ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

Известия Транссиба

№ 4(20)
2014

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

научно-технический журнал

№ 4(20)
2014

Периодичность - 4 выпуска в год

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35
Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 629.42:629.4.054

О. С. Аблялимов

К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Представлены результаты исследований по изучению условий движения высокоскоростных поездов с активной и пассивной системами наклона кузовов вагонов в кривых участках железнодорожного пути с учетом организации движения и эксплуатации электропоезда «Afrosiyob» на участке Ташкент – Самарканд Узбекской высокоскоростной железной дороги.

Настоящая работа выполнена на основании договора о взаимном сотрудничестве между Дирекцией по организации движения и эксплуатации высокоскоростных пассажирских поездов, Управлением по эксплуатации локомотивов ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» и кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТашИИТа, согласно которому проводится цикл теоретических и экспериментальных исследований по изучению и обоснованию параметров (показателей) движения, а также ремонтного производства высокоскоростного подвижного состава и оценке энергетической эффективности использования парка высокоскоростных пассажирских поездов железнодорожной компании в условиях эксплуатации, и является частью упомянутых выше исследований.

Одним из приоритетов комплексной программы развития и модернизации железнодорожной отрасли Узбекистана на 2011 – 2015 гг., связанной с перевозками пассажиров и народнохозяйственных грузов, следует считать обустройство инфраструктуры и введение в эксплуатацию высокоскоростной железнодорожной линии Ташкент – Самарканд с последующим осуществлением электрификации железнодорожных участков до городов Карши и Бухара.

В этой связи Концепция развития скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах Узбекистана является базовой составляющей транспортной политики железнодорожной отрасли на ближайшую и дальнейшую долгосрочную перспективу, которая связана с разработкой разнообразных социально-экономических программ, мероприятий и рекомендаций по организации и последующему внедрению этого вида движения в различные регионы нашей страны. Четыре этапа упомянутой Концепции охватывают период с 2011 по 2035 г. [1], в течение которого предусмотрено организовать движение высокоскоростных пассажирских поездов на участках Ташкент – Самарканд (первый этап в настоящее время реализован), Ташкент – Карши (второй этап) и Ташкент – Бухара (третий этап), а также на четвертом этапе организовать скоростное движение этих поездов на участках Ташкент – Пап – Андижан и Навои – Ургенч, Нукус.

Первый этап Концепции развития скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах Узбекистана был сопряжен с подготовкой высокоскоростного движения на участке Ташкент – Самарканд и последующим пуском в эксплуатацию электропоезда *«Afrosiyob»* на этом участке.

Высокоскоростной электропоезд *«Afrosiyob»* [2], являясь аналогом испанского электропоезда *«Talgo*-250*»*, представляет собой состав постоянного формирования с фактически электровозной тягой, который состоит из двух головных моторных, восьми пассажирских вагонов и вагона-ресторана.

Силовые моторные вагоны двухсистемные, т. е. с напряжением контактной сети в 25,0 кВ (переменного тока) и 3,0 кВ (постоянного тока). В процессе работы под контактной сетью переменного тока мощность каждого силового моторного вагона составляет 2400 кВт, а под контактной сетью постоянного тока – 2000 кВт. Масса силового моторного вагона равна 72 т. Силовые моторные вагоны оборудованы асинхронными тяговыми электродвигателями и преобразователями с *IGBT*-транзисторами с обратным напряжением в 6,5 кВ. Применена типовая для двухсистемных электровозов *«Bombardier»* схема преобразования энергии.

В числе восьми пассажирских вагонов – два вагона типа *VIP*, два вагона бизнес-класса и четыре вагона экономического класса. Общая вместимость высокоскоростного электропоезда *«Afrosiyob»* составляет 215 человек, а максимальная скорость движения – 250 км/ч. На первоначальном этапе расстояние между Ташкентом и Самаркандом в 344 км указанный электропоезд преодолевал за 2 ч 35 мин.

Настоящие исследования посвящены изучению условий движения высокоскоростного подвижного состава с разными системами наклона кузовов вагонов в кривых участках железнодорожного пути различного радиуса кривизны.

За прототип высокоскоростного пассажирского поезда с пассивной системой наклона кузовов вагонов принимаем узбекский электропоезд *«Afrosiyob»,* который в настоящее время уже достаточно успешно эксплуатируется на участке Ташкент – Самарканд, в дальнейшем планируется его эксплуатация на других участках железных дорог Узбекистана, а с активной системой – это, например, электропоезд серии *«Allegro»* российских железных дорог.

Сейчас общая протяженность действующей высокоскоростной железнодорожной линии Ташкент – Самарканд составляет 328 км, где для обоих направ-лений высокоскоростное движение пассажирских поездов (электропоезда *«Afrosiyob»*) охватывает приблизительно 120 км железнодорожного пути, а на оставшемся, но реконструированном под высокоскоростное движение организован смешанный перевозочный процесс – электропоезда *«Afrosiyob»*, грузовые, пассажирские и пригородные поезда с локомотивами в различном секционном исполнении на электрической (электровозы серий *«Uzbekiston»,* ВЛ80^{С} и ВЛ60^{К}) и дизельной (тепловозы серий ТЭ10М, UzTE16M и ТЭП70 БС) тяге, в том числе и моторвагонной (пригородное движение).

Ввод в эксплуатацию нового высокоскоростного участка протяженностью в 20 км (Галляарал – Рзд. № 19) позволил электропоезду *«Afrosiyob»* по сравнению с начальным этапом его эксплуатации сократить время в пути следования между городами Ташкент и Самарканд на 25 мин [3, 5] и повысить среднюю скорость движения приблизительно на 13,69 %. В настоящее время проследование перегонов железнодорожного участка Ташкент – Самарканд высокоскоростным электропоездом «*Afrosiyob*» составляет 2 ч 10 мин.

Таблица 1 – Время хода и скорость движения электропоезда *«Afrosiyob»* на участке Ташкент – Самарканд

Перегоны	Рассстояние, км	Время хода, мин	Скорость движения, км/ч
Ташкент – Рахимова	8,4	5,0	180/130
Рахимова – Сырдарьинская	71,8	29,0	180/170
Сырдарьинская – Гулистан	40,1	15,0	180/170
Гулистан – Даштабад	52,7	18,0	250/220
Даштабад – Джизак	59,4	18,0	250/220
Джизак – Галляарал	25,1	14,0	140/140 – 150
Галляарал – Богарное	25,6	12,0*	140/ 130*
Богарное – Булунгур	29,4	15,0*	140/ 125*
Галляарал – Булунгур	39,0	16,0	250/170
Булунгур – Самарканд	31,5	15,0	160/160
Ташкент – Самарканд	344*/328	155*/130	133,16*/151,38*

На основании данных исследований [3, 5] в таблице 1 (индексом звездочка * обозначены значения на первоначальном этапе эксплуатации электропоезда *«Afrosiyob»*) и на рисунке 1, соответственно, представлены расчетные (проектные), фактические значения наибольших допускаемых скоростей движения и графиковое время проследования высокоскоростного электропоезда *«Afrosiyob»* по условным перегонам и раздельным пунктам участка Ташкент – Самарканд, а также приведены диаграммы их распределения там, которые подтверждают корректность изложенных выше доводов (промежуточные выводы).

Другим резервом сокращения времени хода высокоскоростного электропоезда *«Afrosiyob»* в пути следования является дальнейшее повышение его скорости движения вплоть до конструкционной V = 250 км/ч за счет увеличения радиуса кривых участков железнодорожного пути, особенно малого радиуса кривизны. Последние, на наш взгляд, являются основными (базовыми) составляющими технико-экономических параметров высокоскоростной железнодорожной линии Ташкент – Самарканд. Общая развернутая длина всех кривых главных путей участка Ташкент – Самарканд составляет около 102 км [1], приблизительно 82 км из которых [5] приходится на круговые кривые с малым радиусом кривизны в 1 км 250 м, а оставшиеся 20 км упомянутой выше развернутой длины – это круговые кривые с радиусами кривизны в три тысячи(~ 15,01%) и более (~ 4,93%) метров.

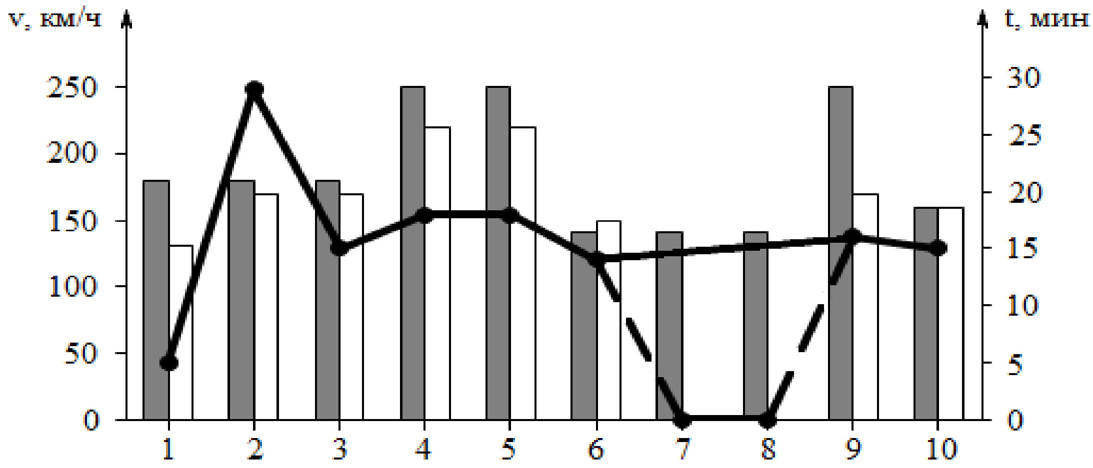


Рисунок 1 – Параметры проследования перегонов участка Ташкент – Самарканд высокоскоростным электропоездом *«Afrosiyob»:* и – расчетные и фактические значения наибольших допускаемых скоростей движения; – поперегонное время хода электропоезда *«Afrosiyob»,* – то же на первоначальном этапе

Расчеты на основании рекомендаций статьи [4] показывают, что скорость движения высокоскоростного электропоезда «*Afrosiyob*» в кривой с радиусом $R_{кр} \approx$ 1200 м составляет 200 км/ч, что подтверждают данные работы [7], а увеличение радиуса кривой с 1250 м до 500 – 525 м позволит обеспечить движение высокоскоростных электропоездов *«Afrosiyob»* в кривых участках железнодорожного пути с таким радиусом кривизны со скоростью движения в 250 км/ч.

В исследовании [6], опираясь на данные работы [7], в результате аппроксимации уже известных значений скоростей движения для диапазона изменения радиусов кривой от 250 до 1750 м [5] нами были получены значения скорости движения высокоскоростных поездов в кривых участках железнодорожного пути с радиусами кривизны, в несколько раз превышающими последние при различных системах наклона кузовов вагонов – активной, пассивной и без систем наклона, характер изменения которых для каждой из рассматриваемых упомянутых систем описывается степенной функцией, позволяющей с довольно высокой точностью определять численные значения этих скоростей для любого i-го радиуса $R_{кр\ i}$ кривой по формулам, которые вместе с достаточной величиной достоверности аппроксимации R^2, равной 0,9998…0,9999 (необходимое условие достоверности – $R^2 \geq 0{,}8$), приведены в работе [6].

Процесс движения высокоскоростных поездов в кривых участках железных дорог будем анализировать по безразмерным величинам скорости движения V и радиусов кривой $R_{кр\ i}$, т. е. по относительным параметрам движения высокоскоростных поездов в условиях их эксплуатации на кривых участках с радиусами кривизны от 250 до 1750 м.

Относительная скорость движения V определяется по выражению:

$$\overline{V} = V_i / V, \tag{1}$$

где V_i – текущее значение скорости движения, км/ч;

V – значение скорости движения при радиусе кривой R = 1750 м, км/ч.

Относительный радиус кривой $R_{кр}$ определяется по формуле:

$$\overline{R}_{кр} = R_{кр\,i} / R_{кр}, \tag{2}$$

где $R_{кр\,i}$ – текущее значение радиуса кривой, м;

$R_{кр}$ – максимальное значение радиуса кривой, м. $R_{кр}$ = 1750 м.

Влияние разнообразных систем наклона кузовов вагонов на прохождение высокоскоростными поездами кривых различных радиуса кривизны и протяженности (длины) будем оценивать по критерию, которым является темп нарастания (изменения) относительной скорости движения высокоскоростных поездов, т. е. величина (параметр), равная отношению абсолютных скоростей движения между собой для систем с наклоняемыми (наклоном) и ненаклоняемыми (без наклона) кузовами вагонов.

Характер изменения скорости движения высокоскоростных поездов при различных системах наклона кузовов вагонов в зависимости от величины радиусов кривой в абсолютных и относительных единицах с учетом их средних значений приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Значения радиусов кривой и скоростей движения высокоскоростных поездов с различными системами наклона кузовов вагонов

Система наклона кузова вагона	Абсолютная V и относительная $\overline{V}$ скорость движения	Радиус кривой $R_{крi}$, м, относительный радиус кривой $\overline{R}_{кр}\cdot10^2$						
		250	500	750	1000	1250	1500	1750
		14,3	28,6	42,9	57,2	71,5	85,8	100
Без наклона	V_1, км/ч	74,3	110,4	135,5	157,9	175,2	191,1	208,9
	$\overline{V}_1\cdot10^2$	35,5	52,8	64,8	75,6	83,8	91,5	100
Пассивная	V_2, км/ч	84,3	127,8	158,2	183,2	205,4	223,2	241,1
	$\overline{V}_2\cdot10^2$	35,0	53,0	65,6	76,3	85,2	92,6	100
Активная	V_3, км/ч	91,1	135,5	166,1	192,1	215,4	235,2	255,4
	$\overline{V}_3\cdot10^2$	35,7	53,0	65,0	75,2	84,3	92,1	100
Средние значения	$V_{ср}$, км/ч	83,2	124,6	153,3	177,7	198,7	216,5	235,1
	$\overline{V}\cdot10^2$	35,4	52,9	65,1	75,7	84,4	92,1	100

Таблица 3 – Значения относительной скорости движения высокоскоростных поездов в кривых участках железнодорожного пути различного радиуса кривизны

Радиус кривой $R_{кр\,i}$, м	Параметры движения высокоскоростных поездов с разными системами наклона кузова вагонов в кривых с радиусами					
	постоянными $R_{кр\,i}$ = const		изменяющимися по соотношению $R_{кр\,i+1} / R_{кр\,i}$, i = 1…6			
	пассивная, $\overline{V}_П$	активная, $\overline{V}_А$	без наклона, $\overline{V}_{i1}$	пассивная, $\overline{V}_{i2}$	активная, $\overline{V}_{i3}$	средние значения $\overline{V}_i^{ср}$
250	1,134	1,226	–	–	–	–
500	1,157	1,227	1,486	1,516	1,487	1,496
750	1,167	1,226	1,227	1,238	1,226	1,230
1000	1,160	1,216	1,165	1,162	1,156	1,161
1250	1,172	1,229	1,109	1,117	1,121	1,116
1500	1,168	1,231	1,093	1,087	1,092	1,090
1750	1,154	1,222	1,091	1,080	1,086	1,086
Средние значения	1,163	1,225	1,195	1,200	1,195	1,197

Параметры высокоскоростных поездов с разными системами наклона кузовов вагонов в кривых с радиусами постоянными $R_{кр\,i}$ = const и изменяющимися по соотношению $R_{кр\,i+1} / R_{кр\,i}$ (здесь i =1…6 – номер радиуса кривой по порядку), при каждом последующем увеличении их на величину ΔR = 250 м приведены в таблице 3, а темп нарастания (изменения) относительной скорости движения высокоскоростных поездов в кривых различного радиуса показан на рисунке 2.

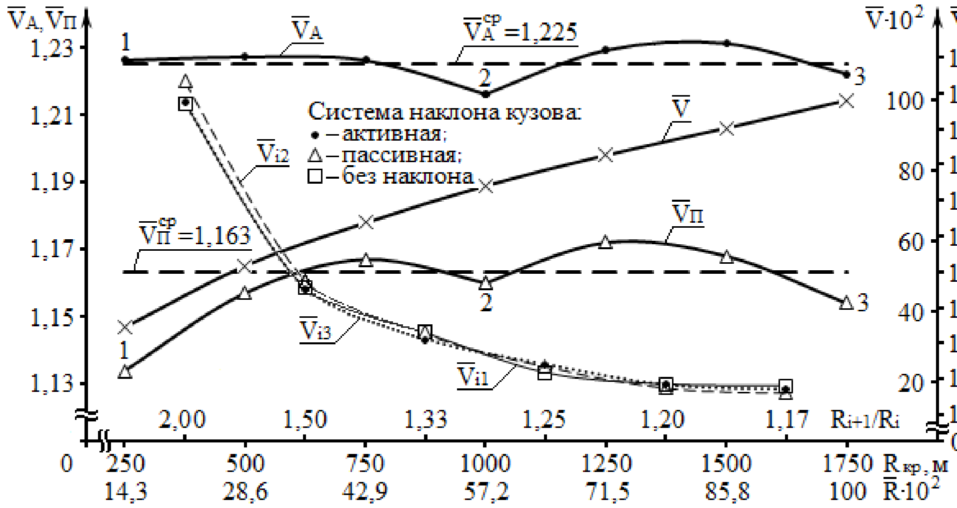


Рисунок 2 – Параметры относительной скорости движения высокоскоростных поездов в кривых участках железнодорожного пути

Изменения абсолютных, в том числе средней и усредненных относительных скоростей движения высокоскоростных поездов с разными системами наклона кузовов вагонов на участках различного радиуса кривизны, показаны на рисунке 3.

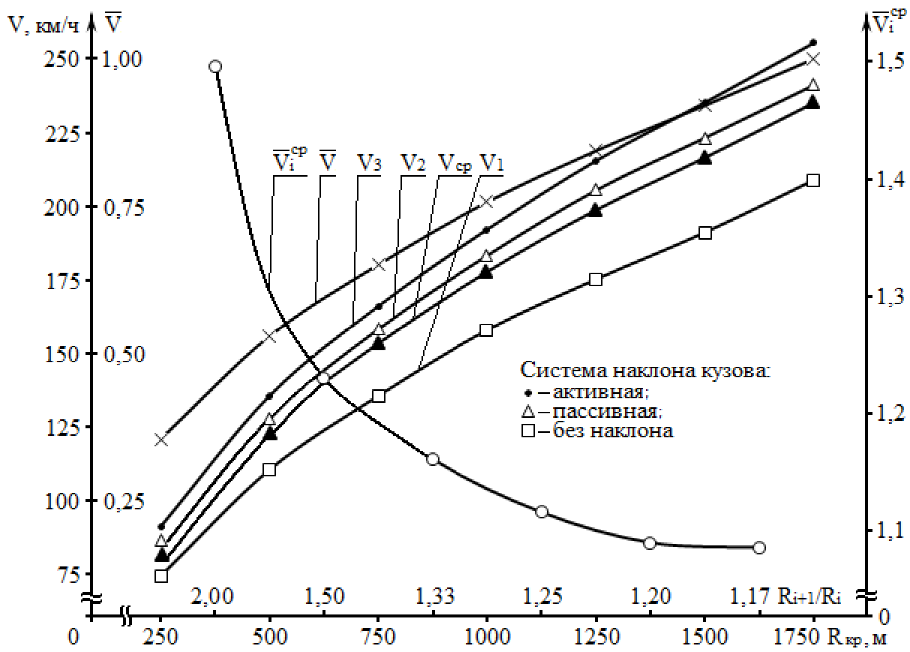


Рисунок 3 – Динамика скорости движения высокоскоростных поездов на участках различного радиуса кривизны

Анализ результатов этой части исследований позволил установить следующее.

Средние значения относительных скоростей движения высокоскоростных поездов при пассивной и активной системах наклона кузовов вагонов составляет, соответственно: $\overline{V}^{ср}_П$ = = 1,163 и $\overline{V}^{ср}_А$ = 1,225, что достаточно хорошо согласуется с исследованиями [4 – 7], в которых при радиусе кривой $R_{кр\ i} \approx 707$ м были получены аналогичные значения, т. е. $\overline{V}^{ср}_П$ = = 1,165, а $\overline{V}^{ср}_А$ = 1,225.

Активная система наклона кузовов вагонов по сравнению с пассивной в рассматриваемом диапазоне изменения радиусов кривизны когда $R_{крi}$ =const, обеспечивает увеличение относительной скорости движения высокоскоростных поездов в интервале 4,82 – 8,11 %, а в случае, где кривые с радиусами изменяющейся кривизны, т. е. $R_{кр\ i+1} / R_{кр\ i} \neq$ const, значения относительной скорости движения последних приблизительно одинаковы для всех упомянутых систем наклона и имеют тенденцию к снижению в среднем на 27,4 %, при увеличении радиуса кривой с 250 до 1750 м.

В последнем случае изменения радиуса кривой абсолютные значения скорости движения высокоскоростных поездов для всех рассматриваемых (анализируемых) систем наклона кузовов вагонов повышаются в среднем в 2,82 раза.

На высокоскоростных железных дорога Узбекистана, где скорость движения электропоездов *«Afrosiyob»* с пассивной системой наклона кузовов вагонов не будет превышать 250 км/ч, расходы на модернизацию (подготовка и изменение) путевой инфраструктуры потребует значительно меньшего вложения материальных ресурсов, чем для новых аналогичных линий, где современные высокоскоростные электропоезда могут достигать скорости движения 350 – 400 км/ч [2, 8].

Используя стандартную программу серии *Microsoft Office Excel* с целью определения параметров движения высокоскоростных поездов с активной и пассивной системами наклона кузовов вагонов в кривых участках железнодорожного пути, мы получили аналитические выражения (уравнения регрессии), позволяющие при достаточной величине достоверности аппроксимации R^2 (необходимое условие достоверности: $R^2 \geq 0{,}8$) производить точные вычисления значений абсолютной и относительной скорости движения таких поездов для любого i-го радиуса $R_{\text{кр } i}$ кривой в принятом диапазоне изменения последнего ($R_{\text{кр } i}$ = 250 – 1750 м), которые вместе с упомянутой величиной R^2 приведены ниже.

Для графиков, изображенных на рисунке 1:

относительная скорость движения $\overline{V}_{\text{А}}$:

участок 1 – 2:

$$\overline{V}_{\text{А}} = -0{,}0028\,R_{kpi}^2 + 0{,}0107\,R_{kpi} + 1{,}2177, \qquad (3)$$

$$R^2 = 0{,}9697; \qquad (4)$$

участок 2 – 3:

$$\overline{V}_{\text{А}} = -0{,}0055\,R_{kpi}^2 + 0{,}0625\,R_{kpi} + 1{,}054, \qquad (5)$$

$$R^2 = 1{,}0000; \qquad (6)$$

относительная скорость движения $\overline{V}_{\text{П}}$:

участок 1 – 2:

$$\overline{V}_{\text{П}} = -0{,}0075\,R_{kpi}^2 + 0{,}0463\,R_{kpi} + 1{,}095, \qquad (7)$$

$$R^2 = 0{,}9987; \qquad (8)$$

участок 2 – 3:

$$\overline{V}_{\text{П}} = -0{,}0065\,R_{kpi}^2 + 0{,}0693\,R_{kpi} + 0{,}0693, \qquad (9)$$

$$R^2 = 0{,}9908; \qquad (10)$$

относительная скорость движения $\overline{V}$:

$$\overline{V} = 36{,}02\,R_{kp}^{0{,}5294}, \qquad (11)$$

$$R^2 = 0{,}9988. \qquad (12)$$

Для графиков, изображенных на рисунке 2:

относительная скорость движения $\overline{V}_i^{\text{ср}}$:

$$\overline{V}_i^{\text{ср}} = -0{,}0265(R_{i+1}/R_i)^2 - 0{,}31(R_{i+1}/R_i) + 1{,}9786, \qquad (13)$$

$$R^2 = 0{,}9541; \qquad (14)$$

$$\overline{V}_i^{\text{ср}} = -0{,}0082(R_{i+1}/R_i)^3 + 0{,}1377(R_{i+1}/R_i)^2 - 0{,}769(R_{i+1}/R_i) + 2{,}5422, \tag{15}$$

$$R^2 = 0{,}9901; \tag{16}$$

относительная скорость движения $\overline{V}$:

$$\overline{V} = 0{,}3602\, R_{kp}^{0{,}5294}, \tag{17}$$

$$R^2 = 0{,}9988; \tag{18}$$

абсолютная скорость движения V_1:

$$V_1 = 75{,}463\, R_{kp}^{0{,}5253}, \tag{19}$$

$$R^2 = 0{,}9989; \tag{20}$$

абсолютная скорость движения V_2:

$$V_2 = 86{,}279\, R_{kp}^{0{,}5366}, \tag{21}$$

$$R^2 = 0{,}9978; \tag{22}$$

абсолютная скорость движения V_3:

$$V_3 = 92{,}508\, R_{kp}^{0{,}5251}, \tag{23}$$

$$R^2 = 0{,}9991; \tag{24}$$

абсолютная скорость движения $V_{\text{ср}}$:

$$V_{\text{ср}} = 84{,}741\, R_{kp}^{0{,}5291}, \tag{25}$$

$$R^2 = 0{,}9987. \tag{26}$$

Из анализа уравнений регрессии (3) – (14) видно, что динамика параметров относительных скоростей движения ($\overline{V}_{\text{П}}$, $\overline{V}_i^{\text{ср}}$) у высокоскоростных поездов с активной и пассивной системами наклона кузовов вагонов при движении в кривых участках железнодорожного пути описывается полиномиальной зависимостью второй или третьей ($\overline{V}_i^{\text{ср}}$) степени, в то время как изменение абсолютных скоростей движения ($V_1 \ldots V_3$), включая относительную скорость $\overline{V}$, характеризуется степенной функцией. Причем в принятом нами диапазоне изменения радиусов кривизны относительная погрешность расчетов упомянутых выше параметров составляет 0,08 – 0,87 %, что обеспечивает точность вычислений в 99,92 – 99,13 %.

