Признак	Примечание				
1	Проверка производительно- сти компрессора	T <sub>3</sub> 78	Время наполнения главного резервуара с 7 до 8 атм.				
2	Проверка номинальных зна-	$P_{TM}$	Среднее значение давления в ТМ				
	чений давления в магистралях	$P_{\Pi M}$	Среднее значение давления в ПМ				
3	Проверка плотности тормоз-	$dP_{TM}$	Величина падения давления в ТМ за 2,5 мин				
	ной и питательной магистралей	$P_{\Gamma P}\Pi$	Давление в ГР после 3 мин при начальном давлении 7 атм.				
4	Проверка плотности УР	$dP_{yp}$	Утечки в УР за 3 мин				
5	Проверка чувствительности ВР к торможению	$P_{TIL}T$	Давление в ТЦ через 5 мин после сброса давления в УР на 0,5 атм				
		U51T	Напряжение на поездном проводе СОТ при торможении				
6	Проверка чувствительности ВР к отпуску	Р <sub>ТЦ</sub> О	Давление в ТЦ через 4 с после перевода ручки КМ в пол 2				
		U51O	Напряжение на поездном проводе СОТ при отпуске				
7	Проверка темпа ликвидации	Тлсд	Время ликвидации сверхзарядки с 6 до 5,8 атм				
	сверхзарядного давления	$P_{TII}X$	Давление в ТЦ				
8	Проверка отсутствия недо- пустимого снижения давления в ТЦ	$dP_{TII}$	Утечки в ТЦ за 1 мин				
9	Проверка ЭПТ на торможение	$P_{\Im T}T$	Давление в ТЦ при торможении ЭПТ				
		$dP_{\Im T}$	Изменение давления в ТМ за 5 мин при ЭПТ				
10	Проверка ЭПТ на отпуск	$P_{\Im T}O$	Давление в ТЦ при отпуске ЭПТ				
11	Проверка пропускной спо- собности КМ	$T_{KM}$	Время сброса давления в ГР с 7 до 6 атм через КМ				

Перечисленные в таблице проверки являются неполными и не могут с высокой степенью достоверности определить неисправный узел пневматической системы.

Рассмотрим данное утверждение на примере некоторых признаков.

В нормально работающей пневматической системе с достаточной производительностью компрессора (ПК) в момент заряда магистралей сжатый воздух поступает от ПК в главный резервуар (ГР), далее – в питательную магистраль (ПМ), где разделяется на два основных направления: питательный резервуар (ПР) и тормозная магистраль (ТМ). Сжатый воздух поступает в ПР через редуктор и обратный клапан, в ТМ – через кран машиниста (КМ). При поездном положении КМ сжатым воздухом заряжается уравнительный резервуар (УР) и ТМ. Из ТМ сжатый воздух поступает к воздухораспределителям (ВР), через которые заряжаются запасные резервуары (ЗР). Соответственно условием удовлетворительного темпа заряда магистралей является отсутствие *недопустимых* утечек в указанных узлах. В данном случае

под *недопустимыми* понимаются утечки, сопоставимые с производительностью компрессора, рассчитываются они на основании математической модели пневматической системы [9] как падение давления в соответствующем узле за определенное время. Утечки в ПМ и ПР оцениваются по признаку  $P_{\Gamma P}\Pi$ , утечки в ТМ и подключенных к ней узлах оцениваются по признаку  $dP_{TM}$ . Таким образом, недопустимое значение диагностического признака производительности компрессора  $T_378$  может свидетельствовать о недопустимом техническом состоянии компрессора, ПМ (признак  $P_{\Gamma P}\Pi$ ) и ТМ (признак  $dP_{TM}$ ) при условии достаточной пропускной способности КМ.

В свою очередь недопустимое состояние признака РгрП может быть обусловлено либо неплотностью ПМ, либо неплотностью ПР (и его обратного клапана), а недопустимое состояние признака  $dP_{\rm TM}$  может быть обусловлено неплотностью ТМ, ЗР либо ВР. При этом необходимо иметь в виду то обстоятельство, что недопустимое техническое состояние ПМ или ТМ не обязательно приведет к недопустимому состоянию признака  $T_378$ , и, наоборот, при определенных степенях развития дефектов компрессора, ПМ и ТМ, каждый из которых нельзя однозначно отнести к недопустимому состоянию, в совокупности могут привести к недопустимому состоянию указанного признака.

Поскольку неплотности и другие неисправности определяются при разных условиях (начальном давлении, времени фиксации) и исходя из математической модели имеют нелинейную зависимость от этих условий, то для построения модели, описывающей их взаимосвязь, необходимо приведение к некоему унифицированному количественному описанию. Построить такое описание можно, применив теорию нечетких множеств [6, 7].

Для каждой неисправности d рассматриваемых узлов пневматической цепи определяем лингвистические переменные, характеризующие степень развития дефекта  $D(p) = \{ (mem), (monycmumo), (mpegyem npuнятия мер), (medonycmumo), (medonycm$ 

### функции принадлежности

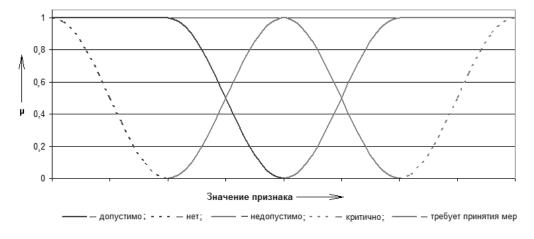


Рисунок 1 – Пример нечетких множеств лингвистических значений

На основании введенных переменных можно определить и формализовать ряд нечетких логических выводов (совокупность правил нечеткого вывода), например:

$$E$$
сли  $E(P$ гр $\Pi) =$  "недопустимо", то  $D(\Pi P) =$  "критически" и  $D(\Pi M) \neq$  "критически" или  $D(\Pi P) \neq$  "критически" и  $D(\Pi M) =$  "критически", или  $D(\Pi P) =$  "недопустимо» и  $D(\Pi M) =$  "умеренно", или  $D(\Pi P) =$  "умеренно" и  $D(\Pi M) =$  "недопустимо"

...

Однако с учетом того, что решением задачи диагностики является определение технического состояния узла, можно произвести обратный логический вывод, который представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} E c \pi u \ E(P_{\Gamma P}\Pi) = "\text{недопустимо"} \ u \ D(\Pi P) = "\text{критически", то } D(\Pi M) \neq "\text{недопустимо"} \\ E c \pi u \ E(P_{\Gamma P}\Pi) = "\text{недопустимо"} \ u \ D(\Pi P) = "\text{недопустимо", то } D(\Pi M) = "\text{умеренно"} \\ E c \pi u \ E(P_{\Gamma P}\Pi) = "\text{недопустимо"} \ u \ D(\Pi P) \neq \text{недопустимо", то } D(\Pi M) = "\text{недопустимо"} \\ \dots \end{cases}$$

Пусть  $E_f(s)$  — лингвистическое значение f ранее введенной переменной E(s), т. е.  $E_f(s)$  можно рассматривать как степень принадлежности значения признака s состоянию f. Также пусть  $D_f(p)$  — лингвистическое значение f ранее введенной переменной  $D_f(p)$ . Тогда модель участка пневматической системы, описанного в примере, можно выразить с помощью системы:

$$\begin{cases} E_{\rm HД\Pi}(T378) = D_{\rm HД\Pi}(\Pi K) \oplus E_{\rm HД\Pi}(P_{\rm rp\Pi}) \oplus (E_{\rm H\PiД}(dP_{\rm TM}) \cap \overline{E_{\rm HД\Pi}}(T_{\rm KM})); \\ E_{\rm HД\Pi}(dP_{\rm TM}) = D_{\rm HД\Pi}(TM) \oplus D_{\rm HД\Pi}(3P) \oplus D_{\rm HД\Pi}(BP); \\ E_{\rm HД\Pi}(P_{\rm rp\Pi}) = D_{\rm HД\Pi}(\Pi P) \oplus D_{\rm HД\Pi}(\Pi M), \end{cases}$$
(1)

где  $\oplus$  – функция граничного объединения  $\mu_{A\oplus B}(x) = \min(\mu_{A\oplus B}(x) + \mu_{A\oplus B}(x),1)$ .

На основе логического анализа системы (1) можно выполнить следующее преобразование:

$$\begin{cases} D_{\rm HД\Pi}(\Pi K) = E_{\rm HД\Pi}(T_378) \setminus (E_{\rm HД\Pi}(P_{\rm rp\Pi}) \cup (E_{\rm HД\Pi}(dP_{\rm TM}) \cap \overline{E_{\rm HД\Pi}}(T_{\rm KM}))); \\ D_{\rm HД\Pi}(TM) = E_{\rm HД\Pi}(dP_{\rm TM}) \setminus (D_{\rm HД\Pi}(3P) \cup D_{\rm HД\Pi}(BP)); \\ D_{\rm HД\Pi}(\Pi M) = E_{\rm HД\Pi}(P_{\rm rp\Pi}) \setminus D_{\rm HД\Pi}(\Pi P). \end{cases}$$
 (2)

Упрощенно данную систему можно представить в виде логической схемы, приведенной на рисунке 2, однако необходимо иметь в виду, что приведенные здесь операции являются нечеткими.

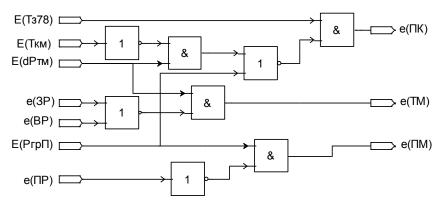


Рисунок 2 – Упрощенная схема логических выводов

Сформулируем аналогичные правила для допустимого состояния ПК, ПМ и ТМ:

$$\begin{cases} D_{\text{доп}}(\Pi K) = E_{\text{доп}}(T378) \cup (\overline{E_{\text{кp}}}(T378) \cap (E_{\text{кp}}(\text{Ргр}\Pi) \cup (E_{\text{кp}}(d\text{Ртм}) \cap \overline{E_{\text{НДП}}}(\text{Ткм})); \\ D_{\text{доп}}(TM) = E_{\text{доп}}(d\text{Ртм}) \cup (\overline{E_{\text{кp}}}(d\text{Ртм}) \cap (D_{\text{кp}}(3\text{P}) \cup D_{\text{kp}}(\text{BP})); \\ D_{\text{доп}}(\Pi M) = E_{\text{доп}}(\text{Ргр}\Pi) \cup (\overline{E_{\text{kp}}}(\text{Ргр}\Pi) \cap D_{\text{kp}}(\Pi\text{P})). \end{cases}$$
(3)

Формализованные правила (2) и (3) определяют допустимые и недопустимые состояния ПК, ТМ и ПМ, т. е. некие граничные условия. Все, что не входит в данные условия, есть состояние *«требует принятия мер»*, что в формализованном виде можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} D_{\text{ТПМ}}(\Pi K) = \overline{D_{\text{ДОП}}}(\Pi K) \cap \overline{D_{\text{НДП}}}(\Pi K); \\ D_{\text{ТПМ}}(\text{ТМ}) = \overline{D_{\text{ДОП}}}(\text{ТМ}) \cap \overline{D_{\text{НДП}}}(\text{ТМ}); \\ D_{\text{ТПМ}}(\Pi M) = \overline{D_{\text{ДОП}}}(\Pi M) \cap \overline{D_{\text{НДП}}}(\Pi M). \end{cases}$$

$$(4)$$

Системы нечетких выводов (2) — (4) представляют собой логико-лингвистическую модель пневматической цепи, из которой наглядно видно, что для определения технических состояний ПК, ПМ и ТМ необходимо помимо обязательных диагностических признаков знать техническое состояние 3P, BP и ПР, для чего необходимо ввести дополнительные диагностические признаки и точки измерения.

На основе представленной методики разработана полная логико-лингвистическая модель пневматической системы, которая описывает взаимосвязь диагностических признаков с состоянием узлов. На основе построенной модели видно, что для обеспечения требуемой глубины диагностирования необходимо расширить число точек измерения и дополнить вектор диагностических признаков. Выбор параметров измерений для дополнительных диагностических признаков и пороговые значения можно определить на основе ранее разработанной математической модели [9].

Разработанная модель прошла успешные испытания на различных типах электросекций в 13 депо. Достоверность диагностирования, определенная по результатам разборок и ревизий узлов, неисправность в которых была обнаружена, составила не менее 95 %. Полнота выявляемых неисправностей при этом превысила 86 %, что подтверждено результатами наладки и эксплуатации электропоездов [10].

На основании изложенного можно сделать выводы.

- 1. Разработана логико-лингвистическая модель пневматической системы, что позволяет в формализованном виде описать взаимосвязь между значениями признаков и техническим состоянием узлов.
- 2. Необходимая глубина диагностирования может быть достигнута только при увеличении точек измерения и введении дополнительных признаков.
- 3. Лингвистические уравнения, представляющие данную модель, позволяют построить функции принадлежности для всех дополнительных диагностических признаков, на основании которых можно выстроить полный вектор диагностических признаков.

### Список литературы

- 1. Костюков, А. В. Методика диагностирования электропневматической системы электропоездов [Текст] / А. В. Костюков, Д. В. Казарин, А. В. Щелканов // Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 121.
- 2. Костюков, А. В. Методика диагностирования технического состояния автотормозной системы электросекции мотор-вагонного подвижного состава [Текст] // А. В. Костюков,

- Д. В. Казарин, А. В. Щелканов // Материалы всерос. науч.-техн. конф. «Наука, образование, бизнес» / ИРСиД Омск, 2013. С. 210.
- 3. Kostyukov, A. V. Technical condition evaluation of the electric multiply unit pneutronic system equipment / A. V. Kostyukov, D. V. Kazarin, A. V. Shchelkanov // The Tenth international conference on condition monitoring and machinery failure prevention technologies CM2013, 2013.
- 4. Инструкция по эксплуатации тормозов подвижного состава железных дорог [Текст]. М.: Трансинфо, 2007. 160 с.
- 5. Пат. 2457966 Российская Федерация, МПК G 01 M 17/08, G 01 R 27/16. Способ диагностики технического состояния автотормозной системы электросекции мотор-вагонного состава [Текст] / Костюков В. Н., Костюков А. В., Щелканов А. В.; заявл. 15.03.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
- 6. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде М.: Мир, 1976. 165 с.
- 7. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации [Текст]. М.: Стандартинформ, 2010.-5 с.
- 8. Прикладные нечеткие системы [Текст] / К. Асаи, Д. Ватада и др. М.: Мир, 1993. 368 с.
- 9. Костюков, В. Н. Модель пневматической системы электропоезда [Текст] / В. Н. Костюков, А. В. Щелканов // Материалы II всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. С. 67 75.
- 10. Автоматизированная система управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией и ремонтом оборудования подвижного состава пригородного пассажирского комплекса (АСУ БЭРТМ МВПС) [Текст] / В. Н. Костюков, А. В. Костюков и др. // Техника железных дорог. -2013. -№ 1. C. 62 66.

### References

- 1. Kostiukov A. V., Kazarin D. V., Shchelkanov A. V. Methods of diagnosing electro electric systems [Metodika diagnostirovaniia elektropnevmaticheskoi sistemy elek-tropoezdov]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Ekspluatatsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tiagi poezdov»* (Materials All-Russia scientific-technical conference with the participation of mezhdunarldnym «The operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction»). Omsk, 2012, pp. 121.
- 2. Kostiukov A. V., Kazarin D. V., Shchelkanov A. V. Methods of diagnosing the technical condition of the system avtotormoznoy electric multiple motor-car rolling stock [Metodika diagnostirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia avtotormoznoi sistemy elektrosektsii motor-vagonnogo podvizhnogo sostava]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Nauka, obrazovanie, biznes»* (Materials All-Russia scientific-technical conference «Science, education and business»). Omsk: IRSiD, 2013, pp. 210.
- 3. Kostyukov A. V., Kazarin D. V., Shchelkanov A. V. Technical condition evaluation of the electric multiply unit pneutronic system equipment // The Tenth international conference on condition monitoring and machinery failure prevention technologies CM2013, 2013.
- 4. Instruktsiia po ekspluatatsii tormozov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Ministerstvo putei soobshcheniya (Instructions for use of railway rolling stock brake. Ministry of Railways). Moscow, 2007, 160 p.
  - 5. Kostiukov V. N., Kostiukov A. V., Shchelkanov A. V. Patent RU 2457966, 10.08.2012.
- 6. Zade L. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiiu priblizhennykh reshenii* (The concept of linguistic variable and its application to decision-making underapproximation). Moscow: Mir, 1976, 165 p.

- 7. Kontrol' sostoianiia i diagnostika mashin. Monitoring sostoia-niia oborudovaniia opasnykh proizvodstv. Poriadok organizatsii, GOST R 53563-2009 (Condition monitoring and diagnostics of machines. Monitoring, consisting of hazardous production equipment. The order of organization, State Standart R 53563-2009). Moscow: Standartinform, 2010, 5 p.
- 8. Asai K., Vatada D. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems). Moscow: Mir, 1993, 368 s.
- 9. Kostiukov V. N., Shchelkanov, A. V. Model electric pneumatic system [Model' pnevmaticheskoi sistemy elektropoezda]. *Materialy II vserossiyskoy NTK «Tekhnologiche-skoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zh/d podvizhnogo sostava»* (Proceedings of the II All-Russia NTC «Technological-mechanical maintenance of the repair and improvement of the dynamic properties of railway rolling stock»). Omsk, 2013, pp. 67 75.
- 10. Kostiukov V. N., Kostiukov A. V. The automated control system of safe resource-eksplua tatsiey and repair of rolling stock equipment suburban passenger com-plex (ACS BERTM MVPS) [Avtomatizirovannaia sistema upravleniia bezopasnoi resursosberegaiushchei eksplua-tatsiei i remontom oborudovaniia podvizhnogo sostava prigorodnogo passazhirskogo kom-pleksa (ASU BERTM MVPS)] *Tekhnika zheleznykh dorog Technique is useful to roads*, 2013, no. 1, pp. 62 66.

УДК 621.316.973

В. А. Кандаев, А. В. Пономарев, К. В. Авдеева, А. В. Колесник

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В статье проведен анализ состояния опорного хозяйства и показано, что замена железобетонных опор должна осуществляться с учетом их фактического коррозионного состояния. Предложен новый метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, позволяющий проводить измерения на двух опорах одновременно. При этом вторая опора выступает в качестве токового электрода. На основе анализа переходного процесса для схемы замещения опоры контактной сети выведены формулы для определения сопротивления бетона, сопротивления и емкости границы раздела «арматура — бетон». По значениям этих параметров определяют коррозионное состояние опоры в подземной части. Использование предложенного метода позволит значительно сократить временные и трудовые затраты на проведение диагностических процедур.

Опоры контактной сети являются стратегически важными объектами инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги», так как от их надежности напрямую зависит безопасность движения поездов. Падение опоры приводит к повреждению или обрыву контактной сети и, как следствие, к задержкам поездов и значительным материальным затратам, а иногда и к более серьезным последствиям.

В настоящее время парк опор контактной сети на 93 % состоит из железобетонных и на 7 % из металлических опор [1]. Около 30 случаев нарушений работы контактной сети в год вызвано отказом опор. С целью снижения риска непредвиденного отказа ежегодно принимаются меры по замене дефектных опор и опор, находящихся в эксплуатации более 40 лет (изменение их количества отображено на рисунке 1).

В соответствии с принятым ОАО «РЖД» планом поэтапной замены дефектных опор контактной сети на период 2013 – 2015 гг. ежегодно осуществляется замена порядка десяти тысяч опор, среди которых встречаются как остродефектные, так и бездефектные (рисунок 2).

На некоторых дорогах доля бездефектных опор среди замененных может достигать 80 % и более. В среднем по дороге из всех замененных опор 55 % оказываются дефектными и остродефектными, а 45 % могли бы находиться в эксплуатации еще длительное время.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что замена опоры должна осуществляться с учетом не ее возраста, а фактического коррозионного состояния. По этой причине задача совершенствования известных и разработки новых методов определения коррозионного состояния опор контактной сети является актуальной.

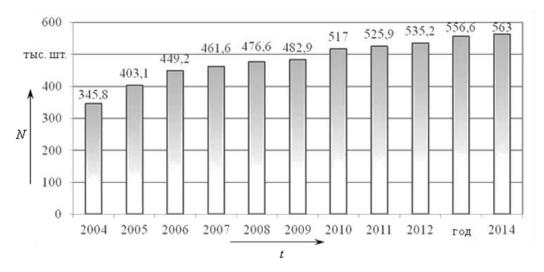


Рисунок 1 – Количество опор, находящихся в эксплуатации более 40 лет

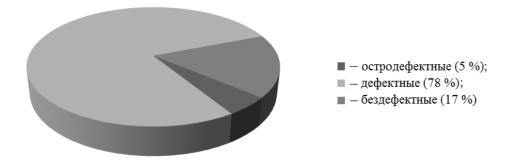


Рисунок 2 – Фактическое состояние ежегодно заменяемых опор контактной сети

В настоящее время известен метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор [2], включающий в себя определение в переходном режиме сопротивления бетона, сопротивления и емкости границы раздела «арматура — бетон», характеризующих коррозионное состояние их подземной части. Хотя данный метод позволяет определить коррозионное состояние арматуры и бетона в подземной части опоры с высокой степенью достоверности, он имеет ряд недостатков. Во-первых, для измерений необходимо установить токовый электрод, во-вторых, при определении емкости границы раздела необходимо знать сопротивление растекания токового электрода.

В данной статье предлагается усовершенствованный метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, лишенный указанных выше недостатков.

Схема измерений, реализующая предлагаемый метод, представлена на рисунке 3.

Аккумуляторную батарею 1 и электронный ключ 2 подключают через шунты между арматурами двух соседних опор (№ 1 и № 2), поляризуют опоры в течение промежутка времени  $\Delta t$ , затем размыкают ключ. При этом с помощью запоминающих осциллографов 4 и 4' синхронно на обеих опорах выполняют измерения потенциала арматуры относительно медносульфатного электрода сравнения и тока, протекающего через арматуру опоры. Поляризующий потенциал арматуры опоры № 2 будет противоположен по знаку потенциалу арматуры опоры № 1.

В соответствии со схемой замещения опоры контактной сети [2] составим расчетную схему, представленную на рисунке 4.

Опора представлена элементами  $E_c$ ,  $R_{\rm rp}$ ,  $C_{\rm rp}$  и  $R_6$ . Сопротивление границы раздела  $R_{\rm rp}$  характеризует интенсивность окислительного процесса, емкость  $C_{\rm rp}$  создается на границе раздела «металл – электролит», при этом одной обкладкой является металл арматуры, другой — жидкий приэлектродный слой из диссоциированных полярных молекул. Электрохимический потенциал  $E_c$  представляет собой собственный потенциал арматуры относительно медносульфатного электрода сравнения. Сопротивление бетона  $R_6$  определяется состоянием бетона.

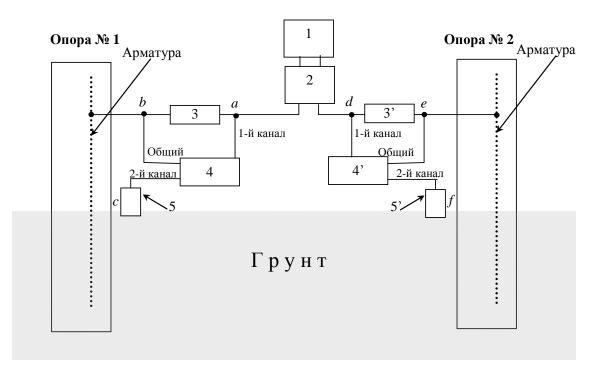


Рисунок 3 — Схема измерений: 1 — аккумуляторная батарея; 2 — электронный ключ; 3 и 3' — шунты; 4 и 4' — запоминающие осциллографы; 5 и 5' — электроды сравнения

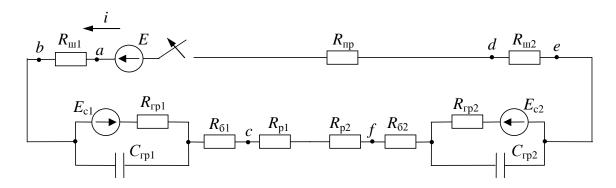


Рисунок 4 — Расчетная схема: E — ЭДС источника питания;  $R_{\rm m}$  — сопротивление шунта;  $R_{\rm np}$  — сопротивление соединительных проводов;  $R_6$  — сопротивление бетона;  $R_{\rm rp}$  — сопротивление границы раздела «арматура — бетон»;  $C_{\rm rp}$  — емкость границы раздела «арматура — бетон»;  $E_{\rm c}$  — электрохимический потенциал на границе раздела «арматура — бетон»;  $R_{\rm p}$  — сопротивление растеканию опоры

При выполнении измерений длительность поляризации арматуры опор  $\Delta t$  выбирают такой, чтобы процесс, предшествующий размыканию ключа, можно было считать установившимся. Тогда ток в цепи до коммутации

$$i(0-) = \frac{E + E_{c1} - E_{c2}}{R_{m1} + R_{rp1} + R_{61} + R_{p1} + R_{p2} + R_{62} + R_{rp2} + R_{m2} + R_{mp}}.$$
 (1)

Напряжение, измеряемое между точками a - b, c - b, d - e и f - e,

$$u_{ab}(0-) = i(0-)R_{m1};$$
 (2)

$$u_{cb}(0-) = -i(0-)(R_{rp1} + R_{61}) + E_{c1};$$
 (3)

$$u_{de}(0-) = -i(0-)R_{uv2};$$
 (4)

$$u_{fe}(0-) = i(0-)(R_{rp2} + R_{62}) + E_{c2}.$$
 (5)

По закону Кирхгофа напряжение на емкости границы раздела определяется следующим образом:

$$u_C = -i_R R_{\rm rp} + E_{\rm c}. \tag{6}$$

Тогда напряжение на емкостях до коммутации

$$u_{C_1}(0-) = -i(0-)R_{\text{rpl}} + E_{\text{cl}};$$
 (7)

$$u_{C_2}(0-) = i(0-)R_{m2} + E_{c2}.$$
 (8)

Ключ считаем идеальным. После размыкания ключа ток i(0+) = 0.