Таким образом, полученные нами уравнения регрессии и параметры скоростей движения высокоскоростных поездов с разными системами наклона кузовов вагонов в кривых различного радиуса кривизны будут полезны специалистам железнодорожного транспорта, работа которых сопряжена с организацией движения и эксплуатацией высокоскоростного пассажирского подвижного состава на участках железных дорог, в том числе с перевозочным процессом электропоездов *«Afrosiyob»* в условиях ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари», а также связана с разработкой рекомендаций и мероприятий по повышению эффективности использования этого вида электрического транспорта.

Список литературы

1. Ульджабаев, К. У. Развитие скоростного движения на железных дорогах Узбекистана [Текст] / К. У. Ульджабаев, В. К. Ярашова. – Т.: Экстремум Пресс, 2010. – 136 с.

2. Лувишис, А. Л. Высокоскоростные поезда на железных дорогах стран – членов ОСЖД [Текст] / А. Л. Лувишис / Бюллетень ОСЖД. – Варшава, 2012. – № 4. – С. 17 – 27.

3. Аблялимов, О. С. К вопросу организации высокоскоростного движения пассажирских поездов на участке Ташкент – Самарканд [Текст] / О. С. Аблялимов, О. М. Курбанов // Актуальные вопросы высокоскоростного движения / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – С. 10 – 13.

4. Аблялимов, О. С. К путевой инфраструктуре высокоскоростных железных дорог [Текст] / О. С. Аблялимов, С. С. Ботирова / XI межвуз. науч.-практ. конф. «Молодой научный исследователь» / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – С. 43 – 45.

5. Аблялимов, О. С. К анализу скорости движения высокоскоростных поездов в кривых участках железнодорожного пути [Текст] / О. С. Аблялимов // Международная научно-практическая конференция «Транспорт-2013» / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2013. – С. 58 – 60.

6. Аблялимов, О. С. К исследованию высокоскоростного движения на железных дорогах Узбекистана [Текст] / О. С. Аблялимов, В. С. Кудряшов // Turdosh texnik o'kuv muassasalari ijodkor yoshlarining birinchi slyoti. –Ташкент: TADI, 2013. – С. 47 – 51.

7. Трофимович, В. В. Высокоскоростной электрический транспорт [Текст] / В. В. Трофимович / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2008. – 100 с.

8. Аблялимов, О. С. О перспективах развития высокоскоростного железнодорожного транспорта на железных дорогах Узбекистана [Текст] / О. С. Аблялимов, В. С. Кудряшов // Актуальные вопросы высокоскоростного движения / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – С. 28 – 32.

References

1. Ul'dzhabaev K. U., Iarashova V. K. *Razvitie skorostnogo dvizheniia na zheleznykh dorogakh Uzbekistana* (Development of high-speed railways in Uzbekistan). Tashkent: Ekstremum Press, 2010, 136 p.

2. Luvishis A. L. High-speed trains on the railways of the OSJD member countries. OSJD Bulletin [Vysokoskorostnye poezda na zheleznykh dorogakh stran-chlenov OSZhD]. *Biulleten' OSZhD – OSJD Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 17 – 27.

3. Ablialimov O. S., Kurbanov O. M. To the organization of high-speed passenger trains on the Tashkent – Samarkand [K voprosu organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniia passazhirskikh poezdov na uchastke Tashkent – Samarkand]. *Aktual'nye voprosy vysokoskorostnogo dvizheniia – Topical issues of high-speed*, 2013, pp. 10 – 13.

4. Ablialimov O. S., Botirova S. S. To track high-speed rail infrastructure [K putevoi infrastrukture vysokoskorostnykh zheleznykh dorog]. *XI mezhvuzovskaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia «Molodoi nauchnyi issledovatel'»* (XI Interuniversity scientific and practical conference «Young Researcher»). Tashkent, 2013, pp. 43 – 45.

5. Ablialimov O. S. To the analysis of the speed of high-speed trains in the curved sections of railway track [K analizu skorosti dvizheniia vysokoskorostnykh poezdov v krivykh uchastkakh zheleznodorozhnogo puti]. *Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia «Transport – 2013»* (International Scientific and Practical Conference «Transport – 2013»). Rostov-na-Donu, 2013, pp. 58 – 60.

6. Ablialimov O. S., Kudriashov V. S. The investigation of high-speed railways in Uzbekistan [K issledovaniiu vysokoskorostnogo dvizheniia na zheleznykh dorogakh Uzbekistana]. *Turdosh texnik o'kuv muassasalari ijodkor yoshlarining birinchi slyoti*, 2013, pp. 47 – 51.

7. Trofimovich V. V. *Vysokoskorostnoi elektricheskii transport* [High-speed electric vehicles]. Khabarovsk, 2008, 100 p.

8. Ablialimov O. S., V. S. Kudriashov On the prospects of high-speed rail on the railways of Uzbekistan [O perspektivakh razvitiia vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta na zheleznykh dorogakh Uzbekistana]. *Aktual'nye voprosy vysokoskorostnogo dvizheniia – Topical issues of high-speed*, 2013, pp. 28 – 32.

УДК 621.331:621.331

В. Д. Бардушко, В. А. Ушаков

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ В МЕЖПОДСТАНЦИОННОЙ ЗОНЕ СРЕДСТВАМИ MATLAB

При моделировании систем тягового электроснабжения, отражающем электрические процессы взаимодействия системы тягового электроснабжения и подвижных электрических нагрузок (электровозов и электропоездов), одним из элементов которых является организация имитации передвижения поездов в пространстве. Эффект перемещения поездов в имитационном моделировании (ИМ) в среде MatLab по заданному графику движения на анализируемом участке приводит к необходимости последовательного переключения моделей электроподвижного состава (ЭПС) к тяговой сети таким образом, что реализуется эффект его перемещения по участку. Однако в этом случае возникают процессы, реально не имеющие места в действительности. Это связано с реализацией дискретного способа моделирования перемещения, характеризующегося тем, что ЭПС, находящийся на одной ячейке – модели тяговой сети[1] в один момент времени, в последующий скачком переходит на другую. При этом ЭПС предыдущей ячейки отключается, а на ячейку следующей включается. При этом возникают не существующие в действительности процессы коммутации, искажающие результаты исследований.

Методу снижения отрицательных последствий от таких искажений и посвящена данная статья.

Возможность моделирования систем электроснабжения в среде MatLab практически с любой топологией и широкой реализацией электроэнергетических элементов при формировании модели делает его мощным инструментом анализа работы любых систем тягового электроснабжения.

Для анализа работы систем тягового электроснабжения (СТЭ) может быть использовано два метода имитационного моделирования – метод Монте-Карло, или метод статистических испытаний [1, 2], и метод, непосредственно воспроизводящий ход процессов в реальной последовательности событий (динамическая имитация).

В первом случае отдельные события последовательности не зависят друг от друга и получаемый искомый материал может выступать в качестве выборки для получения интегральных характеристик процесса, не зависящих от порядка следования отдельных элементарных событий. Однако относительно небольшой объем исходных данных в этом методе делает целесообразным его использование при решении таких ответственных задач, как определение среднеквадратичных (эффективных) токов в расчетных элементах системы с целью оценки ее устойчивости к нагреванию. Средние значения, например, токов, определяются с целью анализа перерабатываемого количества электроэнергии. Средние значения напряжения необходимы для оценки важнейшего показателя работы электрической железной дороги – оценки ее пропускной способности, так как от этого показателя зависит время хода поезда по расчетным участкам и, следовательно, целый ряд других экономических показателей, среди которых время оборота подвижного состава, время доставки грузов и т. д. Необходимая исходная информация для такого моделирования состоит из данных о топологии системы электроснабжения, электрических характеристик ее отдельных элементов и данных о законах распределения задающих токов межпоездных интервалов. Первый закон распределения необходим для «розыгрыша» каждого последующего события, второй – для «розыгрыша» мест размещения ЭПС в модели. Упомянутые законы распределения изучены рядом исследователей. Так, в источниках [4 – 10] отмечается, что распределение токов хорошо описывается нормальным либо усеченным нормальным распределением. Распределение межпоездных интервалов, как показано в работах [9, 10], может быть описано распределением Вейбулла или экспоненциальным законом распределения, как это показано в источ-

[1] Следует отметить, что ячейка-модель тяговой сети отражает ее пространственные свойства и содержит информацию, как о распределенных параметрах, так и о протяженности части тяговой сети, которая моделируется этой ячейкой.

нике [6]. Каждый из этих законов требует для конкретного его формирования статистической информации о средних и среднеквадратичных значениях, которые без каких-либо особых сложностей могут быть получены для исследуемого объекта.

Однако в области анализа работы систем тягового электроснабжения есть задачи, решение которых возможно только при реализации реальной последовательности хода событий во времени, позволяющей сохранять логическую связь каждого предыдущего события с последующим. В частности, оценка старения (износа) изоляции отдельных электроэнергетических объектов сопряжена с вычислением температуры расчетной точки через сложную связь с током. Температура, в свою очередь, определяет износ изоляции через показательную зависимость. Другим примером необходимости имитационного моделирования с исполнением реальной последовательности хода событий во времени является исследование реакции системы на возмущающие факторы [3].

Особенности формирования имитационной модели систем тягового электроснабжения в среде MatLab с перемещающимися нагрузками. Второй метод имитационного моделирования осложняется необходимостью не только воспроизведения динамики[2] процесса в электрических цепях, но и необходимостью имитации перемещения поездов на анализируемом участке в соответствии с исполненным или планируемым графиком их движения. И физические, и виртуальные модели в этом случае предполагают имитировать последовательность событий посредством следующих друг за другом большого числа отдельных дискретных событий, разделенных малыми временными интервалами. Чем точнее требуется получить результат, тем меньше шаг дискретизации процесса во времени [4 – 7]. Графическая иллюстрация такого моделирования приведена на рисунке 1.

Для реализации эффекта перемещения на модели всего участка расставляются электроподвижные нагрузки (ЭПН), отстоящие друг от друга на расстоянии $\Delta\ell$, определяемом шагом дискретизации процесса Δt. На рисунке 1 отражены три поезда на участке с токами $I_{1,t}$, $I_{2,t}$, $I_{3,t}$,[3] движущиеся слева направо. В первый момент времени индекс t равен 1, т. е. $I_{1,1}$, $I_{2,1}$, $I_{3,1}$, во второй – 2 и т. д. Остальные поезда, расставленные в модели в этот момент времени, не включены. Во второй момент времени электроподвижные нагрузки (электровозы) с токами, $I_{1,1}$, $I_{2,1}$, $I_{3,1}$ отключаются, но включаются электроподвижные нагрузки с токами $I_{1,1}$, $I_{2,1}$, $I_{3,1}$ и т. д. для последующих моментов времени, что приведет к имитации передвижения электровозов с поездами. Каждая «выхваченная» из непрерывно текущего времени схема обычно называется мгновенной схемой (МС) [6]. Таким образом, моделирование по второму методу, когда он востребован, приводит к усложнению в сравнении с первым и вызвано необходимостью управлять процессом моделирования во времени в соответствии с расчетными графиками движения поездов.

Очевидно, что переходы от отдельных событий, имитирующие график движения поездов (ГДП), могут быть реализованы переключением электрических нагрузок, в данном случае электроподвижного состава, брэйкерами модели. Это определяет лишь технологию реализации графика движения, но не реальный процесс, в котором такого рода коммутация может не иметь места. Такого рода искусственная коммутация приводит к несуществующим в реальности переходным процессам и, следовательно, нежелательным искажениям результатов, что чрезвычайно важно для исследования показателей качества электроэнергии.

Необходимость использования принципа предвключенного состояния ЭПС в ИМ и формирование схем моделей. Для исключения отрицательных последствий такой реализации модели ниже предлагается метод, реализация которого в значительной мере снижает нежелательные процессы.

---

[2] В данном случае целесообразно воспользоваться определением динамики процесса из работы [3], где указывается, что под “…динамической системой в широком смысле понимается объект, функционирующий в непрерывном времени, непрерывно наблюдаемый и изменяющий свое состояние под воздействием внешних и внутренних причин...”.

[3] Первый индекс указывает номер поезда, второй – рассматриваемый момент времени.

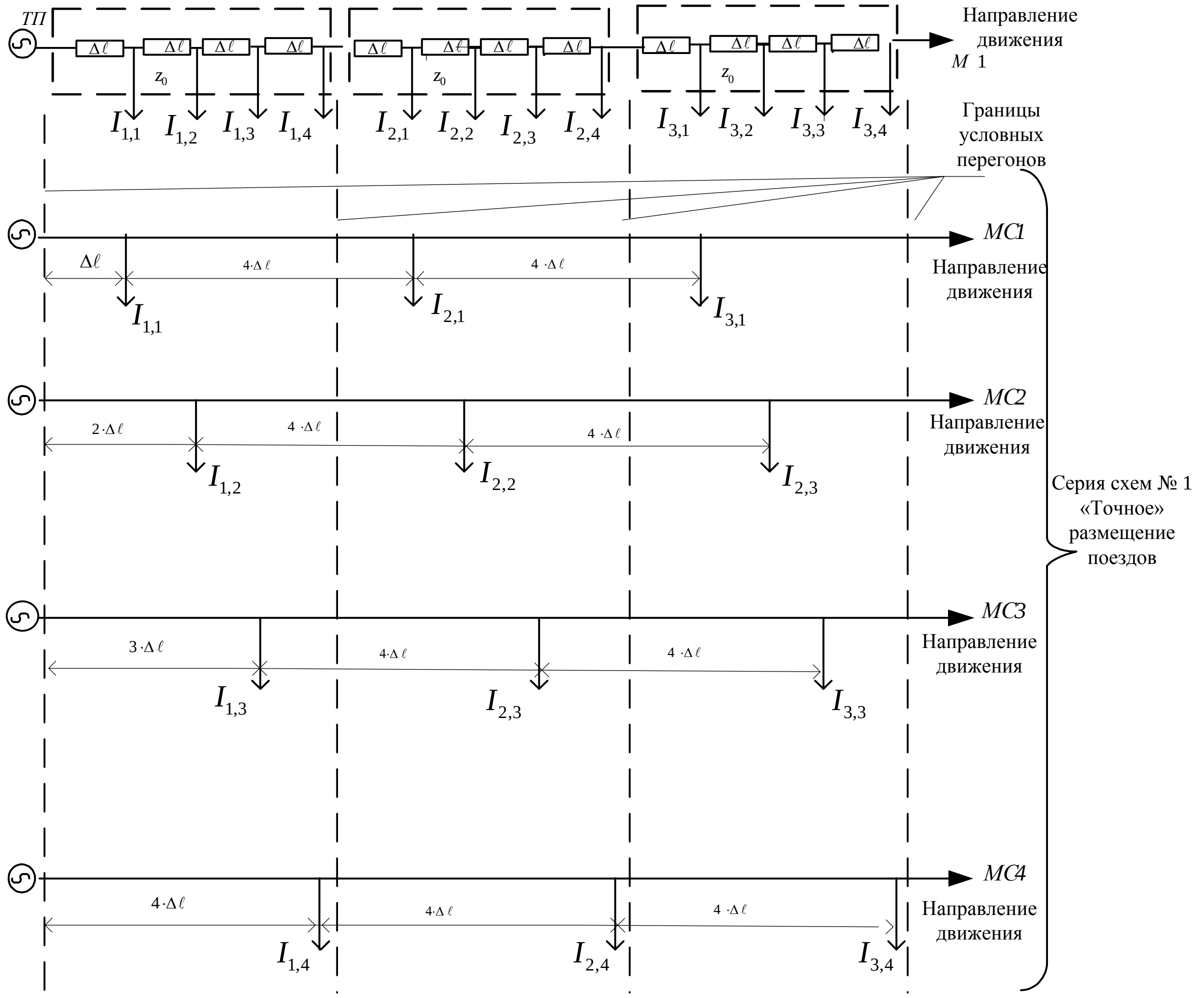


Рисунок 1 – К имитации перемещения поездов в модели по графику движения

Если реализовать модели всех ЭПС модели в режиме предвключенного состояния, потребляющих электроэнергию не от исследуемой системы тягового электроснабжения, а от вспомогательных «собственных» источников, то описанные выше нежелательные процессы коммутации будут проявляться в значительно меньшей степени. Способ реализации предварительной инициализации предвключенного режима электровоза (выпрямителя ЭПС) от дополнительного источника напряжения с последующим подключением ЭПС к контактной сети иллюстрируется схемой на рисунке 2.

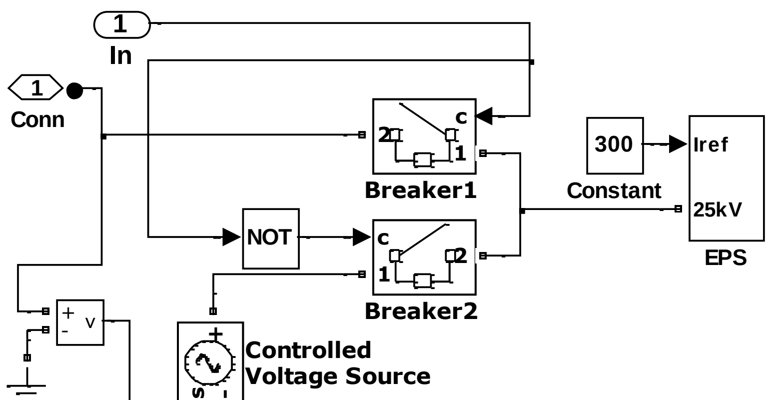


Рисунок 2 – Схемная реализация предвключенной модели электровоза

Модель выпрямительной нагрузки электровоза (EPS) в исходном состоянии подключается к управляемому источнику напряжения (Controlled Voltage Sourse) через Breaker2. Напряжением источника управляет измеритель напряжения, подключенный к зажиму Conn. В предвключенном состоянии выпрямитель EPS (рисунок 3) выходит на заданный блоком Constant уровень действующего значения тока первичной обмотки трансформатора ЭПС. По управляющему сигналу на входе In выпрямитель EPS отключается от управляемого источника напряжения и через Breaker1 подключается к зажиму Conn, т. е. к точке подключения токоприемника электровоза.

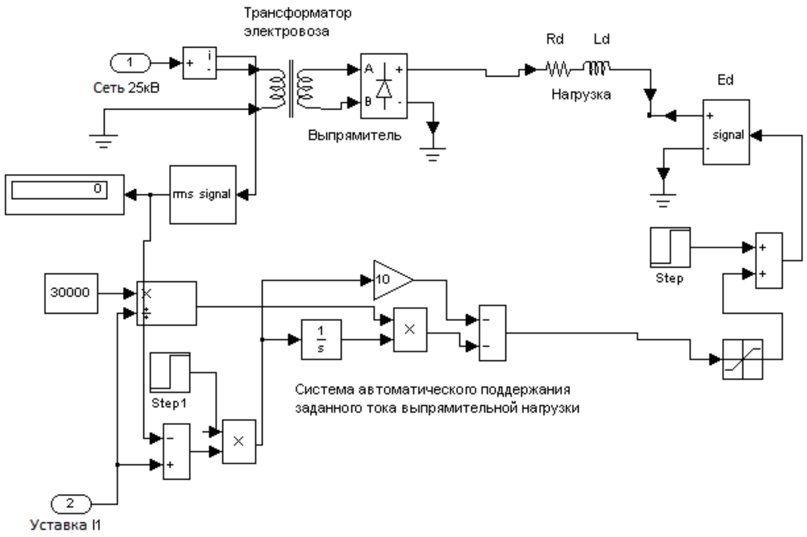


Рисунок 3 – Модель схемы выпрямительного агрегата электровоза

Модель тяговой выпрямительной нагрузки, т. е. модель электровоза (см. рисунок 3), содержит модели однофазного преобразовательного трансформатора и неуправляемого выпрямителя, работающего на последовательно включенные Xd, Rd и встречную ЭДС Ed. Ed формируется управляемым источником напряжения с использованием автоматической системы поддержания заданного тока через токоприемник электровоза. Принятый способ моделирования нелинейной выпрямительной нагрузки позволяет автоматически с высокой точностью поддерживать заданные значения тока нагрузки независимо от уровня напряжения в точке ее подключения[4]. В качестве EPS возможно использование моделей тиристорных выпрямителей с зонно-фазовым регулированием с системами выведения на режим как по току, так и по мощности. Время выведения выпрямителя на режим в предвключенном состоянии составляет порядка 0,2 с модельного времени. Переходный процесс выхода выпрямителя на режим после переключения к токоприемнику занимает 0,02 – 0,03 с. Таким образом, интервал дискретности коммутации последовательно распределенных по тяговой сети EPS может составлять 0,2 с.

Модель двухпутного участка с узловой схемой питания с коммутируемыми ЭПС представлена на рисунке 4.

В состав модели входят две подсистемы – Subsystem и Subsystem1, моделирующие соответственно четный и нечетный пути, измерители мгновенных и действующих значений токов плеч питания, измерители несинусоидальности токов (Total Harmonic Distortion) и блоки Фурье для вычисления составляющих высших гармоник тока. Для отстройки от переходных составляющих в сигналах THD и Fourier применены элементы выборки-хранения Sample & Hold (S/H).

---

[4] Это соответствует принятой практике представления тяговых нагрузок их токами. Целесообразность этого доказывается в источнике [7].

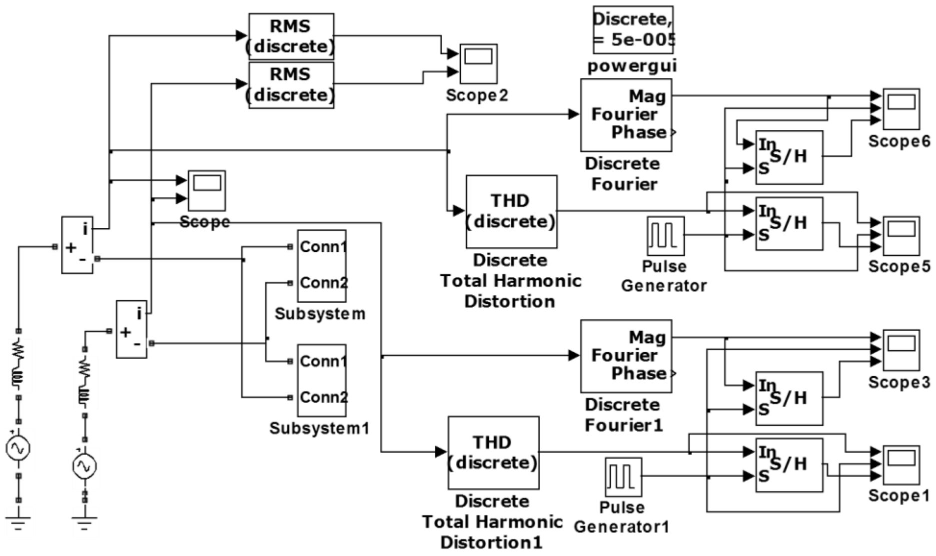


Рисунок 4 – Модель двухпутного участка с узловой схемой питания с коммутируемыми ЭПС

Тяговая сеть (рисунок 5) разделена на двадцать фрагментов – RL1 – RL20. В начале и в конце каждого фрагмента присоединены модели электровозов EPS1 – EPS21. Сигналы подключения длительностью 0,1 с формируются таймером и распространяются по цепочке элементов задержки (Transport delay). Время задержки каждого элемента – 0,1 с. Количество импульсов, формируемых таймером, соответствует числу электровозов, перемещающихся по этому пути.

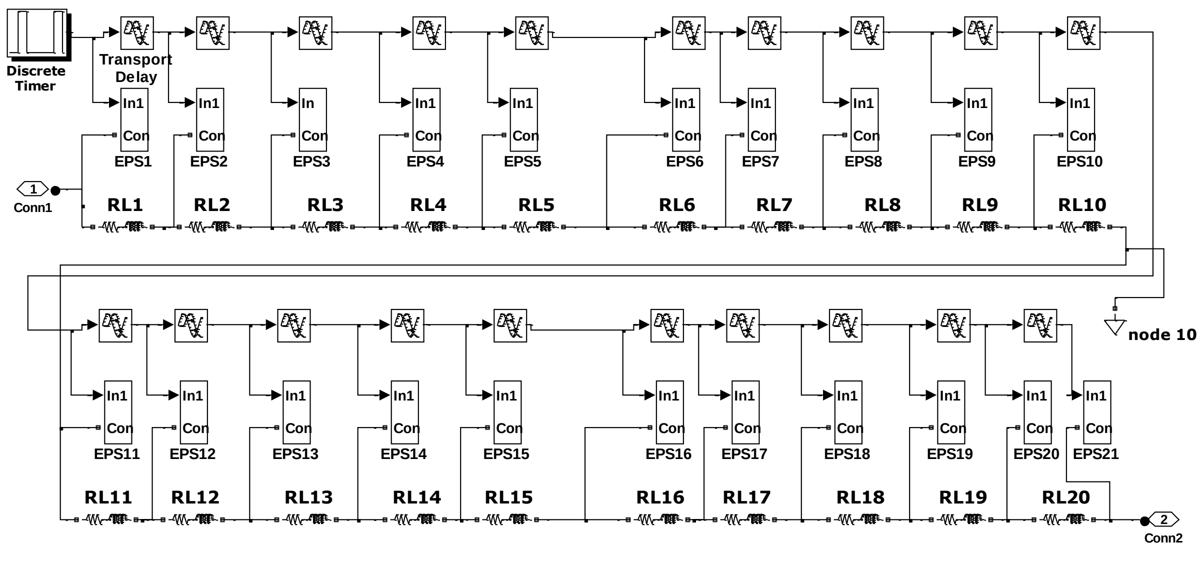


Рисунок 5 – Модель одного пути тяговой сети с коммутируемыми электровозами

Модель второго пути присоединена встречно-параллельно модели первого пути, что позволяет моделировать встречное движение по четному и нечетному путям.

В качестве иллюстрации отстройки от переходных составляющих в сигналах действующих значений токов с помощью элементов выборки-хранения Sample & Hold (S/H) на рисунке 8 приведены осциллограммы этих токов после обработки, а на рисунке 9 и 10 – осциллограммы амплитуды третьей гармоники тока плеча и THD[5] тока плеча до и после обработки.

[5] THD-Total Harmonic Distortion – коэффициент гармонических составляющих, оценивающий искажение форм кривых.

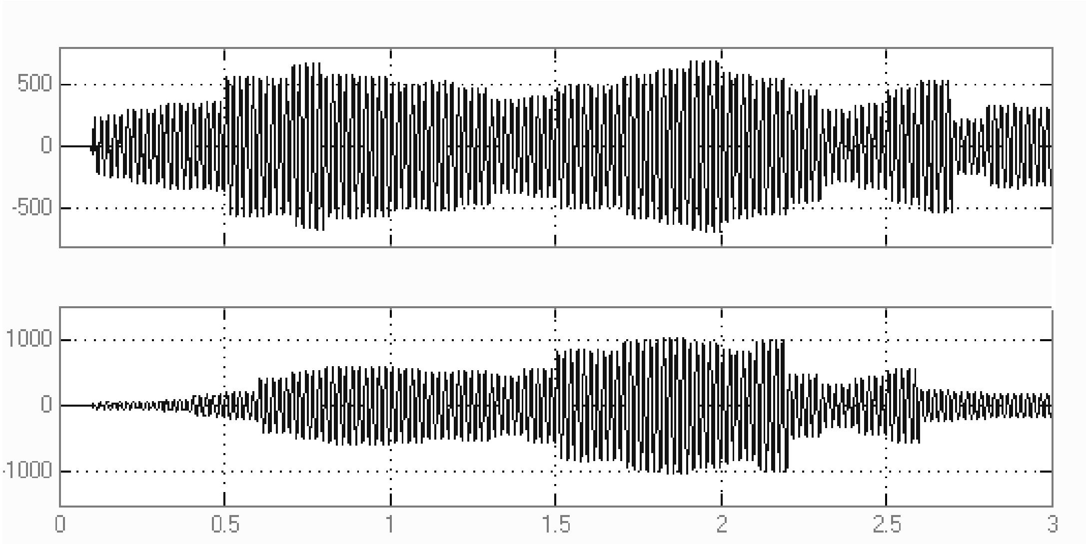


Рисунок 6 – Мгновенные значения токов плеч питания при встречном перемещении двух электровозов по четному и нечетному путям

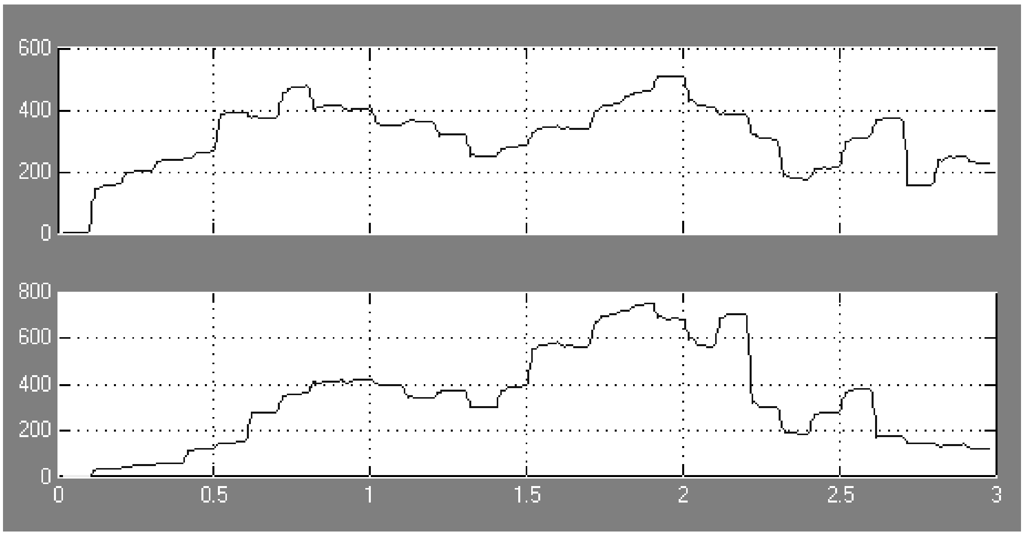


Рисунок 7 – Токи плеч при встречном перемещении двух ЭПС после преобразования в действующие значения

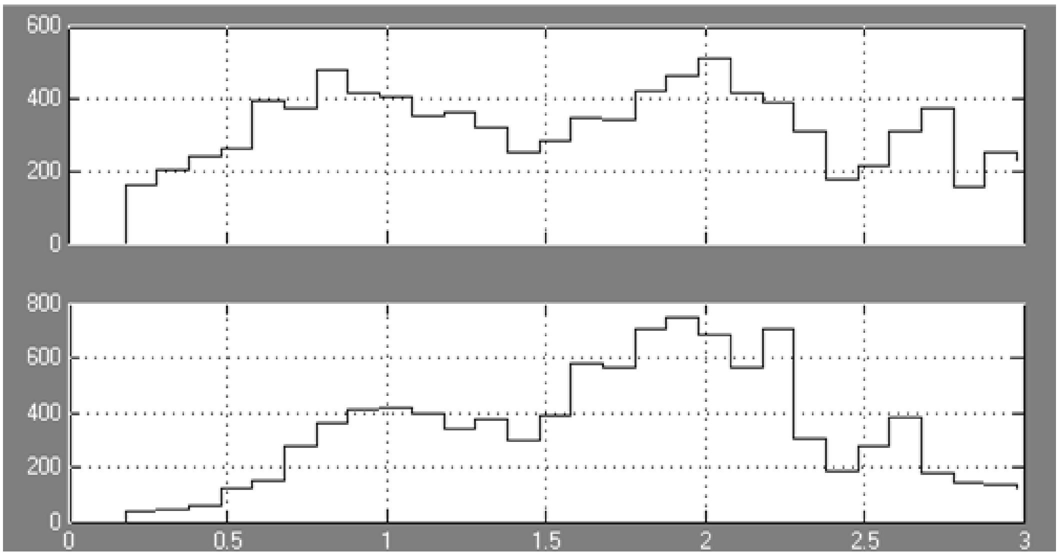


Рисунок 8 – Действующие значения токов плеч при встречном перемещении ЭПС после дискретизации с использованием элементов выборки-хранения

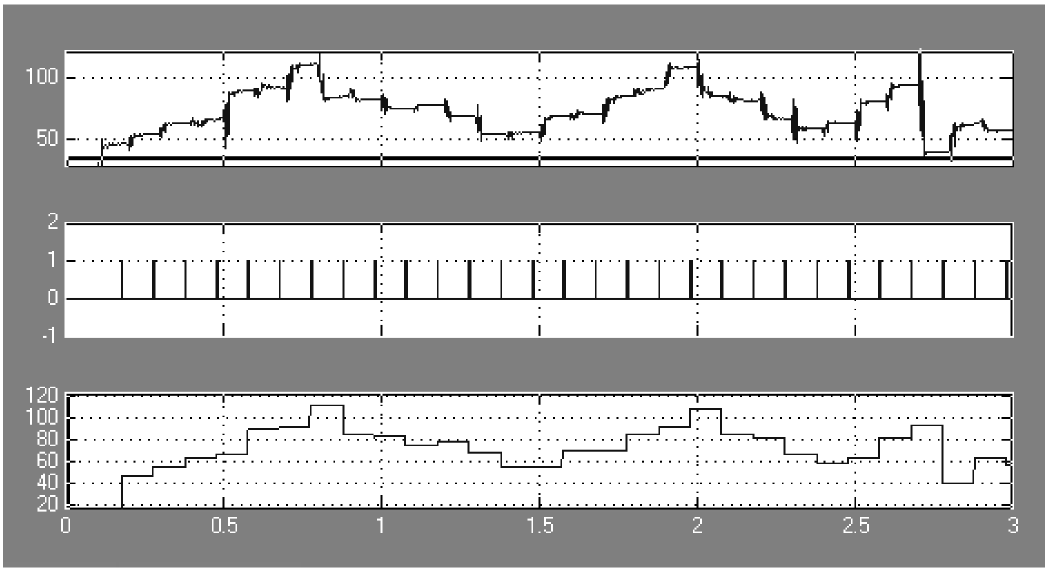


Рисунок 9 – Амплитуда третьей гармоники тока левого плеча до и после элемента выборки-хранения

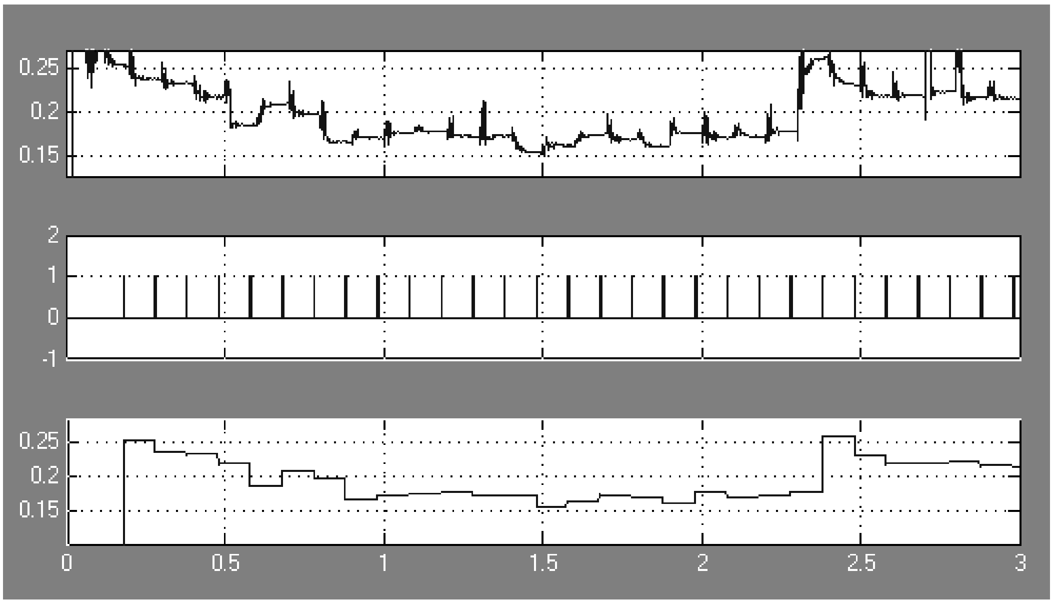


Рисунок 10 – THD тока левого плеча до и после элемента выборки-хранения

Область применения предлагаемого способа моделирования электроподвижных нагрузок. Преимущественной областью применения рассмотренных выше принципов и сформированных на их основе моделей систем тягового электроснабжения являются исследования ряда показателей качества электроэнергии и прежде всего показателей, характеризующих формы кривых тока и напряжения. Кроме того, более точная имитация процессов, связанных с формами кривых тока и напряжения, позволяет решать вопросы для повышения надежности работы устройств автоматики и релейной защиты. Это особенно актуально на участках с рекуперативным торможением, характеризующимся повышенным содержанием гармоник в кривых тока и напряжения. Предлагаемая модель дает возможность получения более точных результатов о составе и уровнях гармоник, что в свою очередь повышает точность прогностических расчетов, связанных с оценкой дополнительного старения твердой изоляции трансформаторов, а также дополнительного старения конденсаторов компенсирующих установок.

Необходимость совершенствования режимов работы систем тягового электроснабжения эксплуатируемых систем, а также решение вопросов их проектирования требует современных инструментальных методов, каковыми являются имитационные модели, в частности, реализуемые в MatLab. Организация эффекта перемещения электровозов в имитационных моделях, реализуемых в среде MatLab по заданному графику движения поездов, приводит к тому, что имеют место переключения в моделях ЭПС, которых нет в реальном процессе. Это приводит к появлению ложной информации о составе и уровне гармоник в системе тягового электроснабжения и не дает возможности получать достоверные показатели качества электрической энергии, привлекаемые для решения ряда задач.

В статье рассмотрены методы, позволяющие реализовать такие модели с наибольшей точностью и существенно снижающие погрешности, вызываемые особенностями построения моделей. Предложенная модель предвключенного электровоза является тем направлением, которое позволяет достичь поставленной цели и решения перечисленных выше задач.

Список литературы

1. Биндер, К. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике [Текст] / К. Биндер, Д. В. Хеерман. – М.: Наука; Физматлит, 1995. – 144 с.

2. Краковский, Ю. М. Вероятностный анализ безубыточности грузовых перевозок на основе метода Монте-Карло [Текст] / Ю. М. Краковский, И. А. Домбровский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 1 (13). – С. 125 – 130.

3. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 356 с.

4. Марквардт, Г. Г. Исходные положения по созданию математической модели процесса работы устройств электроснабжения электрических железных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт // Сб. науч. тр. ВЗИИТа / Всерос. заочный ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 1969. Вып. 37. – С. 46 – 52.

5. Марквардт, К. Г. Косвенные способы определения потерь электрической энергии в тяговой сети [Текст] / К. Г. Марквардт, А. Н. Кувичинский, Е. Н. Давыдав // Сб. науч. тр. МИИТа / Московский ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 1969. – Вып. 302. – С. 102 – 108.

6. Марквардт, Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения [Текст] / Г. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1972. – 204 с.

7. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

8.Тимофеев, Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками [Текст] / Д. В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972. – 267 с.

9. Мирошниченко, Р. И. Режимы работы электрифицированных участков [Текст] / Р. И. Мирошниченко. – М: Транспорт, 1982. – 207 с.

10. Решение задач энергоснабжения на электронных машинах [Текст] / Р. И. Мирошниченко, М. С. Гочуа и др. – М: Транспорт, 1971. – 168 с.

References

1. K. Binder, D. V. Kheerman *Modelirovanie metodom Monte-Karlo v statisticheskoi fizike* (Simulation Monte Carlo method in statistical physics). Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1995, 144 pp.

2. Krakovskii Iu. M., Dombrovskii I. A. Probabilistic analysis breakeven freight traffic on the basis of the Monte Carlo method [Veroiatnostnyi analiz bezubytochnosti gruzovykh perevozok na osnove metoda Monte-Karlo]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 1 (13), pp. 125 – 130.

3. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* (Modeling of complex systems). Moscow: Nauka, 1978, 356 p.

4. Markvardt G. G. Assumptions for creating a mathematical model of the process of the devices power supply of electric railways [Iskhodnye polozheniia po sozdaniiu matematicheskoi modeli protsessa raboty ustroistv elektrosnabzheniia elektricheskikh zheleznykh dorog]. *Sbornik nauchnykh trudov VZIITa – Collection of scientific works VNIIZhT*, 1969, no. 37, pp. 46 – 52.

5. Markvardt K. G., Kuvichinskii A. N., Davydav E. N. Indirect methods for determining the loss of electric power in traction network [Kosvennye sposoby opredeleniia poter' elektricheskoi energii v tiagovoi seti]. *Sbornik nauchnykh trudov MIITa – Collection of scientific works MIIT*, 1969, no 302, pp. 102 – 108.

6. Markvardt G. G. *Primenenie teorii veroiatnostei i vychislitel'noi tekhniki v sisteme energosnabzheniia* (The use of probability theory and computer technology in the power supply system) Moscow: Transport, 1972, 204 pp.

7. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Power supply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 pp.

8.Timofeev D. V. *Rezhimy v elektricheskikh sistemakh s tiagovymi nagruzkami* (Modes in electrical systems with traction load). Moscow: Energiia, 1972, 267 pp.

9. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* (Modes electrified sections). Moscow: Transport, 1982, 207 pp.

10. Miroshnichenko R. I., Gochua M. S. *Reshenie zadach energosnabzheniia na elektronnykh mashinakh* (Solving power electronic machines). Moscow: Transport, 1971, 168 pp.

УДК 621.436

В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Е. С. Лазарев

РАЗРАБОТКА ПРИБЛИЖЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЯЗИ ПРОЦЕССОВ ВПРЫСКА И СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ЛОКОМОТИВОВ

Предложена формальная методика построения приближенной математической модели связи закона подачи топлива и индикаторного процесса сгорания с учетом преимущественно физических свойств жидкого топлива: вязкости, плотности, сжимаемости и поверхностного натяжения, влияющих на цикловую подачу при других заданных константах горючего.

В составе дизельной системы топливоиспользования (ДСТИ) [1], рассматриваемой нами в качестве кибернетической системы управления, наиболее сложным для анализа и синтеза, эксплуатации и прогнозирования является объект управления (процессы в цилиндре дизеля), где преобразование тепловой энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в механическую работу происходит через ряд последовательных физико-химических, теплотехнических, массообменных и термодинамических преобразований, составляющих в совокупности круговой необратимый и незамкнутый рабочий цикл. Однако непосредственное изучение рабочего цикла все же затруднено сложностью всей совокупности факторов, влияющих на протекание процесса в целом. К таким факторам относятся режим работы дизеля, давление наддува, способ смесеобразования и регулировка и закон подачи топлива, скорость вращения вала, степень сжатия, состав и род топлива и многие другие факторы. В дизеле имеет место одновременное протекание термодинамических, газодинамических и тепломассообменных процессов, кратких по времени и накладывающихся друг на друга [2 – 4].

Одним из подходов для установления формальной связи и возможности последующего численного моделирования связи процессов сгорания и закона подачи топлива в дизеле является использование аппарата теории автоматического управления, где разработаны методы идентификации, учитывающие процессы функционирования системы управления в виде типовой кибернетической системы [6 – 9].

В выполненном исследовании предполагается, что весь комплекс процессов с момента начала подачи топлива до окончания его сгорания и тепловыделения является некоторой сложной самоуправляемой динамической системой.

На основе статистических методов решения задачи идентификации принято, что входная переменная и ее реакция (закон подачи и индикаторная диаграмма – экспериментальные кривые) представляют собой стационарные случайные функции, а объект управления (процесс сгорания) классифицирован как одномерный линейный с сосредоточенными параметрами.

В качестве критерия близости объекта использован критерий минимума математического ожидания заданной функции от разности входных сигналов объекта и модели.

Последовательный анализ функционирования системы топливоиспользования (СТИ) дизель-энергетической транспортной установки (ДЭТУ) позволяет представить процессы ее управления в виде кибернетической системы (рисунок 1), включающей в себя пять основных частей: управляемого процесса (объекта управления), в качестве которого принят процесс сгорания топлива $P(t)$; управляющей системы (топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунки); измерительной системы (комплекса контрольно-измерительных приборов (КИП) и устройств); задающей системы (формы профиля кулачкового вала, определяющего закон подачи топлива $\sigma(t)$: контролирующей системы (оператора или ЭВМ).

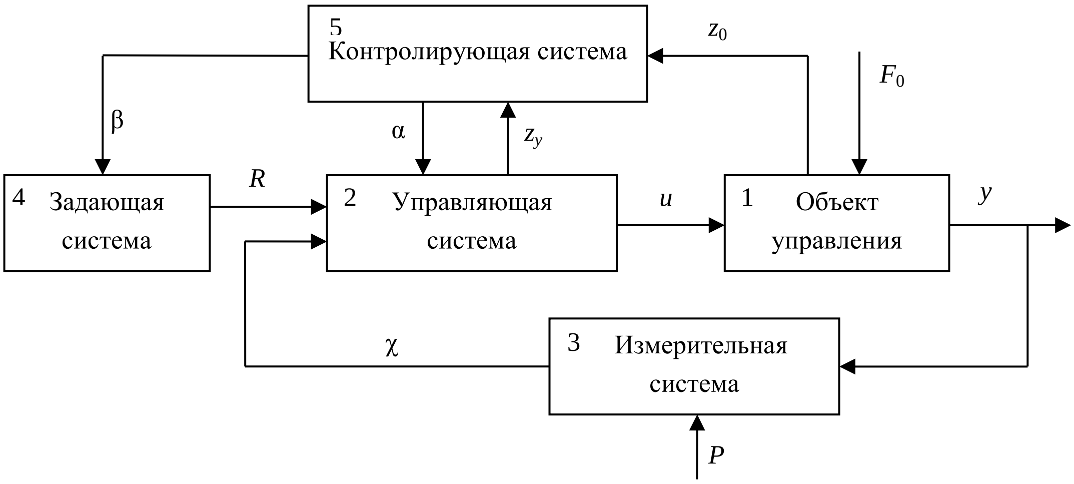


Рисунок 1 – Кибернетическая система управления СТИ ДЭТУ:
1 – процесс сгорания; 2 – ТНВД; 3 – КИП; 4 – форма профиля кулачкового вала; 5 – оператор

Эти части связаны между собой и образуют два контура управления: основной контур (2 – 1 – 3) с обратной связью через измерительную систему и дополнительный (5 – 4 – 2 – 1). Из функциональной схемы следует, что основной контур обеспечивает работу ДЭТУ, задавая периодически сигнал R в форме профиля кулачка ТНВД (закона подачи) конкретного типа дизеля. Это позволяет системе поддерживать значения выходных обобщенных координат y (определенной формы индикаторной диаграммы) таким образом, чтобы ошибка $E = R - X$ находилась в заданных пределах. В качестве выходной характеристики измерительной системы может быть принято среднее эффективное давление или среднее максимальное давление либо функция давления в цилиндре и частоты вращения коленчатого вала дизеля. К основному контуру предъявляются требования устойчивости и качества переходного процесса [10].

Контролирует работу дополнительный контур, обеспечивающий перенастройку алгоритма задающей системы и изменение алгоритма управляющей системы в целях нормального функционирования основного контура.

Управляющая система (ТНВД) подает сигналы (закон подачи топлива) на вход объекта управления, на выходе которого измерительная система обеспечивает выдачу информации, например, в виде индикаторной диаграммы, т. е. $P(t)$.

Такой принцип управления, заложенный в структуре системы, обеспечивает управление по отклонению и гарантирует высокое качество функционирования [10]. В случае возникновения неисправностей и отказов отдельных элементов ДЭТУ контролирующая система в соответствии с фактическим состоянием параметров (Z_0, Z_y) управления выдает корректирующие сигналы (α, β). На объект управления могут воздействовать случайные внешние возмущения F_0, случайные помехи *P*, поэтому сигналы *X* на выходе будут иметь приближенные значения выходных координат состояния процесса *Y* (индикаторной диаграммы).

Функцию $x = f(\sigma)$ можно определить или эмпирическим подбором аналитических зависимостей с отысканием численных коэффициентов, не имеющих определенного физического смысла, но описывающих с известным приближением наблюдаемые связи, или последовательной расшифровкой природы отдельных процессов всего цикла с последующим созданием общей теории горения. Первый способ пригоден для аналитического описания процесса сгорания на современном этапе, когда еще не разработана универсальная модель сгорания в дизелях, позволяющая управлять этим процессом на всех его этапах. Совокупность всех процессов, протекающих в цилиндре дизеля, определяет вид индикаторной диаграммы, которая является наиболее объективным критерием для оценки рабочего цикла и его основных показателей: КПД, максимального давления, скорости нарастания давления и др.

Поэтому важно выяснить, в каком направлении должен быть усовершенствован процесс сгорания, чтобы получить индикаторную диаграмму с наилучшими показателями, т. е. получить оптимальный рабочий цикл.

В настоящее время нет точного метода расчета, аналитически связывающего процессы топливоподачи, смесеобразования и сгорания в дизеле, поэтому не существует пока и расчетной оптимальной характеристики впрыска, пригодной для расчета и моделирования процессов в дизелях различных типов [2, 5].

Многочисленные экспериментальные и расчетные исследования дают основания полагать, что динамика подачи топлива существенно влияет на процесс сгорания в дизеле, а следовательно, и на его мощностные и экономические показатели работы. Для установления формальной связи (модели) процессов сгорания и закона подачи топлива воспользуемся аппаратом теории автоматического управления (ТАУ), где широко используются и разрабатываются методы идентификации с учетом процессов функционирования системы управления в виде кибернетической схемы, рассмотренной ранее, и особенностей протекания процессов в ее составных частях [5, 10]. При этом полагаем, что весь комплекс процессов в камере сгорания с момента начала подачи топлива и до окончания его сгорания является некоторой сложной самоуправляемой динамической системой.

Постановка задачи. Пусть имеем динамическую систему и на ее вход поступает сигнал в форме случайной функции $\sigma(t)$, т. е. закон подачи топлива в дизеле, на выходе – случайная функция $P(t)$, т. е. индикаторная диаграмма дизеля (изменение давления в цилиндре по времени). Заметим, что нас интересует преимущественно участок диаграммы – процесс сгорания.

Функции $\sigma(t)$ и $P(t)$ замеряются инструментально в виде графиков либо в форме таблиц (ординат этих функции).

Требуется найти оптимальный оператор, преобразующий функцию входа $\sigma(t)$ в функцию выхода $P(t)$ наилучшим образом (рисунок 2).

Добавим, что под условным наименованием «закона впрыска» подразумевают зависимость расхода топлива через форсунку от угла поворота коленчатого вала п.к.в. (φ°) или времени *(t)*: $\sigma = f(t)$ или $\sigma = f(\varphi°)$.

Другими словами, закон впрыска характеризуется относительным распределением топлива в процессе единичного впрыска.

Закон впрыска зависит от типа впрыскивающей системы, ее конструктивных параметров и от режима работы двигателя.

Как известно из теории ДВС, закон впрыска оказывает существенное влияние на динамические показатели протекания процесса сгорания.