В соответствии с законом коммутации напряжение на емкости  $u_{\rm C}(0-)=u_{\rm C}(0+)$ . Тогда напряжение после коммутации между точками c-b и f-e

$$u_{cb}(0+) = u_{C_1}(0+) = -i(0-)R_{rp1} + E_{c1};$$
 (9)

$$u_{fe}(0+) = u_{C_2}(0+) = i(0-)R_{rp2} + E_{c2}.$$
 (10)

После размыкания ключа емкость  $C_{\rm rp}$  будет разряжаться через сопротивление границы раздела «арматура — бетон»  $R_{\rm rp}$ . При этом постоянная времени цепи определяется по соотношению:

$$\tau = R_{\rm rp} C_{\rm rp}. \tag{11}$$

Принужденные составляющие напряжения вычисляются по формулам:

$$u_{cbnp} = E_{c1}; (12)$$

$$u_{fenp} = E_{c2}. (13)$$

Общий вид осциллограмм на опорах № 1 и № 2 представлен на рисунке 5, момент времени  $t_0 = 0+$ .

Решение для напряжения между арматурой опоры и медно-сульфатным электродом сравнения может быть записано в виде:

$$u(t) = u_{\rm np} + A_{\rm l} e^{-\frac{t}{\tau}}. (14)$$

Коэффициент  $A_1$  определим при постановке в выражение (14), записанное для момента времени t = 0+, выражений (9), (12) и (10), (13). Учитывая уравнение (11), напряжения между арматурой опоры и медно-сульфатным электродом сравнения после коммутации определяют следующим образом:

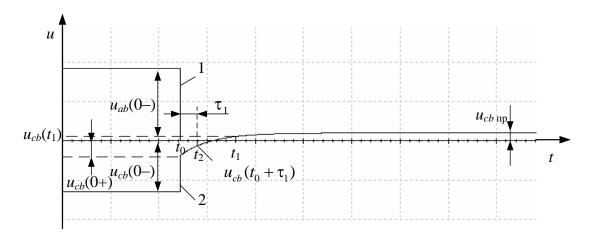
$$u_{cb}(t) = E_{c1} - i(0 - )R_{rpl}e^{-\frac{t - t_0}{R_{rpl}C_{rpl}}};$$
(15)

$$u_{fe}(t) = E_{c2} + i(0 - )R_{rp2}e^{-\frac{t - t_0}{R_{rp2}C_{rp2}}}.$$
(16)

Введем следующие обозначения:

$$u_1(t) = u_{cb}(t);$$
 (17)

$$u_2(t) = u_{fe}(t)$$
. (18)



a

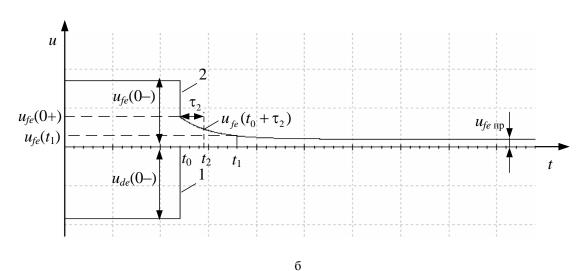


Рисунок 5 — Общий вид осциллограмм на опорах № 1 (а) и № 2 (б): кривая 1 — напряжение на шунте; кривая 2 — напряжение на арматуре опоры относительно медно-сульфатного электрода сравнения

Выразим сопротивление бетона подземной части опоры из выражений (3), (9) и (5), (10):

$$R_{61} = \frac{u_1(0+) - u_1(0-)}{i(0-)}; \tag{19}$$

$$R_{62} = \frac{u_2(0+) - u_2(0-)}{i(0-)} \,. \tag{20}$$

Значения сопротивления границы раздела «арматура — бетон» рассчитаем по выражениям (9) и (10):

$$R_{\rm rpl} = \frac{u_1(0+) - E_{\rm cl}}{-i(0-)}; \tag{21}$$

$$R_{\rm rp2} = \frac{u_2(0+) - E_{\rm c2}}{i(0-)} \,. \tag{22}$$

По расчетным значениям

$$u_1(t_0 + \tau_1) = E_{c1} + \frac{u_1(0+) - E_{c1}}{e};$$
 (23)

$$u_2(t_0 + \tau_2) = E_{c2} + \frac{u_2(0+) - E_{c2}}{e}$$
 (24)

на осциллограмме (см. рисунок 5) определяем момент времени  $t_2$ , соответствующий значению напряжения  $u_1(t_0+\tau_1)$  для опоры № 1 и  $u_2(t_0+\tau_2)$  для опоры № 2.

Постоянная времени определяется по формуле:

$$\tau = t_2 - t_0. \tag{25}$$

Емкость границы раздела «арматура – бетон» определяется по выражению (11):

$$C_{\rm rp} = \frac{\tau}{R_{\rm rp}} \,. \tag{26}$$

Емкость границы раздела можно определить, зафиксировав на осциллограмме произвольный момент времени  $t_1$  и значение напряжения в этот момент времени:

$$u_1(t_1) = E_{c1} - i(0 -) R_{rpl} e^{-\frac{t_1 - t_0}{R_{rpl} C_{rpl}}}; (27)$$

$$u_2(t_1) = E_{c2} + i(0-)R_{rp2}e^{-\frac{t_1 - t_0}{R_{rp2}C_{rp2}}}.$$
(28)

Значения напряжения в момент времени  $t_0 = 0+$  вычисляются по уравнениям:

$$u_1(t_0) = E_{c1} - i(0-)R_{rp1};$$
 (29)

$$u_2(t_0) = E_{c2} + i(0-)R_{rp2}$$
 (30)

Емкость границы раздела в этом случае определяется по формулам:

$$C_{\rm rpl} = \frac{t_1 - t_0}{R_{\rm rpl} \ln\left(\frac{u_1(t_0) - E_{\rm cl}}{u_1(t_1) - E_{\rm cl}}\right)};$$
(31)

$$C_{\text{rp2}} = \frac{t_1 - t_0}{R_{\text{rp2}} \ln\left(\frac{u_2(t_0) - E_{\text{c2}}}{u_2(t_1) - E_{\text{c2}}}\right)}.$$
 (32)

Оценка коррозионного состояния подземной части железобетонных опор № 1 и № 2 производится по полученным значениям сопротивления бетона, сопротивления и емкости границы раздела «арматура – бетон».

Для проверки предложенного метода определения сопротивления бетона и параметров границы раздела «арматура — бетон» в переходном режиме были проведены измерения тока и потенциала двухполюсника, собранного из дискретных элементов по схеме, приведенной на рисунке 4. Погрешность определения элементов схемы не превышает 10 %.

Таким образом, представленный метод позволяет с достаточной точностью определить электрохимические параметры границы раздела «арматура – бетон».

Преимуществом предлагаемого метода является возможность проведения измерений на двух опорах одновременно за счет того, что вторая опора служит токовым электродом для первой и измерения выполняются синхронно на обеих опорах. При этом как минимум в два раза сокращаются временные затраты на проведение диагностических процедур.

### Список литературы

- 1. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2013 г. [Текст] / ОАО «РЖД». М., 2014.-100 с.
- 2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст]: Монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ РФ. М., 2013. 552 с.

### References

- 1. Analiz raboty khoziaistva elektrifikatsii i elektrosnabzheniia v 2013 g. (Analysis of the electrification and power supply farm in 2013). Moscow, 2014. 100 p.
- 2. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdaucshie toki i ekspluatazionnii control korrozion-nogo sostojanija podzemnih sooruzhenii system elektrosnabzhenuja zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and corrosion state operational control of underground structures of railway transport power supply systems): Monograph. Moscow: UMZ SHDT RF, 2013. 552 p.

УДК 621.331.629.4

В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм

# МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

В статье приведен анализ составляющих энергетической эффективности рекуперативного торможения и факторов, влияющих на эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Описаны методы оценки энергетической эффективности рекуперации и результаты экспериментальных исследований эффективности рекуперации. Выполнено обоснование использования метода имитационного моделирования как способа оценки потенциала рекуперативного торможения. Представлена последовательность выполнения работ.

Общеизвестно, что рекуперативное торможение обеспечивает безопасность движения поездов и одновременно с этим повышает энергетическую эффективность электрической тяги. Поэтому на сети железных дорог ежегодно ставится задача по повышению объема рекуперированной энергии. Однако до последнего времени не ставилась цель оценки энергетической эффективности рекуперации. Понятие энергетической эффективности рекуперации можно разделить на два основных направления:

энергетическая эффективность применения рекуперативного торможения. Показателем эффективности в этом случае является объем рекуперируемой электроподвижным составом (ЭПС) электроэнергии (удельная величина и процент от потребления на тягу);

энергетическая эффективность использования энергии рекуперации. Показателем эффективности в этом случае является сокращение удельного расхода энергии по счетчикам тяговых подстанций за счет применения рекуперации (удельная величина и процент от расхода на тягу).

Таким образом, и оценка эффективности рекуперации на произвольном участке железной дороги должна выполняться по двум основным направлениям:

1. Оценка эффективности фактического применения рекуперативного торможения, которая должна выполняться с учетом основных факторов и фактически сложившихся на участке условий для применения рекуперативного торможения.

- 2. Оценка эффективности использования энергии рекуперации с распределением ее объемов по составляющим, к которым можно отнести:
  - а) потребление энергии рекуперации на собственные нужды электроподвижного состава;
- б) потери энергии рекуперации в контактной сети при передаче энергии рекуперации от рекуперирующего ЭПС к ЭПС, находящемуся в режиме тяги, и к тяговым подстанциям;
  - в) потребление энергии рекуперации на тягу поездов ЭПС, находящихся в режиме тяги;
- г) потери энергии рекуперации в выпрямительно-инверторных преобразователях и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока при возврате энергии рекуперации из контактной сети;
- д) потребление энергии рекуперации на собственные нужды тяговых подстанций, на нужды железнодорожных и сторонних потребителей, линий продольного электроснабжения, получающих питание с шин тяговых подстанций;
- е) потери энергии рекуперации в понижающих трансформаторах тяговых подстанций постоянного и переменного тока при передаче энергии рекуперации через них в систему внешнего электроснабжения;
  - ж) возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.

По первому направлению задачей является определение уровня эффективности применения рекуперативного торможения локомотивными бригадами.

По второму направлению задачей является оценка эффективности использования энергии рекуперации, приводящей к сокращению удельного расхода на тягу поездов по измерительным системам тяговых подстанций.

От правильности выбора метода выполнения оценки зависят достоверность полученных в ходе нее результатов и точность сделанных выводов. При этом главным при выборе метода проведения исследования является то, какое количество факторов, влияющих на объект исследования, учитывает метод. Основные факторы, влияющие на эффективность применения рекуперативного торможения, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы, оказывающие влияние на эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации

	Факторы, влияющие						
Принадлежность фактора	на эффективность применения рекупе-	на эффективность использования энер-					
	ративного торможения	гии рекуперации					
	род тока	род тока					
	Параметры и режимы работы систем						
	тягового и внешнего электроснабжения	тягового и внешнего электроснабжения					
электроснабжения	Наличие и мощность нетяговых						
	потребителей, получающих питание	бителей, получающих питание от тяго-					
	от тяговых подстанций	вых подстанций					
	Доля пассажирских поездов на	Доля пассажирских поездов на участке					
	участке	доли писсиянрекня посодов на у пистко					
Организация	Показатели графика движения поез-	Показатели графика движения поездов					
движения поездов	дов	токазатели графика движения поездов					
дымения посудов	Масса составов	-					
	Нагрузка на ось составов	_					
	Техническая скорость на участке	_					
	Серии ЭПС (их технические характе-						
Электроподвижной	ристики рекуперации)						
состав	Доля ЭПС с исправными системами	_					
	рекуперации						
Прочее	Профиль пути	_					
Прочес	Погодные условия	_					

По обоим направлениям оценки энергетической эффективности рекуперации для решения поставленных задач с учетом тех или иных из перечисленных выше факторов могут использоваться следующие методы.

### 1. Экспериментальные методы.

Метод «глобального» эксперимента, подразумевающий наличие на всех присоединениях системы тягового электроснабжения рассматриваемого участка единой автоматизированной системы учета электроэнергии [1] и оборудование всех единиц ЭПС, обращающегося по участку, штатными высокоточными автоматизированными системами учета электроэнергии и системами глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС, подключенными к единому серверу, что обеспечит контроль использования энергии рекуперации и оценку потоков и потерь электроэнергии во всех элементах системы тягового электроснабжения на любом произвольном участке и за любой промежуток времени [2].

Метод «локального» эксперимента, при котором выбранный участок железной дороги оборудуется системами учета электроэнергии на фидерах контактной сети (ФКС) тяговых подстанций, один или несколько электровозов оборудуются специальными системами фиксации расхода электроэнергии и местоположения с передачей информации на единый сервер, на участке организуются специальный график движения поездов и специальные схемы питания тяговой сети. Проведение такого эксперимента, с одной стороны, позволяет с меньшими затратами провести исследование структуры использования энергии рекуперации, а, с другой стороны, получить с высокой точностью оценку эффективности использования энергии рекуперации при различных графиках движения поездов и параметрах системы тягового электроснабжения.

Метод сравнения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на участках работы локомотивных бригад с применением и запретом на применение рекуперативного торможения.

- 2. Статистические методы построения регрессионных зависимостей, основанные на использовании данных предыдущих периодов.
  - 3. Методы, основанные на имитационном моделировании.

Имитационное моделирование перевозочного процесса, позволяющее выполнять оценку эффективности использования энергии рекуперации на участке железной дороги с учетом большинства влияющих факторов.

Создание регрессионной модели использования энергии рекуперации, построенной на основании результатов имитационного моделирования, учитывающего наиболее значимые факторы.

Создание модели использования энергии рекуперации, основанной на нечетких нейронных сетях. Данная модель должна совмещать в себе преимущества статистического метода и регрессионной модели, основанной на результатах имитационного моделирования.

Оптимальным инструментом для оценки эффективности рекуперации является имитационное моделирование перевозочного процесса. К преимуществам такого подхода относятся простота и малозатратность, прозрачность и многовариантность расчетов, адекватность получаемых результатов.

При этом имитационное моделирование в программном комплексе «КОРТЭС» не позволит учесть ряд факторов, влияющих на эффективность рекуперации:

- уровень напряжения в контактной сети;
- наличие и мощность нетяговых потребителей, получающих питание от тяговых подстанций;
  - погодные условия.

Для анализа влияния этих факторов целесообразно использовать экспериментальные или статистические методы.

Целью проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации является подтверждение эффективности применения рекуперативного торможения и определение структуры использования энергии рекуперации различными потребителями.

Подтверждение энергетической эффективности рекуперативного торможения выполнено путем оценки уровня удельного расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на участке Тайга — Мариинск Западно-Сибирской железной дороги [3].

В ходе эксперимента в течение первых трех суток на участке фиксировались все показатели, характеризующие энергоемкость перевозочного процесса, в условиях применения рекуперативного торможения в штатном режиме. В следующие трое суток те же показатели фиксировались в условиях запрета на применение рекуперативного торможения. Условия проведения эксперимента (размеры движения, выполненная на участке работа, погодные условия) за первые и вторые трое суток были сопоставимы.

Анализ результатов эксперимента показал, что удельный расход электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций, определенный за период применения рекуперативного торможения, оказался на 11,2 % ниже по сравнению с периодом эксперимента, когда рекуперативное торможение не применялось (таблица 2).

Полный расход электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций в условиях применения рекуперации оказался ниже на 11,4 % при том, что выполненный объем перевозочной работы за рассматриваемые периоды отличался всего на 0,3 %.

Таблица 2 – Результаты эксперимента по оценке целесообразности использования энергии рекуперации на участке Тайга – Мариинск Западно-Сибирской железной дороги

Показатель	Применени	е рекуперации	Относительное изменение при отсутствии рекуперации, %	
HORASATOIB	применялась	не применялась		
Работа, выполненная на участке, $10^4$ ткм брутто	15 050	15 088	0,3	
Расход по счетчикам тяговых подстанций, кВт·ч	1 698 445	1 892 667	11,4	
Расход по счетчикам электроподвижного состава, кВт·ч	1 402 909	1 675 281	19,4	
Небаланс электроэнергии на тягу поездов, %	17,4	11,5	-33,9	
Удельный расход по счетчикам тяговых подстанций, кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто	112,8	125,4	11,2	
Удельный расход по счетчикам электроподвижного состава, кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто		111	19,1	

Аналогичным образом зафиксированы меньшие значения полного и удельного расхода электроэнергии по счетчикам ЭПС в условиях применения рекуперативного торможения, соответственно на 19,4 и 19,1 % по сравнению с периодом, когда рекуперативное торможение не применялось.

При этом зафиксировано увеличение на 33,9 % небаланса электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и ЭПС в условиях применения рекуперативного торможения. Это обусловлено увеличением технологических потерь от протекания энергии рекуперации по контактной сети от электровозов, движущихся в режиме рекуперативного торможения, к электровозам, работающим в режиме тяги.

Все изложенное позволяет сделать заключение о том, что использование рекуперативного торможения обеспечивает повышение энергетической эффективности электрической тяги поездов и снижение затрат на электроэнергию.

Для определения структуры использования энергии рекуперации проведены эксперименты по проследованию одиночных поездов по межподстанционным зонам с горным профилем пути, когда поезда на спуске движутся в режиме рекуперативного торможения, что позволило оценить потокораспределение энергии рекуперации по следующим составляющим:

- потери электроэнергии в контактной сети и оборудовании тяговых подстанций [5, 6];
- использование энергии рекуперации нетяговыми потребителями;
- возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.

На полигоне постоянного тока эксперимент был проведен на участке Теплая Гора — Европейская — Азиатская Свердловской железной дороги [7].

Питание тяговой сети в межподстанционных зонах Теплая Гора — Европейская и Европейская — Азиатская (рисунок 1) было организовано от тяговой подстанции Европейская по консольной схеме, что позволило исключить подпитку тяговой сети от смежных тяговых подстанций. Расход электроэнергии на тяговой подстанции Европейская контролировался по счетчикам, установленным на стороне низкого напряжения понизительного трансформатора и на вводе выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИПа).

Профиль пути участка Теплая Гора — Европейская — Азиатская характеризуется наличием затяжных спусков длиной 12 км с перепадом высоты 100 м и длиной 6 км с перепадом высоты 40 м.

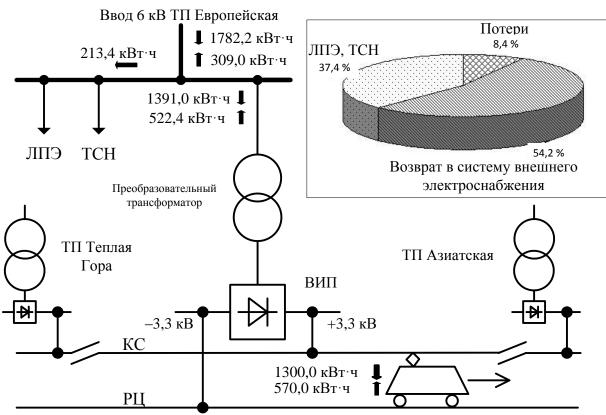


Рисунок 1 – Схема потокораспределения и баланс энергии рекуперации на тяговой подстанции Европейская за время эксперимента

В эксперименте использовался трехсекционный электровоз ВЛ11 № 397Б-398АБ с грузовым поездом № 2104 массой 2786 т. В процессе эксперимента на локомотиве фиксировались показания счетчиков моторного режима и рекуперации во время поездки. Объем возврата электроэнергии при рекуперативном торможении по счетчикам электровоза на участке Теплая Гора — Европейская — Азиатская приведен в таблице 3. Схема потокораспределения энергии на тяговой подстанции Европейская приведена на рисунке 1.

Таблица 3 – Объем возврата электроэнергии при рекуперативном торможении на участке Теплая Гора – Европейская – Азиатская

Vиосток -	Возврат энергии при рекуперативном торможении, кВт-ч						
Участок	секция 397Б	секция 398А	секция 398Б	всего			
Теплая Гора – Европейская	80	70	100	250			
Европейская – Азиатская	100	90	130	320			
Всего	180	160	230	570			

Анализ результатов эксперимента позволил сделать следующие выводы:

- 1) объем энергии рекуперации в результате поездки на участке Теплая Гора Европейская Азиатская электровозом 1,5ВЛ11 с поездом массой 2786 т составил 570 кВт·ч, или 41 % от объема электроэнергии, отпущенной на тягу поездов тяговой подстанцией Европейская;
- 2) потери электрической энергии в тяговой сети, включающие в себя потери в контактной сети, потери в преобразовательном трансформаторе и выпрямительно-инверторном преобразователе, составили при движении электровоза в режиме тяги 6,5 %, в режиме рекуперативного торможения 8,4 %. Приведенное значение потерь электрической энергии обусловлено применением в ходе эксперимента консольной схемы питания тяговой сети. В нормальных условиях применяется схема двухстороннего питания, что приводит к снижению потерь в три раза. Увеличение потерь электрической энергии в режиме рекуперативного торможения обусловлено увеличением доли потерь холостого хода в преобразовательном трансформаторе;
- 3) по результатам эксперимента определены составляющие структуры использования энергии рекуперации:

потери электроэнергии в контактной сети, преобразовательном трансформаторе и выпрямительно-инверторном преобразователе при передаче энергии рекуперации от электровоза к тяговой подстанции -8,4%;

потребление энергии на собственные нужды тяговой подстанции и нетяговыми железнодорожными и сторонними потребителями, получающими питание от нее, -37.4%;

возврат электрической энергии в систему внешнего электроснабжения -54,2% от выработанной энергии рекуперации;

4) проведенный эксперимент подтвердил высокую эффективность рекуперативного торможения на однопутном участке с использованием ВИПов на тяговых подстанциях. Энергоэффективность рекуперативного торможения на таких участках определяется наличием и исправностью систем рекуперации на ЭПС и ВИПах на тяговых подстанциях. А при незначительных размерах движения на однопутных участках постоянного тока наличие ВИПов на тяговых подстанциях является единственным способом эффективной реализации потенциала рекуперативного торможения.

На полигоне переменного тока натурный эксперимент был выполнен на участке Бискамжа — Чарыш Красноярской железной дороги. Для эксперимента был использован электровоз ВЛ85. Питание тяговой сети в межподстанционной зоне Югачи — Бискамжа было организовано от тяговой подстанции Бискамжа по схеме длинной консоли, что позволило исключить подпитку тяговой сети от тяговой подстанции Югачи. В межподстанционной зоне Бискамжа — Чарыш было сохранено двухстороннее питание тяговой сети.

Результаты потокораспределения электроэнергии рекуперации и небаланс электрической энергии на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции Бискамжа по результатам эксперимента на участке Бискамжа — Чарыш представлены в таблице 4.

Рекуперация по счетчикам ЭПС на участке Бискамжа — Чарыш составила 560 кВт $\cdot$ ч. Возвращенная электроэнергия по счетчикам на ФКС составила 495 кВт $\cdot$ ч. Технологические потери в контактной сети — 11,6 %. По вводам 27,5 кВ возврат составил 55 кВт $\cdot$ ч.

Схема потокораспределения энергии на тяговой подстанции Бискамжа представлена на рисунке 2.

Небаланс по шинам 27,5 кВ ТП Бискамжа определяется следующим образом, кВт $\cdot$ ч: принято 7315, в том числе 6710 – по вводу 27,5 кВ; 495 – возврат по ФКС-1,2 МПЗ-1; 110 – возврат по ФКС-4 МПЗ-2;

распределено 7268,84, в том числе 5445 — прием по ФКС-4 МПЗ-2; 55 — прием по ФКС-1,2 МПЗ-1; 1683 — потреблено ДПР; 11,64 — потреблено ТСН, 19,2 — потреблено ГРШ; 55 — возврат по вводу 27,5 кВ.

Таблица 4 – Небаланс электрической энергии на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции Бискамжа при распределении энергии рекуперации

Югачи – Бискамжа						жа – Ча- ыш	Ввод 27,5 кВ тя-				
электровоз ФКС № 1, 2		потери троэн в тягов		ФКС-4		говой подстанции Бискамжа		Потреблено ДПР, ТСН,	Небаланс электроэнер- гии на шинах		
тяга, кВт·ч	рек., кВт·ч	прием, кВт·ч	воз- врат, кВт·ч	тяга, кВт·ч (%)	рек., кВт·ч (%)	прием, кВт·ч	возврат, кВт·ч	прием, кВт·ч	возврат, кВт·ч	ГРЩ, кВт·ч	27,5 кВ, кВт·ч (%)
52	560	55	495	3,0 (5,5)	65 (11,6)	5445	110	6710	55	1713,84 (550)	46,16 (0,6)

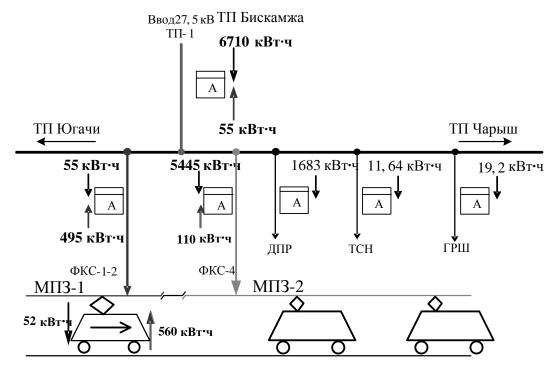


Рисунок 2 – Схема потокораспределения энергии на ТП Бискамжа

Небаланс электроэнергии по шинам 27,5 кВ тяговой подстанции Бискамжа составил, кВт $\cdot$ ч,

$$7315 - 7268,84 = 46,16.$$

Таким образом, энергия рекуперации электровоза, поступившая на шины 27,5 кВ ТП Бискамжа была в основном потреблена ДПР, ТСН, ГРШ и только незначительная ее часть (55 кВт·ч) была возвращена по вводу 27,5 кВ в питающую энергосистему.

При проведении оценки эффективности использования энергии рекуперации следует учитывать, что в данном случае объект исследования является комплексным и включает в

себя систему тягового электроснабжения, электроподвижной состав, а также режимы их работы и взаимодействия [4]. Степень их влияния на эффективность использования энергии рекуперации может быть определена на основании серии натурных экспериментов на полигонах постоянного и переменного тока сети железных дорог.