Если располагать законом впрыска $\sigma = f(\varphi°)$ г/°п.к.в., можно построить зависимость $\sigma_\Sigma = f(\varphi°)$ (г/Δφ п.к.в.), у которой ординаты будут равны суммарному количеству топлива, поступившего в цилиндр за время от начала впрыска топлива до рассматриваемого момента *x,* например, за период задержки воспламенения.

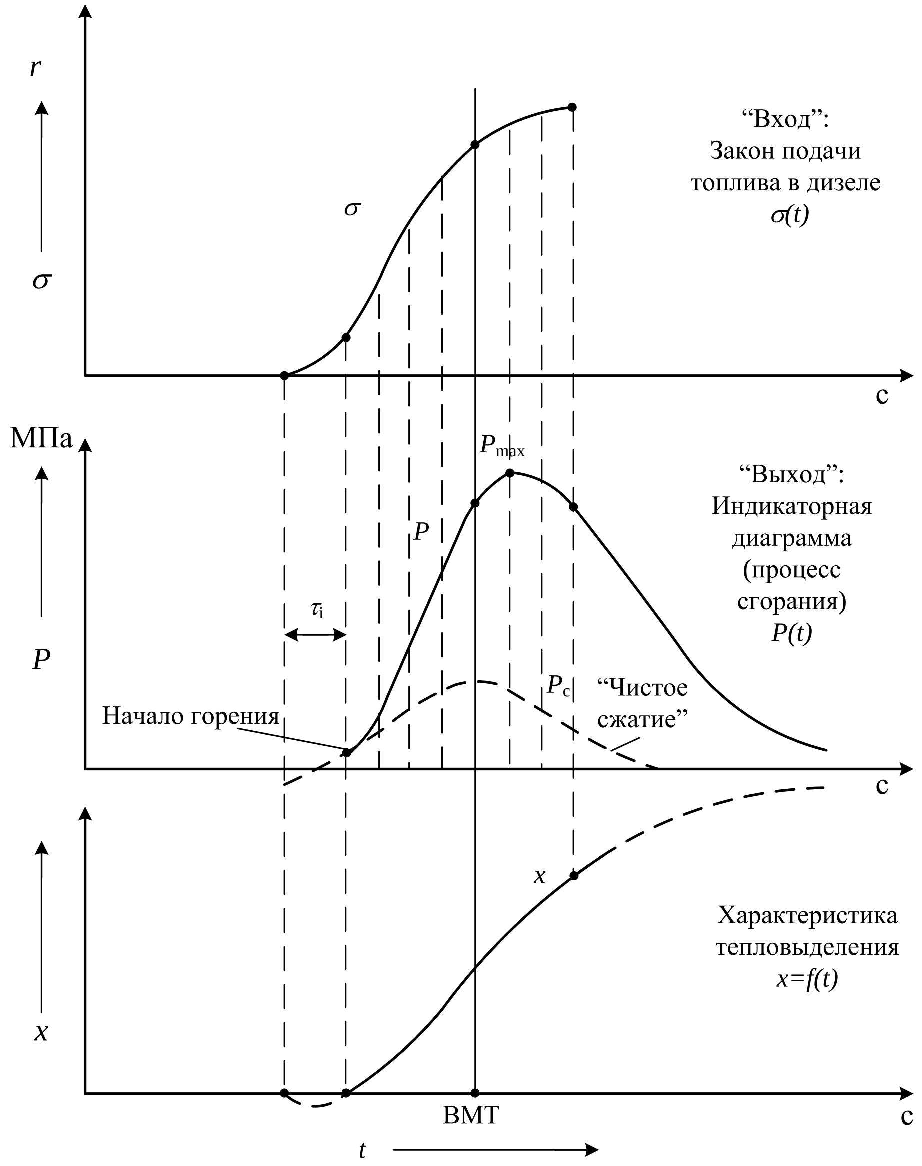


Рисунок 2 – Графическая интерпретация связи закона подачи топлива σ*(t)* и давления газов в цилиндре *P(t)* в период горения

На рисунке 3 показаны кривые нарастания суммарного количества подаваемого за один впрыск (1', 2') топлива σ_Σ, совмещенные с кривыми изменения давления газов в цилиндре (1, 2). Из кривых *c* и *d* видно, что при более крутом нарастании количества топлива (*d*) за период задержки самовоспламенения τ_1 поступает значительная доля топлива от всей цикловой подачи $\sigma_{ном}$, что вызывает резкое нарастание давления $\Delta P/\Delta\varphi$ и увеличение давления P_z, т. е. увеличивается «жесткость» работы дизеля, отрицательно влияющая на срок службы дизеля. Наоборот, при менее крутом нарастании количества подаваемого топлива (кривая 1) процесс сгорания будет более «мягким» и $P_г$ снизится, однако общая продолжительность впрыска увеличивается, что приводит к повышению удельного расхода топлива.

При прочих равных условиях закон впрыска определяется скоростью впрыскиваемого топлива. Обычно стремятся осуществить впрыск с возрастающей скоростью (кривая 1' на рисунке 3) с тем, чтобы уменьшить динамические показатели цикла P_z и $\Delta P/\Delta\varphi$, а также более рационально использовать воздушный заряд, находящийся в дальних «углах» камеры сгорания (последние порции топлива, имеющие максимальную скорость, проникают в самые отдаленные углы). При этом динамические показатели цикла 1' (P_z, $\Delta P/\Delta\varphi$) будут меньше по сравнению с циклом 2', поскольку меньшее количество топлива будет подано за время φ_1.

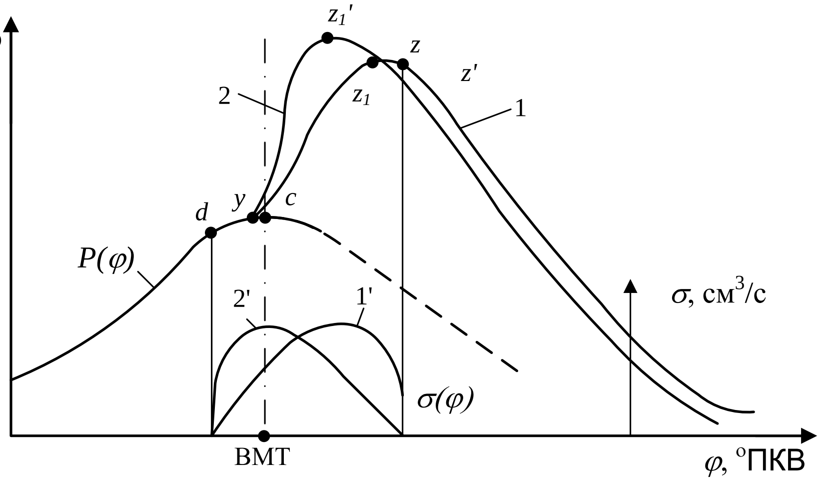


Рисунок 3 – Связь закона впрыска топлива *G* (φ) с характером изменения давления в цилиндре *P*(φ)

Если исходить из возможности использования статистических методов решения задачи идентификации, то будем считать, что воздействие (входная переменная системы) σ(t) и реакция (выходная переменная) P(t) представляют собой случайные функции. Требуется определить математический вид оператора этой динамической системы так, чтобы он был оптимальным с точки зрения возможно более точного воспроизведения реакции системы по входному сигналу. По физической сущности как входная переменная (закон подачи σ(t)), так и выходная (индикаторная диаграмма P(t)) являются случайными функциями, так как при фиксированном значении их аргумента (времени или угла поворота вала) их значения являются случайными величинами в силу воздействия на них ряда случайных факторов, которые заранее учесть нельзя. Это видно по осциллограммам процессов, снятых на пленку с помощью электроннолучевого индикатора, фиксирующего последовательные циклы, которые имеют вид ряда периодических случайных колебаний относительного некоторого среднего значения. Тогда можно рассматривать процессы σ(t) и P(t) как стационарные случайные, а построение модели может быть осуществлено только вероятностными методами. Объект управления классифицируем как одномерный линейный с сосредоточенными параметрами [10].

В большинстве случаев для целей управления необходимо математическое описание, устанавливающее связь между входными и выходными переменными, на базе которой может быть выработано такое управление объектом, которое обеспечило бы достижение заданной цели функционирования объекта. Применительно к решению поставленной конкретной задачи наиболее общим является случай, когда и воздействие, и реакция будут функциями одного и того же аргумента. Правило преобразования одной функции в другую называют оператором.

Понятие «оператор» является более общим, чем понятие «функция», и более общим, чем понятие «функционал». Если функция ставит в соответствие две переменные величины, а функционал – переменную величину и функцию, то оператор ставит в соответствие две функции времени, например, $P(t) = A\ \sigma(t)$. Здесь оператор обозначен буквой A. В соответствии с принятой классификацией объекта его характеристикой является оператор A_t. Случайные функции входа σ(t) и выхода P(t) могут быть измерены инструментально.

Тогда задача идентификации более точно сводится к определению не самого оператора A_t, а его оценки A_t*, которая и используется в дальнейшем. Целесообразно тогда потребовать близости оценки оператора A_t* к истинному значению оператора A_t в смысле некоторого критерия, т. е.

$$P^*(t)=A^*\ \sigma(t). \tag{1}$$

Чаще всего в качестве критерия близости объекта используется критерий минимума математического ожидания заданной функции от разности выходных сигналов объекта и модели. Наиболее удобен для реализации и аналитических исследований критерий минимума среднеквадратической ошибки

$$J = M[\varepsilon^2(t)]. \tag{2}$$

Воспользуемся схемой (рисунок 4) для вывода уравнения идентификации в общем виде.

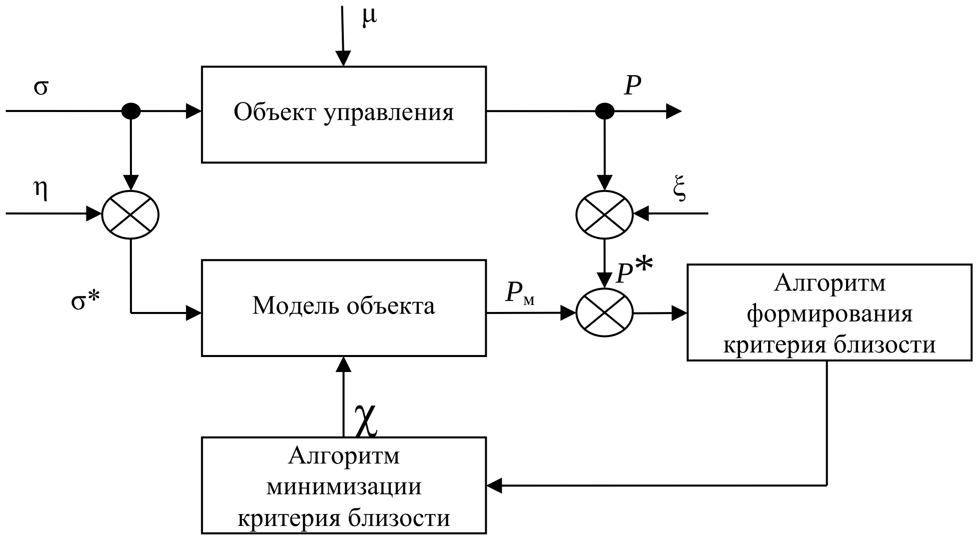


Рисунок 4 – Общая схема моделирования взаимодействия объектов

На рисунке 4 обозначено: μ, η, ξ, χ, σ*, P* – соответственно оперативное возмущение, помеха входной переменной, помеха в канале передачи, экспериментальные данные входа и выхода.

В математической статистике при решении подобных задач вводят функцию потерь $\rho(P_t\,, P_t^*)$, которая не зависит от оператора A_t. [10]. На математическое ожидание этой функции накладывают требование минимума

$$M[\rho(P_t\,, P_t^*)] \to \min \tag{3}$$

и в этом смысле понимают близость оценки A_t^* к истинному значению оператора A_t. Соотношение (3) будет выполнено, если потребовать минимум математического ожидания функции $\rho(P_t\,, P_t^*)$ при заданной случайной функции $\sigma(t)$, т. е.

$$M\left[\rho\left(P_t, \frac{P_t^*}{\sigma_s}\right)\right] \to \min. \tag{4}$$

Условием минимума (4) будет такое:

$$\frac{d}{dP_t^*} M\left[\rho\left(P_t, \frac{P_t^*}{\sigma_s}\right)\right] = 0. \tag{5}$$

Учитывая соотношение (2), условие (3) запишем в виде:

$$M\left[\left(P_t - P_t^*\right)^2\right] \to \min. \tag{6}$$

Тогда из выражения (5) получим уравнение для определения оптимальной оценки оператора A_t^*:

$$P_t^*(t) = A_t^* \cdot \sigma(t) = M\left[\frac{P(t)}{\sigma(t)}\right], \tag{7}$$

где $M\left[\dfrac{P(t)}{\sigma(t)}\right]$ – условное математическое ожидание выходной переменной относительно входной.

Из уравнения (7) следует, что оператор условного математического ожидания, т. е. регрессия выходной переменной $P(t)$ относительно входной $\sigma(s)$, дает оптимальный оператор объекта в классе всех возможных операторов.

Таким образом, определяя из опытных данных условное математическое ожидание выходной переменной относительно входной, получаем оптимальную (в смысле критерия минимума среднего квадратического отклонения) оценку оператора объекта.

Учитывая принятый метод идентификации и особенности решаемой задачи, оптимальный оператор будем искать в классе линейных операторов, а не среди всех возможных случайных величин. В настоящем исследовании воспользуемся принципом суперпозиции, который выполняется для линейного оператора.

Умножим среднюю и правую части уравнения (7) на входную случайную функцию σ(υ):

$$A_t^* \cdot \sigma(\nu) \cdot \sigma(s) = M\left[\frac{P(t)}{\sigma(s)}\right] \cdot \sigma(\nu). \tag{8}$$

Усредняя по входной переменной обе части последнего равенства, получим:

$$M\left[A_t^* \cdot \sigma(\nu) \cdot \sigma(s)\right] = M\left[M\left[\frac{P(t)}{\sigma(s)}\right] \cdot \sigma(\nu)\right]. \tag{9}$$

Тогда

$$M\left[A_t^* \cdot \sigma(\nu) \cdot \sigma(s)\right] = M\left[P(t) \cdot \sigma(\nu)\right]. \tag{10}$$

В силу коммутативности операторов M и A_t из уравнения (10) получаем:

$$A_t^* \cdot M\left[\sigma(\nu) \cdot \sigma(s)\right] = M\left[P(t) \cdot \sigma(\nu)\right]. \tag{11}$$

Не ограничивая общности, для линейного случая предположим, что математические ожидания случайных функций $\sigma(t)$ и $P(t)$ равны нулю, т. е. $M[\sigma(t)] = 0$ и $M[p(t)] = 0$. Тогда произведение под знаком математического ожидания в левой части выражения (11) представляет собой корреляционную функцию входного сигнала в виде

$$M\left[\sigma^0(\nu) \cdot \sigma^0(s)\right] = K_{\sigma\sigma}(\nu, s), \tag{12}$$

а произведение под знаком математического ожидания в правой части уравнения (11) есть взаимная корреляционная функция входного $\sigma(t)$ и выходного $P(t)$ сигналов:

$$M\left[P^0(t) \cdot \sigma^0(s)\right] = K_{P\sigma}(t, \nu), \tag{13}$$

Тогда выражение (11) можно переписать в виде:

$$A_t^* \cdot K_{\sigma\sigma}(\nu, s) = K_{P\sigma}(t, \nu). \tag{14}$$

В частном случае, когда случайные функции $\sigma(t)$ и $P(t)$ являются стационарными и стационарно связанными, оптимальная по критерию минимума среднего квадрата отклонения оценка оператора определится из уравнения:

$$K_{P\sigma}(t) = A_t^* \cdot K_{\sigma\sigma}(\tau - \lambda). \tag{15}$$

Весовая функция объекта $g(t,s)$ определится из интегрального уравнения

$$K_{P\sigma}(t, \nu) = \int_{t-T}^{t} g(t, s) K_{\sigma\sigma}(s, \nu) ds, \tag{16}$$

где $K_{\sigma\sigma}(s, \nu)$ – автокорреляционная функция случайной функции σ(t);

$K_{P\sigma}(t, \nu)$ – взаимная корреляционная функция случайных функций σ(t) и P(t);

T – интервал времени наблюдения.

В уравнении (14) неизвестны оператор и его параметры. Корреляционные функции оцениваются по результатам измерений входных и выходных сигналов реального объекта (дизельного двигателя) по известным формулам математической статистики [5]. Взаимная корреляционная функция случайных процессов σ(t) и P(t) определяются как корреляционный момент:

$$R_{\sigma P}(t_1,t_2)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}[\sigma-m_\sigma(t_1)][P-m_P(t_2)]P(\sigma,P,t_1,t_2)d\sigma dP, \qquad (17)$$

где $m_\sigma(t_1)$ и $m_P(t_2)$ – математические ожидания случайных процессов:

$m_\sigma(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\sigma(t)P(\sigma,t)d\sigma$; $m_P(t)=\int_{-\infty}^{\infty}P(t)P(P,t)dP$ – соответственно одно- и двухмерные плотности распределения вероятностей.

Если σ(t) и P(t) являются стационарными и стационарно связанными случайными процессами, то выражение (17) упрощается и записывается в виде:

$$R_{\sigma P}(t_1,t_2)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}[\sigma-m_\sigma][P-m_P]P(\sigma,P,\tau)d\sigma dP, \qquad (18)$$

где $\tau = t_1 - t_2$.

На практике принимают гипотезу о том, что исследуемые сигналы обладают свойством эргодичности по отношению к корреляционным функциям. Тогда для рассматриваемой нами задачи (стационарных случайных процессов) можно записать:

$$R_{\sigma P}(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}\left[\sigma(t)-m_\sigma\right]\left[P(t-\tau)-m_P\right]dt. \qquad (19)$$

Принятие гипотезы эргодичности позволяет определять корреляционные функции по центрированным реализациям случайных процессов, что сводится к вычислению среднего арифметического значения реализации и вычитанию его из всех исходных значений реализации.

Анализ характера протекания рабочего процесса дизеля по индикаторным диаграммам от цикла к циклу и синхронно снятые диаграммы законов подачи показывают [3, 4], что изменение характеристик этих процессов сказывается в основном на изменении среднего значения реализации, что позволяет выделить центрированием низкочастотную случайную составляющую.

Тогда уравнение для взаимной корреляционной функции центрированных случайных сигналов σ(t) и P(t) будет иметь вид:

$$R_{\sigma P}(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}\sigma(t)P(t-\tau)dt. \qquad (20)$$

При вычислении взаимной корреляционной функции на ЭВМ последнее выражение для центрированных реализаций будет таким:

$$R_{\sigma_1,\sigma_2}(k\cdot\Delta t)=\frac{1}{2N+1}\sum_{i=-N}^{N}\sigma_1(i\cdot\Delta t)\sigma_2\left[(i+k)\Delta t\right], \qquad (21)$$

где $k\cdot\Delta t$ – интервал времени сдвига (k = 0, 1, 2, … N – 1);

N – число измеряемых ординат функции.

Общий алгоритм определения корреляционной функции можно записать следующим образом.

Центрируются реализации исследуемых случайных процессов σ(t) и P(t).

В первом приближении оценивают высшую f_{max} и низшую f_{min} гармоники в исследуемых сигналах.

Определяют максимальное время корреляции сигнала из соотношения:

$$\tau_{max\geq}\frac{1}{f_{min}}. \qquad (22)$$

Выбирают интервал вычисления корреляционной функции в соответствии с требуемой точностью (примерно 2 %). Тогда должно быть: $T \approx 16\tau_{max}$.

Выбирают шаг квантования по времени:

$$\Delta t \le \frac{1}{10 f_{min}}. \tag{23}$$

Выбирают не менее 14 различных уровней квантования (для достижения точности 2 %).

Оценивают число вычисляемых координат:

$$N = \frac{T}{\Delta t} + 1. \tag{24}$$

Проводят расчет по алгоритму (21).

Наиболее полно идентифицируемые объекты описываются в терминах пространства состояний. Под состоянием объекта понимают совокупность величин, полностью определяющих его положение в данный момент времени.

Чаще всего моделью динамических объектов являются дифференциальные уравнения. Объекты с сосредоточенными параметрами описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

С учетом принятой схемы решения задачи наиболее общим в математическом плане описанием объекта управления будет представление последнего в виде дифференциального уравнения, которое для стационарного одномерного линейного объекта описывает его динамические свойства.

В качестве конкретного выражения оператора можно указать описание объекта таким дифференциальным уравнением:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i P(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^j \sigma(t)}{dt^j}, n \ge m. \tag{25}$$

Тогда построение математической модели объекта, т. е. нахождение его оператора, может осуществляться различными способами – по результатам теоретических исследований [3, 5], логического анализа, опытных данным [2] и т. п. В условиях нормального функционирования объекта (процесса сгорания в дизеле) задачей идентификации может являться определение коэффициентов уравнения (25), что связано с широкой постановкой экспериментальных исследований процессов топливоиспользования в дизелях [1 – 4].

С учетом изложенного, приближенный алгоритм определения динамических характеристик процесса сгорания, т. е. нахождение оператора объекта в классе линейных операторов можно представить в следующем виде.

Выбирают приближенное аналитическое уравнение для нормированной корреляционной функции входа $\sigma(t)$.

Рассчитывают средние квад-ратические отклонения входа $\sigma(t)$ и выхода $P(t)$.

Определяют вид приближенного уравнения нормированной взаимной кор-реляционной функции $R_{P\sigma}(\tau)$.

Составляют уравнения для корреляционной функции входа $K_{\sigma\sigma}(m)$ и взаимной корреляционной функции выхода $R_{P\sigma}(\tau)$.

Используя уравнение Винера – Хопфа, выводят интегральные уравнения для определения весовой функции.

Выводят уравнение передаточной функции, используя преобразования Лапласа.

Определяют конкретный вид дифференциального уравнения объекта из общего выражения (25).

На практике при индицировании дизелей используют различные датчики [4, 5].

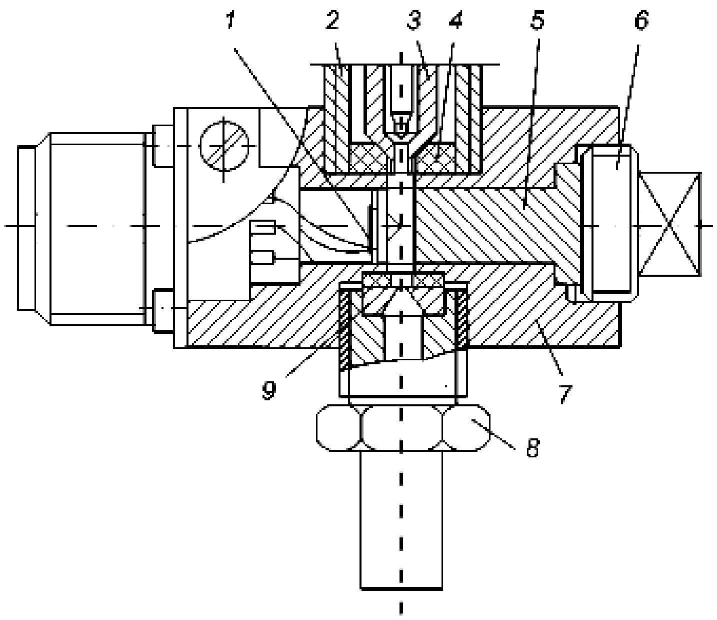


Рисунок 5 – Схема тензометрического датчика характеристики впрыска ТЗП-1: 1 – проволочный тензометрический преобразователь; 2 – гайка специальная; 3 – распылитель; 4 – прокладка распылителя; 5 – вытеснитель объема топлива; 6 – пробка; 7 – корпус датчика; 8 – штуцер; 9 – жиклер

Так, в Центральном НИИ Топливной аппаратуры (ЦНИИТА) разработан способ определения характеристики впрыска измерением давления датчиком топлива (рисунок 5) в специальной приемной камере, устанавливаемой за распылителем форсунки. Для измерения давления могут быть использованы датчики любого типа (тензометрические, пьезокварцевые, емкостные). Корпус датчика 7 устанавливается на распылитель 3 с помощью специальной гайки 2, что не требует изменения конструкции форсунки и не нарушает регулировки. Уплотняется распылитель прокладкой 4. Выход топлива из камеры происходит через жиклер 9 и штуцер 8, Приемная камера ограничена с одной стороны мембраной диаметром 10 мм и толщиной 0,8 – 1,0 мм, выполненной за одно целое с корпусом, с другой стороны – торцом вытеснителя объема 5, поджимаемого пробкой 6. Объем каналов и полости приемной камеры составляет 0,06 см^3. Проволочный тензометрический преобразователь 1 (рабочее плечо моста) наклеен на внешнюю сторону мембраны и термокомпенсационный – на недеформирующиеся стенки лаза. Благодаря жиклеру в камере создается противодавление впрыску, что приближает условия эксперимента к условиям работы ТА па двигателе.

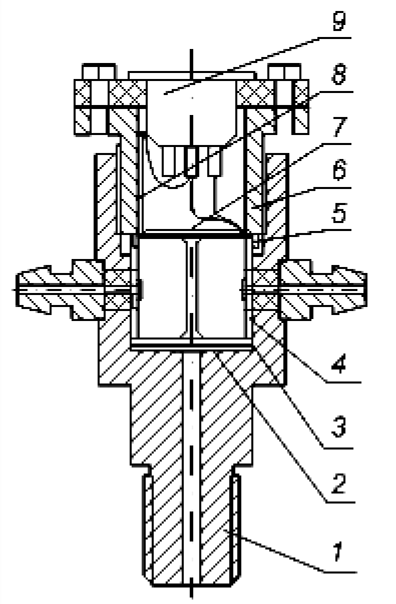


Рисунок 6 – Датчик давления: 1 – корпус датчика; 2 – чувствительный элемент; 3 – прокладка уплотняющая; 4 – втулка распорная; 5 – резиновое кольцо; 6 – гайка; 7 – тензометрический элемент; 8 – компенсатор; 9 – разъем

Чувствительный элемент 2 состоит из двух мембран, жестко соединенных между собой штоком. В полость датчика подводится охлаждающая жидкость. Датчик записывает изменения давления в зависимости от угла поворота коленчатого вала [4] (развернутую индикаторную диаграмму), т. е. функцию $P(t)$ при помощи усилителя осциллографа, либо выводом на ПЭВМ.