Однако проведение большого числа натурных экспериментов является очень трудоемким, длительным и дорогостоящим мероприятием. Кроме того, натурные эксперименты не позволяют выделить и оценить степень влияния какого-либо отдельного параметра или характеристики объекта исследования, так как на практике невозможно не только зафиксировать все, кроме исследуемого, параметры и характеристики, но даже и повторить эксперимент при одних и тех же условиях.

Поэтому наиболее эффективным способом исследования при невозможности проведения многократных измерительных экспериментов в настоящее время является имитационное моделирование, которое характеризуется высокой степенью детализации, возможностью исследования динамики развития процессов, высокой степенью достоверности получаемых результатов.

Технической базой для проведения имитационного моделирования является программный комплекс «КОРТЭС» (ВНИИЖТ), применение которого для анализа режимов работы системы тягового электроснабжения утверждено техническим указанием Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» №К-108/04 от 24.02.2004.

Имитационное моделирование включает в себя тяговый и электрический расчеты, представляющие собой цикл, который включает в себя предварительный расчет с целью получения предварительных показателей системы тягового электроснабжения и окончательный расчет по итогам корректировки показателей, полученных в результате предварительного моделирования.

Сравнение результатов проведенного на участке Тайга – Мариинск натурного эксперимента с результатами имитационного моделирования данного участка приведено в таблице 5.

Таблица 5 — Расчетные и фактические показатели работы участка Тайга — Мариинск за период эксперимента с применением рекуперативного торможения

Показатель	Расчетное значение	Фактическое значение	Погрешность результатов расчета, %
Расход электрической энергии по счетчикам электроподвижного состава, кВт-ч	1 342 584	1 402 909	-4,3
Расход электрической энергии по счетчикам тяговых подстанций, кВт·ч	1 654 096	1 698 445	-2,6
Работа, выполненная на участке, $10^4$ ткм брутто	15 187	15 050	+0,9
Удельный расход электрической энергии по счетчикам электроподвижного состава, $\kappa B \tau \cdot v/10^4$ ткм бругто	88,5	93,2	-5,0
Удельный расход электрической энергии по счетчикам тяговых подстанций, к $B$ т $\cdot$ ч $/10^4$ ткм брутто	109,2	112,8	-3,4
Удельная рекуперация электрической энергии, к $B$ т·ч $/10^4$ ткм брутто	12,9	12,7	+1,6

Анализ представленных в таблице 5 погрешностей результатов моделирования позволяет утверждать, что использование имитационной модели для определения влияния различных факторов на эффективность использования энергии рекуперации допустимо.

Разработка методики оценки эффективности использования энергии рекуперации рекуперации на произвольном участке железной дороги подразумевает выполнение следующих работ:

- 1) анализ влияния каждого из факторов на эффективность рекуперации при неизменных остальных факторах;
- 2) разработка таблицы коэффициентов влияния каждого из факторов на эффективность рекуперации;
- 3) разработка алгоритма оценки эффективности применения рекуперативного торможения на произвольном участке железной дороги;
- 4) разработка алгоритма оценки эффективности использования энергии рекуперации на произвольном участке железной дороги.

Оценка эффективности применения рекуперативного торможения на выбранном участке выполняется в следующей последовательности.

- 1. Определяются основные параметры выбранного участка: род тока, протяженность, расчетный подъем, протяженность и крутизна наибольших уклонов и подъемов, ограничения скоростей и др.
- 2. Определяется принадлежность участка по сложности профиля к одному из типовых профилей пути [8].
- 3. Определяются погодные условия на выбранном участке за выбранный для анализа отчетный период: средняя температура воздуха, скорость и направление ветра, осадки, гололедные явления и др.
  - 4. Определяются серии ЭПС, эксплуатируемые на участке.
- 5. Определяется доля ЭПС с исправными системами рекуперации и доля пассажирских электровозов, эксплуатируемых на участке.
- 6. Определяются показатели исполненного графика движения поездов: количество пар поездов (по видам движения), наличие пакетного или пачечного графика (интервалы между пакетами и внутри пакетов), межпоездные интервалы.
  - 7. Определяется масса составов поездов, курсирующих на участке.
  - 8. Определяются нагрузки на ось составов поездов, курсирующих на участке.
- 9. Определяются технические и участковые скорости по видам движения и сериям ЭПС на участке.
- 10. Определяются коэффициенты влияния всех факторов на эффективность применения рекуперативного торможения на участке по таблице коэффициентов влияния факторов (разрабатывается на этапе анализа влияния каждого из факторов на эффективность рекуперации при неизменных остальных факторах).
- 11. Рассчитывается диапазон оптимальных значений объемов рекуперации на рассматриваемом участке (кВт·ч/изм.).
- 12. Определяется отчетный уровень рекуперации на рассматриваемом участке за анализируемый период (кBт·ч/изм.).
- 13. Оценивается степень энергетической эффективности фактического применения рекуперативного торможения на рассматриваемом участке (в процентах от расчетной величины).

Оценка эффективности использования энергии рекуперации на выбранном участке выполняется в следующей последовательности.

- 1. Определяются параметры и режимы работы системы тягового электроснабжения: напряжение в контактной сети, тип контактной подвески, схема питания тяговой сети, наличие постов секционирования и пунктов параллельного соединения, параметры трансформаторов, выпрямителей, системы внешнего электроснабжения, наличие и параметры инверторов на тяговых подстанциях и др.
- 2. Определяются наличие и мощность нетяговых потребителей, получающих питание от тяговых подстанций участка.
- 3. Определяются коэффициенты влияния всех факторов на эффективность использования энергии рекуперации на участке по таблице коэффициентов влияния факторов (разрабатывается на этапе анализа влияния каждого из факторов на эффективность рекуперации при неизменных остальных факторах).

- 4. Оценивается эффективность фактического использования энергии рекуперации по составляющим потребления и потерь энергии рекуперации.
- 5. Оценивается доля рекуперации в сокращении энергопотребления на тягу поездов по измерительным системам тяговых подстанций.

В данной статье выделены два основных направления оценки эффективности рекуперации и основные составляющие распределения энергии рекуперации, приведена классификация факторов, влияющих на эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Экспериментальные исследования показали высокую энергетическую эффективность рекуперативного торможения и позволили выполнить анализ основных составляющих баланса энергии рекуперации. Анализ методов оценки эффективности рекуперации показал, что имитационное моделирование перевозочного процесса является оптимальным инструментом для оценки эффективности как применения рекуперативного торможения, так и использования энергии рекуперации. Приведена последовательность работ по выполнению такой оценки с использованием имитационного моделирования. Итогом работ станет заключение об эффективности применения рекуперативного торможения локомотивными бригадами участка, эффективности использования выработанной энергии рекуперации и о степени влияния рекуперативного торможения на сокращение энергопотребления на тягу поездов по измерительным системам тяговых подстанций.

### Список литературы

- 1. Черемисин, В. Т. Концепция единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Транспорт Урала. Екатеринбург. 2013.  $\mathbb{N}$  4. С. 83 86.
- 2. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков и др. // Железнодорожный транспорт. 2015. N 2. C. 45 49.
- 3. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения [Текст] / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм и др. // Локомотив. -2013. -№ 8. -C. 5-8.
- 4. Никифоров, М. М. Комплексные научные исследования по повышению эффективности использования электроэнергии на тягу поездов. Общие положения [Текст] / М. М. Никифоров // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. С. 82 87.
- 5. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения [Текст] / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. Ростовна-Дону, 2014. № 2 (54). С. 106-111.
- 6. Никифоров, М.М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы VI науч.-практ. конф., посвященной Дню российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 40 45.
- 8. Никифоров, М. М. Определение индикатора энергоэффективности электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. С. 147 154.

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

### References

- 1. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Kashtanov A. L. The concept of a unified automated electric power accounting system for traction [Kontseptsiya edinoy avtomatizirovannoy sistemy ucheta electricheskoy energii na tyagu poezdov]. *Transport Urala Transport of the Urals*, 2013, no. 4, pp. 83 86.
- 2. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Pashkov D. V., Nikiforov M. M. Stages of the automated monitoring system energy efficiency implementation of transportation process [Etapy realizatsii avtomatizirovannoy sistemy monitoring energoeffektivnosti perevozochnogo protsessa]. *Zheleznodorozhnyi transport Railway transport*, 2015, no. 3, pp. 45 49.
- 3. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S., Nezevak V. L., Kvaschuk V. A. Influence of regenerative braking on the traction power supply system [Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na sistemu tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Lokomotiv Locomotiv*, 2013, no. 8, pp. 5 8.
- 4. Nikiforov M. M. Complex research on more efficient use of electricity for traction. General provisions [Kompleksnye nauchnye issledovaniya po povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya electroenergii na tyagu poezdov. Obschie polozheniya]. *Materialy mejdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii «Povyshenie energeticheskoi effektivnosti nazemnyh transportnyh sistem»* (Proceedings of the international scientific-practical conference «Improving the energy efficiency of terrestrial transportation systems»). Omsk, 2014, pp. 82 87.
- 5. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Evaluation of technological losses in traction network in the conditions of electric rolling regenerative braking use [Ocenka tehnologicheskih poter' v tyagovoi seti v usloviyah primeneniya elektropodvijnym sostavom rekuperativnogo tormojeniya]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia Bulletin of the Rostov State Transport University, 2014, no. 2 (54), pp. 106 111.
- 6. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yazov A. V. Evaluation of technological losses of electricity in the system of traction power supply DC [Ocenka tehnologicheskih poter' elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabjeniya postoyannogo toka]. *Materialy VI nauchno-prakticheskoi konferencii, posvyaschennoi Dnyu Rossiiskoi nauki «Innovacionnye proekty i novye tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials VI scientific-practical conference dedicated to the Day of Russian Science «Innovation projects and new technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2012, pp. 40 45.
- 7. Vilgelm A. S., Larin A. N. Experimental studies to assess the potential for improving the energy efficiency of train traction through the use of regenerative braking [Eksperimental'nye issledovaniya po ocenke potenciala povysheniya energeticheskoi effektivnosti tyagi poezdov za schet primeneniya rekuperativnogo tormojeniya]. *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 1 (5), pp. 50 56.
- 8. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Determination of energy efficiency indicators of electric AC and DC [Opredelenie indikatora energoeffektivnosti elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka]. *Materialy nauchnoi konferencii «Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Proceedings of the conference «Innovation projects and technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2015, pp. 147 154.

УДК 004.93'12

Е. А. Альтман, Н. Г. Ананьева, Н. А. Тихонова

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ

В работе рассматриваются основные алгоритмы компьютерного зрения, позволяющие обнаружить появление произвольного объекта на железнодорожном переезде. Приводятся результаты моделирования алго-

# Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

ритмов нахождения контуров и выделения фона на видеопоследовательности изображений модели железнодорожного переезда.

В настоящее время ситуация с безопасностью на железнодорожных переездах остается неудовлетворительной. Подавляющее большинство ДТП на переездах происходит в результате грубейших нарушений водителями транспортных средств «Правил дорожного движения». Как правило, это проезды на запрещающий сигнал, объезд шлагбаума и т. п., в результате чего на переезде в момент прохода поезда может оказаться автомобиль [1].

Одним из вариантов решения проблемы безопасности на железнодорожном переезде является детектирование объектов на железнодорожных переездах посредством использования алгоритмов компьютерного зрения, что позволит выявлять определенные объекты из видеопоследовательности [2].

Алгоритмы компьютерного зрения для определения объектов на изображении можно разбить на два класса.

Алгоритмы первого класса определяют наличие и положение конкретных типов объектов – людей, их лиц, машин, дорожных знаков и других типов. Как правило, эти алгоритмы используют методы машинного обучения с большой базой изображений. Обученный на определенный тип объектов алгоритм позволяет с большой вероятностью правильно детектировать объект, однако плохо работает с другими, даже похожими объектами.

В работе рассматриваются алгоритмы второго класса, предназначенные для определения наличия произвольных объектов. Эти алгоритмы можно разбить на две группы, определяемые способом получения из изображения информации об объекте.

Первый способ связан с нахождением резких изменений яркости расположенных рядом пикселей изображения. При этом способе на первом этапе применяется один из методов усиления разницы яркости между соседними пикселями, так называемые детекторы границ (Кенни, Собеля и др.). На втором этапе происходит поиск особых точек изображения (линий границ, углов, контуров или различных типов особых точек, полученных методами машинного обучения). По конфигурации особых точек можно сделать вывод о наличии объектов на изображении.

Второй способ используется для определения появления объектов на видеопоследовательности. В этом случае идет сравнение кадров между собой и по отличиям кадров определяется наличие объектов. Нужно отметить, что простое вычитание яркости пикселей между двумя кадрами не приводит к хорошему результату ввиду изменения освещенности кадров, экспозиции и других параметров съемки, наличия шумов и появления теней объектов.

Далее промоделируем и сравним два указанных способа определения объектов произвольного типа на изображении.

Нахождение изменений яркости изображения (особых точек) применяется во многих разделах компьютерного зрения. При нахождении объектов произвольного типа на изображении ведется поиск замкнутых границ – контуров. В настоящее время известно большое число алгоритмов поиска контуров, подборку статей по этим алгоритмам можно найти на сайте группы компьютерного зрения университета Беркли.

В целом работа алгоритмов поиска контура сводится к трем этапам: преобразование изображения выделяющее (усиливающее границы), поиск контуров среди выделенных границ и последующая обработка контуров в соответствии с условиями задачи.

Выделение границ является изученной задачей. Существует множество линейных фильтров, усиливающих границы: обычный градиент; операторы Собеля, Робертса, Превитта; Лапласиан и детектор границ Кэнни. Как правило, применяется детектор границ Кэнни. В отдельных задачах небольшого улучшения результатов можно добиться применением других детекторов.

Поиск контуров является наиболее трудоемкой с вычислительной точки зрения задачей. Определим понятие контура. Элементом контура называется граница между двумя соседними пикселями. Стоимостью элемента контура называется разница между максимальной яр-

костью пикселей изображения и разницей между яркостями пикселей элемента контура. Контур состоит из связанного множества элементов контура с минимальной стоимостью. Если представить изображение в виде графа, вершинами которого являются пиксели, а ребра связывают смежные вершины и имеют вес, равный стоимости элемента контура, то задача поиска контура сводится к задаче поиска минимального пути в этом графе.

Для моделирования алгоритмов выделения контуров воспользуемся реализацией алгоритма в библиотеке *OpenCV*. Для выделения границ воспользуемся детектором Кэнни с настройками по умолчанию и порогами границ от 100 до 200. Для алгоритма нахождения контуров используем следующие настройки:

RetrievalModes = RETR\_TREE (получить все найденные контуры);

ContourApproximationModes = CHAIN\_APPROX\_SIMPLE (поскольку мы не планируем производить дальнейший анализ контуров для увеличения быстродействия, можно использовать простую аппроксимацию контуров).

Основная часть моделирующей программы приведена на листинге 1.

Листинг 1 – Код для моделирования алгоритма нахождения контуров

Здесь *sourceFrame* – исходное изображение, *grayFrame* – исходное изображение в градациях серого, *canny\_output* – выделенные границы исходного изображения, *contours* – массив найденных контуров, *drawing* – сформированное изображение контуров.

Цикл в конце листинга выбирает контуры размером больше 100 пикселей (нас интересуют только достаточно крупные объекты).

Моделирование проводилось для кадров нескольких видеопоследовательностей. Наиболее характерные результаты видеопоследовательности с катящимся автомобилем приведены на рисунке 1. На верхних фрагментах рисунка показан исходный кадр видеопоследовательности, на нижних – контуры, сформированные приведенной выше программой.

Из приведенных кадров видно, что в целом контуры автомобиля определяются. При этом сам автомобиль распадается на несколько контуров, часть из которых имеет малую площадь и на рисунке не отображена.

При этом определяется также большое число контуров других элементов. Причем эти контуры изменяются от кадра к кадру, что затрудняет определение постоянных объектов в видеопоследовательности по их контурам.

Характерные результаты работы алгоритма определения контуров для видеопоследовательности с проезжающим локомотивом представлены на рисунке 2.

Данный пример представляет собой самый сложный случай для алгоритма определения контуров. Как видно из приведенных данных, контуры движущегося локомотива практически не определяются.

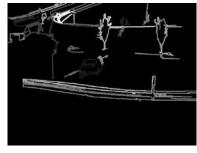
Анализ описанной ситуации показал, что проблема состоит не в алгоритме поиска контуров, а в детектировании границ. На рисунке 3 приведен результат работы детектора Кэнни для кадра данной видеопоследовательности (справа — увеличенный фрагмент с локомотивом).

Контуры движущегося локомотива оказываются размытыми на статичных кадрах видеопоследовательности. Из-за этого размытия не определяется резкая граница, что и приводит к плохой работе детектора.











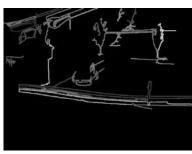
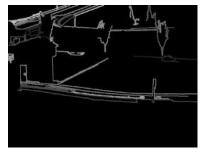
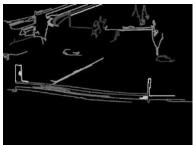


Рисунок 1 — Моделирование алгоритма определения контуров на видеопоследовательности с автомобилем











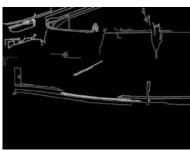


Рисунок 2 – Моделирование алгоритма определения контуров на видеопоследовательности с локомотивом



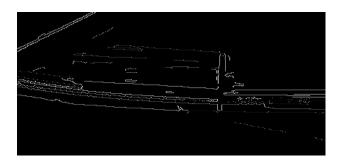


Рисунок 3 – Определенные границы локомотива

В целом можно сделать вывод о том, что лучшие из современных алгоритмов определения контуров не позволяют с достаточно высокой вероятностью определить движение объекта на железнодорожном переезде.

Рассмотрим второй способ определения появления на изображении объектов произвольной формы, связанный с поиском объектов на разностных кадрах. Существует несколько алгоритмов такого типа, которые имеют общее название *Background subtraction* (*BS*, вычитание фона). Сложность этих алгоритмов заключается в необходимости учитывать изменения освещенности кадров, дрожание камеры и изменение параметров съемки. Наиболее полную подборку таких методов можно найти на сайте, посвященном этим методам (opency.org), пример использования этих алгоритмов — в статье, опубликованной на сайте https://sites.google.com/site/backgroundsubtraction.

Как и в случае детекторов границ, современные методы показывают примерно одинаковые результаты, разница между которыми для нашей задачи несущественна. Для моделирования алгоритмов вычитания фона будем использовать реализованный в библиотеке *OpenCV* метод gaussian mixture model for background subtraction [3].

Основная часть моделирующей программы приведена на листинге 2.

```
int erosion elem = 0;
        int erosion size = 2;
int erosion type = MORPH ELLIPSE;
        Mat elementErosion = getStructuringElement(erosion_type,
              Size(2 * erosion_size + 1, 2 * erosion_size + 1),
             Point(erosion_size, erosion_size));
        int dilation_elem = 0;
        int dilation_size = 3;
        int dilation_type = MORPH_ELLIPSE;
        Mat elementDilation = getStructuringElement(dilation_type,
                     Size(2 * dilation_size + 1, 2 * dilation_size + 1),
             Point(dilation_size, dilation_size));
    pMOG2 = createBackgroundSubtractorMOG2();
    pMOG2->apply(sourceFrame, backFrame);
    erode(backFrame, erosionFrame, elementErosion);
    dilate(erosionFrame, dilationFrame, elementDilation);
```

Листинг 2 – Код для моделирования алгоритма вычитания фона

В рассматриваемой модели помимо основного алгоритма вычитания фона применены дополнительные операции по шумоподавлению и усилению яркости найденных объектов. Настройки этих дополнительных операций приведены в первой части листинга.

Для удаления шума с изображения, полученного методом вычитания фона, проще и эффективнее использовать не обычные алгоритмы шумоподавления, а морфологическое преобразование *erosion* (размытие), которое удалит все верхние детали. Размытие реализуется методом *erode*, после этой операции формируется изображение *erosionFrame*.

Для усиления детектированных элементов используется операция *dilation* (расширение). Найденные объекты расширяются, что приводит к уменьшению шума в виде черных пятен между детектированными точками одного объекта. Расширение реализуется методом *dilate*, результат все операций записывается в кадр *dilationFrame*.

Моделирование проводилось на уже рассмотренных ранее видеопоследовательностях. Результаты работы алгоритма приведены на рисунке 4. Эти результаты соответствуют ожиданиям – катящийся автомобиль в целом определяется (средний кадр), после остановки автомобиля вычитание фона дает нулевой результат.

Более интересные результаты получаются при моделировании алгоритма на видеопоследовательности с локомотивом, приведенные на рисунке 5. При появлении быстродвижуще-

гося локомотива алгоритм сразу же четко его находит (средний кадр). Локомотив четко обнаруживается на всех кадрах видеопоследовательности. При этом помимо локомотива на всех кадрах обнаруживается и тень, отбрасываемая им на рельсы (последний кадр). Стоит отметить, что освещение сцены видеопоследовательности довольно равномерное и найденная алгоритмом тень не видна человеческим глазом.



Рисунок 4 — Моделирование алгоритма вычитания фона на видеопоследовательности с автомобилем

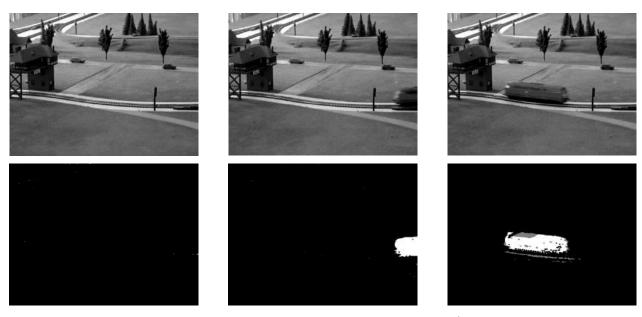


Рисунок 5 — Моделирование алгоритма вычитания фона на видеопоследовательности с локомотивом

Трудность в различении реальных объектов от тени может создать серьезные проблемы при работе алгоритма в реальных условиях. На открытом пространстве железнодорожного переезда могут возникать тени от туч, отражение света от рядом стоящих знаний и других объектов и другие помехи подобного рода.

Устранение подобных помех требует дополнительных алгоритмов или использования дополнительного аппаратного обеспечения. Например, использование стереозрения должно позволить довольно легко отличить плоскую тень от объемного объекта.

В целом по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: современные алгоритмы компьютерного зрения без дополнительных исследований и их адаптации к задаче не позволяют с достаточной вероятностью определять появления объектов на железнодорожных переездах;

отдельные алгоритмы показывают хорошие результаты на конкретных объектах и конкретных условиях, но плохо проявляют себя на других объектах в других условиях. Для практического применения необходимо использовать методику определения появления объектов, использующую различные алгоритмы с разными способами получения информации об объекте:

появляющиеся в реальных условиях помехи (прежде всего тени) могут оказывать существенное влияние на работу алгоритмов компьютерного зрения. Для разработки практически пригодных алгоритмов требуется большая база исходных (видео) изображений, снятых при различных погодных условиях и содержащих различные объекты.

### Список литературы

- 1. Ананьева, Н. Г. Информационная система безопасности малодеятельных железнодорожных переездов [Текст] / Н. Г. Ананьева // Управление, информация и оптимизация: Сборник трудов Всероссийской молодежной научной школы / Национальный исследовательский Томский техн. ун-т. Томск, 2012. С. 181 183.
- 2. Пат. 94202 Российская Федерация, МПК В 61 L 29/00. Электротехнический комплекс для предупреждения аварийных ситуаций на железнодорожных переездах [Текст] / Чижма С. Н., Ананьева Н. Г.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. 2010102685; заявл. 27.01.2010; опубл. 20.05.2010.
- 3. Зачатейский, Н. Д. Совершенствование метода «выделения фона» для нахождения подвижных объектов на железнодорожном переезде с помощью компьютерного зрения [Текст] / Н. Д. Зачатейский, А. А. Аржанников, Е. А. Альтман // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2015. № 1 (21). С. 74 80.

#### References

- 1. Anan'eva N. G. Informatsionnaia sistema bezopasnosti malodeiatel'nykh zheleznodorozhnykh pereezdov [Information security system of inactive railroad crossings]. *Upravlenie, informatsiia i optimizatsiia. Sbornik trudov Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi shkoly* (Management, information and optimization. Proceedings of the All-Russian Youth Scientific School). Tomsk, 2012, pp. 181 183.
- 3. Zachateiskii, N. D., Arzhannikov A. A., Al'tman E. A. Improvement Method «selection background» to locate objects in IG Petritskaya at a railway crossing using computer vision [Sovershenstvovanie metoda «vydeleniia fona» dlia nakhozhdeniia podvizhnykh ob"ektov na zheleznodorozhnom pereezde s pomoshch'iu komp'iuternogo zreniia] *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 74 80.

УДК 656.022.4:519.168:519.852.23

Н. Ю. Афоничев, В. Г. Шахов

### МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО И НАИБОЛЕЕ БЛИЗКИХ К НЕМУ МАРШРУТОВ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ

Рассматривается метод практической реализации решения частного случая транспортной задачи. Он позволяет находить оптимальный и заданное количество маршрутов, ближайших к нему по величине критерия оптимальности. Метод обеспечивает большую гибкость в решении вопросов планирования оптимальной

организации перевозочного процесса при выработке как стратегических, так и оперативных планов в случае возникновения ситуаций типа «авария», «затор» или других форс-мажорных обстоятельств.

Эффект экономии средств при нахождении оптимального решения и, как следствие, увеличение прибыли транспортного предприятия определяют актуальность решения транспортной задачи, предполагающего минимизацию издержек на перевозку [4].

Информационное обеспечение в транспортной логистике играет одну из ключевых ролей [5]. Внедрение логистических форм и методов управления транспортным предприятием позволяет существенно сократить материальные и финансовые расходы, ускорить движение оборотных средств предприятия. Помимо этого наиболее полно удовлетворяются запросы потребителей о качестве и сроках поставок [6]. В условиях рынка это дает транспортному предприятию преимущество в конкурентной борьбе за клиентов.

Поэтому задача оптимизации процесса перевозки является актуальной для любого занимающегося грузоперевозками предприятия, работа которого строится на принципах транспортной логистики [1].