На рисунке 6 показано устройство датчика давления газов в цилиндре дизеля.

Указанные первичные преобразователи использовались нами ранее для записи диаграмм дизеля судового и тепловозного назначения [1, 3, 4].

Список литературы

1. Ведрученко, В. Р. Исследование динамики системы топливоиспользования дизельных энергетических установок [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. – 2014. – № 2 (18). – С. 47 – 55.

2. Жуков, В. П. Математическая модель связи процессов впрыска и тепловыделения [Текст] / В. П. Жуков, А. М. Павличенко // Судовые силовые установки: Сб. науч. тр. / Николаевский кораблестроительный ин-т. – Николаев, 1977. – Вып. 120. – С. 65 – 72.

3. Четвергов, В. А. Идентификация процесса сгорания углеводородного топлива в условиях тепловозного дизеля [Текст] / В. А. Четвергов, В. Р. Ведрученко, М. А. Плеханов // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / Московский ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 1996. – Т. 1. – С. 110, 111.

4. Ведрученко, В. Р. Методика индицирования среднеоборотного судового дизеля [Текст] / В. Р. Ведрученко // Передовой опыт и новая техника: Сб. ЦБНТИ МРФ / Центральное бюро научно-технической информации Минречфлота. – М., 1981. – Вып. 4. – С. 37 – 42.

5. Дворкин, В. Н. Расчет топливной аппаратуры [Текст] / В. Н. Дворкин, А. И. Исаев // Тр. Пермского СХИ / Пермский сельскохозяйственный ин-т. – Пермь, 1967. – Т. 47. – С. 86 – 116.

6. Райбман, Н. С. Что такое идентификация [Текст] / Н. С. Райбман. – М.: Наука, 1970. – 120 с.

7. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов [Текст] / А. М. Дейч. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

8. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 687 с.

9. Юсупов, Р. М. Элементы теории идентификации технических объектов [Текст] / Р. М. Юсупов. – М.: Оборониздат, 1974. – 202 с.

10. Райбман, Н. С Построение моделей процессов производства [Текст] / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.

References

1. Vedruchenko V. R., Krainov V. V. Investigation of the dynamics of fuel use of diesel power plants [Issledovanie dinamiki sistemy toplivoispol'zovaniia dizel'nykh energeticheskikh ustanovok]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 2 (18), pp. 47 – 55.

2. Zhukov V. P. Pavlichenko A. M. Mathematical model of communication processes injection and heat [Matematicheskaia model' sviazi protsessov vpryska i teplovydeleniia]. *Sudovye silovye ustanovki* (Ship power plants). Nikolaev, 1977, no. 120, pp. 65 – 72.

3. Chetvergov V. A. Vedruchenko V. R., Plekhanov M. A. Identification of combustion of hydrocarbon fuel in a diesel locomotive engines [Identifikatsiia protsessa sgoraniia uglevodorodnogo topliva v usloviiakh teplovoznogo dizelia]. *Aktual'nye problemy razvitiia zheleznodorozhnogo transporta: Tezisy dokladov 11 Mezhdunarodnoi nauno-prekticheskoi konferentsii* (Actual problems of development of rail transport: Abstracts International 11-nauno prekticheskoy Conference). Moskow, 1996, T. 1, pp. 110 – 111.

4. Vedruchenko V. R. Technique medium-speed marine diesel engine indexing [Metodika inditsirovaniia sredneoborotnogo sudovogo dizelia]. *Peredovoi opyt i novaia tekhnika – Best practices and new technology*, 1981, no. 4, pp. 37 – 42.

5. Dvorkin V. N., Isaev A. I. Calculation of fuel equipment [Raschet toplivnoi apparatury]. *Trudy Permskogo SKhI – Proceedings of the Perm Agricultural Institute*, 1967, T. 47, pp. 86 – 116.

6. Raibman N. S. *Chto takoe identifikatsiia* (What identification). Moskow: Nauka, 1970, 120 p.

7. Deich A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov* (Methods of identification of dynamic objects). Moskow: Energiia, 1979, 240 p.

8. Eikkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniia* (Identity-based control systems). Moskow: Mir, 1975. 687 p.

9. Iusupov R. M. *Elementy teorii identifikatsii tekhnicheskikh ob"ektov* (Elements of the theory of identification of technical objects). Moskow: Oboronizdat, 1974, 202 p.

10. Raibman,N. S *Postroenie modelei protsessov proizvodstva* (Construction of models of production processes). Moskow: Energiia, 1975, 376 p.

УДК 629.44

Ю. И. Матяш, Е. М. Кирпиченко, В. П. Клюка

НОВЫЙ ПОДХОД К ОЧИСТКЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассмотрены существующие способы решения проблемы по повышению степени очистки сжатого воздуха в тормозной системе подвижного состава. Представлены недостатки данных способов и предложен принципиально новый способ очистки сжатого воздуха, ранее не применяемый на подвижном составе.

Повышение эффективности перевозочного процесса на грузовом железнодорожном транспорте в последнее время реализуется по следующим направлениям:

– увеличение скорости движения грузового и порожнего составов;
– повышение осевой нагрузки (свыше 27 т на ось);
– вождение соединенных поездов с повышенным весом (более 10000 т);
– внедрение интервального движения грузовых поездов.

Увеличение удельной нагрузки на ось, повышение скорости движения поездов и внедрение длинносоставных поездов требуют существенного повышения эффективности работы тормозного оборудования как локомотива, так и всего железнодорожного подвижного состава.

Выполнение поставленных задач возможно при широкомасштабном внедрении на сети железных дорог современного подвижного состава (грузовых вагонов и локомотивов нового поколения), отвечающего указанным требованиям. При этом особое внимание следует уделить увеличению надежности работы тормозного оборудования, поскольку в случае его неисправности возникают различные аварийные ситуации:

изломы рельсов (остряков) из-за большого количества ползунов на колесах;

крушения (проезды запрещающих сигналов) из-за нехватки тормозной эффективности в поезде;

большого количества неработающих тормозов или угасания тормозной волны в поезде;

разрывы поездов из-за продольно-динамических усилий, причиной которых является неравномерное действие тормозов по всему поезду и т. д.

Многолетним опытом эксплуатации установлено, что перечисленные аварии возникают в основном из-за неудовлетворительной очистки сжатого воздуха от посторонних примесей (масла, влаги и др.). Так, например, в осенне-зимний период года наличие паров влаги в сжатом воздухе вызывает образование ледяных пробок в тормозных магистралях (воздухораспределителях, клапанах продувки главных резервуаров, концевых и разобщительных кранах, подводящих к манометрам и песочницам трубках и др.), кроме этого наблюдаются интенсификация коррозионных процессов с образованием ржавчины.

Решению проблемы по повышению степени очистки сжатого воздуха посвящены работы таких ученых, как В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов Л. В. Балон, Т. Л. Риполь-Сарагоси и других. Основную причину наличия паров влаги в сжатом воздухе названные исследователи объясняют наличием высокой температуры сжатого воздуха, находящегося в главных резервуарах локомотива. Поэтому влага, находящаяся в потоке сжатого воздуха, будет конденсироваться только в тормозных коммуникациях локомотива, где температура сжатого воздуха будет значительно ниже, чем в главных резервуарах локомотива. Для решения указанной выше проблемы была предложена конструкция главных резервуаров со встроенными жалюзийными сепараторами [1]. Показано, что применение жалюзийных сепараторов позволяет увеличить количество осаждаемой влаги в главных резервуарах на 20 – 24 %. Однако данное техническое предложение позволяет лишь частично уменьшить накопление конденсата в тормозных магистралях локомотива, а следовательно, не исключаются возникновение перечисленных выше аварий, что подтверждается следующим примером.

На рисунке 1 приведена температурная зависимость влагосодержания насыщенного воздуха при давлении 1 кгс/см^2, построенная по данным работы [2], которая позволяет оценить объемы накопления конденсата в главных резервуарах локомотива при различных условиях его эксплуатации. Например, при температуре окружающей среды T_I = +30 °С и давлении P_I = = 1 кгс/см^2 равновесное влагосодержание ds_I = 30 г/м^3 (см. рисунок 1). При штатной производительности локомотивного компрессора (3,4 м^3/мин) в течение одного часа через главные резервуары будет пропущено более 80 л влаги. Поэтому даже при использовании жалюзийных сепараторов в главных резервуарах происходит накопление влаги, которая беспрепятственно перемещается в тормозную магистраль подвижного состава, что и приводит к возникновению аварийных ситуаций, перечисленных выше.

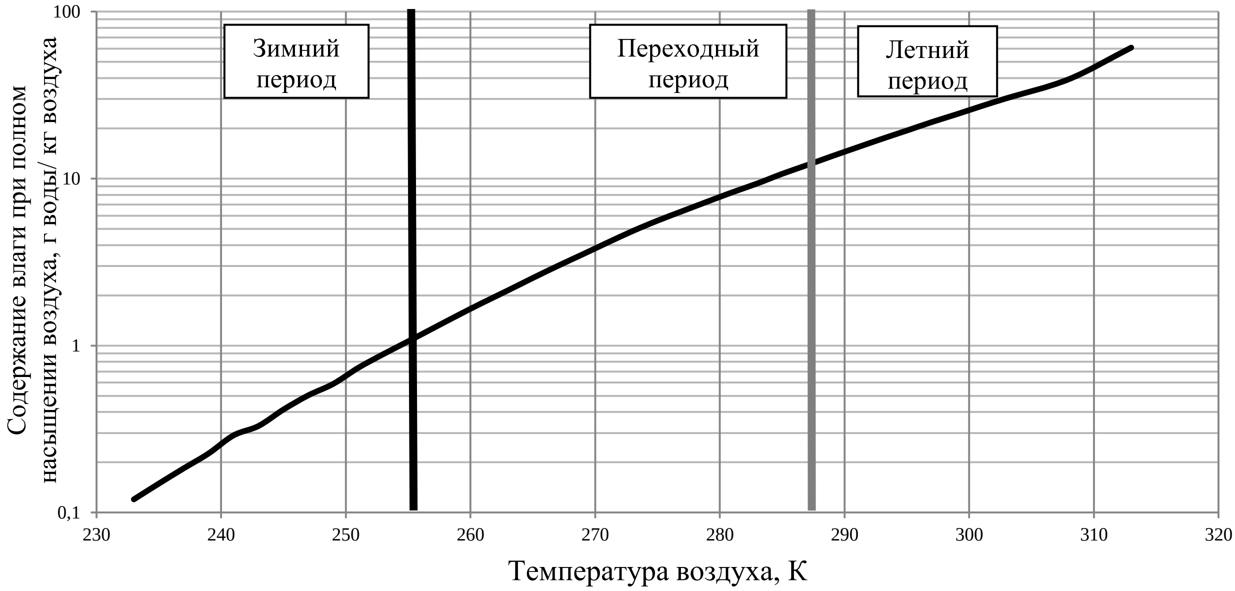


Рисунок 1 – Температурная зависимость влагосодержания насыщенного воздуха при давлении 1 кгс/см^2

Из анализа отечественной и зарубежной научно-технической литературы следует, что на современном этапе для повышения чистоты сжатого воздуха применяются адсорбционные системы осушки воздуха – с холодным или горячим методом регенерации. В работе [3] представлены результаты по использованию двухблочных адсорбционных систем осушки воздуха с холодным методом регенерации, общий вид такой системы показан на рисунке 2.

Разработанная установка для подготовки сжатого воздуха [3] включает в себя винтовой компрессорный агрегат типа АКВ 4,5/1ПУ2 производства ОАО «Транспневматика» и двухблочную короткоцикловую адсорбционную систему осушки воздуха (типа СПВ 4,5/1), принципиальная схема которой приведена на рисунке 3. В качестве адсорбента в адсорбционной системе осушки воздуха используется силикагель типа КСКГ.

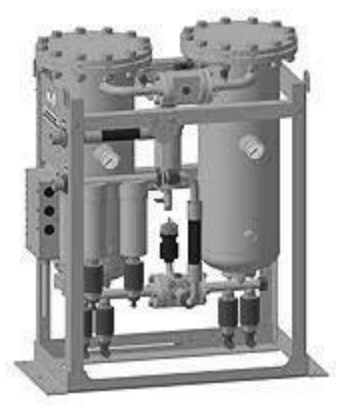


Рисунок 2 – Общий вид двухблочной короткоцикловой адсорбционной системы осушки воздуха

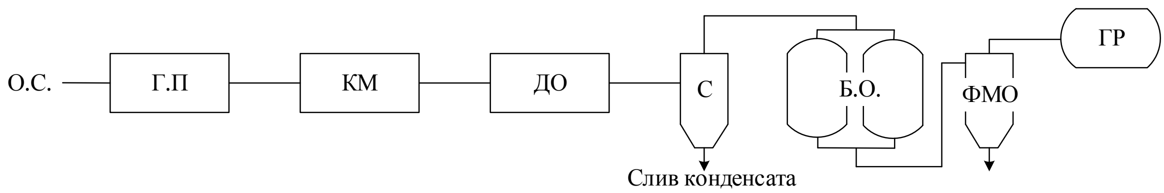


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки двухблочной адсорбционной системы осушки воздуха с холодным методом регенерации: О.С – воздух с параметрами окружающей среды, Г.П – грузовое помещение локомотива, КМ – компрессор, ДО – доохладитель, С – сепаратор, БО – двухблочная адсорбционная система осушки воздуха, ФМО – механический фильтр тонкой очистки, ГР – тормозное оборудование локомотива

Тестовые испытания разработанных осушителей воздуха на тепловозах типа 2ТЭ25КВ и 2ТЭ25А [3] выявили ряд недостатков, основные среди них следующие:

1 – низкая эффективность работы короткоцикловой адсорбционной системы осушки сжатого воздуха, особенно в летний период года (при температуре наружного воздуха от 20 °С и выше). Это объясняется тем, что воздух из окружающей среды вначале поступает в грузовое помещение локомотива, где размещается технологическое оборудование (тяговые двигатели, модуль компрессорного агрегата, вспомогательный компрессор и др.), в результате температура воздуха в грузовом помещении локомотива примерно на 10 °С выше температуры воздуха окружающей среды.

Кроме этого в процессе сжатия температура воздуха на выходе из компрессорной установки возрастает на 15 – 20 °С по сравнению с температурой его всасывания. Поэтому уже при температуре наружного воздуха окружающей среды +20 °С температура воздуха в грузовом помещении локомотива составит примерно 30 °С, а на выходе из компрессора она достигает значения примерно 50 °С. Поскольку адсорбционная емкость силикагелей (в том числе и силикагеля типа КСКГ) при температуре +50 °С уже близка к нулю, короткоцикловая адсорбционная система осушки сжатого воздуха может обеспечивать требуемую степень осушки потока сжатого воздуха в ограниченном диапазоне температур воздуха окружающей среды (ниже +20 °С);

2 – для работы короткоцикловой адсорбционной системы осушки (согласно паспортным данным адсорбционной системы типа СПВ 4,5/1) требуется дополнительный расход воздуха на регенерацию адсорберов (около 20 % от количества очищаемого воздуха), что может негативно сказываться на режимах торможения грузового подвижного состава;

3 – для обеспечения непрерывной работы установки требуется периодическое техническое обслуживание элементов адсорбционной установки (замена выходных фильтров очистки воздуха, контроль и настройка переключающих клапанов, замена адсорбента в адсорберах и др.);

4 – первоначальная стоимость короткоцикловой адсорбционной установки типа СПВ 4,5/1 – 700 – 800 тыс. р., ее масса составляет примерно 800 кг при габаритах 1881×1775×525 мм.

Для исключения отмеченных выше недостатков авторами данной статьи разработан принципиально новый подход к созданию системы очистки сжатого воздуха для нужд железнодорожного транспорта. Данное техническое предложение базируется на использовании повышенного давления сжатого воздуха, например, до 13 кгс/см^2, и удаления капельной влаги из потока сжатого воздуха при максимально возможном давлении в системе (13 кгс/см^2).

Принципиальная схема предлагаемой установки для подготовки сжатого воздуха показана на рисунке 4. Схема включает в себя винтовой компрессор *I* типа ДЭН-30Ш, отрегулированный на избыточное давление $P_{изб}$ =13 кгс/см^2; магистральный сепаратор циклонного типа II серии СЦ.27ОР, обеспечивающий удаление капельной влаги из потока сжатого воздуха до 99 % при максимально возможном давлении в системе ($P_{изб}$ =13 кгс/см^2); автоматический регулятор давления воздуха III для снижения давления воздуха перед главными резервуарами локомотива с 13 до 9 кгс/см^2; главные резервуары локомотива IV; кран машиниста V, устройства для сбора и хранения информации IV и VII.

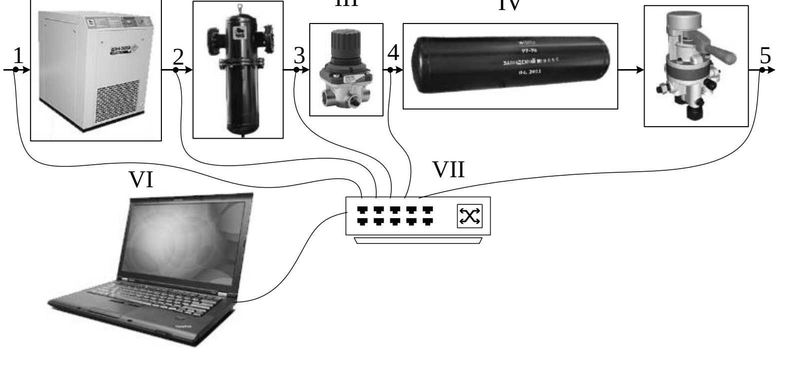


Рисунок 4 – Принципиальная схема предлагаемой установки для подготовки сжатого воздуха

Технические характеристики винтового компрессора типа ДЭН-30Ш и магистрального сепаратора циклонного серии СЦ.27ОР представлены в таблицах 1 и 2 (на основании руководства по эксплуатации грузового электровоза постоянного тока 2ЭС6 ОАО «Уральский завод железнодорожного машиностроения (УВЖМ)», утвержденного генеральным директором ОАО «УВЖМ» в 2008 г.).

Таблица 1 – Технические характеристики винтового компрессора

Тип винтового компрессора	Производительность, $м^3$/мин			Давление, кгс/$см^2$			Расход масла, г/ч			Привод, мощность, кВт
ДЭН-30Ш	44,6	33,9	33,4	07,5	110	113	00,84	00,76	00,69	30

Из данных, представленных в таблице 1, следует, что винтовой компрессор типа ДЭН-30Ш обеспечивает требуемую для современных локомотивов производительность 3,4 $м^3$/мин при давлении сжатого воздуха 13 кгс/$см^2$. Кроме этого винтовой компрессор типа ДЭН-30Ш укомплектован теплообменником для охлаждения масляно-воздушной смеси, поэтому (согласно паспортным данным на винтовой компрессорный агрегат типа АКВ 4,5/1ПУ2) температура воздуха на выходе из винтовой компрессорной установки возрастает всего лишь на 15 – 20 °С по сравнению с температурой его всасывания [3].

Таблица 2 – Магистральные сепараторы циклонного типа серии СЦ.27ОР

Модель	Поток, $м^3$/мин (н.у)	Диаметр×высота, мм×мм	Максимальное рабочее давление, кгс/$см^2$	Потери давления, кгс/$см^2$	Максимальная рабочая температура, °С	Отделение воды, %
СЦ.27ОР	2,9…5.5	85×197	16	0,01	66	99

Магистральные сепараторы циклонного типа серии СЦ.27ОР являются высоконадежными техническими средствами, оборудованы автоматическим дренажом для сброса конденсата, смотровым окном и предохранительным клапаном, имеют гарантийный ресурс более десяти лет безопасной работы.

Схема установки для подготовки сжатого воздуха приведена на рисунке 4. Порядок ее работы рассмотрим для следующих параметров окружающей среды: температура воздуха окружающей среды T_1 = +40 °С, равновесное влагосодержание воздуха d_1 при давлении P_1 = = 1 кгс/$см^2$ составляет 45 г воды/кг воздуха. При работе компрессора атмосферный воздух с приведенными выше параметрами воздуха окружающей среды через жалюзийную решетку вначале поступает в грузовое помещение локомотива (на рисунке 4 не показано) и затем всасывается винтовым компрессором 1. Поскольку в грузовом помещении локомотива находятся агрегаты (тяговый электродвигатель, основной и вспомогательный компрессоры, блок осушения воздуха) с повышенным выделением тепла, температура воздуха в грузовом помещении локомотива T_1 возрастает до +50 °С при сохранении давления всасывания и влагосодержания.

На выходе из компрессорной установки давление сжатого воздуха P_2 увеличивается до 13 кгс/$см^2$, а температура воздуха на выходе из винтовой компрессорной установки типа АКВ 4,5/1ПУ2 T_2 возрастает минимум на 10 °С по сравнению с температурой его всасывания и становится равной 60 °С в то время как равновесное влагосодержание остается на прежнем уровне – d_1 = 45 г воды/кг воздуха и с этими параметрами поток сжатого воздуха поступает в магистральный сепаратор II, где в результате удаления (до 99 %) капельной влаги из потока сжатого воздуха его влагосодержание понижается до значения d_3 = 11,0 г воды/кг воздуха, далее сжатый воздух направляется в автоматический регулятор давления воздуха III, в котором перед поступлением сжатого воздуха в главные резервуары давление понижается с 13 до 9 кгс/$см^2$. В силу незначительной поверхности теплообмена, а также из-за низкого значения коэффициента конвективного теплообмена главных резервуаров, автоматического регулятора давления и других, изменением температуры сжатого воздуха при его движении по коммуникациям системы осушки можно пренебречь, т. е. $T_2 = T_3 = T_4 = +60$ °С.

При давлении $P_3 = 9$ кгс/см^2 и температуре $T_2 = +60$ °С равновесное влагосодержание d_4 составляет 16,0 г воды/кг воздуха, в то время как влагосодержание воздуха, поступающего в главные резервуары, d_3 имеет величину 11,0 г воды/кг воздуха. Таким образом, воздух, поступающий в главные резервуары локомотива, является переосушенными более чем на 20 °С по сравнению с равновесным влагосодержанием воздуха, находящегося в главных резервуарах, что исключает образование конденсата в главных резервуарах локомотива.

Далее воздух с параметрами $T_4 = +60$ °С, $P_4 = 9$ кгс/см^2 и $d_3 = 11{,}0$ г воды/кг воздуха) направляется в кран машиниста V, в котором давления понижается с 9 до 6 кгс/см^2, а температура воздуха практически остается на прежнем уровне (т. е. $T_5 = +60$ °С).

В кране машиниста осуществляется снижение давления воздуха до $P_5 = 6$ кгс/см^2, влагосодержание которого имеет значение $d_3 = d_4 = d_5 = 11{,}0$ г воды/кг воздуха, в то время как равновесное влагосодержание воздуха dp_5 при $T_4 = T_5 = 60$ °С и $P_5 = 6$ кг/см^2 составляет 22 г воды/кг воздуха). Из приведенных данных видно, что сжатый воздух, поступающий в тормозные магистрали локомотива, является переосушенным более чем на 30 °С, что исключает возникновение конденсата и в тормозных магистралях локомотива.

Таким образом, согласно предлагаемому методу создание в системе осушки сжатого воздуха давления до 13 кгс/см^2 и удаление при этом значении давления конденсата из потока сжатого воздуха обеспечивают такое остаточное его влагосодержание, которое будет ниже, чем равновесное влагосодержание воздуха, находящегося в главных резервуарах локомотива (примерно на 20 °С), и значительно ниже, чем в тормозных коммуникациях локомотива (более чем на 30 °С), тем самым исключаются выпадение конденсата во всех устройствах локомотива и нарушение их работоспособности.

Для изучения характера изменения параметров сжатого воздуха, перемещающегося по тормозной системе локомотива, были приведены численные исследования по оценке работоспособности разработанной системы очистки сжатого воздуха в широком диапазоне изменения температуры воздуха окружающей среды (от –40 °С до +40 °С). Установлено, что во всем диапазоне изменения параметров воздуха окружающей среды исключается образование конденсата как в главных резервуарах локомотива, так и в его тормозных магистралях, обеспечивая тем самым надежную работу подвижного железнодорожного транспорта. Изменение влагосодержания сжатого воздуха при его движении по тормозным коммуникациям локомотива определяли с помощью выражения, полученного авторами:

$$d_p(\text{tconct}) = d_0 \cdot P - 0{,}92,$$

где $d_p(\text{tconct})$ – равновесное влагосодержание воздуха при текущем значении давления и при заданной температуре, г воды/кг воздуха;

d_0 – равновесное влагосодержание воздуха при давлении $P = 1$ кг/см^2 и при заданной температуре, г воды/кг воздуха;

P – давление сжатого воздуха, кгс/см^2.

Результаты численного моделирования изменения параметров сжатого воздуха при его перемещении по тормозной системе локомотива приведены в таблице 3, из данных которой видно, что расхождение между расчетными и фактическими значениями влагосодержание сжатого воздуха при изменении температуры окружающей среды от +40 °С до –40 °С в рабочем диапазоне давления (6 – 13 кгс/см^2) не превышает 10 %.