Предлагается метод реализации решения частного случая логистической транспортной задачи о нахождении оптимального с точки зрения заданного критерия при наличии множества возможных (альтернативных) маршрутов, не предполагающего перебора всех возможных маршрутов. Критериями оптимальности могут быть минимальные длина маршрута, время или стоимость перевозки груза. В процессе поиска определяются оптимальный с точки зрения заданного критерия маршрут (вариант № 1) и еще N-1 вариантов маршрута, наиболее близких к оптимальному варианту маршрута (варианты № 2, № 3, ..., № N). Если искомые маршруты существуют, то метод гарантирует их нахождение с большой долей вероятности. Поиск нескольких вариантов предусматривается для того, чтобы лицо, принимающее решение, имело возможность выбора. В этом состоит одно из основных преимуществ предлагаемого метода по сравнению с другими [2].

Предполагается, что абстрактным представлением полигона транспортного предприятия является ненаправленный граф. Его вершины соответствуют промежуточным пунктам на возможных маршрутах следования транспортных средств (станции, разъезды, стрелочные переводы, перекрестки дорог, склады и т. п.). Ребра соответствуют транспортным магистралям (железные или автомобильные дороги и т. п.), соединяющим промежуточные пункты (вершины). Далее для простоты вершины графа будем называть стопами, а ребра — перегонами.

Каждый вариант маршрута характеризуется следующими данными: имена стопов в порядке следования груза по маршруту; параметры перегонов маршрута (длина, средняя скорость движения по перегону, стоимость тонно-километра на перегоне); длина маршрута; значение критерия оптимальности.

Маршруты, имеющие одно и то же значение критерия оптимальности, учитываются в порядке их определения.

Считаем, что два стопа могут соединяться непосредственно между собой только одним перегоном, а каждый стоп имеет один параметр – собственное имя (номер).

Для каждого перегона должны быть определены номер (имя); длина; средняя скорость перемещения перевозящего груз транспортного средства, которая определяется графиком движения и техническим состоянием перегона; стоимость одного тонно-километра; доступность перегона во время перевозки груза (он может быть закрыт на ремонт или быть недоступным по другим причинам). В состав потенциальных (возможных) маршрутов перевозки груза включаются все доступные во время перевозки груза перегоны.

Груз характеризуется весом и максимальным временем, которое он может находиться в пути (этот параметр актуален для скоропортящихся грузов).

Предполагается, что движение транспортных средств по кольцевым маршрутам запрещено, т. е. ни один возможный маршрут не проходит дважды через один и тот же стоп.

Критерии оптимальности маршрута: минимальные длина маршрута, время или затраты на перевозку груза.

Существует множество алгоритмов, которые могут быть применены при определении оптимального маршрута. Самым простым является метод прямого перебора всех возможных путей и сравнения их между собой с точки зрения выполнения критерия оптимальности (переборный метод). Этот метод эффективен для небольшого количества стопов и перегонов (вершин и ребер в графе полигона) — не более 10-15 стопов. Для определения оптимального пути на полигонах, содержащих большее количество стопов и перегонов, может быть применен один из методов прикладной математики, позволяющих гарантированно находить оптимальный (кратчайший) маршрут от одной вершины графа до другой (или до других) за конечное количество итераций [7].

Наиболее существенными можно считать методы, основанные на использовании алгоритмов Дейкстры, Дейкстры – Грибова (улучшенный алгоритм Дейкстры), Флойда – Уоршелла, Джонсона, Беллмана – Форда, Левита и т. п. [7]. Указанные алгоритмы реализуют различные варианты стратегии построения дерева кратчайших путей (Shortest-Paths Tree -SPT) без перебора всех возможных. Многие из них имеют практическое применение и хорошо зарекомендовали себя на практике. Например, алгоритм Дейкстры позволяет эффективно искать кратчайшие пути от одной из вершин в неориентированном насыщенном графе с неотрицательными весами ребер [8]. Поэтому на его использовании основан работающий в маршрутизаторах средних по размеру (до 100 маршрутизаторов) распределенных цифровых IP-сетей протокол OSPF (Open shortest path first) [2], который определяет оптимальные маршруты передачи данных в этих сетях. Другим алгоритмом, который применяется в протоколах маршрутизации ІР-сетей, является алгоритм Беллмана – Форда, используемый в алгоритме длины вектора, который в свою очередь используется в RIP-протоколе маршрутизации [3]. К недостаткам перечисленных алгоритмов можно отнести постепенное увеличение времени на определение оптимального маршрута с ростом количества вершин и ребер графа полигона (степени связности графа). Преимуществами этих алгоритмов над всеми другими являются гарантированное определение оптимального маршрута (если он существует), простота, невысокие требования к аппаратным ресурсам и, как следствие, минимальные затраты на реализацию и надежность, подтвержденная долговременным практическим использованием в протоколах маршрутизации цифровых ІР-сетей.

Существует ряд эвристических методов, которые образуют другой класс алгоритмов, изначально разработанных для решения классической «задачи коммивояжера». Это алгоритмы наискорейшего спуска (градиентный метод и его модификации), оценочных (штрафных) санкций, мини-макса (Моргенштерна – фон Неймана), альфа-бета процедуры.

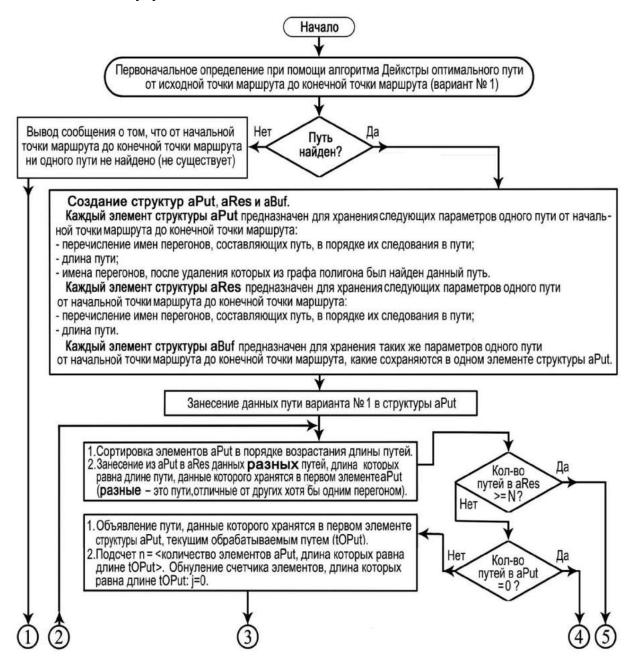
Имеются и другие, более сложные алгоритмы определения оптимального пути или путей (как точных, так и приближенных) в больших и плотных графах, часть из которых использует в качестве основной составляющей один из указанных выше более простых алгоритмов (прежде всего Дейкстры и Беллмана — Форда). К ним относятся приближенный алгоритм Джеффа, неадаптивный и адаптивный алгоритмы маршрутизации со множеством ограничений (TAMCRA и SAMCRA), приближенный алгоритм Чена, алгоритм случайного поиска Кормаза и Крунза, А\*Prune-алгоритм Лиу и Рамакришнана и др.

Активно ведутся теоретические разработки новых алгоритмов: генетических (метаэвристических) и мультиэвристических, мультиагентной оптимизации (АS-алгоритм и др.) и алгоритмов, основанных на теории нейронных сетей.

В решении поставленной задачи для поиска оптимального маршрута (вариант № 1) используется алгоритм Дейкстры как наиболее простой, недорогой в реализации, надежный и доказавший свою эффективность в реальной работе в маршрутизаторах IP-сетей. Это итерационный алгоритм. При поиске оптимального маршрута алгоритм не перебирает все возможные маршруты, а использует оригинальную стратегию поиска оптимального пути, гарантирующую нахождение оптимального маршрута за количество итераций, меньшее, чем

количество потенциальных маршрутов. Количество итераций не поддается предсказанию и зависит от структуры графа полигона, степени его связности и расположения на графе начального и конечного пунктов маршрута. Для решения задачи нахождения маршрутов нескольких вариантов авторами предложен циклический алгоритм Йена [8], который позволяет находить k ближайших к оптимальному пути маршрутов без последовательного перебора всех возможных путей при условии, что оптимальный маршрут был определен ранее. В нашем случае этот маршрут этого варианта определяется при помощи алгоритма Дейкстры. Алгоритм Дейкстры используется также и в качестве основного блока цикла алгоритма Йена, вычисляющего варианты наиболее близких к оптимальному маршруту путей.

На рисунке приведена структурная схема реализации задачи поиска оптимальных маршрутов с использованием алгоритмов Дейкстры и Йена. Предлагаемая методика использовалась в учебном процессе при обучении студентов по специальности «Информационные системы и технологии» и может применяться при обучении студентов по направлениям подготовки «Логистика и управление цепями поставок» и «Логистика».



Структурная схема метода определения оптимального и N - 1 наиболее близких к нему маршрутов

На практике методика применима для следующих задач:

определения оптимальных маршрутов следования грузов в процессе составления графика движения подвижного состава любого вида транспорта;

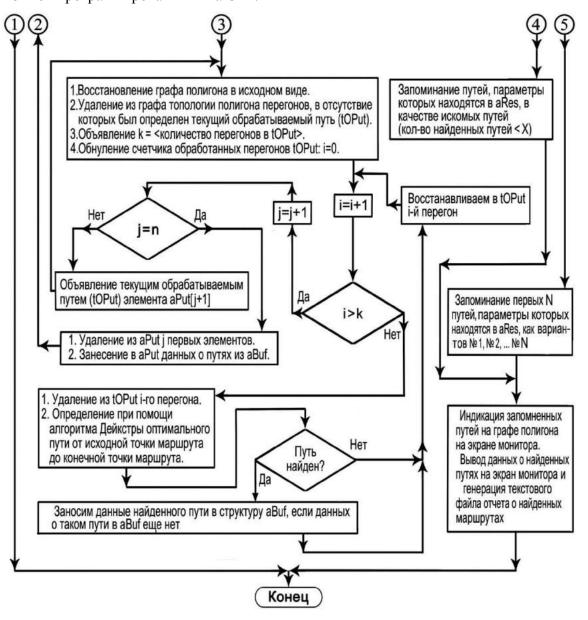
оперативного определения оптимальных путей объезда аварийных участков и участков с заторами на железной дороге и на любом другом виде транспорта;

определения оптимальных маршрутов передвижения тягового состава, работающего на сортировочных горках;

определения (на этапе подготовки к проектированию) маршрутов прокладки железнодорожного полотна, строительства дорожного (шоссейного) полотна, трубопроводов;

поиска оптимальных решений в экспертных системах различного уровня и назначения.

Описанная методика была применена для ряда практических приложений с использованием языков программирования типа С++.



Рисунок, лист 2

#### Список литературы

1. Афоничев, Н. Ю. Определение оптимального маршрута перевозки грузов [Текст] / Н. Ю. Афоничев, В. К. Волкова // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность / Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2015. — N $\!\!\!_{2}$  3. — 5 с.

- 2. Афоничев, Н. Ю., Определение оптимального маршрута перевозки грузов: Учебное пособие [Текст] / Н. Ю. Афоничев / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2010. 74 с.
- 3. Кульгин, М. Технология корпоративных сетей. Энциклопедия [Текст] / М. Кульгин. СПб: Питер, 2000. 704 с.
- 4. Лукинский, В. С. Модели и методы теории логистики [Текст] / В. С. Лукинский. СПб: Питер, 2008. 448 с.
- 5. Миротин, Л. Б. Транспортная логистика: Учебник для транспортных вузов [Текст] / Л. Б. Миротин. М.: Экзамен, 2003. 512 с.
- 6. Никифоров, В. С. Мультимодальные перевозки и транспортная логистика: Учебное пособие [Текст] / В. С. Никифоров. М.: ТрансЛит, 2007. 272 с.
- 7. Шахов, В. Г. Определение оптимального маршрута перевозки грузов: [Текст] / В. Г. Шахов, Н. Ю. Афоничев / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013.
- 8. Алгоритм Дейкстры, Флойда, Беллмана Форда [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.intuit.ru/studies/courses/12181/1174/lecture/25268?page=3.
- 9. Алгоритмы Беллмана Форда, Йена, волновой алгоритм [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://algolist.manual.ru/maths/graphs/shortpath/.

### References

- 1. Afonichev N. Iu., Volkova V. K. Determining the optimal route of transportation of goods [Opredelenie optimal'nogo marshruta perevozki gruzov]. *Rossiia molodaia: peredovye tekhnologii v promyshlennost' Young Russia: advanced technology in the industry*, 2015, no. 3. 5 p.
- 2. Afonichev N. Iu. *Opredelenie optimal'nogo marshruta perevozki gruzov: Uchebnoe posobie* (Determination of the optimal route of transportation of cargo: Textbook). Omsk, 2010, 74 p.
- 3. Kul'gin M. *Tekhnologiia korporativnykh setei*. *Entsiklopediia* (Corporate networks Technology. Encyclopedia). SPb.: Piter, 2000, 704 p.
- 4. Lukinskii V. S. *Modeli i metody teorii logistiki* (Models and methods of logistics theory). SPb.: Piter, 2008, 448 p.
- 5. Mirotin L. B. *Transportnaia logistika: Uchebnik dlia transportnykh vuzov* (Transport Logistics: Textbook for high schools transport). Moscow: Ekzamen Publ., 2003, 512 p.
- 6. Nikiforov V. S. *Mul'timodal'nye perevozki i transportnaia logistika: Uchebnoe posobie* (Multimodal transportation and transport logistics: Textbook). Moscow: TransLit Publ., 2007, 272 p.
- 7. Shakhov V. G., Afonichev N. Iu. *Opredelenie optimal'nogo marshruta perevozki gruzov: Elektronnoe uchebnoe posobie* (Determining the optimal route of transportation of goods: electronic textbooks). Omsk, 2013.
- 8. Algoritm Deikstry, Floida, Bellmana-Forda [Elektronnyi resurs] / Rezhim dostu-pa: http://www.intuit.ru/studies/courses/12181/1174/lecture/25268?page=3

http://www.intuit.ru/studies/courses/12181/1174/lecture/25268

9. Algoritmy Bellmana-Forda, Iena, volnovoi algoritm [Elektronnyi resurs] / Re-zhim dostupa: http://algolist.manual.ru/maths/graphs/shortpath/

УДК 621.313

А. В. Скляр, С. Н. Чижма

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО СПЕКТРУ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА

В статье приводятся два метода оценки угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя, использующие особые спектральные компоненты, порождаемые конструкцией двигателя. Выполнив поиск этих компонентов, можно оценить скольжение ротора. Целью работы является сравнение представленных мето-

дов при различных нагрузках двигателя и определение наиболее точного метода. Результатом работы является создание алгоритма программного модуля для оценки частоты вращения ротора асинхронного двигателя, который может применяться для различных практических задач, где требуется точное определение угловой скорости вращения, однако или нет доступа к движущимся частям для установки датчика оборотов, или применение датчиков оборотов нежелательно.

В настоящее время приобретает широкое распространение метод электромониторинга, который для определения дефектов двигателя использует спектр тока статора. Данный метод нашел применение в атомной и нефтяной отраслях, однако исследований использования этого метода для нужд железной дороги ранее не проводилось. Тем не менее широкое использование асинхронных двигателей в качестве вспомогательных машин подвижного состава, тяговых асинхронных двигателей и статистика отказов оборудования обусловливают применение электромониторинга и в области железнодорожного транспорта.

Ключевым моментом этого метода является определение частоты вращения ротора, так как от нее зависит расположение всех спектральных компонентов в спектре тока статора. Однако применение датчиков частоты вращения в таких системах диагностики нежелательно, так как это увеличивает стоимость системы и количество соединительных проводов, поэтому предпочтительнее использование бездатчикового метода определения частоты вращения ротора.

За последнее время были разработаны методы определения частоты вращения асинхронных двигателей по току статора. Их можно разделить на две группы [1]: методы, использующие математическую модель двигателя, и методы, использующие анализ компонентов спектра напряжения или тока двигателя.

Методы, основанные на математической модели, дают преимущества в скорости обработки данных, но требуют большого количества параметров двигателя. Кроме того, необходимо измерение как тока, так и напряжения [2].

Методы, основанные на спектральном анализе, не зависят от электромагнитных параметров двигателя и требуют только измерения тока или напряжения, однако при использовании таких методов необходимо большое количество вычислений. Наиболее распространены методы, использующие Z-преобразование, быстрое преобразование Фурье и его разновидности, преобразование Гильберта. Сравнение этих методов дано в работах [3, 4].

Часто бездатчиковые оценки частоты вращения используются в системах электроприводов [5]. В источнике [6] описывается способ оптимальной оценки частоты вращения ротора, основанный на измерении текущих значений токов и напряжений статора, вычисляется значение реактивной мощности и применяется пропорционально-интегральное преобразование на основе минимизации критерия качества, определяемого по сохраненным ранее двум предыдущим значениям оценки частоты вращения и разности значений прямого и косвенного вычислений реактивной мощности. В некоторых работах для получения значения частоты вращения двигателя используются искусственные нейронные сети [7, 8]. В работе [9] представлены исследование и разработка наблюдателя угловой скорости для асинхронных электродвигателей по схеме ТРН-АД. В патенте [10] предлагается способ оценки частоты вращения погружных насосов с помощью измерения тока одной из фаз: трансформируют трансформатором тока частотную последовательность импульсов фазного тока и синусоидальный ток, потребляемый погружным электродвигателем от трехфазного питающего напряжения; выделяют нужную частотную последовательность импульсов напряжения, которая создается из-за влияния магнитов, расположенных особым образом.

Базовый принцип оценки угловой скорости по спектру тока статора основан на вычислении особых частот. Эти частоты описываются выражением (1) и включают в себя частоты эксцентриситета с пазовыми гармониками [7], [11]:

$$f_{seh} = f_1 \left[ \left( kR + n_d \right) \frac{\left( 1 - s \right)}{p} + n_w \right],\tag{1}$$

где  $f_{seh}$  — частоты, связанные со скоростью;  $f_1$  — частота питания сети; k — целое; p — число пар полюсов двигателя; R — число пазов ротора; s — скольжение;  $n_d$  — порядок эксцентриситета, при  $n_d = 0$  — статический эксцентриситет, при  $n_d = 1$  — динамический;  $n_w$  — порядок гармоники статорной магнитодвижущей силы. Отсюда можно получить два метода оценки частоты вращения ротора.

Первый метод — метод поиска спектральных компонентов эксцентриситета — описывается формулой (2), которая получается при k = 0,  $n_w = 1$ ,  $n_d = \pm 1$  из формулы (1):

$$f_{seh} = f_1 \left( 1 \pm \frac{1 - s}{p} \right). \tag{2}$$

Формула (2) используется для вычисления динамического эксцентриситета, который всегда присутствует в асинхронном двигателе из-за его конструктивных особенностей. Однако величина эксцентриситета может варьироваться в пределах 10 % от номинального зазора [13], поэтому амплитуда гармоник может существенно отличаться для различных двигателей даже одной марки. Производители обычно стремятся уменьшить величину эксцентриситета двигателя, поэтому предложенный способ может давать неверную интерпретацию, если необходимые спектральные компоненты будут иметь малую амплитуду. Однако проведем исследование этого метода с целью определения его возможностей.

С помощью выражения (2) можно производить оценку частоты вращения ротора, если учитывать тот факт, что скольжение обычно составляет от 0 до 0,08. Тогда в спектре тока можно выделить область для поиска частоты сигналов с наибольшей амплитудой. Найдя такие частоты, можно воспользоваться отношением (2) и уточнить значение скольжения [11]. После этого по формуле (3) вычислить частоту вращения ротора:

$$n_r = \frac{60f_1(1-s)}{p}. (3)$$

Второй метод — метод поиска спектральных компонентов пазовых гармоник — можно описать формулой (4), которая получается из выражения (1) при k = 1,  $n_w = 1$ ,  $n_d = 0$ :

$$f_{rsh} = f_1 \left( R \frac{1-s}{p} \pm 1 \right). \tag{4}$$

Формула (4) используется для расчета пазовых гармоник [7].

Пазовая гармоника вызывается особенностями конструктивного исполнения электрической машины переменного тока, у которой на статоре и на роторе обмотка всегда укладывается в пазах. При вращении ротора в зазоре двигателя возникает периодическое чередование ферромагнитных пазов статора и ротора. Это приводит к модуляции магнитного потока в зазоре частотой, связанной с количеством пазов на роторе и статоре электрической машины [14].

Для оценки скорости с применением пазовых гармоник необходимо знать число пазов ротора, которое можно получить из документации на двигатель либо попытаться определить их по спектру тока, как предложено в работе [11].

Сравним эти два метода на примере оценки частоты вращения ротора асинхронного двигателя, работающего при различных значениях нагрузки на валу.

Для проведения опытов была создана экспериментальная установка. За основу была взята конструкция, описанная в статье [12], однако она претерпела определенные изменения. Установка состоит из асинхронного двигателя M2 АИРМ63В4У3, характеристики которого приведены в таблице 1, и генератора M1 постоянного тока, нагруженного на реостат R. Генератор и двигатель соединены гибкой муфтой. Частота вращения ротора измеряется с помощью датчика Холла. Сигнал тока статора снимается с помощью токовых клещей Fluke i5s,

установленных на одной из фаз АД. Оцифровку преобразованного сигнала тока выполняет система сбора данных фирмы L-Card LTR-EU-2 с модулем АЦП LTR22. Частота дискретизации во всех опытах составляет  $78,125~\mathrm{k\Gamma}$ ц. Спектр тока получен с помощью программного обеспечения LGraph2 фирмы L-Card.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателя АИРМ63В4У3

Параметр	Значение
Номинальная мощность АД, кВт	0,37
Синхронная частота вращения, об/мин	1500
Число пар полюсов	2
Количество пазов ротора	30

Схема испытания приведена на рисунке 1.

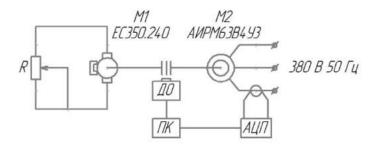


Рисунок 1 – Схема опыта для оценки частоты вращения двигателя:

R – реостат; ДО – датчик оборотов; ПК – персональный компьютер; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Для примера оценки частоты вращения ротора методом поиска гармоник эксцентриситета рассмотрим спектр тока двигателя АИРМ63В4У3, работающего на холостом ходу.

Частота вращения ротора  $n_r$ , измеренная датчиком оборотов, составляет 1492,1 об/мин. Используя формулу (2), вычислим частоту гармоник эксцентриситета:

$$\begin{split} f_{\mathit{LSB\_seh}} &= 50 \bigg( 1 - \frac{1 - 0,00527}{2} \bigg) = 25,132 \; \Gamma \mathrm{II}; \\ f_{\mathit{USB\_seh}} &= 50 \bigg( 1 + \frac{1 - 0,00527}{2} \bigg) = 74,868 \; \Gamma \mathrm{II}. \end{split}$$

На рисунке 2 приведен участок спектра тока статора в диапазоне расположения частот эксцентриситета. Можно увидеть пики амплитуд около рассчитанных частот. Небольшое несоответствие объясняется нестабильностью частоты питающей сети и, как следствие, вращения ротора, а также погрешностью измерений.

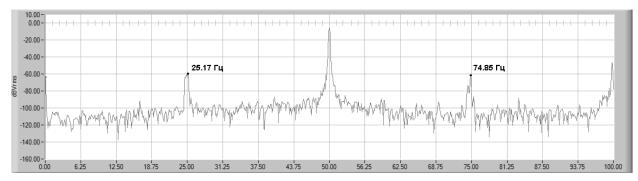


Рисунок 2 – Спектр тока статора при частоте вращения 1492,1 об/мин

Теперь изменим частоту вращения ротора с помощью уменьшения сопротивления реостата генератора. Новая частота вращения составляет 1468,8 об/мин. Соответственно частота гармоник эксцентриситета будет рассчитываться так:

$$\begin{split} f_{\mathit{LSB\_seh}} &= 50 \bigg( 1 - \frac{1 - 0,0208}{2} \bigg) = 25,52 \; \Gamma \mathrm{II}; \\ f_{\mathit{USB\_seh}} &= 50 \bigg( 1 + \frac{1 - 0,0208}{2} \bigg) = 74,48 \; \Gamma \mathrm{II}. \end{split}$$

На рисунке 3 приведен спектр тока статора для этого случая. Как мы видим, гармоники, связанные с эксцентриситетом зазора, сместились на 0,388 Гц друг к другу, что соответствует новой частоте вращения двигателя.

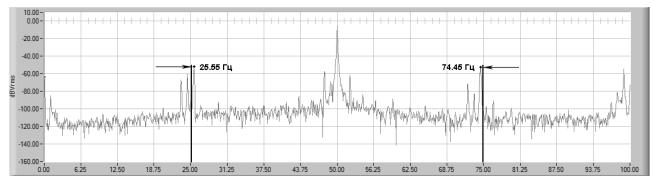


Рисунок 3 – Спектр тока статора при частоте вращения 1466,6 об/мин

В таблице 2 приведены результаты измерения частоты эксцентриситета для других значений нагрузки испытуемого двигателя.

Таблица 2 – Результаты измерения частот эксцентриситета

Мощность	Измеренная	Скольжение	Нижняя вы-	Верхняя	Нижняя изме-	Верхняя изме-
нагрузки,	частота		численная	вычисленная	ренная боковая	ренная боковая
Вт	вращения,		боковая час-	боковая час-	частота эксцен-	частота эксцен-
	об/мин		тота эксцен-	тота эксцен-	триситета, Гц	триситета, Гц
			триситета,	триситета,		
			Гц	Гц		
0	1492,1	0,00527	25,132	74,868	25,17	74,85
21,14	1487,5	0,00833	25,208	74,792	25,22	74,81
42,517	1483,2	0,0112	25,28	74,72	25,25	74,78
63,116	1479,3	0,0138	25,345	74,655	25,31	74,69
87,932	1474,5	0,017	25,425	74,575	25,47	74,61
109,497	1468,8	0,0208	25,52	74,48	25,55	74,45

Теперь проведем оценку частоты вращения ротора методом поиска пазовых гармоник. Рассмотрим спектр тока двигателя, работающего на холостом ходу. Частота вращения ротора, измеренная датчиком оборотов, составляет 1492,4 об/мин. Используя формулу (4), вычислим частоту пазовых гармоник:

$$\begin{split} f_{\mathit{LSB\_rsh}} &= 50 \bigg( 30 \frac{1\!-\!0,\!00507}{2} \!-\!1 \bigg) \!= 696,\!198\,\Gamma\mathrm{II}; \\ f_{\mathit{USB\_rsh}} &= 50 \bigg( 30 \frac{1\!-\!0,\!00507}{2} \!+\!1 \bigg) \!= 796,\!198\,\Gamma\mathrm{II}. \end{split}$$

На рисунке 4 приведен участок спектра тока статора в диапазоне расположения пазовых гармоник. Можно увидеть пики амплитуды на рассчитанных частотах.

Теперь изменим частоту вращения ротора с помощью увеличения нагрузки генератора. Новая частота вращения составляет 1466,6 об/мин. Соответственно частота пазовых гармоник будет рассчитываться так:

$$f_{LSB\_rsh} = 50 \left( 30 \frac{1 - 0.0223}{2} - 1 \right) = 683,275 \,\Gamma \text{H};$$

$$f_{\mathit{USB\_rsh}} = 50 \bigg( 30 \frac{1 - 0{,}0223}{2} + 1 \bigg) = 783{,}275$$
 Гц.

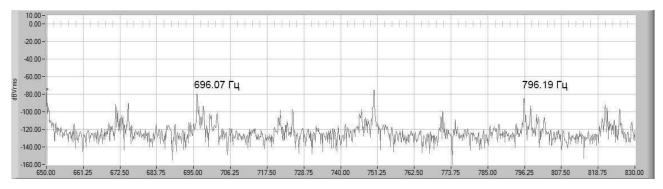


Рисунок 4 – Спектр тока статора при частоте вращения 1492,4 об/мин

На рисунке 5 приведен спектр тока статора для этого случая. Как мы видим, пазовые гармоники сместились на 12,923 Гц влево, что соответствует новой скорости вращения двигателя.

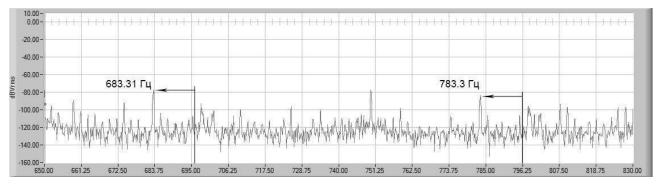


Рисунок 5 – Спектр тока статора при частоте вращения 1466,6 об/мин

В таблице 3 приведены результаты измерения частоты пазовых гармоник для других значений нагрузки испытуемого двигателя.

Таблица	3 _	Результаты	измерения	<b>HASODEIA</b>	гармоник

Мощность	Измеренная	Скольжение	Нижняя вы-	Верхняя вы-	Нижняя изме-	Верхняя изме-
нагрузки,	частота		численная бо-	численная	ренная боковая	ренная боковая
Вт	вращения,		ковая частота	боковая час-	частота пазо-	частота пазо-
	об/мин		пазовой гармо-	тота пазовой	вой гармоники,	вой гармоники,
			ники, Гц	гармоники,	Гц	Гц
				Гц		
0	1491,2	0,0059	695,60	795,60	695,52	795,51
21,38	1487,4	0,0084	693,70	793,70	693,74	793,72
43,974	1483,1	0,0113	691,55	791,55	691,54	791,53
63,364	1479,3	0,0138	689,65	789,65	689,62	789,61
88,101	1472,6	0,0183	686,30	786,30	686,33	786,32
109,634	1467,3	0,0218	683,65	783,65	683,72	783,71

Сравним между собой точность приведенных методов. Результаты полученных скоростей движения ротора для обоих методов и погрешность оценки приведены в таблице 4.

Сравнивая оба метода оценки скорости вращения, можно сделать следующие замечания. Гармоники, отвечающие за эксцентриситет ротора, являются низкочастотными, и их не всегда удается четко выделить в спектре тока статора. По сравнению с ними пазовые гармоники являются высокочастотными, и их легко отделить на фоне общего шума. Очевидно, что

формула (4) будет давать более точные значения скольжения, чем (2), в R раз, особенно при нестабильной частоте вращения ротора. При использовании метода оценки, основанного на влиянии эксцентриситета на ток статора, изменение частот гармоник при изменении частоты вращения данного двигателя на 1 об/мин составляет 0,0167  $\Gamma$ ц. Это является причиной получения спектров с более высоким разрешением, что увеличивает время съема данных. В свою очередь при оценке методом, основанным на появлении пазовых гармоник в спектре тока статора, изменение частоты этих гармоник при изменении частоты вращения двигателя на 1 об/мин составляет 0,5  $\Gamma$ ц. Иначе говоря, этот метод более чувствителен к изменению угловой скорости.

Таблица 4 – Сравнение результатов опытов

Сполоб ополин акоролти	Измеренная датчиком оборо-	Оценка частоты враще-	Относительная
Способ оценки скорости	тов частота вращения, об/мин	ния, об/мин	погрешность, %
Поиск частотных ком-	1492,1	1490,4	0,00114
понентов динамического	1487,5	1487,7	0,000135
эксцентриситета	1483,2	1485,9	0,00182
	1479,3	1481,4	0,00142
	1474,5	1474,2	0,000204
	1468,8	1467	0,00123
Поиск частотных ком-	1491,2	1491,03	0,000114
понентов зубцовопазо-	1487,4	1487,46	0,0000403
вых гармоник	1483,1	1483,07	0,0000202
	1479,3	1479,23	0,0000473
	1472,6	1472,65	0,000034
	1467,3	1467,43	0,0000886

На основании описанных выше экспериментов можно разработать алгоритм для оценки скорости вращения ротора асинхронного двигателя по спектру тока его статора методом поиска пазовых гармоник.

В первую очередь необходимо вычислить возможный диапазон изменения частот пазовых гармоник по формулам (5), (6):

$$f_1 \left( R \frac{1 - s_{\text{max}}}{p} - 1 \right) \le f_{LSB\_rsh} < f_1 \left( R \frac{1}{p} - 1 \right);$$
 (5)

$$f_{1}\left(R\frac{1-s_{\max}}{p}+1\right) \leq f_{USB\_rsh} < f_{1}\left(R\frac{1}{p}+1\right).$$

$$\tag{6}$$

Допустим, нам известно, что при максимальной нагрузке скольжение  $s_{\max}$  составляет 0,08. Вычислим возможный диапазон изменения пазовых гармоник для двигателя АИРМ63В4У3, используя формулы (6) и (7):

$$\begin{split} &50\bigg(30\frac{1-0,08}{2}-1\bigg) \leq f_{LSB\_rsh} < 50\bigg(30\frac{1}{2}-1\bigg);\\ &640 \leq f_{LSB\_rsh} < 700;\\ &50\bigg(30\frac{1-0,08}{2}+1\bigg) \leq f_{USB\_rsh} < 50\bigg(30\frac{1}{2}+1\bigg);\\ &740 \leq f_{USB\_rsh} < 800. \end{split}$$

После вычисления диапазона возможных частот пазовых гармоник перейдем к съему спектра и выделению диапазона поиска. Спектр тока статора с диапазонами поиска показан на рисунке 6.

При анализе спектра нужно учитывать наличие гармоник основной частоты. Тогда в диапазоне поиска однозначно видно присутствие двух частотных компонентов – 697,55 и

797,43 Гц, что соответствует значениям частоты пазовых гармоник (после измерения угловой скорости датчиком скорости измеренные и вычисленные частоты совпали в пределе погрешности).

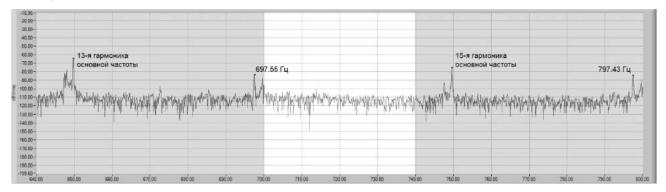


Рисунок 6 - Спектр тока в диапазоне поиска

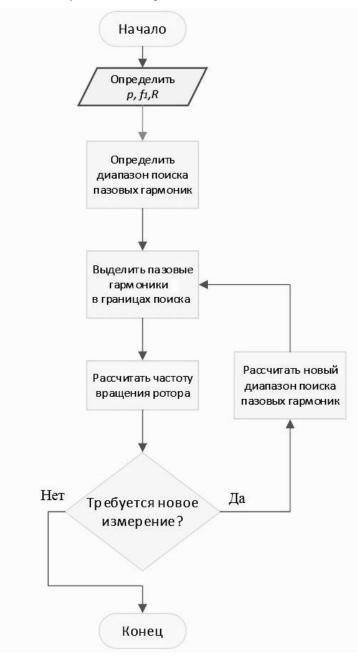


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма оценки частоты вращения ротора асинхронного двигателя

После вычисления частоты компонентов пазовых гармоник можно «захватить» эти частоты и отслеживать их, если принять тот факт, что нагрузка не может измениться мгновенно. Тогда не требуется искать гармоники во всем диапазоне частот. Новый диапазон на каждое измерение можно вычислить так:

$$\Delta f_{rsh} = 2f_1 \frac{R}{p} \Delta s,\tag{7}$$

где  $\Delta s$  — диапазон изменения скольжения, который зависит от предполагаемой скорости изменения нагрузки за время между съемами сигнала.

Например, для двигателя AИРM63B4У3, если скорость не может измениться более чем на 10 об/мин между двумя измерениями, то сдвиг пазовых частот следует искать в диапазоне

$$2.50\frac{30}{2}$$
0,0066667 = 10 Гц.

Новый диапазон поиска составляет всего 10 Гц (5 Гц влево и 5 Гц вправо от старого значения частоты гармоники). Как видно, границы поиска теперь сузились в шесть раз.

На основании приведенных приемов можно составить алгоритм оценки частоты вращения ротора асинхронных двигателей методом поиска пазовых гармоник. Блок-схема этого алгоритма приведена на рисунке 7.

Приведенный алгоритм может использоваться для создания программного модуля наблюдения за скоростью вращения асинхронного двигателя (АД), который подходит для применения в различных практических задачах, например, в составе автоматизированной системы диагностики по спектру тока статора асинхронных вспомогательных и тяговых двигателей подвижного состава. Этот метод может быть полезным и в других областях промышленности, если нет прямого доступа к движущимся частям механизмов и, следовательно, нет возможности закрепить датчик оборотов либо поставить метку. В свою очередь спектр тока легко снять, так как питающие кабели всегда доступны для подключения. Кроме того, токовые трансформаторы часто уже установлены во многих системах управления, что позволяет использовать их для определения скорости вращения нагруженных механизмов.

### Список литературы

- 1. Aiello, M., An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform / M. Aiello, A. Cataliotti // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. -2005. Vol. 54. pp. 1811-1819.
- 2. Rajashekara, K. Sensorless Control of AC Motor Drives / K. Rajashekara, A.Kamamura, K. Matsure // IEEE Press. New Jersey, 1996.
- 3. Aiello, M. A comparison of spectrum estimation techniques for periodic and nonstationary signals / M. Aiello, A. Cataliotti, S. Nuccio // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. pp. 1130 1134.
- 4. Hurst, K. D. A comparison of spectrum estimation techniques for sensorless speed detection in induction machines / K. D. Hurst, T. G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Applications, 1997. Vol. 33. pp. 898 905.
- 5. Соколовский,  $\Gamma$ .  $\Gamma$ . Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] /  $\Gamma$ .  $\Gamma$ . Соколовский. M.: Академия, 2006. 265 с.
- 6. Пат. 2385529 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 21/14. Способ оптимальной оценки частоты вращения асинхронного двигателя и система для его реализации [Текст] / Букреев В. Г., Лаходынов В. С., Аксенов Д. С.; заявитель и патентообладатель ЗАО «ЭлеСи». 2008136335/09; заявл. 09.09.2008; опубл. 27.03.2010.
- 7. Arabaci, H. An articial neural network approach for sensorless speed estimation via rotor slot harmonics / H. Arabaci // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014. pp. 1076 1084.
- 8. Пат. 2476983 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 23/14, Н 02 Р 27/04. Способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя [Текст] / Глазырин А. С.,

- Ткачук Р.Ю. и др.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехн. ун-т. -2011135823/07; заявл. 26.08.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
- 9. Тимошкин, В. В. Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД [Текст] / В. В. Тимошкин: дис... докт. техн. наук. Томск, 2014. 153 с.
- 10. Пат. 2463612 Российская Федерация, МПК G 01 Р 3/48. Способ определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей [Текст] / Ковалев А. Ю., Ковалева Н. А., Кузнецов Е. М.; заявитель и патентообладатель Академический институт прикладной энергетики. 2011104945/28; заявл. 10.02.2011; опубл. 10.10.2012.
- 11. Wei Zhou Incipient bearing fault detection for electric machines using stator current noise cancellation / Zhou Wei // A Dissertation Presented to The Academic Faculty, Georgia Institute of Technology, 2007.
- 12. Чегодаев, Ф. В. Моделирование асинхронного частотного привода с помощью метода взаимной нагрузки [Текст] / Ф. В. Чегодаев, С. Н. Чижма, А. В. Спиридонов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. № 2 (14). С. 31 37.
- 13. Thomson, W. T. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives fundamentals, data interpretation, and industrial case histories / W. T. Thomson, R. J. Gilmore // Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium. Texas, 2003. pp. 145 156.
- 14. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам [Текст] / В. А. Русов. Пермь, 2012. 252 с.

### References

- 1. Aiello M., Cataliotti A. An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform / IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005. Vol. 54. pp. 1811 1819.
- 2. Rajashekara K., Kamamura A., Matsure K. Sensorless Control of AC Motor Drives / IEEE Press. New Jersey, 1996.
- 3. Aiello M., Cataliotti A., Nuccio S. A comparison of spectrum estimation techniques for periodic and nonstationary signals / IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. pp. 1130 1134.
- 4. Hurst K. D., Habetler T. G. A comparison of spectrum estimation techniques for sensorless speed detection in induction machines / IEEE Transactions on Industrial Applications, 1997. Vol. 33. pp. 898 905.
- 5. Sokolovsky G. G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem* [AC drives with frequency regu-lation], Moscow: Academy Publ., 2006, 265 p.
  - 6. Bukreyev V. G., Lakhodynov V. S., Aksenov D. S. Patent RU 2385529, 2010.
- 7. Arabaci H. An articial neural network approach for sensorless speed estimation via rotor slot harmonics / Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014. pp. 1076 1084.
- 8. Glazyrin A. S., Tkachuk R. Yu., Glazyrina T. A. Timoshkin V. V. Patent RU 2476983, 2013.
- 9. Timoshkin V. V. *Razrabotka i issledovanie nabludatelya yglovoi skorosti dlya asinchronnuh electroprivodov po sheme TRN-AD* [Development and research of the observer of the angular velocity for asynchronous electric scheme TRN –AD]. Doctor's thesis, Tomsk, 2014, 153 p.
  - 10. Kovalev A. U., Kovaleva N. A., Kuznicov E. M. *Patent RU* 2463612, 2012.
- 11. Wei Zhou Incipient bearing fault detection for electric machines using stator current noise cancellation / A Dissertation Presented to The Academic Faculty, Georgia Institute of Technology, 2007.
- 12. Chegodaev, F. V., Chizhma S. N., Spiridonov V. A. Modeling asynchronous frequency drive through mutual load method [Modelirovanie asinchronnogo chastotnogo privoda s pomoshu metoda szaimnoy nagryzki]. *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 2 (14), pp. 31 37.

- 13. Thomson W. T., Gilmore R. J. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives fundamentals, data interpretation, and industrial case histories / Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium. Texas, 2003. pp. 145 156.
- 14. Rusov V. A. *Diagnostica defectov vrashaushegosya oborudovaniya po vibracionnym signalam* (Diagnosis defects using rotating machinery vibration signals). Perm, 2012, 252 p.

УДК 656.212.2.073.22

Е. Д. Псеровская, И. Н. Кагадий

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОВОЙ РАБОТЫ СТАНЦИИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПУТЯМИ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

В статье приведен анализ функционирования сложных транспортных систем, охарактеризованы основные принципы использования имитационного моделирования в организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Рассмотрен метод создания объектно-ориентированной модели для описания динамики взаимодействия грузовой станции и пути необщего пользования.

Современные станции и транспортные узлы являются сложными системами, которые нельзя рассчитывать по частям, так как слишком сильно их взаимное нелинейное влияние. Утвержденная для ОАО «РЖД» «Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог/МПС СССР; утв. 24.04.89.» [1] использует аналитический детерминированный подход и, следовательно, сохраняет все погрешности метода. Так, например, загруженность станции рассчитывается отдельно по паркам, горловинам, сортировочным и грузовым устройствам. Поскольку взаимодействие технологических линий друг на друга достаточно сильное, то такой способ не всегда дает объективные значения исследуемых параметров станции.

В имитационном моделировании структура модели отражает структуру реального объекта моделирования на некотором уровне абстракции, а связи между компонентами модели являются отражением реальных связей. В работах [2, 3] приводится описание системного взаимодействия грузовой станции и пути необщего пользования и функционирования двух представленных объектов как системы массового обслуживания. Для оптимизации местной грузовой работы на станциях и промышленных транспортных предприятиях актуально анализировать данные экспериментов и получать на их основе функциональные характеристики управляемой моделируемой системы.

Исследуемая система представлена в виде системы массового обслуживания (СМО): многофазной многоканальной СМО сложной структуры с различными видами заявок. Модель, исходя из такой структуры, состоит из имитации функционирования грузовой станции и грузового пункта [3]. Сетевой график работы грузовой станции и пути необщего пользования приведен на рисунке 1.

Таким образом, цикл обслуживания любой заявки структурно включает в себя несколько фаз обслуживания, которые в свою очередь состоят из элементов, на которых выполняются в определенной последовательности и с известной затратой времени простейшие операции. Начальные базисные элементы отмечены  $\alpha_i$ , а конечные —  $\gamma_i$ . Все остальные фазы  $\beta_i$  являются промежуточными [4]. К базисным относится занятость технологических линий станции для подачи на грузовой пункт (приемоотправочный парк, система расформирования, сортировочный парк, горловины станции; операции 1 — 7 на рисунке 1), к конечным — элементы станции для отправления составов на сеть дорог (грузовые устройства пунктов погрузкивыгрузки, система формирования, сортировочный парк, приемоотправочный парк; операции 8 — 32 на рисунке 1), а промежуточные — элементы простоев и ожидания выполнения операций на базисных и конечных элементах.

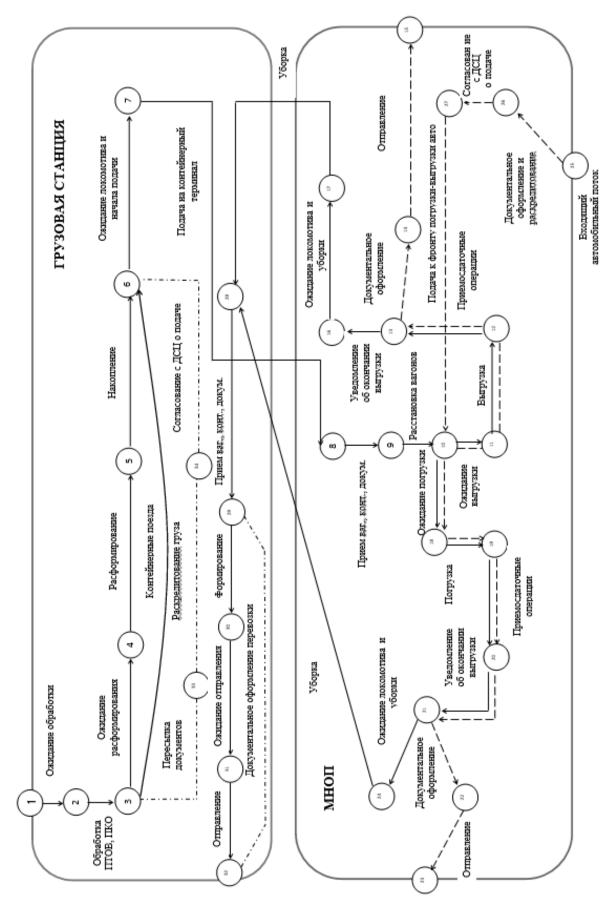


Рисунок 1 – Сетевой график обслуживания пути необщего пользования

Таким образом, рассматриваемую систему можно представить как совокупность фаз, из которых любая последующая примыкает к предыдущей, а каждая фаза состоит из набора базисных и промежуточных элементов. В соответствии с порядком обслуживания заявок один и тот же элемент системы может входить в состав нескольких фаз в качестве базисного или промежуточного их элемента.

Состояние объекта исследования в каждый момент времени T может описываться как входными параметрами A, характер воздействия которых повсеместен и подчинен определенным закономерностям, так и выходными B, значение которых зависит от внутреннего состояния S объекта в ходе его обслуживания на базисных и конечным элементах. Такую систему можно представить как упрощенную агрегативную функцию:

$$\begin{cases} Z(T_{\delta}) = f(a_{\delta}, y_{\delta}, t); \\ Z(T_{\kappa}) = f(a_{\kappa}, y_{\delta}, t). \end{cases}$$
 (1)

Учитывая продолжительные простои транспортного потока на промежуточных элементах станции, конечное состояние системы подвергается серьезной корректировке:

$$\begin{cases}
Z(T_{\delta} + \Delta) = f(a_{\delta}, y_{\delta}, t, \Delta t); \\
Z(T_{\kappa} + \Delta) = f(a_{\kappa}, y_{\delta}, t, \Delta t).
\end{cases}$$
(2)

Влияние параметра  $\Delta t$  на итоговое адекватное поведение системы необходимо проследить на имитационной модели для определения характера воздействия входящих в этот параметр элементов.

В модели целесообразно рассматривать заявки трех видов: заявки как транспортные средства – передаточные и маршрутные поезда; заявки на обслуживание грузовой станцией и заявки на обслуживание грузовым пунктом.

Заявки как транспортные средства — поезда — имеют следующие параметры: «видПоезда» — код типа транспортного средства; «колГрузов» — количество тонн груза в грузовом поезде; «врСледования» — время следования с грузовой станции на грузовой пункт; «разные» — другие характеристики процесса перевозки грузов.

Заявки поступают в систему через временные интервалы, описываемые произвольной функцией распределения, причем также по произвольным законам распределения. СМО имеет несколько обслуживающих устройств, в которых поступающая заявка обслуживается в течение временного интервала, описываемого некоторой произвольной функцией распределения. Если вновь поступившая заявка «застает» обслуживающее устройство «занятым», она «ожидает» обслуживание в очереди [2].

Система перевозок включает в себя между грузовой станцией и МНОП обращение передаточных и маршрутных поездов, прибывающих под погрузку или выгрузку. Для идентификации этих типов транспортных средств в поле «видПоезда» используются коды 1 и 2 соответственно.

Для фиксации количества поступающих грузов на станцию примыкания и грузовой пункт в соответствующих заявках выбираются поля «колГрузов1» и «колГрузов2». Это позволит проконтролировать количество входящего и выходящего грузопотоков.

Показатели системы грузоперевозок:

«коэфПогр1», «коэфПогр2» – коэффициенты использования транспортных средств при погрузке грузов в вагоны поездов типов 1 и 2 на грузовом пункте соответственно;

«коэфВыгр1», «коэфВыгр2» – коэффициенты использования транспортных средств при выгрузке грузов из вагонов поездов типов 1 и 2 на грузовом пункте соответственно;

«коэфСледования1ГрПункт», «коэфСледования2ГрПункт», «коэфСледования1Станция», «коэфСледования2Станция» – коэффициенты, учитывающие следование поездов типов 1 и 2 с грузовой станции на грузовой пункт и обратно соответственно;

«коэфПостГрПункт»=»ПостГрПунк»т/«всегоПостГрПункт» – коэффициент поступления грузов со станции примыкания на грузовой пункт, «ПостГрПункт» – количество поступившего груза со станции примыкания, «всегоПостГрПункт» – количество всего поступившего на грузовой пункт груза;

«коэфПостСтанция»=»ПостСтанция»/«всегоПостСтанция» – коэффициент поступления грузов с грузового пункта на станцию примыкания, «ПостСтанция» – количество поступившего с грузового пункта груза, «всегоПостСтанция» – количество всего поступившего на станцию груза;

«коэфПост»=(«ПостГрПункт»+»ПостСтанция»)/(«всегоПостГрПункт»+»всегоПостСтанция») – коэффициент поступления и высвобождения грузопотоков системой перевозок в целом;

«коэфИспЛок» = «коэфРасформ1» + «коэфРасформ2» + «коэфФорм1» + «коэфФорм1» + «коэфФорм1» + «коэфСледования1ГрПункт» + «коэфСледования2ГрПункт» + «коэфСледования1Станция» + «коэфСледования2Станция» - коэффициент использования локомотива станции;

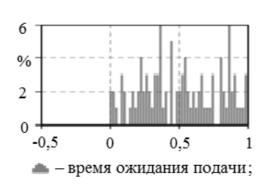
«коэфИсп2»= «коэфПогр1» + «коэфПогр2» + «коэфВыгр1» + «коэфВыгр2» – коэффициент использования ПРМ.

Формализованное описание работы модели на основе исходных данных и задачи моделирования выполнено с допущениями, чтобы представить ее наиболее адекватной. На моделируемую станцию в соответствии с графиком движения поездов прибывает определенное количество поездов. В данной модели рассматриваются только категории грузовых поездов: передаточные и маршрутные. По прибытии поездов осуществляются технический и коммерческий осмотр составов и подготовка их к расформированию. Одновременно с этим производится проверка перевозочных документов. После обработки составы расформировываются, причем для маршрутных поездов следует формирование подач на грузовой пункт, поскольку в таких категориях поездов вагоны уже подобраны и операции по расформированию с ними не осуществляются. После расформирования следует формирование подач назначением на исследуемый грузовой пункт. Подачей считается определенное количество вагонов, впоследствии располагаемых на пути грузового пункта для одновременной погрузки или выгрузки. Количество подач зависит от режима работы грузового пункта, количества средств механизации и их эксплуатационной производительности, а также вместимости путей погрузки-выгрузки, т. е. фактически от времени на обработку одной подачи вагонов. После формирования подач и освобождения грузового пункта от предыдущей группы вагонов вагоны подаются на грузовой пункт, где осуществляется их выгрузка или погрузка. После этого они убираются обратно на станцию, где формируют передаточные и маршрутные поезда и отправляют со станции на сеть железных дорог также в соответствии с расписанием движения поездов.