Сравнивая принципиальные схемы известной и предложенной систем осушки сжатого воздуха, приведенные на рисунках 3 и 4 соответственно, можно сделат вывод о том, что использование предложенных технических решений существенно снижает затраты на приобретение и обслуживание предлагаемой системы осушки сжатого воздуха за счет исключения установки адсорбционного блока осушки и ее сменных элементов (стоимость адсорбционного осушителя воздуха, например, фирмы ЕКОМАК, составляет 750 274 р., сменного фильтра тонкой очистки сжатого воздуха типа DF – 13 507 р., разовой смены адсорбента – 12 080 р.). Ежегодное технологическое обслуживание механических фильтров тонкой очистки, переключающих клапанов, замена адсорбента и составляет порядка 10 % от первоначальной стоимости адсорбционного осушителя воздуха (75 000 р.). Улучшены также и массогабаритные показатели предложенной системы очистки сжатого воздуха (с учетом системы автоматического переключения клапанов и адсорберов масса адсорбционного блока осушки производительностью 3,4 м^3/мин составляет примерно 800 кг, а ее габариты – 1881 × 1775 × 525 мм).

Таблица 3 – Изменение параметров сжатого воздуха при его перемещении по тормозной системе локомотива

Температура воздуха, °С		Влагосодержание сжатого воздуха (г воды/кг воздуха) при давлении, кг/см^2,									
окруж. среды	после сжатия	1	6			9			13		
		табл.	расч.	факт.	погр., %	расч.	факт.	погр., %	расч.	факт.	погр., %
40	60	130	22,0	24,0	8,3	16,0	17,	6,9	11,0	12,0	8,5
30	50	80	14,0	15,0	6,7	9,4	10,0	7,0	6,8	7,5	4,0
20	40	45	8,0	8,6	7,0	5,2	5,3	2,0	4,0	4,2	5,0
10	30	22	4,0	4,2	4,8	2,8	2.9	3,5	2,1	2,2	5,0
0	20	15	2,7	2,9	7,0	1,8	1,9	5.2	1,5	1,4	6,0
-10	10	7,5	1,3	1,4	7,0	0,92	0,96	4,2	0,067	0,070	5,0
-20	0,0	3,2	0,6	0,62	3,0	0,40	0,42	4,8	0,03	0,03	0,0
-30	-10	1,5	0,26	0,28	7,0	0,18	0,19	5,2	0,013	0,014	7,0
-40	-20	0,64	0,1	0,11	9,0	0,075	0,08	6.5	0,006	0,006	0,0

В заключение следует отметить целесообразность внедрения разработанной установки на пунктах подготовки грузовых вагонов к эксплуатации (ППВ) и пунктах их технического обслуживания (ПТО), поскольку предложенная установка позволяет исключить накопление конденсата в тормозной системе грузовых вагонов при проверке работоспособности тормозов.

Список литературы

1. Балон, Л. В. Повышение влагоосаждающей способности главных резервуаров локомотива и систем УЗОТ за счет внедрения жалюзийных сепараторов [Текст] / Л. В. Балон, Т. Л. Риполь-Сарагоси // Автоматические тормоза грузового железнодорожного подвижного состава. – М., 2004. – С. 120 – 134.

2. Вороней, Д. Влажный воздух [Текст] / Д. Вороней, Д. Козич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.

3. Редин, А. Л. Анализ методов подготовки сжатого воздуха для пневматических систем подвижного состава [Текст] / А. Л. Редин // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 45 – 47.

References

1. Balon L. V., Ripol'-Saragosi T. L. Vlagoosazhdayuschey Increased capacity main tanks Lokomo-asset and the RCD systems through the introduction of louvered separators [Povyshenie vlagoosazhdaiushchei sposobnosti glavnykh rezervuarov lokomo-tiva i sistem UZOT za schet vnedreniia zhaliuziinykh separatorov]. *Avtomaticheskie tormoza gruzovogo zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava – Automatic braking freight rolling stock*, 2004, pp. 120 – 134.

2. Voronei D., Kozich D. *Vlazhnyi vozdukh* (Moist air). Moskow: Energoatomizdat, 1984, 136 p.

3. Redin A. L. Analysis of methods of preparation of compressed air for pneumatic systems of rolling stock [Analiz metodov podgotovki szhatogo vozdukha dlia pnevmaticheskikh sistem podvizhnogo sostava]. *Zheleznodorozhnyi transport – Rail*, 2010, no. 3, pp. 45 – 47.

УДК 629.424.3:621.436

С. М. Овчаренко, О. В. Балагин, Д. В. Балагин

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ УЗЛОВ ТЕПЛОВОЗОВ

В статье рассмотрены этапы реализации комплексной системы бесконтактного теплового контроля основных узлов и систем тепловозов. Представлены разработанные методики оценки технического состояния секций холодильников, электрических машин и топливной аппаратуры высокого давления тепловозов с использованием тепловизионного метода контроля.

Реформа ОАО «РЖД» направлена на повышение эффективности работы всех звеньев единого комплекса – перевозочного процесса. В этом процессе локомотивное хозяйство занимает одно из ведущих мест. Сложившаяся в настоящее время ситуация с техническим состоянием парка тепловозов требует решения ряда важных технических задач, связанных с повышением эффективности их использования. Сохранение на этом этапе эксплуатации тепловозного парка необходимого уровня его надежности во многом зависит от тех технологий, которые применяются как в ремонтном производстве, так и в процессе диагностирования узлов и систем тепловозов.

В последнее время на кафедре «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения активно развивается направление диагностирования узлов и систем тепловоза тепловыми методами контроля.

С целью реализации комплексной системы бесконтактного теплового контроля основных узлов и систем тепловозов на первом этапе в результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны методики для оценки технического состояния секций холодильников, электрических машин и топливной аппаратуры высокого давления тепловозов с использованием тепловизионного метода контроля.

Экономичная работа тепловозов в условиях эксплуатации во многом зависит от технического состояния элементов топливной аппаратуры высокого давления. В процессе работы основные элементы топливного насоса высокого давления (ТНВД) (плунжерная пара, нагнетательный клапан) и форсунки (прецизионная пара «игла – корпус», щелевой фильтр) подвержены износу и засорению абразивными частицами. В результате ухудшается качество рабочего процесса в цилиндре дизеля, снижается уровень вырабатываемой цилиндровой мощности, повышается удельный эффективный расход топлива и сокращается ресурс дизеля в целом. Оперативный бесконтактный контроль с минимумом вспомогательных операций и затрат времени позволяет избежать перечисленных выше последствий.

В качестве диагностического параметра для оценки технического состояния ТНВД и форсунки принято значение температуры поверхности трубопровода топливной системы высокого давления $t_{iэ}^{j}$.

Тепловизионные измерения необходимо производить при режиме теплопередачи, близком к стационарному. Стационарность процесса достигается путем прогрева дизеля на номинальной позиции контроллера машиниста в течение 15 – 30 мин до стабилизации значений температуры воды и масла дизеля. В процессе проведения испытаний необходимо фиксировать значение температуры наружного воздуха. Далее останавливается дизель-генераторная установка и проводятся операции термографирования.

Алгоритм обработки результатов термографирования и выдачи заключения о техническом состоянии топливной аппаратуры (ТА) тепловоза представлен на рисунке 1.

Процесс контроля рекомендуется проводить при нахождении тепловоза на территории локомотивного депо до или после ТО-3, ТР-1, ТР-2 и ТР-3. Проведенный контроль позволит вовремя выявить ТНВД и форсунки, не обеспечивающие необходимый рабочий процесс дизеля, что даст возможность оперативно восстановить необходимые мощностные, экономические и экологические характеристики тепловозного дизеля.

Кроме того, оперативный контроль технического состояния ТА позволит оценить качество ремонта и в случае необходимости принять соответствующие меры для улучшения технического состояния топливной системы тепловоза.

Для определения расчетным способом температуры поверхности стенки топливной трубки высокого давления *i*-го цилиндра введено обозначение $t_{р}^{jн}$ – расчетное нормативное значение температуры поверхности трубопровода исправной топливной системы при *j*-й температуре.

Полученные результаты математического моделирования температуры поверхности топливного трубопровода высокого давления [1] показывают, что отклонение температуры поверхности трубопровода топливной системы с неисправным ТНВД от температуры поверхности трубопровода с исправной топливной системой находится в пределах от 10,4 до 14,3 %. В качестве граничного значения отклонения температуры трубопровода топливной системы с неисправным ТНВД принято значение 10 %.

Отклонение температуры поверхности трубопровода топливной системы с неисправной форсункой от температуры поверхности трубопровода с исправной топливной системой находится в пределах от 5,8 до 9,2 %. В качестве граничного значения отклонения температуры трубопровода топливной системы с неисправной форсункой принято значение 5 %.

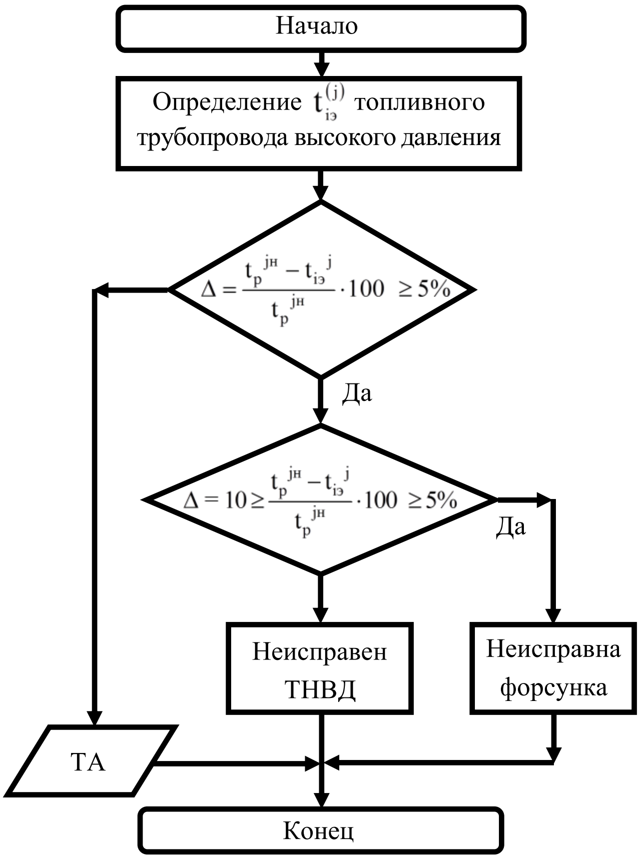
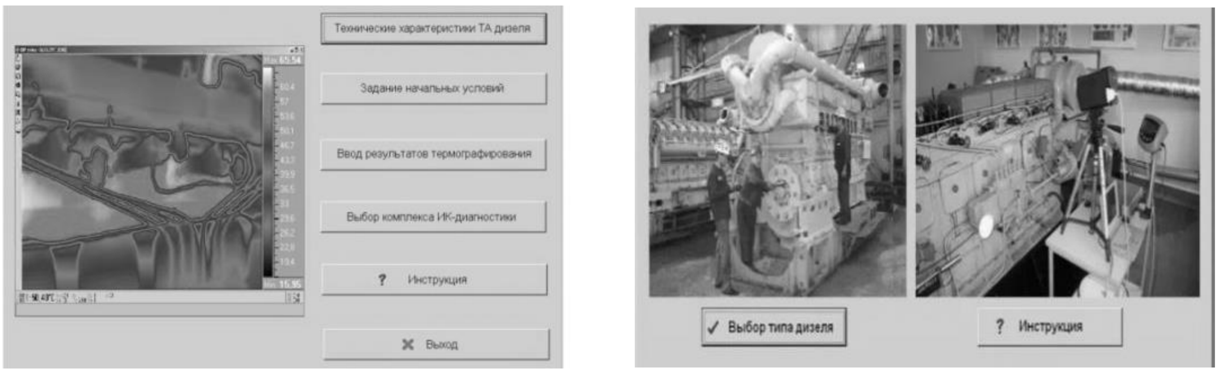


Рисунок 1 – Алгоритм обработки результатов термографирования ТА дизеля

Для практической реализации предложенной технологии контроля технического состояния топливной аппаратуры разработано программное обеспечение в среде программирования Delphi 7 (рисунок 2).

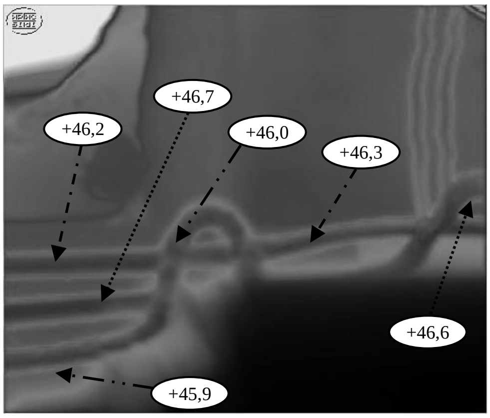


а б

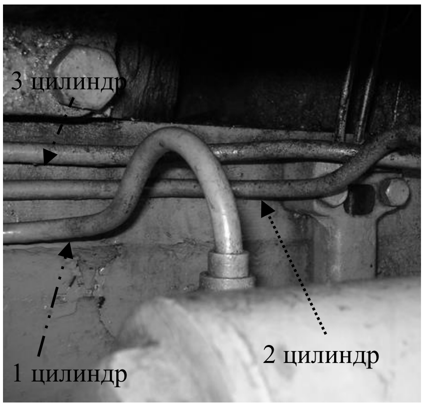
Рисунок 2 – Программный комплекс технологии тепловизионного контроля технического состояния топливной аппаратуры тепловозных дизелей

Результаты практического применения технологии контроля технического состояния топливной аппаратуры представлены на рисунке 3.

Повышение надежности электрических машин (в том числе тяговых электродвигателей (ТЭД)) в условиях эксплуатации также способствует сокращению количества отказов в пути следования и неплановых ремонтов тепловозов.

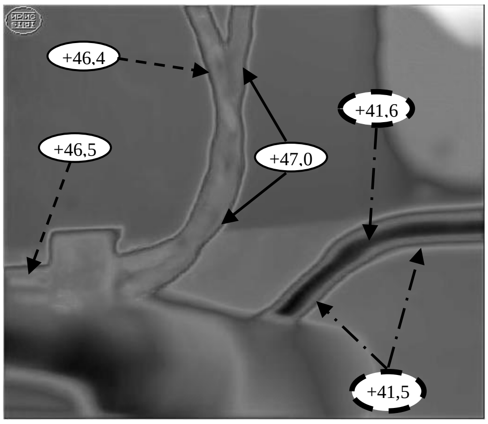


температура окружающей среды $t_{окр}$ = +5,0 °С; ТА в удовлетворительном техническом состоянии;

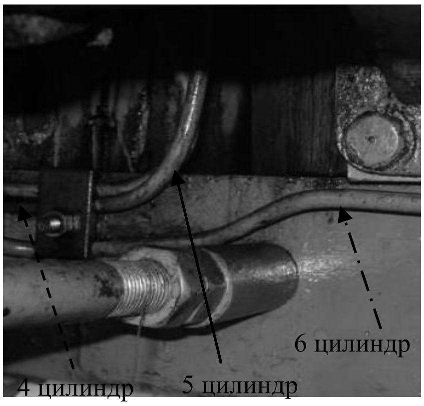


а

б



температура окружающей среды $t_{окр}$ = +5,1 °С; неисправен ТНВД 6 цилиндра дизеля − износ плунжерной пары



в

г

Рисунок 3 – Термограммы нагнетательных трубопроводов дизеля ПД1М тепловоза ТЭМ-2 № 6124 (режим работы дизеля – 8 п.к.м.): а, б – при температуре окружающей среды $t_{окр}$ = +5,0 °С и ТА в удовлетворительном техническом состоянии; в, г – при $t_{окр}$ = +5,1 °С и неисправности ТНВД 6 цилиндра дизеля − износе плунжерной пары

Значительное число отказов ТЭД происходит по причине выплавления припоя из петушков коллектора – 13 % от общего числа отказов. Этот вид неисправностей возникает вследствие того, что двигатель загружается крайне неравномерно, что в свою очередь приводит к большим колебаниям температуры якоря электрической машины. Возникновению случаев отказов ТЭД способствует и повышенный уровень вибрации ТЭД в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

В результате математического моделирования работы ТЭД [2, 3] предложен и обоснован новый диагностический параметр – перепад между температурой на поверхности коллектора и температурой на поверхности коллекторного петушка $\Delta t_i^{(j)}$. В итоге установлены функциональные зависимости между техническим состоянием якоря тягового электродвигателя и перепадом температуры между поверхностью коллектора и поверхностью коллекторного петушка. Установлено критическое значение степени пропайки контактного соединения, при которой может произойти отказ тягового электродвигателя.

Формирование заключения о техническом состоянии паяных соединений якоря производится в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4 [4].

Так как в настоящее время на производстве при проведении приемосдаточных испытаний ТЭД отсутствуют средства, позволяющие достоверно оценить техническое состояние рассматриваемых соединений, рекомендуется производить тепловизионный контроль после прохождения ремонта в объеме ТР-3, СР и КР не только на ТЭД постоянного тока, имеющих паяное соединение коллекторного петушка с выводами якорной обмотки, но и на ТЭД, у которых данный вид соединения выполнен при помощи сварки, поскольку в контакте петушка с выводами обмотки якоря, выполненного при помощи сварки, вследствие воздействия эксплуатационных факторов, снижающих надежность ТЭД, также возможно нарушение целостности контакта.

Результаты практического применения методики оценки технического состояния якоря электрической машины (ЭМ) представлены на рисунке 5.

Устойчивая эксплуатация тепловозов во многом зависит от качества функционирования системы охлаждения, эффективность которой в процессе эксплуатации снижается, что приводит к работе дизеля при повышенной температуре теплоносителей, к понижению надежности локомотивов, к ограничению мощности силовой установки и, как следствие, к ухудшению топливной экономичности дизеля. Значительный вклад в решение данной проблемы внесли А. И. Володин, В. А. Перминов, В. Г. Григоренко, Н. И. Панов, А. П. Третьяков, Ю. А. Куликов и др.

Основными элементами системы охлаждения тепловоза, определяющими эффективность ее работы, являются секции холодильника. В процессе эксплуатации теплорассеивающая способность отдельных секций холодильника тепловозов снижается [5]. Следовательно, необходимо проводить периодический оперативный контроль технического состояния холодильника тепловоза с целью выявления неисправных секций.

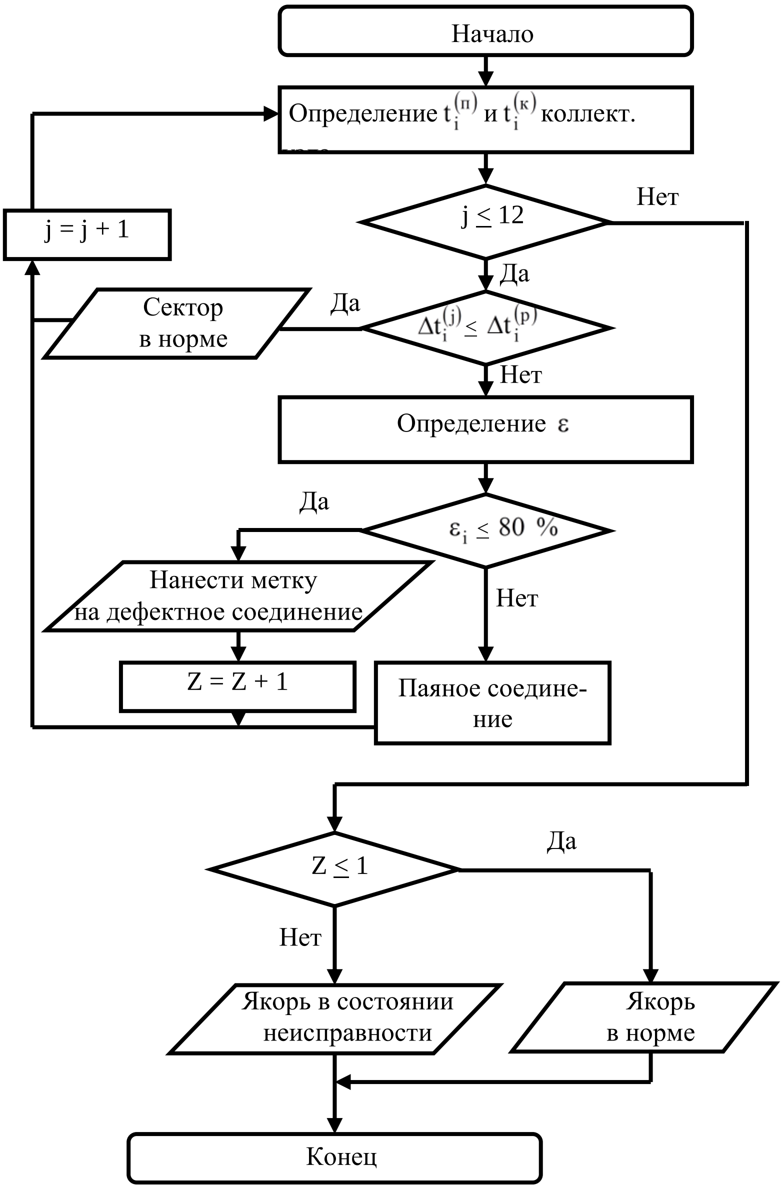
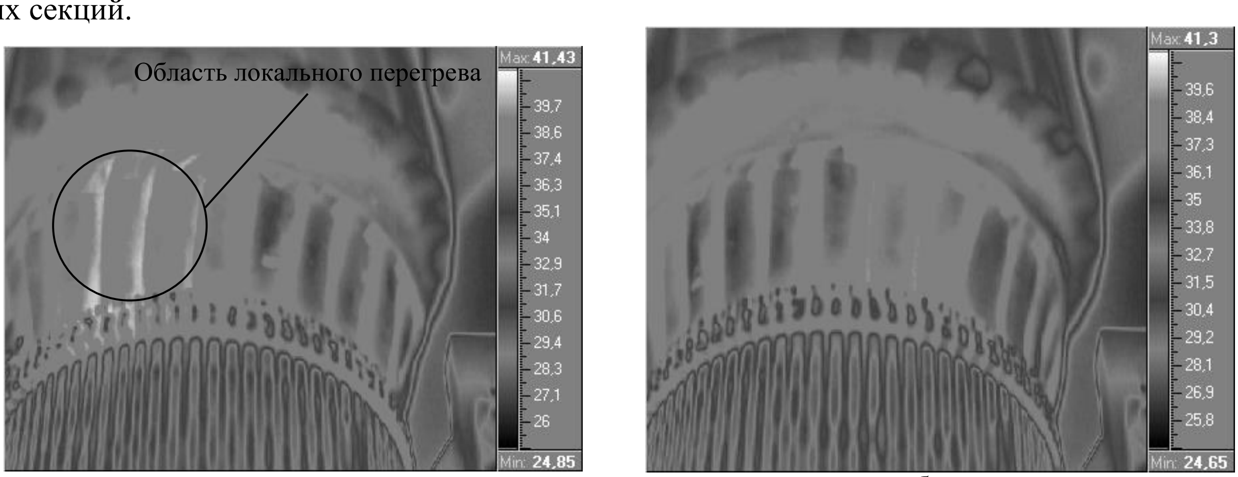


Рисунок 4 – Алгоритм оценки технического состояния якоря ЭМ



а б

Рисунок 5 – Термограммы 4-го и 3-го секторов якоря после 15 мин прогрева:
а – группа петушков коллектора и выводов якорной обмотки с повышенной температурой нагрева;
б – область равномерного распределения температуры по коллектору и выводам якорной обмотки

По результатам проведенных исследований обоснован и предложен новый диагностический параметр для проведения тепловизионного контроля секций холодильника тепловоза – температурный напор стенки трубки секции $\Delta t_п^j$ [5].

Алгоритм оценки технического состояния системы охлаждения тепловозов представлен на рисунке 6.