Помимо этого на грузовом пункте организуется прибытие автомобильного транспорта с грузом. Эти автомобили после проверки документов также следуют к месту, где осуществляется погрузка-выгрузка. Причем часть груза может перегружаться сразу с автомобиля в вагон и наоборот, минуя склад, либо со склада на автомобиль или в вагон, либо с автомобиля и из вагона на склад.

При моделировании станции необходимо учитывать, что на станции уже имеется какойто объем работы, что дополнительно загружает основные линии, как на реальном объекте. Более того, операции по расформированию-формированию составов, формированию подач и следование со станции на грузовой пункт и обратно осуществляются одним локомотивом станции. Таким образом, необходимо учесть, что только при свободности грузового пункта возможны последовательные операции по обслуживанию прибывающих на станцию вагонов. Помимо этого данный локомотив может быть занят и другими маневровыми операциями, не связанными с обработкой вновь прибывших вагонов, что приводит к продолжительным простоям в ожидании работы с местными вагонами. Другими словами, после расформирования локомотив может быть занят перестановкой вагонов, заездом в депо и т. д.

Выполнение расчетов с помощью имитационной модели работы станции и грузового пункта позволит при оптимальном уровне загрузки грузовых фронтов определить максимальное число вагонов, ожидающих подачи на грузовые фронты. Отсюда можно рассчитать требуемый для станции вагонный парк. Число и длина путей, количество локомотивов и средств механизации на складах будут определяться моделированием изменения искомых параметров и нахождением их оптимальных значений. Таким образом, технология обработки заявки на обслуживание клиента железнодорожного транспорта включает в себя занятие путей станции примыкания группой вагонов назначением на данный складской комплекс, занятие и использование маневрового локомотива для подачи вагонов на фронт, собственно подача вагонов и расстановка на путях погрузки-выгрузки, погрузочно-выгрузочные операции, сборка и уборка вагонов обратно на станцию примыкания. Рассматривая каждый отдельный элемент как технологическую линию, можно оптимизировать время нахождения перерабатываемого вагонопотока в этих фазах так, чтобы обеспечивалось использование максимальной выгрузочной способности грузовых фронтов [4]. При этом будут учитываться оптимальное время подачи-уборки вагонов, достаточное количество вагонов в одновременной подаче на грузовой фронт и время их расстановки и сборки, длина фронта погрузки-выгрузки, число механизмов и время выполнения грузовых операций и загрузка локомотивов. Анализ статистических данных обработки вагонов позволит определить время нахождения перерабатываемого вагонопотока на каждой технологической линии. В качестве примера использования имитационной модели приведены графические зависимости, полученные в результате численных экспериментов работы грузового фронта при изменяющемся количестве вагонов, поступающих под обработку. Графический анализ представлен на рисунке 2.



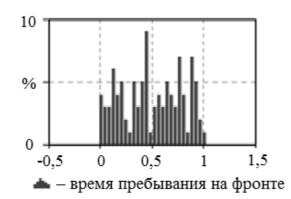


Рисунок 2 – Сегмент нахождения вагонопотока на грузовом фронте

Таким образом, аналитическое представление времени нахождения вагонов на станции будет иметь вид:

$$T_{ij} = \sum_{i=1}^{K_{ij}} t_{ij}^{6a3} + \sum_{i=8}^{K_{ij}} t_{ij}^{\text{KOH}} + \sum_{i=8} \Delta t_{ij},$$
 (3)

где  $T_{ij}$  – продолжительность нахождения i-го вагонопотока на j-м грузовом пункте;  $K_{ij}$  – количество операций в соответствии с сетевым графиком (см. рисунок 1);  $t_{ij}^{6a3}$  и  $t_{ij}^{\text{кон}}$  – продолжительность нахождения на базовых и конечных элементах;  $\Delta t_{ij}$  – непроизводительные простои на станции.

Итак, в современных условиях возрастает роль точных методов расчета основных параметров железнодорожных станций. Технологические и экономические показатели работы станций непосредственно зависят от технической структуры и технологии работы, которые, в свою очередь, не могут не изменяться при изменении транспортных потоков. Динамичность ситуации требует оперативных решений по нахождению рационального технического оснащения, соответствующего текущему поездо- и вагонопотоку, рациональной технологии работы, а также оценки последствий изменений в структуре и технологии работы станции. Наиболее точные результаты могут быть получены методом имитационного моделирования.

### Список литературы

- 1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог [Текст] / МПС СССР. М.: Транспорт, 1991. 304 с.
- 2. Кагадий, И. Н. Использование метода имитационного моделирования в местной работе железнодорожных станций [Текст] / И. Н. Кагадий // Материалы XI междунар. научпракт. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 96.
- 3. Кагадий, И. Н. Системная динамика функционирования грузовой станции [Текст] // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения». -2015. -№ 1. C. 226.
- 4. Левин, Д. Ю. Организация местной работы: монография [Текст] / Д. Ю. Левин. М.: УМЦ ЖДТ, 2013. С. 80.

### References

- 1. *Instrukciyporaschetunalicnoypropusknoysposobnostyjeleznychdorog* (Instruction on calculation of cash capacity of the railroads). Ministy of Railways USSR]. Moscow, 1991.
- 2. Kagady I. N. Use of a method of simulation modeling in local work of railway stations [Ispol'zovanie metoda imitacionnogo modelirovaniy v mestnoy rabote jeleznodorojnyh stanciy]. *Transportnay infrastruktura Sibirskogo regiona Transport infrastructure of the Siberian region*, 2015, vol. 1, 96 p.
- 3. Kagady I. N. System dynamics of functioning of cargo station [Systemnay dinamika funkcionirovaniy gruzovoy stancii]. *Transportny kompleks v regionah: opyt I perspectivy organizacii dvijeniy Transport complex in regions: experience and prospects of the organization of the movement*, 2015, no. 1, 226 p.
- 4. Levin D. Y. *Organizaciy mestnoy raboty: monographiy* (Organization of local work: monograph). Moscow, 2013, 80 p.

УДК 69.05: 658.512.6

С. В. Базилевич, С. И. Васильев, С. М. Кузнецов

### МИНИМИЗАЦИЯ РИСКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ ВЫПРАВОЧНО-ПОДБИВОЧНО-РИХТОВОЧНЫХ МАШИН

Авторами предложена модель обоснования продолжительности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных и строительных машин. С помощью этой модели можно оценить эффективность и надежность машин на любом объекте. Это позволит наиболее достоверно прогнозировать сроки производства отдельных видов работ и их стоимость еще на стадии проектирования. В статье приведены показатели натурных испытаний и дана оценка надежности производства работ. Одним из основных факторов надежности работы строительных машин является коэффициент использования их по времени. Во всех нормативных документах приводятся устаревшие данные по коэффициентам использования машин в течение рабочего времени, которые требуют обновления, так как машины постоянно совершенствуются. Для оценки надежности продолжительности работы машин авторами создана база данных по результатам натурных испытаний

выправочно-подбивочно-рихтовочных машин, кранов, экскаваторов, бульдозеров, трубоукладчиков, буровых станков и земснарядов. Для доказательства обоснованности значений базы данных по результатам натурных испытаний проводились два этапа проверки: логическая и математическая.

После формирования выборки в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее рассчитывались надежность и риск завершения запланированного объема работ в намеченный промежуток времени. При этом рассматривался коэффициент использования машин по времени и риск его отклонения от среднего значения.

Использование предлагаемого подхода к оценке продолжительности работы выправочно-подбивочнорихтовочных и строительных машин может быть распространено на любой тип техники и позволит получить численные значения оценки надежности производства работ в запланированный срок, что весьма актуально при строительстве, ремонте и текущем содержании пути.

Создание информационных баз натурных испытаний, технических и экономических показателей выправочно-подбивочно-рихтовочных машин, кранов, экскаваторов, бульдозеров, трубоукладчиков, буровых станков и земснарядов способствует оптимизации их работы с заданной надежностью при строительстве, ремонте и текущем содержании пути [1, 2].

Для обоснования продолжительности производства работ необходимо создать базы результатов натурных испытаний работ. Информация баз данных должна быть очищена от неверных измерений. Для этой цели проводятся две проверки: логическая и математическая [3, 4].

Для определения продолжительности работ с заданной вероятностью в нормативных документах следует приводить среднюю величину и среднее квадратическое отклонение нормы времени. Тогда продолжительность выполнения работ с минимальным риском можно будет определять по формуле [5, 6]:

$$t = \overline{t} + r,\tag{1}$$

где r – риск продолжительности выполнения работ;

t – средняя продолжительность выполнения работ.

Риск продолжительности выполнения работ определяется по формуле:

$$r = \sqrt{V},\tag{2}$$

где V – вариация отклонения от среднего значения продолжительности выполнения работ.

Вариация отклонения от среднего значения продолжительности выполнения работ определяется по формуле:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} V_{ij}}{n^2},$$
(3)

где  $V_{ij}^{\Pi}$  — ковариация продолжительности выполнения работ при использовании i-го и j-го испытания.

Ковариация продолжительности выполнения работ при использовании i-го и j-го испытаний определяется по формуле:

$$V_{ij} = (t_i - \overline{t})(t_j - \overline{t}). \tag{4}$$

При наличии результатов натурных испытаний по соответствующим технологическим процессам можно рассчитать организационно-технологическую надежность производства работ [2]. При отсутствии данных по продолжительности строительных работ воспользуемся уравнением:

$$V_{\rm p} = \overline{\Pi_{\rm p}} \cdot \bar{t} = \Pi_{\rm pm} \cdot t_{\rm m}, \tag{5}$$

где  $V_{\rm p}$  – объем работ;  $\Pi_{\scriptscriptstyle {\rm 3M}}$  и  $\overline{\Pi_{\scriptscriptstyle {\rm 9}}}$  – соответственно эксплуатационная производительность при

минимальном риске и средняя эксплуатационная производительность машины;  $t_{\rm M}$  и t — соответственно продолжительность работы при минимальном риске и средняя продолжительность работы машины. Из выражения (5) определяется изменение продолжительности работ при минимальном риске:

$$\frac{\overline{t}}{t_{\rm M}} = \frac{\overline{\Pi_{\rm 3}}}{\Pi_{\rm 3M}} = \frac{\Pi_{\rm T} \overline{K_{\rm B}}}{\Pi_{\rm T} K_{\rm BM}} = \frac{\overline{K_{\rm B}}}{K_{\rm BM}} = \frac{\overline{K_{\rm B}}}{\overline{K_{\rm B}} - r},$$
(6)

где  $\Pi_{\rm T}$  — техническая производительность машины;  $K_{\rm BM}$  u  $\overline{\rm K}_{\rm B}$  — соответственно коэффициент использования машины по времени с минимальным риском и средний коэффициент; r — риск отклонения от среднего значения.

В транспортном строительстве до 95 % объемов работ выполняются машинами, а в промышленном и гражданском строительстве — около 85 %, поэтому можно утверждать, что надежность производства работ в значительной степени зависит от эффективной работы строительных и дорожных машин.

Для оценки продолжительности производства работ с минимальным риском проанализированы результаты натурных испытаний работы строительных машин. Результаты обработки выборок коэффициентов использования по времени бульдозеров, буровых станков, земснарядов и роторных экскаваторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты использования машин по времени

Наименование показателя	Выправочно- подбивочно- рихтовочная машина	Бульдозер	Буровой станок	Земснаряд	Экскаватор роторный
1	2	3	4	5	6
Количество опытов, шт.	1296	872	151	145	403
Количество связей, шт.	3	3	3	3	3
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Минимальное значение фактора	0,3105	0,453	0,548	0,509	0,704
Максимальное значение фактора	0,5042	0,843	0,917	0,64	1,0
Выборочное среднее значение фактора	0,4006	0,6597	0,7715	0,5740	0,8528
Среднее линейное отклонение фактора	0,0247	0,0580	0,0684	0,0229	0,0514
Среднее квадратическое от-клонение	0,03071	0,0708	0,0814	0,0278	0,0627
Стандартное отклонение фактора	0,03072	0,0709	0,0816	0,0279	0,0628
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,00085	0,0024	0,0066	0,0023	0,0031
Ошибка от среднего значения фактора, %	0,213	0,3640	0,8611	0,4038	0,3667
Эмпирическая дисперсия вы- борки	0,00094	0,0050	0,0067	0,00078	0,0039
Вариации отклонения от среднего значения	0,00061	0,003367	0,004681	0,000527	0,002643

#### Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Риск отклонения от среднего значения	0,025	0,0580	0,0684	0,0229	0,0514
Коэффициент вариации	0,077	10,74	10,55	4,85	7,35
Вычисленное значение кри- терия Пирсона	7,25	2,34	2,31	5,59	5,46
Табличное значение критерия Пирсона	8,13	8,13	7,86	7,86	8,13
Количество интервалов	11	11	8	8	10

При минимальном риске время продолжительности процесса при работе выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и ВПРС-02 увеличится:

$$\frac{\overline{t}}{t_{_{\rm M}}} = \frac{\overline{K_{_{\rm B}}}}{\overline{K_{_{\rm B}}} - r}; \quad \frac{\overline{t}}{t_{_{\rm M}}} = \frac{0,4006}{0,4006 - 0,025} = 1,0666 \text{ pasa.}$$

При минимальном риске время продолжительности процесса при работе бульдозеров увеличится:

$$\frac{\bar{t}}{t_{\rm M}} = \frac{\overline{K_{\rm B}}}{\overline{K_{\rm B}} - r}; \quad \frac{\bar{t}}{t_{\rm M}} = \frac{0,6597}{0,6597 - 0,0580} = 1,0964 \text{ pasa.}$$

При минимальном риске время продолжительности процесса при работе бурового станка увеличится:

$$\frac{\overline{t}}{t_{_{\rm M}}} = \frac{\overline{K_{_{\rm B}}}}{\overline{K_{_{\rm B}}} - r}; \quad \frac{\overline{t}}{t_{_{\rm M}}} = \frac{0,7715}{0,7715 - 0,0684} = 1,0973 \text{ pasa.}$$

При минимальном риске время продолжительности процесса при работе земснаряда увеличится:

$$\frac{\overline{t}}{t_{\rm M}} = \frac{\overline{K_{\rm B}}}{\overline{K_{\rm B}} - r}; \quad \frac{\overline{t}}{t_{\rm M}} = \frac{0,5740}{0,5740 - 0,0229} = 1,0416 \text{ pasa.}$$

При минимальном риске время продолжительности процесса при работе роторного экскаватора увеличится:

$$\frac{\bar{t}}{t_{\rm M}} = \frac{\overline{K_{\rm B}}}{\overline{K_{\rm B}} - r}; \quad \frac{\bar{t}}{t_{\rm M}} = \frac{0,8528}{0,8528 - 0,0514} = 1,0641 \text{ pasa.}$$

Проведенные исследования по работе выправочно-подбивочно-рихтовочных и строительных машин за 12-летний период показали, что при минимизации организационно-технологического риска машин продолжительность работ может увеличиться не более чем на 10 %.

Для минимизации риска увеличения продолжительности работ принимаем при оптимизации потока возможность увеличения продолжительности отдельных работ методом Монте-Карло не более чем на 10 %. С помощью программы *Impotok* формируем выборку коэффициентов увеличения продолжительности работ и среднего процента увеличение продолжительности отдельных работ. Последний необходим для построения доверительного интервала продолжительности производства работ.

По данным выборки коэффициента увеличения продолжительности производства работ и среднего процента выполняем увеличение продолжительности отдельных работ с помощью программы Sample. Алгоритм расчета приведен в источнике [7], по нему рассчитываем статистическую информацию (таблица 2) и строим соответствующие графики (рисунки 1-4).

Таблица 2 – Характеристика выборки относительной продолжительности производства работ ( $T_{\text{от}}$ ) и среднего процента увеличения продолжительности отдельных работ (P)

	Велич	ина выборки
Показатель	относительной продол-	среднего процента увеличения
Hokusutesib	жительности произ-	продолжительности отдельных
	водства работ $(T_{ot})$	работ (Р)
Входные данные		
Количество опытов, шт.	999	999
Уровень значимости	0,05	0,05
Фактор	$T_{ m or}$	P
Выходные данные		
Минимальное значение фактора	1	2,72
Максимальное значение фактора	1,083	6,13
Размах вариации	0,083	3,41
Мода	1,05	4,46
Медиана	1,05	4,53
Асимметрия выборки	-0,083	-0,066
Эксцесс выборки	0,055	-0,202
Выборочное среднее значение фактора	1,05	4,54
Среднее линейное отклонение фактора	0,009	0,493
Среднее квадратическое отклонение фактора	0,011	0,610
Стандартное отклонение фактора	0,011	0,610
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,00036	0,01931
Ошибка от среднего значения фактора, %	0,034	0,425
Эмпирическая дисперсия выборки	0,00013	0,373
Вариация отклонения от среднего значения	8,4E-05	0,243
Риск отклонения от среднего значения	0,0092	0,493
Коэффициент вариации	1,08	13,43
Нормальное распределение		
Вычисленное значение критерия Пирсона	0,006	0,007
Табличное значение критерия Пирсона	15,53	15,53
Критерий согласия Колмогорова – Смирнова	0,328	0,338
Критические значение критерия согласия	1,36	1,36
Колмогорова – Смирнова	1,30	1,50
Количество диапазонов, шт.	11	11
Количество связей, шт.	3	3
Количество степеней свободы, шт.	8	8

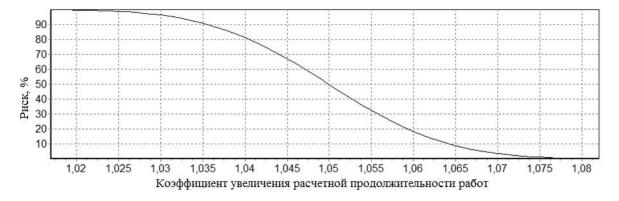


Рисунок 1 – Организационно-технологический риск коэффициента увеличения продолжительности работ

С помощью программы *Modell* по данным выборки строим модель относительной продолжительности производства работ и определяем ее характеристики (таблица 3). Алгоритм расчета программы *Modell* приведен в работе работе [8]. Характеристики модели остатков [9] относительной продолжительности производства работ приведены в таблице 4.

С помощью программы *Diagram* по данным выборки строим доверительный интервал продолжительности производства работ. Алгоритм построения доверительного интервала приведен в статье [10]. Показатели доверительного интервала модели коэффициента увеличения продолжительности производства работ приведены на рисунке 5 и в таблице 5.

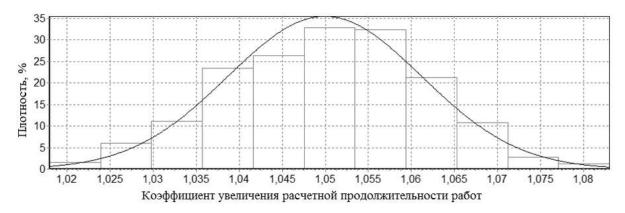


Рисунок 2 – Плотность распределения вероятностей коэффициента увеличения продолжительности работ



Рисунок 3 — Организационно-технологический риск среднего процента увеличения продолжительности отдельных работ

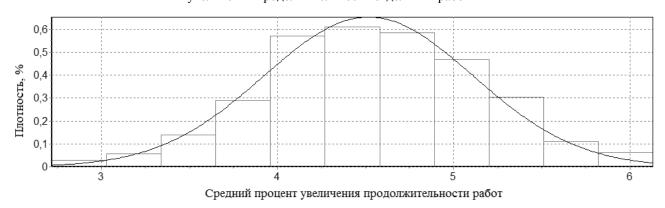


Рисунок 4 — Плотность распределения вероятностей среднего процента увеличения продолжительности отдельных работ

Таблица 3 — Характеристика модели  $T_{\text{от}} = +1,005+0,00988 \cdot P$ 

Показатель	Величина
1	2
Доля объясненной вариации, %	29,66
Коэффициент множественной корреляции	0,5446
Средний отклик	1,05
Стандартная ошибка от среднего отклика, %	0,91
Стандартная ошибка	0,0095

#### Окончание таблицы 3.

1	2
Общий <i>F</i> -критерий регрессии	420,8
Табличное значение общего <i>F</i> -критерия	3,83
Дисперсия	0,0001
Сумма разностей	0,0000
Средняя арифметическая разность	0,00775
Максимальная разность	0,02601
Максимальная разность, %	2,45

Таблица 4 — Характеристика остатков модели  $T_{\text{от}}$  = + 1,005+ 0,00988 · P

Показатель	Величина
Входные данные	
Количество опытов, шт.	999
Количество связей, шт.	3
Количество диапазонов, шт.	11
Уровень значимости	0,05
Выходные данные	
Минимальное значение фактора	-0,025
Максимальное значение фактора	0,026
Асимметрия выборки	-0,0011
Эксцесс выборки	-0,36
Выборочное среднее значение фактора	0
Среднее линейное отклонение фактора	0,0077
Среднее квадратическое отклонение фактора	0,0095
Стандартное отклонение фактора	0,0095
Средняя квадратическая ошибка фактора	3,02E-04
Эмпирическая дисперсия выборки	9,09E-05
Вариации отклонения от среднего значения	5,99E-05
Риск отклонения от среднего значения	7,74E-03
Количество интервалов	11
Вычисленное значение критерия Пирсона	0,011
Табличное значение критерия Пирсона	15,53
Критерий согласия Колмогорова – Смирнова	0,586
Критические значение критерия согласия Кол-	1,360
могорова – Смирнова	

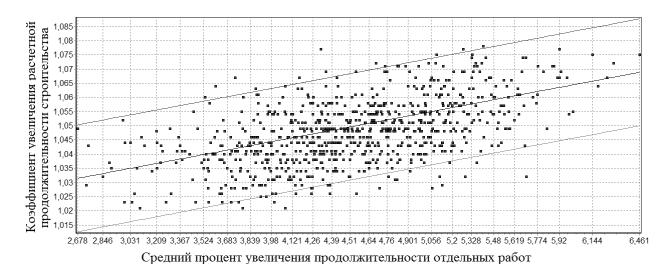


Рисунок 5 — Зависимость коэффициента увеличения продолжительности производства работ от среднего процента увеличения продолжительности отдельных видов работ

Таблица 5 – Модель и ее доверительный интервал

Модель	Доверительный интервал с уровнем риска 5 %
$T_{\rm ot} = +1,005+0,00988 \cdot P$	$T_{or} \pm 0.0187 \sqrt{1.00126 + 0.00289 \cdot (P - 4.522)}$

На основании изложенного можно сделать выводы.

- 1. Предложенная модель обоснования продолжительности выполнения работ в соответствии с данными натурных испытаний эксплуатации машин позволяет оценить надежность производства работ в запланированный срок, если известны объемы работ, которые необходимо выполнить.
- 2. Модель является универсальной, она применима как при строительстве, ремонте и текущем содержании пути, так и в транспортном, промышленном и гражданском строительстве.
- 3. Использование модели позволит с заданной надежностью рассчитать время производства работ, на  $10-15\,\%$  повысить эффективность использования машин и бригад за счет их ритмичной и бесперебойной работы.

### Список литературы

- 1. Базилевич, С. В. Организационно-технологические показатели эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия [Текст] / С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. –2015. № 2 (22). С. 105 122.
- 2. Базилевич, С. В. Модели показателей эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и ВПРС-02 [Текст] / С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2015. № 3 (23). С. 109 118.
- 3. Кузнецов, С. М. Обработка результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов, К. С. Кузнецова // Экономика железных дорог. -2010. -№ 7. -С. 88 99.
- 4. Кузнецов, С. М. Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании [Текст] / С. М. Кузнецов // Экономика железных дорог. -2013. -№ 7. -С. 90-97.
- 5. Базилевич, С. В. Повышение надежности возведения зданий и сооружений [Текст] / С. В. Базилевич, С. М. Кузнецов, И. Л. Чулкова // Экономика железных дорог. 2008. 12. C. 66 70.
- 6. Повышение организационно-технологической надежности проектирования строительных объектов [Текст] / С. В. Базилевич, В. Н. Анферов и др. // Известия вузов. Строительство. -2013. -№ 8. C. 51 63.
- 7. Кузнецов, С. М. Обработка статистической информации [Текст] / С. М. Кузнецов, В. Я. Ткаченко, Н. В. Холомеева // Научно-исследовательские публикации. Воронеж: prescopus. 2014. N2 3 (7). C. 45 54.
- 8. Кузнецов, С. М. Автоматизация построения моделей для оптимизации организационно-технологических решений [Текст] / С. М. Кузнецов, Н. В. Холомеева, С. Э. Ольховиков // Научно-исследовательские публикации. Воронеж: prescopus. 2014. N 2011. C. 5 13.
- 9. Кузнецов, С. М. Анализ остатков моделей организационно-технологических решений [Текст] / С. М. Кузнецов, О. В. Соболева, М. П. Шефер // Научно-исследовательские публикации. Воронеж: prescopus. 2014. № 7 (11). С. 24 32.
- 10. Кузнецов, С. М. Построение доверительных интервалов работы гидротранспортных систем [Текст] / С. М. Кузнецов, А. И. Круглов, О. А. Легостаева // Научно-исследовательские публикации. Воронеж: prescopus. 2014. № 13 (17). С. 5 15.