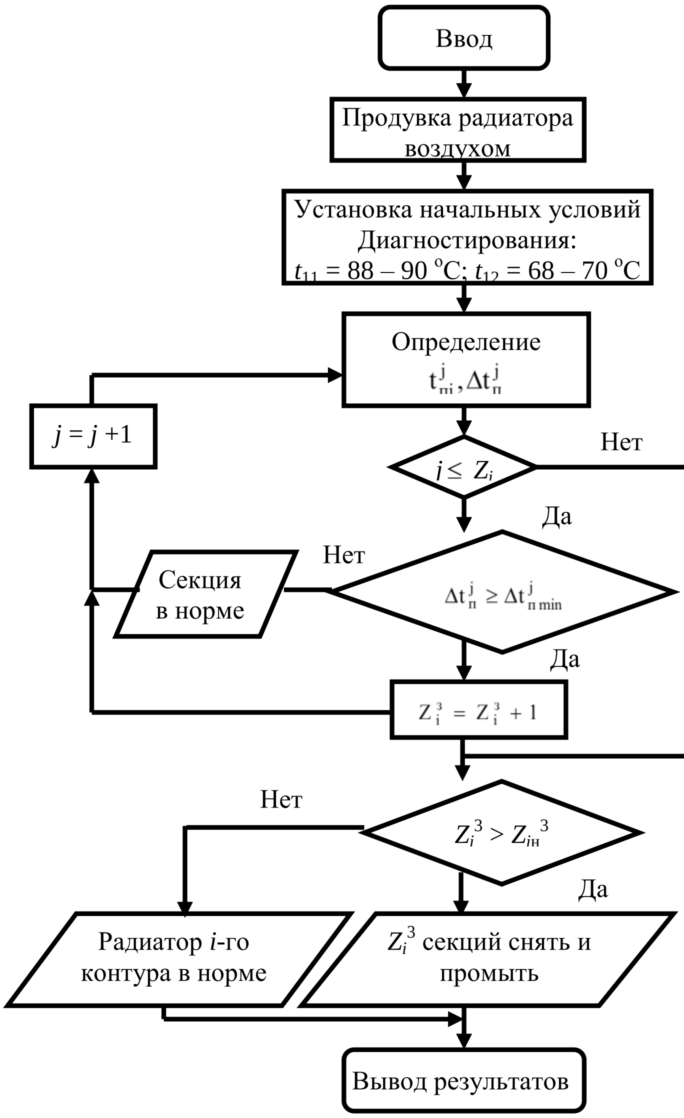


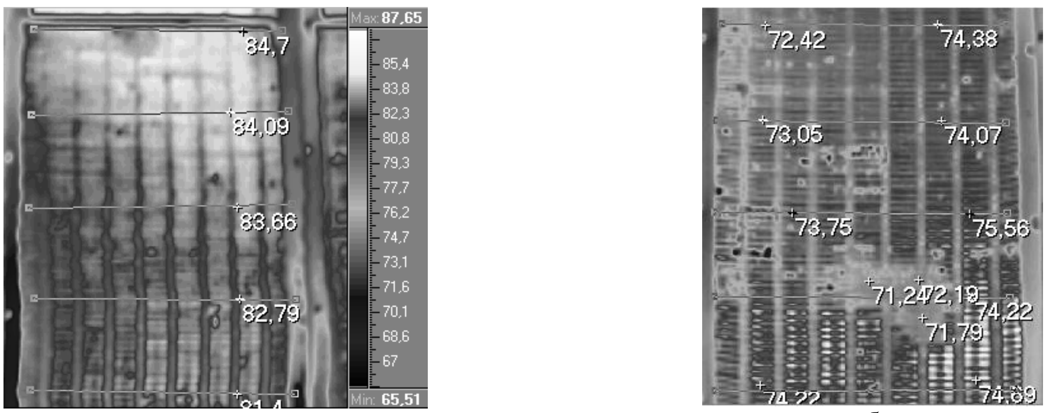
Рисунок 6 – Алгоритм оценки технического состояния системы охлаждения тепловоза

Процесс диагностирования рекомендуется проводить при нахождении тепловоза на станции реостатных испытаний на ТР-2 и ТР-3. Диагностика на ТР-2 позволит вовремя выявить секции, не обеспечивающие необходимую теплорассеивающую способность, и тем самым предотвратить увеличение отбора мощности на привод вентилятора, исключить увеличение расхода топлива на 1 – 1,5 % и не допустить возможного перегрева дизеля в эксплуатации [5].

На втором этапе реализации комплексной системы бесконтактного теплового контроля необходимо разработать единую термодинамическую модель тепловоза с целью исследования тепловых режимов его узлов и систем в различном техническом состоянии; разработать единую методику бесконтактного теплового контроля тепловозов; создать необходимое программное обеспечение для оперативной обработки результатов термографирования и формирования заключения.

Реализация поставленных задач позволит разработать энергетический паспорт тепловоза и выполнить оценку эффективности его внедрения в комплексной системе менеджмента качества.

Результаты методики оценки технического состояния системы охлаждения тепловозов представлены на рисунке 7.



а б

Рисунок 7 – Термограммы укороченной секции первого контура:
а – техническое состояние в пределах нормы; б – смятие пластин оребрения

Список литературы

1. Балагин, Д. В. Математическая модель процесса нагрева топливного трубопровода высокого давления топливной аппаратуры тепловозных дизелей [Текст] / Д. В. Балагин, О. В. Балагин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 4 (16). – С. 9 – 13.

2. Володин, А. И. Тепловизионный контроль технического состояния узлов подвижного состава [Текст] / А. И. Володин, О. В. Балагин, В. К. Фоменко // Наука и техника транспорта / РОАТ «МИИТ». – М. – 2009. – № 1. – С. 27 – 31.

3. Володин, А. И. Моделирование тепловых процессов в якоре электрической машины постоянного тока [Текст] / А. И. Володин, О. В. Балагин, В. К. Фоменко // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт 2008» / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2008. – С. 7 – 11.

4. Володин, А. И. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния паяных соединений якоря тягового электродвигателя [Текст] / А. И. Володин, О. В. Балагин, В. К. Фоменко // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 4 (23). – С. 21 – 24.

5. Балагин, О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей [Текст]: Дис… канд. техн. наук: 05.22.07 / Балагин Олег Владимирович. – Омск, 2005. – 165 с.

References

1. Balagin D. V., Balagin O. V. Mathematical models process of heating fuel pipeline high pressures of diesel engines fuel equipment of [Matematicheskaia model' protsessa nagreva toplivnogo truboprovoda vysokogo davleniia toplivnoi apparatury teplovoznykh dizelei]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 4 (16), pp. 9 – 13.

2. Volodin A. I., Balagin O. V, Fomenko V. K. Thermovision control technical conditions knots of a rolling stock [Teplovizionnyi kontrol' tekhnicheskogo sostoianiia uzlov podvizhnogo sostava]. *Nauka i tehnika transporta – Science and Technology of Transport*, 2009, no. 1, pp. 27 – 31.

3. Volodin A. I. Modelirovanie teplovykh protsessov v iakore elektricheskoi mashiny postoiannogo toka [Modeling of thermal processes in an anchor of the electrical machines direct current]. *Trudi Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoi konferencii «Transport-2008»* (Works of the All-Russian scientific and practical conference «Transport 2008»). Rostov on Don, 2008, pp. 7 – 11.

4. Volodin A. I., Balagin O. V, Fomenko V. K Development of technology thermovision controls of technical condition solder connections of an anchor traction electric motors [Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolia tekhnicheskogo sostoianiia paianykh soedinenii iakoria tiagovogo elektrodvigatelia]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2009, no. 4 (23), pp. 21 – 24.

5. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolia tekhnicheskogo sostoianiia sektsii kholodil'nikov teplovoznykh dizelei* (Development technology of thermovision control technical condition of diesel engines sections refrigerators). Phd’s thesis, Omsk, OSTU, 2005, 165 p.

УДК 629.47:658.2

С. М. Овчаренко, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛЯ

Приводятся результаты исследования возможности применения искусственных нейронных сетей в задачах идентификации предотказного состояния дизеля типа Д49 по результатам спектрального анализа кар-

терного масла. Полученные результаты необходимы для разработки программного обеспечения по оценке степени износа деталей тепловозного дизеля по результатам спектрального анализа моторного масла.

Возможность оценки технического состояния дизеля локомотива без его разборки приобрела актуальность практически с момента начала его эксплуатации. Осмотр деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и кривошипно-шатунного механизма (КШМ) дизеля осуществляется только на крупных видах ремонта. Детали именно этих групп в значительной степени подвержены динамическим и тепловым нагрузкам, что приводит к их интенсивному изнашиванию. Необходимо, чтобы параметры системы ремонта соответствовали текущему уровню надежности работы эксплуатируемых технических объектов, в частности, тепловозных дизелей. Реализация системы ремонта по техническому состоянию предполагает наличие эффективных методов диагностирования. Применительно к тепловозному дизелю одним из наиболее эффективных методов безразборной оценки степени износа деталей ЦПГ и КШМ можно считать метод, основанный на использовании результатов спектрального анализа моторного масла. В настоящее время наиболее перспективным тепловозным дизелем считается дизель типа Д49 (ЧН 26/26), который устанавливается на несколько серий отечественных тепловозов.

В настоящее время известны по крайней мере два подхода к оценке технического состояния дизеля с использованием результатов спектрального анализа моторного масла. Первый основан на реализации вероятностного алгоритма, второй – на установлении зависимостей между количеством изношенного металла с деталей и изменением их геометрических размеров [1].

Методика оценки степени износа деталей и узлов дизеля заключается в установлении соотношения объема металла, изношенного с детали, и изменения геометрических размеров детали. Периодический контроль текущих значений концентрации продуктов износа в моторном масле позволяет оценить объем металла, изношенного с деталей и, соответственно, степень износа их отдельных групп. В процессе эксплуатации деталей и узлов дизеля скорость их износа зависит от множества факторов. Например, при неправильной установке детали или при достижении предельных значений износа будет наблюдаться резкое увеличение скорости износа. В процессе эксплуатации дизелей важно не только отслеживать текущую степень износа деталей, но и фиксировать начало периода резкого возрастания скорости изнашивания даже отдельной детали. Разработка алгоритма решения задачи осложняется многокомпонентным химическим составом материалов контролируемых деталей. В работе предлагается использование метода идентификации начала катастрофического изнашивания деталей с применением искусственных нейронных сетей (ИНС).

При решении задач классификации устанавливается класс объекта по его характеристикам. В данном случае объектом – являются детали дизеля, а их характеристикой – объем продуктов износа.

Количество скрытых слоев определяется при обучении сети с минимальной тестовой и производительной ошибкой. Число входных нейронов определяется количеством рассматриваемых химических элементов, а число выходных сигналов – количеством контролируемых деталей. Каждый входной нейрон содержит в себе количественные значения химических элементов, полученных в ходе моделирования процесса накопления продуктов износа в масле дизеля.

Обучение нейронной сети осуществляется за счет корректировки весов синапсов. ИНС получает знания о поведении системы по входным значениям на каждой итерации процесса обучения. Алгоритм процесса обучения нейронной сети представлен на рисунке 1.

В качестве обучающей выборки используется информация, полученная в результате моделирования процесса износа деталей. Данные группируются по отдельным химическим элементам с привязкой к определенным группам деталей дизеля. На рисунке 2 показаны результаты моделирования процесса изнашивания деталей с расчетом объема металла, изношенного с отдельных групп деталей дизеля в зависимости от наработки.

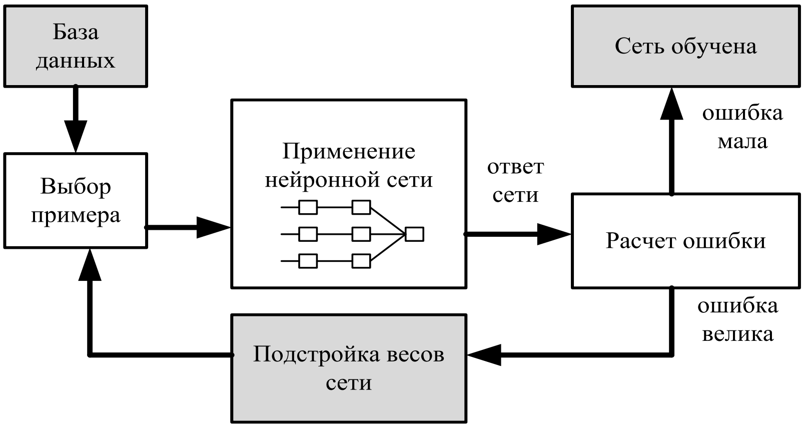


Рисунок 1 – Алгоритм обучения нейронной сети

Очевидно, что количество металла, поступающее в моторное масло, с разных групп деталей на одинаковую наработку будет разным. Максимальное количество металла, изношенного с деталей, при моделировании наблюдается у цилиндровых втулок (ЦВ), поршневых пальцев (ПП), головки поршня (ГП), компрессионных (КК) и маслосъемных колец (МК).

Соотношение количества химических элементов, содержащихся в моторном масле при различных соотношениях износа деталей, – одна из основных характеристик, при построении и при обучении нейронной сети. Под обучением понимается процесс адаптации нейронной сети к изначально заданному образцу сети путем модификации (в соответствии с тем или иным алгоритмом) весовых коэффициентов связей между нейронами.

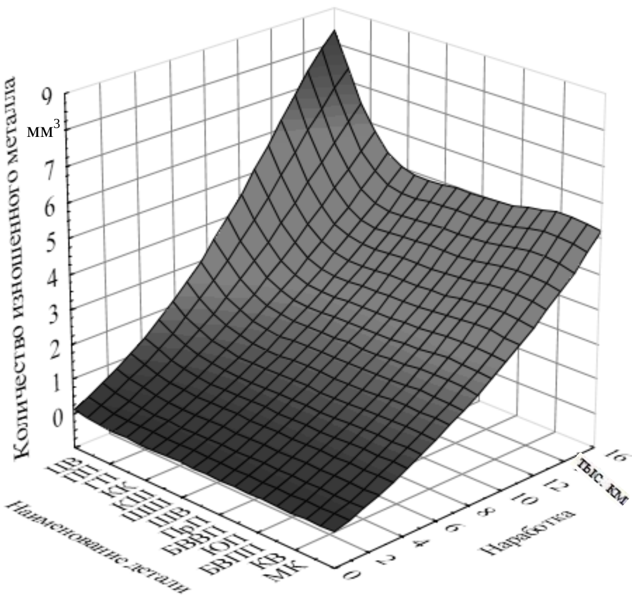


Рисунок 2 – Общее количество изношенного металла

Все расчеты выполнены в компьютерной программной среде «Statistica Automated Neural Networks».

Перед началом обучения сети и при установке значений на входной слой нейронов применены следующие настройки:

– категориально-целевые переменные (выходной слой) – наименование детали;
– непрерывно-входная (выходной слой) – значения химических элементов;
– стратегия создания модели – автоматизированная нейронная сеть (АНС);
– размер подвыборок – обучающая – 70 %, контрольная – 15, тестовая – 15 %;
– тип сети – многомерный персептрон;
– количество скрытых нейронов – от 10 до 30;
– функция ошибки – сумма квадратов;
– функции активации скрытых и выходных нейронов – логистическая, гиперболическая;
– количество эпох – 1000;
– затухающая регулировка весов на скрытом слое: – min – 0,0001, max – 0,001.

В результате обучения ИНС получено шесть наиболее производительных сетей с минимальной ошибкой и адекватной реакцией на входные значения, из которых выбрана одна с максимальной высокой производительностью. Главная характеристика сетей – это архитектура и функция активации скрытых и выходных нейронов.

Нейронная сеть типа многослойный персептрон MLP 9-17-13 (рисунок 3) содержит на входном слое девять значений, 17 скрытых нейронов, на выходном слое – 13 значений. Функция активации как для скрытого слоя нейронов, так и для выходных нейронов является логистической.

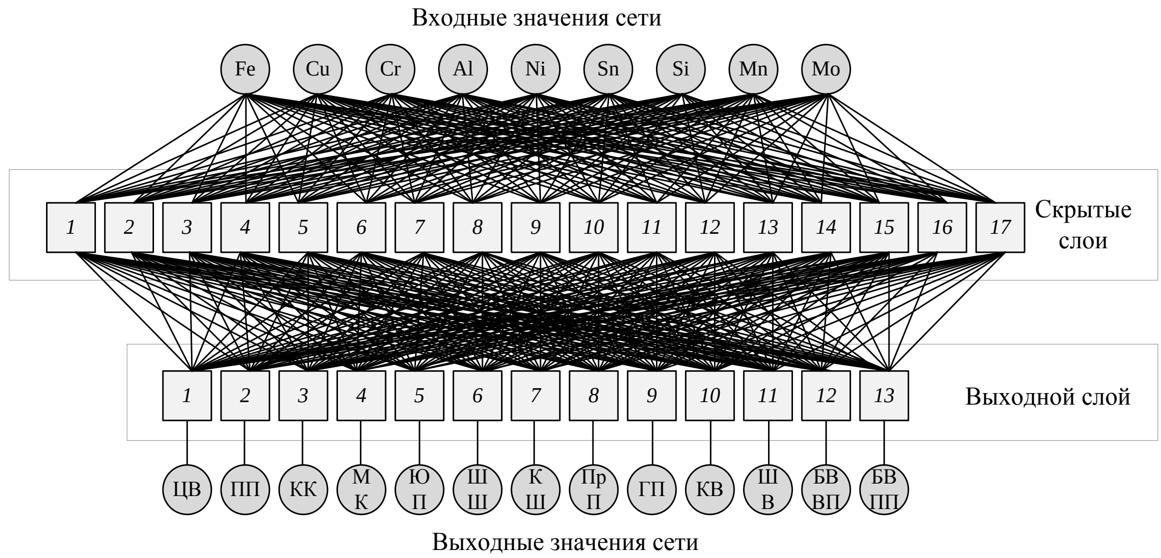


Рисунок 3 – Нейронная сеть типа MLP 9-17-13:
ЦВ – цилиндровая втулка; ПП – поршневой палец; КК и МК – компрессионные и маслосъемные кольца; ЮП – юбка поршня; ШШ и КШ – шатунные и коренные шейки; ПрП – палец прицепного шатуна; ГП – головка поршня; КВ и ШВ – коренные и шатунные вкладыши; БВВП и БВПП – бронзовые втулки вставки поршня и прицепного шатуна

Логистическая форма сигмоидальной нелинейности в общем виде определяется следующим образом:

$$\varphi_j(\upsilon_j(n)) = \frac{1}{1+e^{(-\alpha\upsilon_j(n))}}, \qquad \alpha > 0, \qquad -\infty < \upsilon_j(n) < +\infty, \tag{1}$$

где $\upsilon_j(n)$ – локальное поле *j* нейрона.

Амплитуда выходного сигнала нейрона с такой активационной функцией лежит в диапазоне $0 \le y_j \le 1$. Дифференцируя выражения (1) по $\upsilon_j(n)$, получим:

$$\varphi_j'(\upsilon_j(n)) = \frac{\alpha \cdot e^{(-\alpha\upsilon_j(n))}}{[1+e^{(-\alpha\upsilon_j(n))}]^2}. \tag{2}$$

Так как $y_j(n) = \varphi_j(\upsilon_j(n))$, то можно избавиться от $e^{(-\alpha\upsilon_j(n))}$ в выражении (2) и представить производную функцию активации в виде:

$$\varphi_j'(\upsilon_j(n)) = \alpha y_j(n)[1 - y_j(n)]. \tag{3}$$

Для нейронов, расположенных на выходном слое $y_j(n) = o_j(n)$, локальный градиент (ошибка) нейрона j выражается следующим образом:

$$\delta_j(n) = e_j(n) \cdot \varphi_j'(\upsilon_j(n)) = \alpha[d_j(n) - o_j(n)] \cdot o_j(n)[1 - o_j(n)], \tag{4}$$

где $o_j(n)$ – функциональный сигнал на выходе *j*-го нейрона;
$d_j(n)$ – целевой сигнал.

Для произвольного скрытого нейрона *j* локальный градиент выражается так:

$$\delta_j(n) = \varphi_j'(\upsilon_j(n))\sum_k \delta_j(n) w_{kj}(n) = \alpha y_j(n)[1 - y_j(n)]\sum_k \delta_j(n) w_{kj}(n). \qquad (5)$$

Следует обратить внимание на то, что согласно выражению (2) производная $\varphi_j'(\upsilon_j(n))$ достигает своего максимального значения при $y_j(n) = 0{,}5$, а минимального значения (нуля) – при $y_j(n) = 0$ и $y_j(n) = 1$. Так как величина коррекции синаптических весов в сети пропорциональна производной $\varphi_j'(\upsilon_j(n))$, то для максимального изменения синаптических весов нейрона его функциональные сигналы (вычисленные в соответствии с сигмодаидальной функцией) должны находиться в середине диапазона [2, 3].

Матрица ошибок ИНС (таблица 1) отождествляет количество верно определенных входных значений при тестировании перекрестной проверки обученной нейронной сети.

Таблица 1 – Матрица ошибок сети MLP 9-17-13

Износ	Все	Правильно	Неправильно	Правильно (%)	Неправильно (%)
БВВП	160	159	1	99,38	0,63
БВПП	272	261	11	95,96	4,04
ГП	164	160	4	97,56	2,44
КВ	176	168	8	95,00	5,00
КК	165	164	1	99,39	0,61
КШ	130	111	29	85,38	14,62
МК	170	169	1	99,41	0,59
ПП	164	154	10	93,90	6,10
ПрП	163	161	2	98,77	1,23
ЦВ	255	253	2	99,22	0,78
ШВ	240	233	7	97,08	2,92
ШШ	245	233	12	95,10	4,90
ЮП	162	161	1	99,38	0,62
ВСЕ	2291	2195	96	95,81	4,19

На основе полученных результатов обучения можно сделать вывод о том, что НС – MLP 9-17-13 характеризуется высокими показателями производительности. Данная сеть также имеет минимальную обучающую ошибку в 5 % по каждой рассматриваемой детали, кроме ПП и КШ, где ошибка не превышает 7 и 15 % соответственно.

Анализ чувствительности рассматриваемой модели ИНС (таблица 2) показывает соотношение «вход – выход». Под чувствительностью функции *f* по отношению к ее параметрам *w* понимается величина [2]

$$S_w^F = \frac{\partial F / F}{\partial w / w}. \qquad (6)$$

Таблица 2 – Анализ чувствительности сети

MLP 9-17-13	
Fe	27,59906
Sn	21,98530
Mo	21,60815
Cr	19,63955
Si	19,28844
Al	18,83557
Cu	18,81850
Mn	17,04018
Ni	1,008668

Функция $F(w)$ рассматриваемой сети описывает осуществляемое сетью отображение «входа» на «выход», а w – вектор всех синаптических весов сети. Частные производные функции $F(w)$ по всем элементам вектора весов w вычисляются без затруднений. Исходя из формулы (1) следует заметить, что сложность вычисления каждой отдельной частной производной линейно зависит от W – общего количества весов, содержащихся в сети. Эта линейность сохраняется постоянно, где синаптические веса присутствуют в цепочке вычислений [2].

Из анализа чувствительности сети (см. таблицу 2) следует, что основное влияние на эффективность прогноза осуществляют все виды химических элементов, кроме никеля. Никель в данном случае никак не воздействует на прогноз состояния деталей, поэтому его можно не применять в обучении НС и прогнозировании [2, 4].

Описательные статистики нейронной сети MLP 9-17-13 (таблица 3) показывают минимальные, максимальные, средние выборки при обучении по каждому элементу входных сигналов.

Таблица 3 – Описательные статистики сети MLP 9-17-13

Выборка	Описательные статистики								
	Fe	Cu	Cr	Mo	Mn	Al	Si	Ni	Sn
Max (обуч.)	0,071	0,0619	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0025	0	0,0126
Max (обуч.)	116,5	46,511	0,4841	0,9607	1,2060	1,0577	14,097	33E+07	9,1738
Среднее (обуч.)	2,981	2,1832	0,0140	0,0179	0,0294	0,0172	0,2468	15096	0,3375
Стандар. отклон. (обуч.)	8,143	4,3254	0,0338	0,067	0,0843	0,0660	0,9920	72257	0,7040
Min (контр.)	0,071	0,0619	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0025	0	0,0126
Max (контр.)	70,73	53,178	0,2943	0,5812	0,7316	0,6378	16,147	1	6,1422
Среднее (контр.)	2,599	2,1319	0,0122	0,0144	0,0254	0,0181	0,2916	0	0,2917
Стандар. отклон. (контр.)	6,549	4,8082	0,0273	0,053	0,0678	0,0673	1,3304	0	0,5244
Min (тест.)	0,071	0,0621	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0025	0	0,0126
Max (тест.)	103,3	47,037	0,4296	0,8516	1,0697	0,9239	14,228	1	5,9515
Среднее (тест.)	2,234	2,0437	0,0110	0,012	0,0215	0,0216	0,2119	0	0,3301
Стандар. отклон. (тест.)	19,37	1,2112	0,0800	0,1615	0,2009	0,0161	0,1578	0	0,1754
Min (общий)	0,071	0,0619	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0025	0	0,0126
Max (общий)	116,5	53,178	0,4841	0,9607	1,2060	1,0577	16,147	33E+07	9,1738
Среднее (общее)	2,812	2,1546	0,0133	0,0165	0,0276	0,0180	0,2483	10573	0,3259
Стандар. отклон. (общее)	7,709	4,3503	0,0320	0,0632	0,0798	0,0691	1,0444	60471	0,6657

Весовые коэффициенты w, основа обученной сети, в НС MLP 9-17-13 принимают значения от –600 до 600. Гистограмма распределения рассчитанных весов сети на рисунке 4, показывает, что основная группа весов сформирована в значениях от –100 до 100.

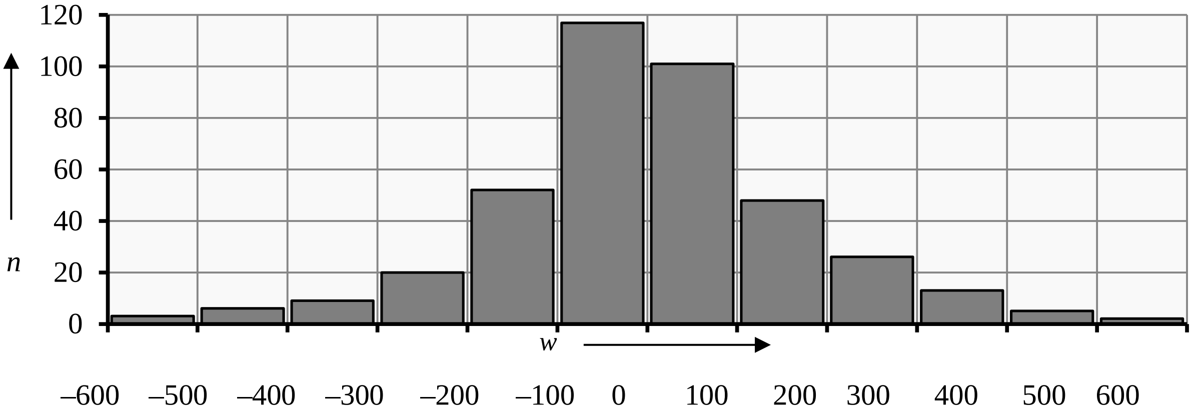


Рисунок 4 – Гистограмма распределения весов сети

При проведении статистической оценки необходимо рассмотреть уровень доверия, который отражает диапазон значений исходя из средней выборочной совокупности, характеризующей точность полученных значений по отношению к истинным значениям.

Уровень доверия характеризует то, что значение параметров обученной нейронной сети находится в допустимом для нее доверительном интервале. Доверительная вероятность обычно обозначается как 1 – α и выбирается из значений 0,9; 0,95; 0,99 [4].