### References

- 1. Bazilevich S. V., Zaytsev A. V., Kuznetsov S. M. Organizational and technological parameters of operation of the liner-tamping-straightening machines cyclic action [Organizacionno–tehnologicheskie pokazateli ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin ciklicheskogo deistviya]. *Izvestiia Transsiba The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 2 (22), pp. 115 122.
- 2. Bazilevich S. V., Zaytsev A. V., Kuznetsov S. M. Model performance liner-tamping-straightening machines VPR-02 and VPRS-02 [Modeli pokazatelei ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin VPR-02 i VPRS-02]. *Izvestiia Transsiba The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 3 (23), pp. 109 118.
- 3. Kuznetsov S. M., Kuznetsova K. S. Processing of results of field tests with the technical and tariff regulation [Obrabotka rezultatov naturnih ispitanii pri tehnicheskom i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznykh dorog Economy railways*, 2010, no. 7, pp. 88 99.
- 4. Kuznetsov S.M. Improvement of processing of results of field tests with the technical and tariff regulation [Sovershenstvovanie obrabotki rezultatov naturnih ispitanii pri tehnicheskom i tarifnom normirovanii]. *Ekonomika zheleznykh dorog Economy railways*, 2013, no 7, pp. 90 97
- 5. Bazilevich S. V., Kuznetsov S. M., Chulkova I. L. Improving the reliability of construction of buildings and structures [Povishenie nadejnosti vozvedeniya zdanii i soorujenii]. *Ekonomika zheleznykh dorog Economy railways*, 2008, no. 12, pp. 66 70.
- 6. Bazilevich S. V., Anferov V. N., Vasil'ev S. I., Kuznetsov S. M. Improvement of organizational and technological reliability of the design of construction projects [Povyshenie organizacion-no-tekhnologicheskoj nadezhnosti proektirovaniya stroitel'nyh ob'ektov]. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo Proceedings of the universities. Building*, 2013, no. 8, pp. 51 63
- 7. Kuznetsov S. M., Tkachenko V. I., Golomeeva N. V. Processing of statistical information [Obrabotka statisticheskoi informacii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii. Voronej Scientific research publications. Voronezh*, 2014, no. 3 (7), pp. 45 54.
- 8. Kuznetsov S. M., Golomeeva N. V., Olhovikov S. E. Automation of model building to optimize organizational and technological solutions [Avtomatizaciya postroeniya modelei dlya optimizacii organizacionno-tehnologicheskih reshenii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii. Voronej Scientific research publications. Voronezh*, 2014, no. 7 (11), pp. 5 13.
- 9. Kuznetsov S. M., Soboleva O. V., Schaefer M. P. Analysis of patterns of organizational and technological solutions [Analiz ostatkov modelei organizacionno-tehnologicheskih reshenii]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii. Voronej Scientific research publications. Voronezh*, 2014, no. 7 (11), pp. 24 32.
- 10. Kuznetsov S. M., Kruglov A. I., Legostaeva O. A. Construction of confidence intervals of hydrotransport systems [Postroenie doveritelnih intervalov raboti gidrotransportnih system]. *Nauchno-issledovatelskie publikacii. Voronej Scientific research publications. Voronezh*, 2014, no. 13 (17), pp. 5 15.

УДК 629.471

П. Н. Рубежанский, А. В. Давыдов

### КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО КОМПЛЕКСА «РЖД»

Авторами предложена комплексная программа объединения в единую систему всех процессов жизненного цикла локомотивов, способствующая сокращению издержек, связанных в первую очередь с эксплуатацией и обслуживанием локомотивного парка ОАО «РЖД». Основным показателем данной комплексной системы является уровень готовности технического изделия, определяемый коэффициентом готовности.

Выработанная методология позволит перейти от технологии фиксирования технических отказов с последующим выявлением их причин и проведением восстановительных работ к технологии прогнозирования и

предупреждения этих отказов, основанной на постоянном контроле технического состояния локомотивов и прогнозирования запаса ресурса в режиме online.

Комплексная программа реорганизации и развития отечественного локомотивостроения, организации ремонта и эксплуатации тягового подвижного состава была утверждена решением коллегии МПС России в 2001 г. с целью снижения издержек на обслуживание и ремонт тягового подвижного состава и повышение эксплуатационной эффективности на протяжении всего жизненного цикла локомотива (указание МПС от 09.10.2001 № Е-1698у).

В данной программе были заложены основы специализации локомотивных депо по типам локомотивов, видам ремонта, отдельных эксплуатационных депо и создание вертикали управления локомотиворемонтным комплексом.

В современных условиях локомотивный комплекс — один из ведущих секторов ОАО «РЖД» — объединяет в себе элементы, представленные на рисунке 1.

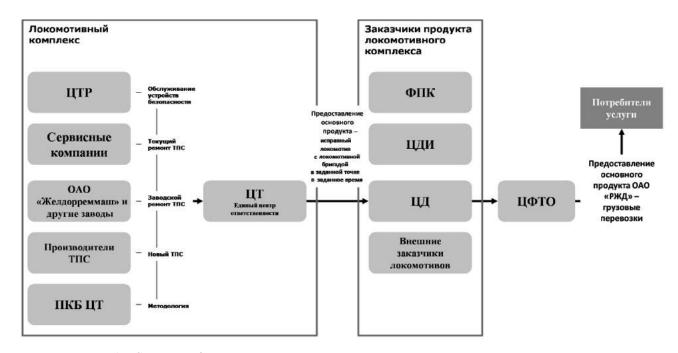


Рисунок 1 – Структура функционирования локомотиворемонтного производственного процесса

В состав локомотивного комплекса входят следующие элементы:

- дирекция тяги филиал ОАО «РЖД», в составе которой 16 региональных дирекций структурных подразделений дирекции и 146 эксплуатационных локомотивных депо;
- дирекция по ремонту тягового подвижного состава филиал ОАО «РЖД», 17 региональных дирекций по ремонту тягового подвижного состава структурных подразделений дирекции, 113 ремонтных локомотивных депо;
  - проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства филиал ОАО «РЖД»;
  - сервисные и локомотиворемонтные структуры:
  - OOO «ТМХ-Сервис» с девятью филиалами;
- ОАО «Желдорреммаш» с 10 заводами по капитальному и среднему ремонту тягового подвижного состава;
  - OOO «СТМ-Сервис» с пятью управлениями сервиса.

Под эти реформенные преобразования разработана и введена в действие нормативноправовая документация (564 документа), регламентирующая порядок работы и взаимодействия созданных структур, определены целевые функции и задачи региональных дирекций, распределены уровни ответственности всех участников перевозочного процесса [3, 5].

К реализации комплексной программы реформирования локомотивного хозяйства Министерства путей сообщения Российской Федерации (МПС РФ) приступили в 2008 г. с раз-

работки «Системы сервисного обслуживания локомотивного парка ОАО «РЖД». В то же время были предопределены основные принципы функционирования данной системы сервисного обслуживания (рисунок 2) на основе создания функциональной модели полного сервисного обслуживания. При этом переход к реализации программы полного сервисного обслуживания должен быть осуществлен поэтапно.

#### Переход на систему полного сервиса

■ Внедряемая система должна обеспечить комплексную услугу по обслуживанию ТПС, включающую в себя ТО, ТР, СР и капитальные ремонты в гарантийный и послегарантийный периоды, организацию эффективной логистики запасных частей/узлов и агрегатов, обучение персонала, взаимодействие с производителями ТПС и с перевозчиками по усовершенствованию ремонтных регламентов и конструкции ТПС

# Переход на систему сервисного обслуживания на всем жизненном цикле ТПС

- Необходимо построить единую систему сервисного обслуживания и поддержки технического состояния ТПС на всем его жизненном цикле.
- Производители должны продавать локомотивы с контрактом на их полное сервисное обслуживание в течение всего жизненного цикла

#### Формирование единых центров ответственности за техническое состояние ТПС

• Следует устранить многоступенчатость ответственности различных участников системы сервиса (заводов-производителей, ремонтных заводов и депо) за техническое состояние ТПС на различных этапах его жизненного цикла

### Разделение компетенций участников системы

 Внедряемая система должна быть построена на принципе усиления ключевых компетенций каждого участника

#### Гарантии надежности системы

- Следует сформировать прозрачную систему взаимоотношений между участниками сервиса, основанную на юридически обязывающих договорах, отражающих мотивацию и границы ответственности участников.
- Необходимо обеспечить постоянное технологическое взаимодействие участников системы сервиса

Рисунок 2 – Базовые принципы организации сервисного обслуживания тягового подвижного состава

В связи с отсутствием опыта и операционных рисков, возникающих в результате перехода к модели сервисного обслуживания, на первом этапе было решено опробовать модель частичного сервисного обслуживания, в котором акцентировалось внимание на своевременном обеспечении качественными запасными частями и на контроле соблюдения технологии ремонта локомотивов.

Первый пилотный проект применения модели частичного сервисного обслуживания был реализован в 2010 г., когда на сервисное обслуживание в ООО «ТМХ-Сервис» были переданы 187 электровозов серии 2ЭС5К «Ермак» и ВЛ85 в локомотивных ремонтных депо Вихоревка и Нижнеудинск (распоряжение ОАО «РЖД» от 31.07.2010 №1668р.) Базовым показателем, характеризующим эффективность деятельности сервисной компании, был выбран коэффициент технической готовности (КТГ), отражающий фактически временной период, в течение которого локомотив находится в технически исправном состоянии и готов к осуществлению поездной работы [1, 2].

До передачи на сервисное обслуживание склад запасных частей и материалов для локомотивов серии 2 ЭС5K «Ермак» в центре технического ремонта (ЦТР) оценивался в 15 млн р., после — 35 млн р. Дополнительно ООО «ТМХ-Сервис» обеспечило формирование склада линейного локомотивного оборудования на сумму в 30 млн р [4, 6].

Для получения кумулятивного эффекта руководством «РЖД» было принято решение об укрупнении проекта, и в 2011 г. на сервисное обслуживание ООО «ТМХ-Сервис» было передано еще 1236 локомотивов. В структуры взаимодействия по реализации укрупненного проекта дополнительно вошли ООО «СТМ-Сервис», сервисная компания ЗАО «Группа «Синара». И в целом количество локомотивов на сервисном обслуживании на 01.01.2015 количество локомотивов в системе сервисного обслуживания составляло 5 288 единиц подвижного состава.

В рамках данного проекта полного сервисного обслуживания, определенного решениями Координационного совета начальников железных дорог (пункт 3, протокол от 18 октября 2013 г. № КСН-4/пр), по результатам проведения аукционов на полное сервисное обслуживание локомотивного парка ОАО «РЖД» № 284 с 30 апреля 2014 г. его реализация перешла в две частные компании: ООО «СТМ-Сервис» и ООО «ТМХ-Сервис».

Авторы, являясь координаторами данного проекта, определили дополнительные функции и мероприятия к данному проекту в части его реализации, к которым относятся:

разработка и реализация системы информационной поддержки комплексной системы;

создание единого информационного пространства с применением спутниковых технологий диагностики фактического ресурса узлов и деталей локомотивов в эксплуатации;

реализация информационных потоков, характеризующих техническое состояние подвижного состава и технологического оборудования депо;

разработка программного обеспечения управления информационными потоками;

разработка алгоритмов выявления предотказного состояния и остаточного ресурса элементов подвижного состава, а также методологии повышения ресурса и износостойкости в первую очередь высоконагруженных элементов;

разработка научно-методических и программно-технических решений, а также нормативно-справочных документов, обеспечивающих внедрение ИПИ-технологий на предприятиях и в организациях отрасли, в том числе интерактивной документации;

накопление статистических данных.

Данный авторский проект получил условное наименование «Комплексное локомотивное депо». Так что такое комплексное депо? Это производственная структура организации и управления техническим обслуживанием и ремонтом приписного локомотивного парка «РЖД» для осуществления их эффективной эксплуатации на основе интегрированной информационной среды, образованной в результате мониторинга и диагностики технического состояния транспортных средств [5, 8].

Мониторинг и контроль параметров основан на технологиях построения телеметрических систем космических аппаратов, которые обеспечивают сбор информации о техническом состоянии объекта контроля с накоплением статистической информации на локальных серверах, с последующей передачей этой информации для анализа и принятия решений в центр логистической поддержки [9].

Использование спутниковых каналов связи и передачи данных в труднодоступных районах позволит обеспечить передачу необходимых диагностических данных в режиме реального времени, что дает возможность эффективно управлять процессом эксплуатации тепловозов и электровозов, а использование спутниковых навигационных систем позволит не только осуществлять контроль их местоположения, но и осуществлять привязку значений диагностических параметров к условиям эксплуатации транспортных средств (рисунок 3 [9,10]).

Это даст возможность разработать технологию оценки остаточного ресурса диагностируемых деталей, делать оценки рисков отказов с учетом ресурса основных блоков, а следовательно, делать оценки будущего состояния надежности и безопасности. Кроме того, это позволит формировать модели, описывающие управление функционированием, с точки зрения теории автоматизированного управления, а также выработку управляющих воздействий, которые приведут к устойчивому функционированию локомотивов.

Именно для такой структуры комплексного депо Тында, включающей в себя локомотивы — ремонтное депо — ПТОЛы — ремонтный завод, предлагается реализация пилотного проекта, что позволит охватить и информационно связать жизненный цикл приписного парка локомотивов Байкало-Амурской дирекции (рисунок 4).



Рисунок 3 – Комплексное депо Байкало-Амурской дирекции по ремонту тягового подвижного состава

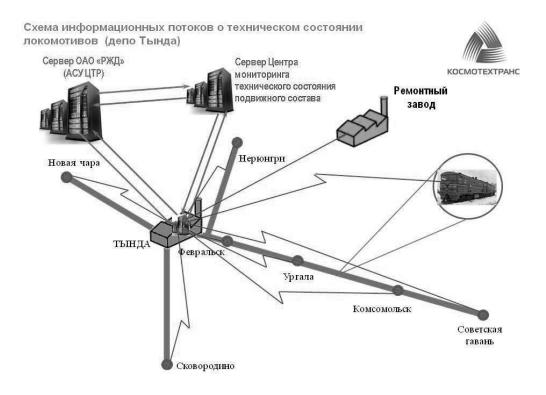


Рисунок 4 – Схема информационных потоков о техническом состоянии локомотивов

Целевой функцией данной системы является преобразование этапов эксплуатации локомотивов в высокоавтоматизированный процесс, интегрированный путем информационного взаимодействия всех его участников, поэтому центральным звеном комплексной системы является центр логистической поддержки (ЦЛП). Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла технических изделий (по ГОСТ Р 53393-2009) — это совокупность видов инженерной деятельности, реализуемых посредством управленческих, инженерных и информационных технологий, ориентированных на обеспечение высокого уровня готовности изделий при одновременном снижении затрат, связанных с их эксплуатацией и обслуживанием, которые являются значительной, а иногда и определяющей частью стоимости жизненного цикла изделия.

В качестве такого центра предлагается использовать центр мониторинга с уже разработанной нами информационной системой, способной концентрировать в себе данные, полученные от бортовых средств контроля, обрабатывать и предоставлять их в удобном для пользователя виде (рисунок 5). Данная информационная система имеет возможность к расширению ее функций для реализации сбора диагностической информации при углубленном диагностировании переносными и стационарными средствами.

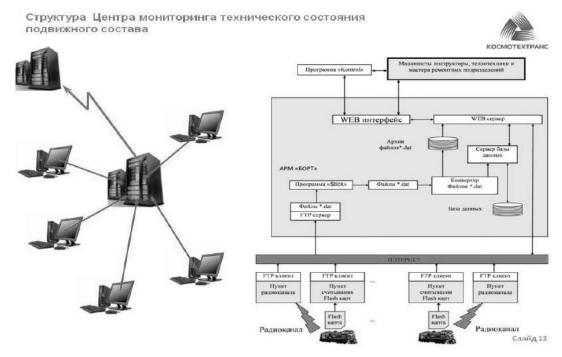


Рисунок 5 – Функциональная схема мониторинга диагностики локомотива

В центре мониторинга технического состояния (ЦТМ, см. рисунок 5) по специальным алгоритмам, разработанным авторами данной статьи, будет осуществляться обработка всей информации о техническом состоянии локомотивов приписного парка депо, которая по радиоканалам поступает как при эксплуатации, так и при осуществлении технического обслуживания и ремонта локомотивов в депо, а также при осуществлении ремонта на заводе [4, 7, 10]. На основе сформированной статистической информации вырабатываются управленческие решения, позволяющие перейти от технологии фиксирования технических отказов с последующим выявлением их причин и проведением восстановительных работ к технологии прогнозирования и предупреждения этих отказов, основанной на постоянном контроле технического состояния локомотивов и прогнозирования запаса ресурса, определяющей в итоге необходимость и объем очередного цикла технического обслуживания или ремонта.

# Список литературы

1. Белов, В. С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения [Текст] / В. С. Белов / МЭСИ. – М., 2008.

- 2. Макаров, Г. Н. Теория экономических информационных систем [Текст] / Г. Н. Макаров / Смоленский гуманитарный ун-т. Смоленск, 2008. 49 с.
- 3. Давыдов, А. В. Методические подходы к измерению показателей системы управления перевозочным комплексом [Текст] / А. В. Давыдов, П. Н. Рубежанский // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург, 2010. № 1. С. 19 22.
- 4. Рубежанский, П. Н. Методы повышения эффективности организации локомотиворемонтной деятельности холдинга «Российские железные дороги» [Текст] / П. Н. Рубежанский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. унтводного транспорта. Новосибирск. 2014. N 3. С. 60 65.
- 5. Рубежанский, П. Н. Надежность и эффективность системы управления перевозочным процессом [Текст] / П. Н. Рубежанский // Экономика железных дорог. 2013. № 8. С. 81 87.
- 6. Рубежанский, П. Н. Особенности качества перспективного планирования в транспортных системах Алтайского края [Текст] / П. Н. Рубежанский, А. И. Колпаков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. − Новосибирск. -2014. -№ 1. -C. 58-61.
- 7. Бубнова, Г. В. Модели управления маркетингом грузовых перевозок. Монография [Текст] / Г. В. Бубнова. М.: Маршрут, 2003. 256 с.
- 8. Бубнова,  $\Gamma$ . В. Корпоративная система управления маркетингом [Текст] /  $\Gamma$ . В. Бубнова / МИИТ. М., 2006. 14 с.
- 9. Бубнова,  $\Gamma$ . В. Информационные технологии, системы анализа, оценки, прогнозирования и управления работой ОАО «РЖД» на рынке транспортных услуг [Текст] /  $\Gamma$ . В. Бубнова, М. М. Ковшова, А. М. Тюфаев / МИИТ. М., 2005. 13 с.
- 10. Гапанович, В. А. Прогрессивные технологии обеспечения безопасности движения поездов и сохранности перевозимых грузов [Текст] / В. А. Гапанович, И. И. Галиев, В. П. Клюка / УМЦ ЖДТ. М.,  $2008. 220 \, c.$

# References

- 1. Belov V. S. *Informatsionno-analiticheskie sistemy. Osnovy proektirovaniia i primeneniia* (Information-analytical systems. Fundamentals of Design and Applications). Moscow: MESI, 2008.
- 2. Makarov G. N. *Teoriia ekonomicheskikh informatsionnykh sistem* (Theory of economic information systems). Smolensk: SGU, 2008.
- 3. Davydov A. V., Rubezhanskii P. N. Methodical approaches to measuring the performance of the system of transportation of controlled-complex [Metodicheskie podkhody k izmereniiu pokazatelei sistemy upravleniia perevozochnym kompleksom]. *Transport Urala Transport of Ural*, 2010, no. 1, pp. 19-22.
- 4. Rubezhanskii P. N. Methods to improve the organization locomotive-repair activity holding company «Russian Railways» [Metody povysheniia effektivnosti organizatsii lokomotivo-remontnoi deiatel'nosti kholdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi»]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Scientific problems of Siberia and the Far East*, 2014, no. 3, pp. 60 65.
- 5. Rubezhanskii P. N. Reliability and efficiency of transportation process control system [Nadezhnost' i effektivnost' sistemy upravleniia perevozochnym protsessom]. *Ekonomika zheleznykh dorog Economics railways*, 2013, no. 8, pp. 81 87.
- 6. Rubezhanskii P. N., Kolpakov A. I. Features quality long-term planning in the transport systems of the Altai Territory [Osobennosti kachestva perspektivnogo planirovaniia v transportnykh sistemakh Altaiskogo kraia]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka Scientific transport problems of Siberia and the Far East*, 2014, no. 1, pp. 58 61.
- 7. Bubnova G. V. *Modeli upravleniia marketingom gruzovykh perevozok. Monografiia* (Marketing freight management models. The monograph). Moscow: Marshrut, 2003, 256 p.
- 8. Bubnova G. V. *Korporativnaia sistema upravleniia marketingom* (Enterprise marketing management system). Moscow: MIIT, 2006, 14 p.
- 9. Bubnova G. V., Kovshova M. M., Tiufaev A. M. *Informatsionnye tekhnologii, sistemy analiza, otsenki, prognozirovaniia i upravleniia rabotoi OAO «RZhD» na rynke transportnykh usług* (In-

formation technology, analysis, evaluation, prediction and management of JSC "Russian Railways" in the market of transport services). Moscow: MIIT, 2005, 13 p.

10. Gapanovich V. A., Galiev I. I., Kliuka V. P. *Progressivnye tekhnologii obespecheniia bezopasnosti dvizheniia poezdov i sokhrannosti perevozimykh gruzov* (Advanced technologies ensure traffic safety and security of goods transported). Moscow, 2008, 220 p.

УДК 629.424

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ ТЕПЛОВОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

# Анисимов Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

# Чернышков Игорь Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

В статье описаны различные подходы к определению динамики тепловыделения в дизеле, проанализирована структура уравнения Пугачева, показан способ подбора параметров характеристики тепловыделения, приведены результаты расчета линии сгорания и их сравнение с опытными данными.

Ключевые слова: дизельный двигатель, процесс сгорания, математическое моделирование, характеристика тепловыделения, закон сгорания Вибе, уравнение сгорания Пугачева, тепловозные дизели.

# DIESEL ENGINE COMBUSTION PROCESS SIMULATING USING PUGACHEV COMBUSTION RATE EQUATION

# **Anisimov Alexandr Cergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

# Chernyshkov Igor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

This article describes different ways of mass-burned fraction curve calculation, shows the Pugachev's combustion rate equation structure, method of this equation factors selection and simulating versus experimental data matching.

Keywords: diesel engine, combustion process, math simulating, combustion rate, Vibe equation, Pugachev's equation, locomotive diesels.

УДК 629.4.027.2

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

### Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Президент ОмГУПСа, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-42-19.

# Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

# Лукс Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

# Ушак Виктор Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

В статье проведен сравнительный анализ динамической нагруженности полувагона с разными типами тележек в груженом и порожнем режимах движения при различных параметрах геометрических неровностей пути (амплитуды  $\eta_0$  и длины  $L_{\rm H}$ ) с учетом его жесткости.

Ключевые слова: полувагон, тележка, тележка 18-9810, математическая модель, анализ тележек, основные преимущества тележки 18-9810.

# IMPROVEMENT OF DYNAMIC QUALITIES OF FREIGHT WAGONS IN OPERATION

### **Galiev Ilham Islamovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

President, honored worker of science and technology of Russia, doctor of engineering, professor of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-42-19.

# Gatelyuk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Higher mathematics», OSTU

Phone: (3812) 31-16-88.

# **Luks Dmitry Yurievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduante student of the department «Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.

### **Ushak Viktor Nikolaevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department « Theoretical mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.

A theoretical and practical study of gondola cars equipped with various models of trucks: 18-100 and 18-9810. Compiled design scheme, system of differential equations and bringing its solution for different types of trucks.

The analysis of the solutions of this system are found depending on the amplitude of the pitching and bouncing speed carriage movement. Found dynamic forces on the one spring group. Based on the comparison of the two bogies conclusions about the benefits of truck 18-9810.

Keywords: wagon, cart, truck 18-9810, mathematical model, analysis of bogies, the main advantages of the trolley 18-9810.

УДК 629.4.03.004.58: 620.178.5:681.3.06

# ВИБРАЦИОННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ

# Гиоев Заурбек Георгиевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и аппараты», РГУПС.

E-mail: gioevZ@yandex.ru

# Приходько Виктор Маркович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Начертательная геометрия и графика», РГУПС.

E-mail: ngg@rgups.ru

# Козаев Виталий Сергеевич

Республиканская типографии «Алания». 362008, г. Владикавказ, пр. Коста 11/19. Директор типографии «Алания».

Рассматриваются причины возникновения корпусных вибраций в подшипниках качения в собранной машине, и на основе их измерения и анализа предлагается метод безразборного определения радиальных зазоров в них. Предложен и обоснован алгоритм вибрационного прогнозирования технического состояния подшипников качения в тяговых двигателях локомотивов.

Ключевые слова: *корпусная вибрация, диагностика, подшипники, техническое состояние, прогнозирование, вибропреобразователь, тяговый электродвигатель, локомотив.* 

# VIBRATIONAL PROGNOSTICATION OF OPERATING CONDITIONS OF THE LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MACHINES

# Gioev Zaurbek Georgiyevich

Rostov State Transport University (RSTU).

Sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolceniya, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Doctor of technical sciences, professor of the department «Electrical machines and apparatus», RSTU.

E-mail: gioevZ@yandex.ru

### Prikhodko Viktor Markovich

Rostov State Transport University (RSTU).

Sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolceniya, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Descriptive geometry and drawing», RSTU.

E-mail: ngg@rgups.ru

# **Kozaev Vitaliy Sergeevich**

Republican printing house «Alania».

Kosta Ave., 11/19, Vladikavkaz, 362008, Russia.

Director of printing house.

The reasons of a case-type vibration in the frictionless bearings in the assembled machine are studied. The method of identification of the radial clearances in the bearings without disassembling is suggested on the basis of the conducted measurements and analysis. The algorithm of vibrational prognostication of operating conditions of the frictionless bearings in the locomotive traction motors is suggested and grounded.

Keywords: case-type vibration, diagnostics, frictionless bearings, operating conditions, prognostication, vibrator inverter, traction electric motor, locomotive.

УДК 656.222.052.46

# УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛОКОМОТИВНЫХ ТЕЛЕЖЕК В КРИВЫХ

# Доронин Сергей Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: svdoronin@mail.ru

# Доронина Ирина Ивановна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС). 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

В статье рассматривается управляемое движение тележек многосекционных электровозов 2ЭС5К «Ермак» в кривых малого радиуса. Для реализации управления предлагается ввести в состав каждой буксы колесной пары дополнительное звено — специальную каретку. Анализируются два варианта управления положением тележки электровоза в кривых малого радиуса. Приводится вывод об эффективности управления одной передней колесной парой тележки.

Ключевые слова: локомотив, тележка, колесная пара, гребень колеса, головка рельса, вписывание подвижного состава в кривые.

# MOTION CONTROL OF LOCOMOTIVE BOGIE IN CURVES

# Doronin Sergei Vladimirovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: sydoronin@mail.ru

### Doronina Irina Ivanovna

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», FESTU.

The article deals with the controlled motion of electric locomotive 29C5K «Ermak» in the small radius curves. To implement the management offered to enter into the composition of each axlebox node of wheels pair additional unit - a special carriage. Analyzed two variants the control electric locomotive in the small radius curves. The conclusion the most efficiency control is control of the first wheels pair.

Keywords: locomotive, carriage, wheel pair, wheel flange, rail head, rolling stock's following curves.

УДК 629.4.027.2

# ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОТИПНЫХ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

# Костюков Владимир Николаевич

Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Динамика» — Научнопроизводственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», ООО «НПЦ «Динамика».

644043, г. Омск, а/я 5223.

Доктор технических наук, профессор, председатель совета директоров, главный конструктор ООО «НПЦ «Динамика».

E-mail: post@dynamics.ru

Тел.: (3812) 25-43-72.

# Костюков Алексей Владимирович

Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Динамика» — Научнопроизводственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», ООО «НПЦ «Динамика».

644043, г. Омск, а/я 5223

Кандидат технических наук, первый заместитель ген. директора – технический директор OOO «НПЦ «Динамика».

E-mail: post@dynamics.ru

Тел.: (3812) 25-43-72.

# Казарин Денис Викторович

Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Динамика» — Научнопроизводственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», ООО «НПЦ «Динамика».

644043, г. Омск, а/я 5223

Кандидат технических наук, зам. начальника департамента поддержки и продвижения систем ООО «НПЦ «Динамика».

E-mail: post@dynamics.ru

Тел.: (3812) 25-43-72.

# Басакин Василий Владимирович

Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Динамика» — Научнопроизводственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», ООО «НПЦ «Динамика».

644043, г. Омск, а/я 5223

Младший научный сотрудник ООО «НПЦ «Динамика».

E-mail: post@dynamics.ru

Тел.: (3812) 25-43-72.

Для повышения достоверности распознавания технического состояния узлов механической части рельсового подвижного состава и расчета критических значений параметров выдвинута гипотеза об однородности групп однотипных узлов механической части электропоезда. В рамках эксперимента по проверке данной гипотезы проведен сбор информации

№ 1(25) 2016

о значениях параметров вибрации узлов электропоезда в движении; разработана методика и проведен статистический анализ измеренных параметров вибрации для однотипных узлов.

Ключевые слова: *техническое состояние, эксплуатация, экспериментальные исследования, параметры вибрации, подвижной состав.* 

# ASSESSMENT OF UNIFORMITY OF VIBRATION PARAMETERS OF AN ELECTRIC TRAIN'S STANDARD ASSEMBLIES

# Kostyukov Vladimir Nikolaevich

Scientific Production Company «Dynamics» – «Diagnostics, reliability of machinery and complex automation», SPC «Dynamics».

P. O. Box 5223, Omsk, 644043, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, Russian Federation Government Award-winner, research supervisor, Chief of Executive board, SPC «Dynamics».

E-mail: post@dynamics.ru Phone: (3812) 25-43-72.

# **Kostyukov Alexey Vladimirovich**

Scientific Production Company «Dynamics» – «Diagnostics, reliability of machinery and complex automation», SPC «Dynamics».

P. O. Box 5223, Omsk, 644043, Russia.

Ph. D., first deputy director general – technical director, SPC «Dynamics».

E-mail: post@dynamics.ru

Phone: (3812) 25-43-72.

## **Kazarin Denis Viktorovich**

Scientific Production Company «Dynamics» – «Diagnostics, reliability of machinery and complex automation», SPC «Dynamics».

P. O. Box 5223, Omsk, 644043, Russia.

Ph. D., the deputy head of the department of systems support and promotion, SPC «Dynamics».

E-mail: post@dynamics.ru

Phone: (3812) 25-43-72.

## **Basakin Vasily Vladimirovich**

Scientific Production Company «Dynamics» – «Diagnostics, reliability of machinery and complex automation», SPC «Dynamics».

P. O. Box 5223, Omsk, 644043, Russia.

Junior research associate, SPC «Dynamics».

E-mail: post@dynamics.ru Phone: (3812) 25-43-72.

To improve the reliability of the detection of a technical condition of the mechanical components of rail rolling stock and calculate the critical values of the parameters put forward the hypothesis of the homogeneity of groups of similar nodes mechanical electron-tropoezda. As part of an experiment to verify this hypothesis, carried out the collection of information about the values of vibration parameters of electric components in the movement; the technique and the statistical analysis of the measured vibration parameters for the same type of bonds-fishing.

Keywords: technical condition, operation, pilot studies, of vibration parameters, rolling stock.

УДК 624.042.062

# УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СБОРНЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

# Красотина Лариса Владимировна

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», СибАДИ. E-mail: krasotina.larisa@gmail.com

В настоящей работе представлен вариант учета податливости стыков посредством математического моделирования сборных однослойных цилиндрических геометрически ортотропных оболочек на основе контактной краевой задачи конструкционного типа.

Ключевые слова: сборная однослойная профилированная бескаркасная несущая цилиндрическая оболочка, конечно-элементные модели, метод конечных элементов, модель Кирхгофа — Лява, котел цистерны для перевозки жидких и газообразных грузов, подвижной состав, локомотив, вагоны.

# ACCOUNTING FOR JOINT WORK TEAMS OF SINGLE WALLED ELEMENTS SHELL CONSTRUCTION OF RAILWAY ROLLING STOCK

## Krasotina Larisa Vladimirovna

Siberian State Automobile and Highway Academy, SSAHA.

5, Mira av., Omsk, 644080, Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Building construction», SSAHA.

E-mail: krasotina.larisa@gmail.com

In this paper we presented an option accounting compliance joints through mathematical modeling of prefabricated single-walled cylindrical geometric op-totropnyh shells on the basis of the contact boundary value problem of structural type.

Keywords: team single-layer frameless profiled carrier-Jilin-cylindrical shell finite element model; finite element method; Kirchhoff model – Lyava, boiler tanks for transportation of liquid and gaseous cargo, rolling stock, locomotive, carriages.

УДК 629.424.1

# ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

### Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: Micheev\_V\_A@mail.ru

# Сергеев Павел Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: SergeevPB@omgups.ru

В статье рассматривается подход к оперативной оценке технического состояния функциональных подсистем энергетической установки тепловоза в составе комплексных микропроцессорных систем управления. Представлен подход к оперативной оценке технического состояния топливной системы. По результатам анализа граф-модели топливной системы выделена совокупность контрольных параметров, разработан алгоритм, позволяющий установить причины выхода контролируемых параметров за допустимые пределы.

Ключевые слова: энергетическая установка тепловоза, граф-модель, оперативная оценка технического состояния.

# OPERATIONAL EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF THE DIESEL POWER PLANT FUNCTIONAL SUBSYSTEMS

# Mikheyev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Cars and carriage economy»

E-mail: Micheev\_V\_A@mail.ru

# **Sergeev Pavel Borisovich**

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Cars and carriage economy»

E-mail: SergeevPB@omgups.ru

The article discusses the approach to operational evaluation of technical condition of the diesel locomotive power plant functional subsystems as a part of an integrated microprocessor control systems. Presents an approach to operational evaluation of technical condition of a fuel system. By results of the analysis of a fuel system graph model set of control parameters is selected, the algorithm allowing to establish the reasons of controlled parameters output of admissible limits is developed.

Keywords: diesel locomotive power plant; graph model; operational evaluation of technical condition.

УДК 629.4.066

# РАЗРАБОТКА ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ

# Щелканов Александр Викторович

Общество с ограниченной ответственностью «НПЦ «Динамика» - Научно-

производственный центр «Диагностика, надежность машин и комплексная автоматизация», ООО «НПЦ «Динамика».

644043, г. Омск, а/я 5223.

Начальник отдела диагностических систем ООО «НПЦ «Динамика».

E-mail: post@dynamics.ru

Тел.: (3812) 25-43-72.

В данной статье автором представлена логико-лингвистическая модель, обеспечивающая достаточную глубину и полноту диагностирования с соблюдением всех требуемых инструкцией проверок и норм. Для построения данной модели были определены диагностические признаки с учетом каждой из требуемых проверок. Результаты разработки диагностической модели применены и прошли успешные испытания на различных типах электросекций.

Ключевые слова: диагностика, признаки, диагностическая модель, пневматическая система электропоезда

# DEVELOPMENT OF LOGICAL-LINGUISTIC MODEL OF THE ELECTRIC TRAIN PNEUMATIC SYSTEM FOR DIAGNOSTIC TASKS

## Shhelkanov Aleksandr Viktorovich

Scientific Production Company «Dynamics» – «Diagnostics, reliability of machinery and complex automation», SPC «Dynamics».

P. O. Box 5223, Omsk, 644043, Russia.

Head of diagnostic systems Department, SPC «Dynamics».

E-mail: post@dynamics.ru

Phone: (3812) 25-43-72.

In the article the author presents a logical-linguistic model, providing a sufficient depth and completeness of diagnostics with fulfillment of all required testing instructions and standards. Diagnostic features for every required testing were determined in order to build the suggested model. The results of a diagnostic model development were applied and successfully tested on various types of electrical sections.

Keywords: diagnostics, features, diagnostic model, electric train pneumatic system.

УДК 621.316.973

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ

# Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

# Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

### Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

# Колесник Артем Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

В статье проведен анализ состояния опорного хозяйства и показано, что замена железобетонных опор должна осуществляться с учетом их фактического коррозионного состояния. Предложен новый метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, позволяющий проводить измерения на двух опорах
одновременно. При этом вторая опора выступает в качестве токового электрода. На основе анализа переходного процесса для схемы замещения опоры контактной сети выведены
формулы для определения сопротивления бетона, сопротивления и емкости границы раздела
«арматура — бетон». По значениям этих параметров определяют коррозионное состояние
опоры в подземной части. Использование предложенного метода позволит значительно сократить временные и трудовые затраты на проведение диагностических процедур.

Ключевые слова: *коррозионное состояние, граница раздела, железобетонные опоры контактной сети, поляризация, переходный процесс.* 

# METHOD OF CORROSION STATE DETERMINING OF CONTACT SYSTEM CONCRETE POLES

### Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

# **Ponomarev Anton Vitalievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the departament «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

# Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the departament «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

# Kolesnik Artem Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the departament «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

The article shows that the replacement of concrete poles should be based on their actual corrosion state. Authors propose a new method for determining the corrosion state of the contact system concrete poles underground part, which allows to carry out measurements on the two poles at the same time. In this case, second pole acts as a current electrode. There is a formulas for determining the resistance of concrete, resistance and capacity of «steel – concrete» interface region. This algebraical expressions are results of the transient process analysis for the contact system poles equivalent circuit. The values of these parameters define the corrosion state pole in the underground part. Using of the proposed method will significantly reduce the time and labor costs of diagnostic procedures.

Keywords: corrosion state, interface region, contact system concrete poles, polarization, transient process.

УДК 621.331. 629.4

# МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

# Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, зав. кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

### Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

# Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», кандидат технических наук, доцент, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

В статье приведен анализ составляющих энергетической эффективности рекуперативного торможения и факторов, влияющих на эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Описаны методы оценки энергетической эффективности рекуперации и результаты экспериментальных исследований эффективности рекуперации. Выполнено обоснование использования метода имитационного моделирования как способа оценки потенциала рекуперативного торможения. Представлена последовательность выполнения работ.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, энергия рекуперации, система тягового электроснабжения, энергетическая эффективность, имитационное моделирование.

# METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF REGENERATIVE BRAKING THE USE AND ENERGY RECOVERY

### **Cheremisin Vasiliy Titovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, director of energy research Institute of railway transport, head of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

### Nikiforov Michael Michailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, K. Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the head of the scientific and industrial laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

# **Vilgelm Alexander Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU),

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor, senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

The article analyzes the components of the energy efficiency of regenerative braking and the factors influencing the effectiveness of the use of regenerative braking and energy recovery. Methods of evaluating the energy efficiency of recovery and the results of experimental studies of the effectiveness of recovery. Achieved justification for the use of the method of simulation modeling as a method for evaluating the potential of regenerative braking. It shows the sequence of the work.

Keywords: regenerative braking, regenerative energy system of the traction power supply, energy efficiency, simulation modeling

УДК 004.93'12

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ

### Альтман Евгений Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

E-mail: AltmanEA@omgups.ru

# Ананьева Надежда Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Программист кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

### Тихонова Наталья Алексеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

E-mail: TihonovaNA@omgups.ru

В работе рассматриваются основные алгоритмы компьютерного зрения, позволяющие обнаружить появление произвольного объекта на железнодорожном переезде. Приводятся результаты моделирования алгоритмов нахождения контуров и выделения фона на видеопоследовательности изображений модели железнодорожного переезда.

Ключевые слова: алгоритмы компьютерного зрения, моделирование, видеопоследовательность, объекты, кадр, железнодорожный переезд.

# APPLICATION ALGORITHMS OF COMPUTER VISION FOR OBJECT DETECTION ON THE RAILWAY CROSSING

### **Altman Evgeny Anatolyevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph.D., associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: AltmanEA@omgups.ru

### Ananieva Nadezda Gennadievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Programmer of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

### Tihonova Natalya Alekseevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph.D., associate professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: TihonovaNA@omgups.ru

Development of innovative methods and hardware gives additional opportunities for the solution of various tasks. For example, innovations allow increasing safety in places of crossing highways and railroads by means of detection methods of objects in the required control zone. The big risk of emergencies in places as a railway crossing is caused by a high speed and the inertial movement of the train. In this connection, there is no possibility of timely braking of the train and prevention of collision with an obstacle.

At the present time, the biggest percent of accident rate belongs to uncontrollable railway crossings. On such railway crossings completely are absent the blocking means or the warning technical tools. Controlled railway crossings are equipped with the blocking means for the automobiles. Also, they are equipped with the systems of video supervision. But the current systems of video supervision have no function of informing the driver of the train in an emergency.

Therefore, to priorities belongs development of technical requirements for a hardware and software system. The automatic analysis of a dynamic situation in borders of a railway crossing, transfer to the driver of the approaching train of the required information belongs to priorities too.

This work describes briefly main algorithms of computer vision which allow distinguishing any object on a railway crossing. The example of algorithmic modeling of detection of contours and allocation of a background on video has been considered in this work.

Received results led to the conclusion about a necessary adaptation of modern computer vision algorithms for the solution of a detection problem of various objects with the required accuracy and in various working conditions.

Keywords: the computer vision algorithms, simulation, video sequence, objects, frame, railway crossing.

УДК 656.022.4:519.168:519.852.23

# МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО И НАИБОЛЕЕ БЛИЗКИХ К НЕМУ МАРШРУТОВ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ

# Афоничев Николай Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Старший преподаватель кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

# Шахов Владимир Григорьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

Рассматривается метод практической реализации решения частного случая транспортной задачи. Он позволяет находить оптимальный и заданное количество маршрутов, ближайших к нему по величине критерия оптимальности. Метод обеспечивает большую гибкость в решении вопросов планирования оптимальной организации перевозочного процесса при выработке как стратегических, так и оперативных планов в случае возникновения ситуаций типа «авария», «затор» или других форс-мажорных обстоятельств.

Ключевые слова: транспорт, логистика, оптимизация, граф, алгоритм.

# METHOD OF SEARCH OF OPTIMAL AND MOST NEAR TO IT TRANSPORTATION ROUTES OF CARGO

# Afonichev Nikolai Iurevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Senior lecturer of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

# **Shakhov Vladimir Grigorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph.D., professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

The method of practical realization of decision of the special case of a transport task is examined. It allows to find optimal and the set amount of routes the nearest to it on the size of criterion of optimality. A method provides large flexibility in the decision of questions of planning of optimal organization of vehicular process at making, both strategic plans and operative plans in case of origin of situations of type "accident", "congestion", or other force-majeure circumstances.

Keywords: transport, logistic, optimization, route, graph, algorithm.

УДК 621.313

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО СПЕКТРУ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА

# Скляр Андрей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

E-mail: SklyarAV@niitkd.ru

# Чижма Сергей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

E-mail: chizhmasn@omgups.ru

В статье приводятся два метода оценки угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя, использующие особые спектральные компоненты, порождаемые конструкцией двигателя. Выполнив поиск представленных компонентов, можно оценить скольжение ротора. Целью работы является сравнение представленных методов при различных нагрузках двигателя и определение наиболее точного метода. Результатом работы является создание алгоритма программного модуля для оценки частоты вращения ротора асинхронного двигателя, который может применяться для различных практических задач, где требуется точное определение угловой скорости вращения, однако или нет доступа к движущимся частям для установки датчика оборотов, или применение датчиков оборотов нежелательно.

Ключевые слова: *асинхронный двигатель*, *скорость ротора*, *спектр тока*, *эксцентриситет*, *зубцово-пазовые гармоники*.

# ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE ROTOR SPEED OF ASYNCHRONOUS MOTORS USING SPECTRUM OF CURRENT CONSUMPTION

# Sklyar Andrew Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate of the departament «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89. E-mail: SklyarAV@niitkd.ru

# Chizhma Sergey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., associate professor, chief of the departament «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: chizhmasn@omgups.ru

The article describes two methods to estimate the rotor speed of the induction motor using special spectral components generated by the engine design. After you search for these components is possible to estimate the rotor slip. The aim is to compare these methods under different engine loads and to determine the most accurate method. The result is program algorithm for determining the rotational speed of the rotor of an induction motor, which can be used for a variety of practical tasks that require precise definition of speed, but there is no any access to moving parts to install the speed sensor or the use of sensors is undesirable revolutions.

Keywords: induction motor, the rotor speed, spectrum of current, eccentricity, rotor slot harmonics.

УДК 656.212.2.073.22

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОВОЙ РАБОТЫ СТАНЦИИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПУТЯМИ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

# Псеровская Елена Дмитриевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

E-mail: pserovskaya@stu.ru

# Кагадий Игорь Николаевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

В статье приведен анализ функционирования сложных транспортных систем, охарактеризованы основные принципы использования имитационного моделирования в организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Рассмотрен метод создания объектно-ориентированной модели для описания динамики взаимодействия грузовой станции и пути необщего пользования.

Ключевые слова: *имитационное моделирование*, грузовая станция, путь необщего пользования, система массового обслуживания, местная работа, станция примыкания, грузовой пункт.

# MODELING STATION'S CARGO WORK IN INTERACTION WITH WAYS OF UNCOMMON USE

### Pserovskaya Elena Dmitrievna

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Ph. D., associate professor, head of the department «Logistics, someone-profit work and rolling stock», SSTU.

E-mail: pserovskaya@stu.ru

# **Kagady Igor Nikolaevich**

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Post-graduate student of the department «Logistics, someone-profit work and rolling stock», SSTU.

The analysis of functioning of difficult transport systems is provided in article, the basic principles of use of simulation modeling in the organization of transportation process on railway transport are characterized. The method of creation of object-oriented model for the description of dynamics of interaction of cargo station and a way of uncommon use is considered.

Keywords: simulation modeling, cargo station, way of uncommon use, system of mass service, local work, station of an adjunction, cargo point.

УДК 69.05: 658.512.6

# МИНИМИЗАЦИЯ РИСКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ ВЫПРАВОЧНО-ПОДБИВОЧНО-РИХТОВОЧНЫХ МАШИН

### Базилевич Светлана Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Менеджмент, маркетинг и коммерция», ОмГУПС.

E-mail: bcv65@mail.ru

# Васильев Сергей Иванович

Сибирский федеральный университет (СФУ).

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», СФУ.

E-mail: s-vasilev1@yandex.ru

### Кузнецов Сергей Михайлович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Доктор технических наук, доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства», СГУПС.

E-mail: ksm56@yandex.ru

Авторами предложена модель обоснования продолжительности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных и строительных машин. С помощью этой модели можно оценить

эффективность и надежность машин на любом объекте. Это позволит наиболее достоверно прогнозировать сроки производства отдельных видов работ и их стоимость еще на стадии проектирования. В статье приведены показатели натурных испытаний и дана оценка надежности производства работ. Одним из основных факторов надежности работы строительных машин является коэффициент использования их по времени. Во всех нормативных документах приводятся устаревшие данные по коэффициентам использования машин в течение рабочего времени, которые требуют обновления, так как машины постоянно совершенствуются. Для оценки надежности продолжительности работы машин авторами создана база данных по результатам натурных испытаний выправочно-подбивочно-рихтовочных машин, кранов, экскаваторов, бульдозеров, трубоукладчиков, буровых станков и земснарядов. Для доказательства обоснованности значений базы данных по результатам натурных испытаний проводились два этапа проверки: логическая и математическая.

После формирования выборки в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 проверялась ее принадлежность закону нормального распределения с помощью критерия согласия Пирсона. Далее рассчитывались надежность и риск завершения запланированного объема работ в намеченный промежуток времени. При этом рассматривался коэффициент использования машин по времени и риск его отклонения от среднего значения.

Использование предлагаемого подхода к оценке продолжительности работы выправочно-подбивочно-рихтовочных и строительных машин может быть распространено на любой тип техники и позволит получить численные значения оценки надежности производства работ в запланированный срок, что весьма актуально при строительстве, ремонте и текущем содержании пути.

Ключевые слова: организационно-технологическая надежность, организационнотехнологический риск, строительные и путевые машины, оценка надежности производства, коэффициент использования машин в течение рабочего времени, натурные испытания, риск завершения запланированного объема работ в намеченный промежуток времени, численные значения оценки надежности производства работ.

# MINIMIZATION OF RISK WHEN DETERMINING THE DURATION OF LINER-TAMPING-STRAIGHTENING MACHINES

### **Bazilevich Svetlana Viktorovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the departament «Management, marketing and commerce», OSTU.

E-mail: bcv65@mail.ru

# Vasilyev Sergey Ivanovich

Siberian Federal University (SFU).

79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia.

Ph. D., associate professor of the departament «Drilling of oil and gas wells», SFU.

E-mail: s-vasilev1@yandex.ru

# **Kuznetsov Sergey Mikhailovich**

Siberian state University of railway engineering (STU)

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia

Dr. Sci. Tech., associate professor of the departament «Technology, organization and economics of construction», STU.

E-mail: ksm56@yandex.ru

The authors propose a model of justification of the duration of the operation liner-tamping-straightening and construction machinery. Using this model, we can evaluate the efficiency and reliability of machines on any object. This allows you to most reliably predict the timing of production of certain types of works and their cost at the design stage. The article presents the indicators of full-scale tests and the estimation of reliability of manufacturing operations. One of the main factors of reliability of work of construction machines is the utilization of their time. All normative documents are obsolete data on the utilization of machines during the working time, which need updating, as the machines are constantly improving. To assess the reliability of working machines, the authors developed a database of the results of field tests liner-tamping-straightening machines, cranes, excavators, bulldozers, pipe layers, drilling rigs and dredges. To prove the validity of database values according to the results of full-scale tests were carried out two stages of verification: logical and mathematical.

After sampling in accordance with GOST R 8.736-2011 was verified that it belongs to the law of normal distribution using the criterion of Pearson agreement. It was further calculated the reliability and risk of the planned volume of work in scheduled period of time. When it was considered the utilization ratio of machines time and the risk of deviation from the mean.

The proposed approach to the assessment of duration of liner-tamping-straightening and construction machinery can be extended to any type of equipment and will allow to obtain numerical values for evaluating the reliability of production work in the scheduled time, which is very important in the construction, repair and maintenance.

Keywords: organizational and technological reliability, organizational and technological risk, construction and track machines, evaluation of reliability of production, the utilization factor of the machines during the working time, field tests, risk the completion of the planned volume of work in scheduled period of time, the numerical values for evaluating the reliability of production operations.

УДК 629.471

# КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО КОМПЛЕКСА «РЖД»

# Рубежанский Петр Николаевич

ОАО «РЖД».

123032, г. Москва, ул. Каланчевская, 35.

Кандидат экономических наук, советник президента по экономике ОАО «РЖД».

Тел.: (499) 262-71-99.

E-mail: kyzylasov@yandex.ru

### Давыдов Анатолий Вячеславович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экономика транспорта», СГУПС.

Тел.: (383) 328-05-64. E-mail:Davydov@stu.ru

Авторами предложена комплексная программа объединения в единую систему всех процессов жизненного цикла локомотивов, способствующая сокращению издержек, связанных в первую очередь с эксплуатацией и обслуживанием локомотивного парка ОАО «РЖД». Основным показателем данной комплексной системы является уровень готовности технического изделия, определяемый коэффициентом готовности.

Выработанная методология позволит перейти от технологии фиксирования технических отказов с последующим выявлением их причин и проведением восстановительных работ к технологии прогнозирования и предупреждения этих отказов, основанной на постоянном контроле технического состояния локомотивов и прогнозирования запаса ресурса в режиме online.

Ключевые слова: комплексное депо, логистическая поддержка управления, информационные потоки, технология телеметрических систем, сервисное обслуживание.

# CONCEPT OF DEVELOPMENT OF THE COMPLEX IN REPAIR OF LOCOMOTIVES OF «RUSSIAN RAILWAY»

# Rubezhanskiy Petr Nikolaevich

Joint Stock Company of the Russian Railway.

35, st. Kalanchevskay, Moscow, 123032, Russia.

Ph. D., economic problems advisor Joint Stock Company of the Russian Railway.

Phone: (499) 262-71-99.

E-mail: kyzylasov@yandex.ru

# **Davydov Anatoly Vyacheslavovich**

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Dr. Sci. economic, professor, head of the department «Transport Economic», SSTU.

Phone: (383) 328-05-64. E-mail:Davydov@stu.ru

By the author it is offered complex programs of association in uniform system of all processes of life cycle of locomotives, promoting reduction of the expenses connected first of all with operation and service of locomotive park JSC RZhD. The main indicator this complex the system is the level of readiness of a technical product determined by an availability quotient.

The developed methodology will allow to pass from technology of fixation of technical refusals, with the subsequent identification of their reasons and carrying out recovery work, to the technology of forecasting and the prevention of these refusals based on a constant control of technical condition of locomotives and forecasting of a stock of a resource in the Online mode.

Keywords: complex depot, logistic support of management, information streams, technology of telemetric systems, service.

#### Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;

- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia\_transsiba@mail.ru

# Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

### В редакцию журнала представляются:

текст статьи на белой бумаге формата A4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова  $(5-10\ \text{слов})$ , название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат A4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite — *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

### Научное издание

# Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

### № 1 (25) 2016

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-36469 от 3 июня 2009 г. и ПИ № ФС77-49218 от 30 марта 2012 г.

Hомер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ Агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год (каждый квартал).

Редактор – Майорова Н. А. Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35; тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia\_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.03.2016. Тираж 500 экз.

Отпечатано в ГП «Омская областная типография»: 644070, г. Омск, ул. Декабристов, 37. Дата выпуска: 30.03.2016.