На рисунке 5 изображена диаграмма в трехмерном пространстве, отображающая уровень доверия полученной нейронной сети. Темные точки на рисунке (тестовые (выборочные) наблюдения) характеризуют принадлежность уровня доверия к полученным в ходе обучения ИНС значениям целевой и выходной функций. Следует заметить, что отклонения уровней являются незначительными и не выходят за пределы 5 %, что допустимо при решении рассматриваемой задачи.

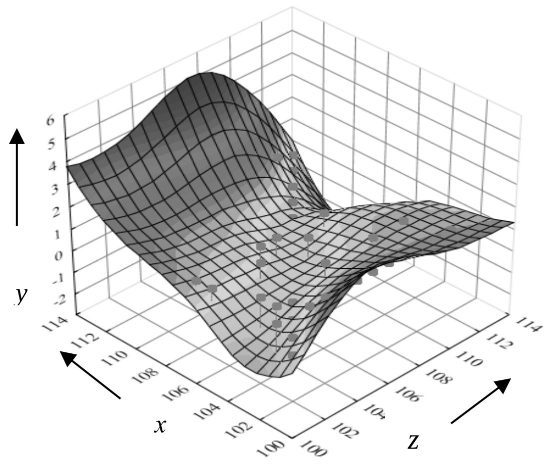


Рисунок 5 – Уровень доверия рассматриваемой НС: y – остаток; x и z – целевая и выходная функции

Список литературы

1. Овчаренко, С. М. Метод безразборного контроля величины износа трущихся деталей тепловозных дизелей [Текст] / С. М. Овчаренко, Е. И. Сковородников // Наука и техника транспорта / Российская открытая акад. трансп., Московский гос. ун-т путей сообщения. – М. – 2006. – № 2. – С. 64 – 71.

2. Хайкин, С. О. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. О. Хайкин. – М., 2006. – 1104 с.

3. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории [Текст] / А. И. Галушкин. М., 2010. – 496 с.

4. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе Statistica: Учебное пособие [Текст] / В. П. Боровиков. – М., 2013. – 288 с.

References

1. Ovcharenko S. M., Skovorodnikov E. I. Method dimension to control the amount of wear of rubbing parts of diesel engines [Metod bezrazbornogo kontrolia velichiny iznosa trushchikhsia detalei teplovoznykh dizelei]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology of Transport*, 2006, no.2, pp. 64 – 71.

2. Haykin S. O. *Neironnye seti* (Neural Networks). Moscow, 2006, 1104 p.

3. Galushkin A. I. *Neironnye seti* (Neural Networks). Moscow, 2010, 496 p.

4. Borovikov V.P. *Populiarnoe vvedenie v sovremennyi analiz dannykh v sisteme STATISTICA* (Popular introduction to modern data analysis system Statistica). Moscow, 2013, 288 p.

УДК 621.336

А. Н. Смердин, А. Е. Чепурко, В. Н. Горюнов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОКОПРИЕМНИКА ЗА СЧЕТ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

В статье приведены усовершенствованные методики аэродинамических натурных и лабораторных испытаний токоприемника. Предложено считать плотность среды ее интегральным показателем. Рассматри-

вается влияние плотности воздуха на приведенные виды испытаний и обоснована необходимость внесения поправок при анализе результатов для корректной обработки полученных данных.

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года» ОАО «РЖД» планируется увеличение скорости движения поездов и строительство отдельных скоростных и высокоскоростных магистралей. Введение в эксплуатацию современного электроподвижного состава потребует проведения испытаний, в том числе и испытаний токоприемников, поэтому совершенствование методик испытаний является в настоящее время актуальной задачей.

С повышением скорости движения увеличивается и влияние аэродинамических сил [1]. Спектры обтекания электроподвижного состава существенно зависят от конфигурации крышевого оборудования, которое оказывает влияние на параметры работы токоприемника.

Наиболее достоверную оценку аэродинамических вертикальных сил, действующих на токоприемник электроподвижного состава, позволяют дать натурные испытания с помощью диагностического комплекса (специального подвижного состава), предложенного в ОмГУПСе, обеспечивающие измерение параметров контактной сети и данного исследуемого токоприемника [1 – 4]. Данный диагностический комплекс должен иметь крышевое оборудование, аналогичное оборудованию подвижного состава, на котором планируется эксплуатация токоприемника.

Токоприемник устанавливается на крыше диагностического комплекса на место штатного измерительного токоприемника. В схему измерения включается показанное на рисунке 1 оборудование: 1 – токоприемник; 2 – тензометрический датчик; 3 – блок регистрации; 4 – блок; 5 – синтетический трос; 6 – электрическая лебедка; 7 – видеокамера; 8 – портативный компьютер; 9, 11 – медиаконвертеры; 10 – оптоволоконный шнур; 12 – компьютер оператора; 13 – GPS-датчик; 14 – анемометр; 15 – крыло; 16 – управляющие стержни.

Регистрация аэродинамической подъемной силы выполняется с помощью тензометрических датчиков [5]. В представленной на рисунке 1 схеме измерения применяются электрические тензометры (тензорезистивные датчики) типа ZFA50. Перед началом испытаний необходимо произвести тарировку тензодатчиков, для этого используется груз с суммарной массой, соответствующей пределам измерения ZFA50.

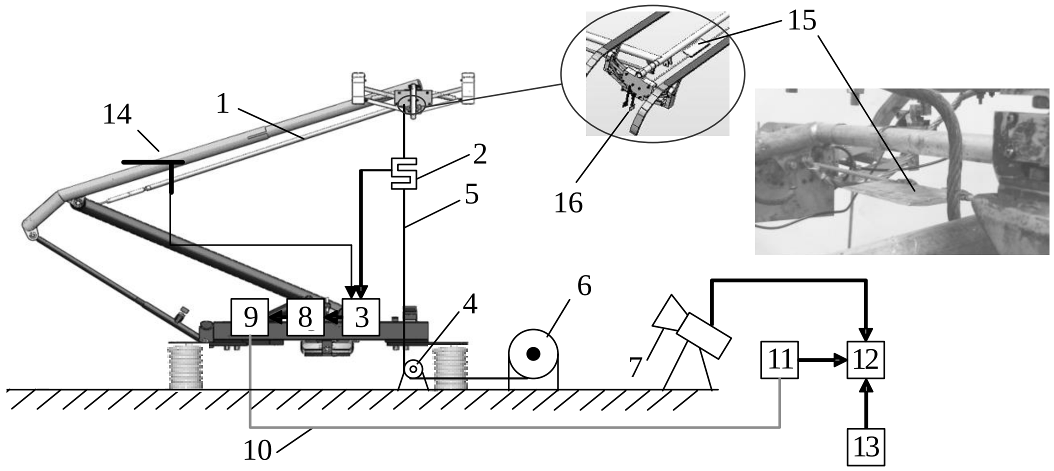


Рисунок 1 – Схема измерения аэродинамической подъемной силы токоприемника

Методика испытаний заключается в определении аэродинамической подъемной силы токоприемника при различных значениях скорости движения. Полоз (полоза) токоприемника фиксируют в горизонтальном положении для исключения поворотов относительно оси кареток. К верхнему шарниру системы подвижных рам присоединяется тензометрический датчик, подключенный к блоку регистрации, на этот блок также поступает информация с анемометра. К датчику нажатия крепится синтетический трос длиной не менее 10 м и диаметром не менее 6 мм. Второй конец троса закрепляют через блок на электрической лебедке. Видеокамера устанавливается на крыше диагностического комплекса таким образом, чтобы в ее поле зрения попадал полоз токоприемника во всем диапазоне вертикальных перемещений. При помощи видеокамеры, подключенной к компьютеру оператора, определяется высотное положение токоприемника во время испытаний. Управление лебедкой осуществляется дистанционно из кабины диагностического комплекса. Блок регистрации подключается к портативному компьютеру. Медиаконвертер соединяется с ПЭВМ при помощи волоконно-оптического кабеля, выполняющего роль потенциальной развязки. Блок регистрации, портативный компьютер и медиаконвертер устанавливаются на основании токоприемника. Второй конец волоконно-оптического кабеля подключается к медиаконвертеру, расположенному в кабине диагностического комплекса и соединенному с компьютером оператора. Информация об аэродинамической вертикальной подъемной силе от блока регистрации поступает через портативный компьютер, волоконно-оптический кабель в компьютер оператора, при помощи которого осуществляется наблюдение в процессе испытаний. К компьютеру подключен также GPS-датчик, осуществляющий привязку показаний датчиков по времени к местности.

С помощью схемы измерений, приведенной на рисунке 1, в 2012 г. специалистами ОмГУПСа в рамках выполнения хоздоговорной работы проводились испытания токоприемника ТА1-УКС.160 (АИСТ). Данные испытаний показали, что при одних и тех же рабочей высоте токоприемника, направлении и скорости набегающего потока аэродинамические вертикальные силы различаются. В соответствии с выражениями классической аэродинамики для аэродинамической подъемной силы и силы лобового сопротивления известно, что эти силы зависят также и от плотности среды [6, 7].

Плотность воздуха определяется такими факторами, как давление, температура, влажность, наличие второй фазы, и может считаться интегральным параметром среды, зависящим от метеоусловий:

$$\rho = f(T, P, \varphi, \omega), \qquad (1)$$

где T – температура среды; К, P – давление среды, Па; φ – относительная влажность среды; ω – доля второй фазы в среде.

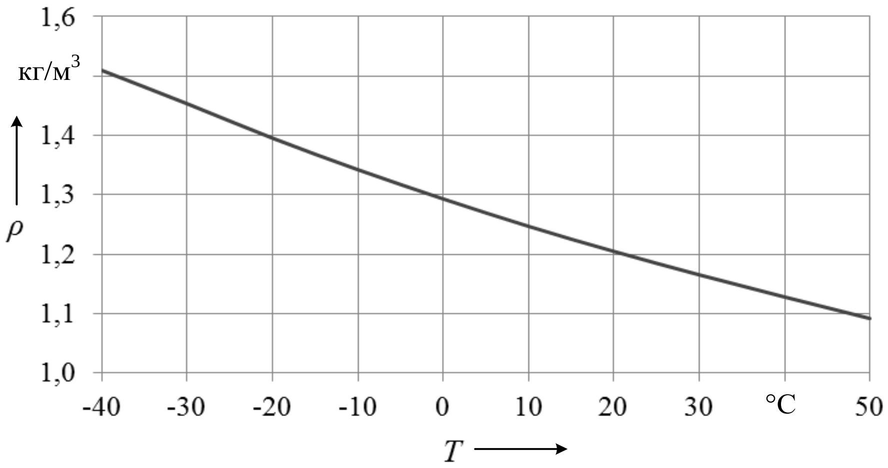
В качестве средств для измерения плотности используются различные плотномеры. Первыми измерителями плотности, которые появились еще в конце XIX в., были пикнометры (стеклянные шаровидные колбы, в которых плотность газа или жидкости определялась путем взвешивания). Существенным недостатком применения данного устройства для измерения плотности является невозможность использовать его при натурных испытаниях и получать данные в виде цифрового сигнала.

В качестве альтернативы могут быть использованы устройства, с помощью которых плотность определяется путем обработки информации о метеорологических параметрах среды, полученной с помощью датчиков. Определив влажность, давление и температуру, можно вычислить плотность среды [8]. Зависимость плотности сухого воздуха от температуры и давления при отсутствии в нем второй фазы приведена на рисунке 2.

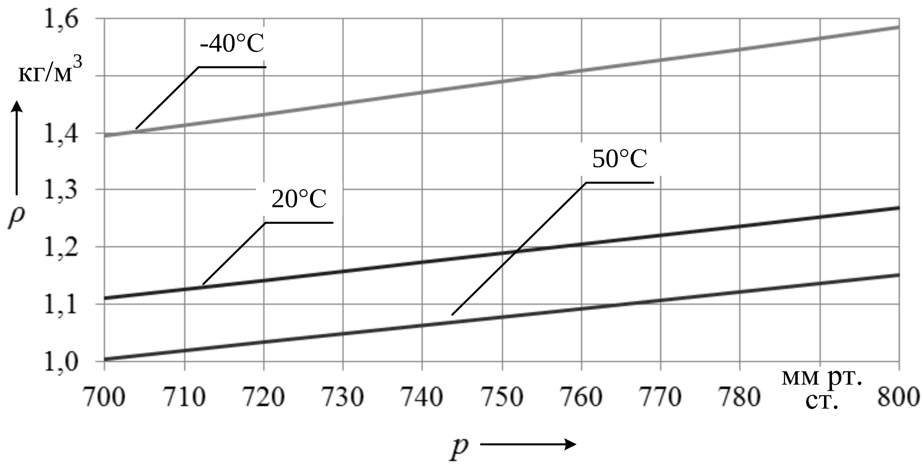
Использование данного метода измерения плотности требует применения большого числа датчиков, что снижает надежность схемы, а влияние второй фазы на плотность среды при этом вообще не учитывается. Для решения указанной проблемы предлагается использовать зависимость скорости звука в среде от ее интегрального показателя плотности, кг/м^3,

$$\rho = 0{,}00003 \cdot c^2 - 0{,}0306 \cdot c + 7{,}645, \qquad (2)$$

где c – скорость распространения звука в воздушной среде, м/с.



а



б

Рисунок 2 – Зависимость плотности сухого воздуха от: температуры (а) и давления (б)

Данная зависимость приведена в ГОСТ 4401-81 [8] и показана в виде графика на рисунке 3. Таким образом, предлагаемый интегральный показатель плотности среды позволяет учитывать большинство факторов, влияющих на аэродинамические силы, действующие на токоприемник.

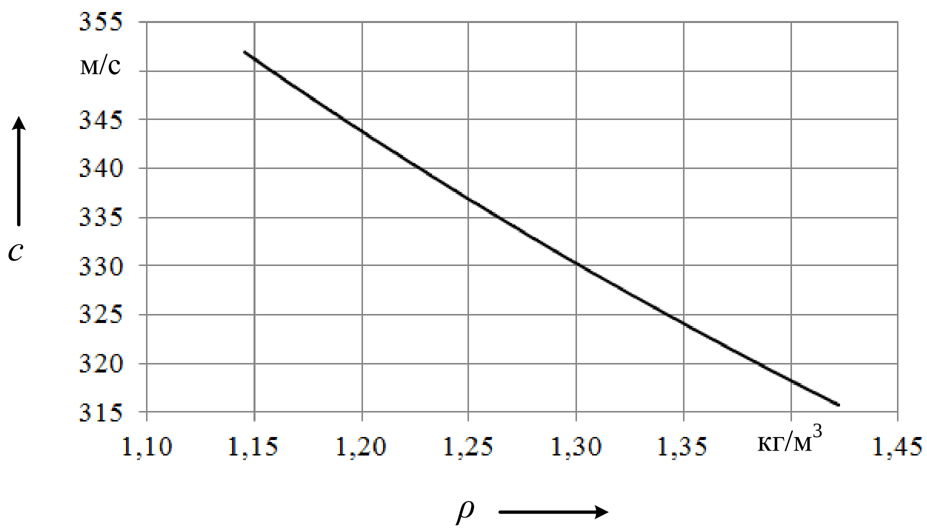


Рисунок 3 – Скорость звука в среде различной плотности

С помощью ПО, разработанного в ОмГУПСе, расчет плотности воздуха может быть произведен посредством ультразвукового измерителя. На вход датчика ультразвука микроконтроллером, интегрированным в измеритель показателя плотности, подается короткий импульс (10 мкс), который запускает схему измерения. Источник формирует пачку из восьми импульсов с частотой 40 кГц, после чего на приемнике устанавливается сигнал высокого уровня. Этот сигнал, в свою очередь, сбрасывается ультразвуковым импульсом, отраженным от поверхности с высоким значением коэффициента отражения звука. Микроконтроллер измеряет время, за которое ультразвуковой сигнал прошел путь от источника до приемника (рисунок 4). После этого рассчитывается скорость звука, которая непосредственно зависит от плотности среды.

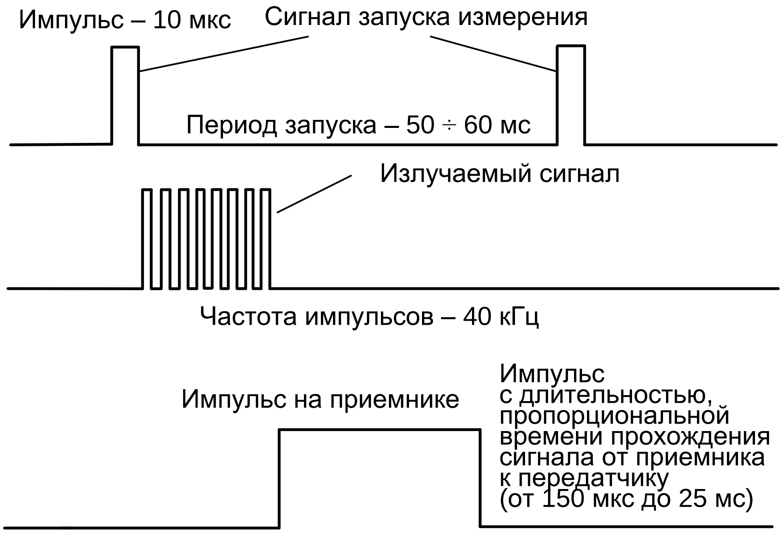


Рисунок 4 – Принцип работы датчика для определения плотности среды

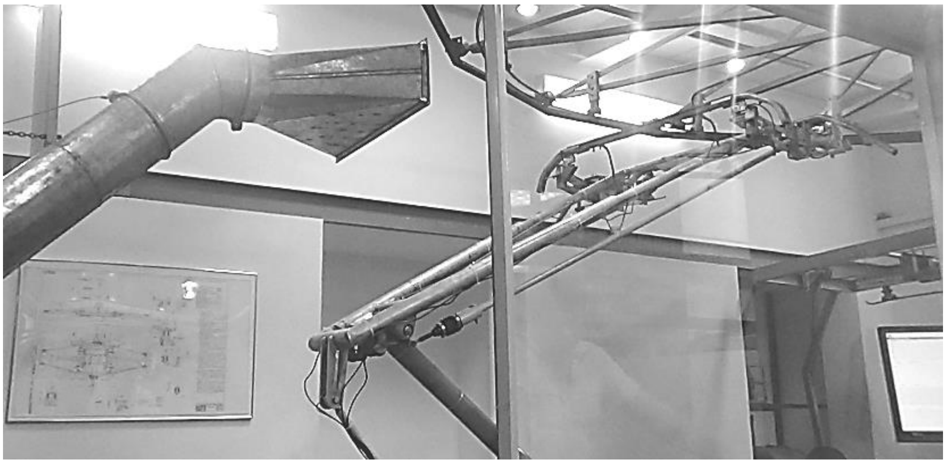
Апробация методики была проведена в ходе лабораторных испытаний аэродинамического устройства для компенсации аэродинамической составляющей контактного нажатия на стенде, показанном на рисунке 5. В рамках этих испытаний данное аэродинамическое устройство с крылом профиля NACA-2210 было закреплено на верхнем узле токоприемника. Комплект измерительных приборов состоял из дифманометра ДМЦ-01, ультразвукового измерителя показателя плотности и аналого-цифрового преобразователя, подключенных к компьютеру. К аналого-цифровому преобразователю были подключены тензодатчик и датчик угла поворота крыла.

Массив данных накапливался в ходе нескольких измерений с частотой 10 Гц. В базу данных заносились также показания дифманометра. При анализе данных производилась выборка по скорости в диапазоне от 20 до 70 м/с с интервалом скоростей 1 м/с для четырех углов поворота крыла.

Для обеспечения достоверности полученных данных алгоритм их получения и обработки должен был соответствовать положению теории планирования эксперимента [9, 10].

Результаты, полученные при лабораторных исследованиях, определялись условиями эксперимента, сбором массива информации в ходе проведения этих исследований и обработкой данных. На этапе лабораторных исследований, который предшествовал снятию показаний, на полученные данные могли повлиять качество поверки и тарировки измерительных приборов, погрешности оператора, погрешности методики измерений, а также невыявленные в ходе подготовки недостатки экспериментальной установки и положение объекта исследования. В ходе эксперимента получали массив данных, после чего обрабатывали его с помощью методов математической статистики [10]. Данный этап исследований включал в себя также построение графиков функций и проверку результатов исследований в некоторых характерных точках, определенных заранее. Если полученные данные признавались по заданным критериям достоверными, то строились итоговые графики. В противном случае выявлялись факторы, которые вносили погрешности, и эксперимент проводился заново.

а б



в

Рисунок 5 – Стенд для испытаний верхнего узла токоприемника в лаборатории «Контактные сети и ЛЭП» ОмГУПСа по усовершенствованной методике: а – ультразвуковой измеритель показателя плотности; б – датчик угла поворота крыла; в – токоприемник с малой аэродинамической трубой

Алгоритм действий при аэродинамических испытаниях токоприемника с помощью усовершенствованной методики включал в себя следующие шаги:

приведение в готовность оборудования для измерения аэродинамической составляющей контактного нажатия, включая размещение непосредственно рядом с токоприемником ультразвукового измерителя плотности;

фиксацию начальных показаний тензодатчиков, проведение их тарировки с помощью груза с заранее известной массой;

снятие показаний: подъем токоприемника, получение данных при отсутствии аэродинамического воздействия и с включенной аэродинамической трубой с последующим расчетом их разности, которая и является аэродинамической вертикальной силой при заданной скорости движения воздушного потока;

регулирование скорости набегающего потока, измеряемой дифманометром, путем изменения расстояния от трубы до верхнего узла;

распределение полученных данных в зависимости от рабочей высоты токоприемника и скорости потока;

приведение результатов к данным с одинаковой плотностью для их корректного сопоставления и построение аэродинамических характеристик подъемной силы токоприемника с учетом влияния плотности воздуха.

Схема измерения была дополнена датчиком угла поворота крыла (рисунок 6), который при установке аэродинамического устройства на токоприемник позволяет производить контроль этого угла в зависимости от скорости набегающего воздушного потока.

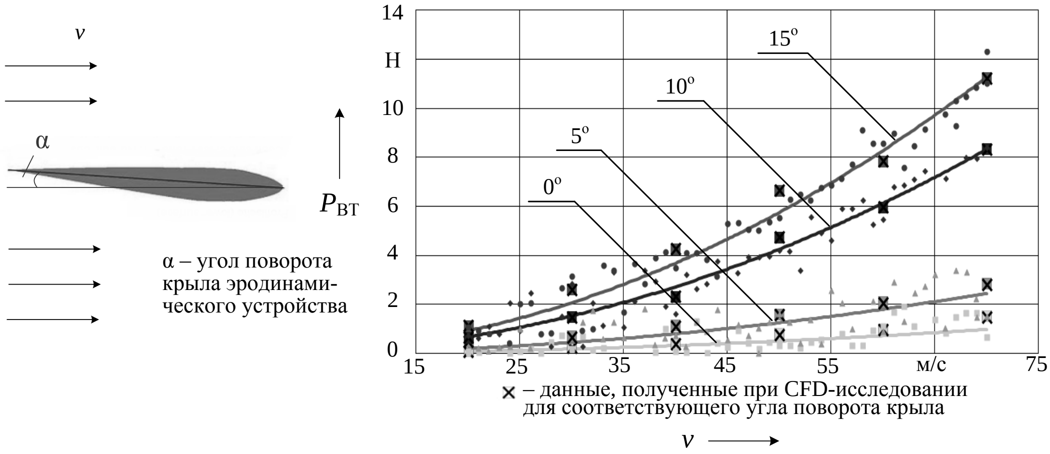


Рисунок 6 – Аэродинамические характеристики крыла аэродинамического устройства в зависимости от угла его поворота при движении токоприемника «коленом» вперед

Итогом лабораторных испытаний стали построенные зависимости аэродинамической подъемной силы крыла аэродинамического устройства от угла атаки при скорости воздушного потока от 20 до 70 м/с, которые приведены на рисунках 6 и 7. Кроме того, для данного крыла были определены аэродинамические вертикальные силы с использованием средств вычислительной гидрогазодинамики (CFD).

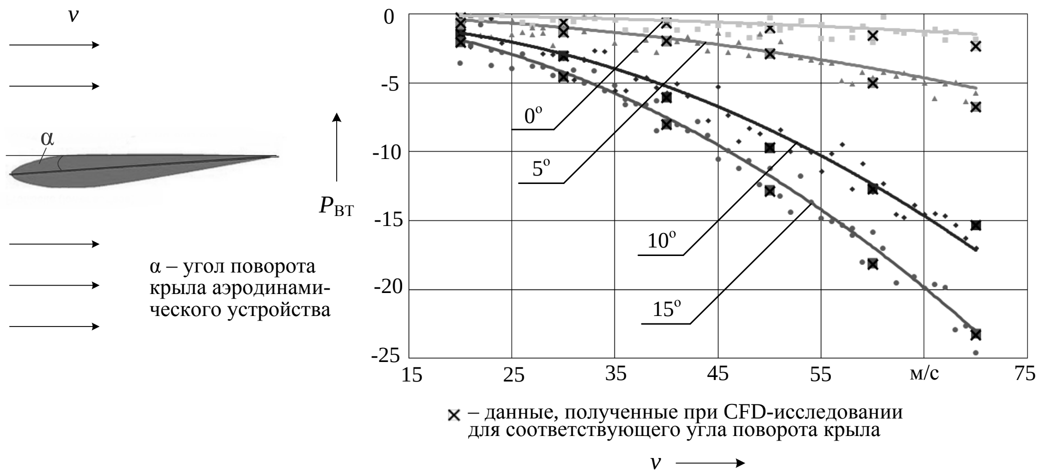


Рисунок 7 – Аэродинамические характеристики крыла аэродинамического устройства в зависимости от угла его поворота при движении токоприемника «коленом» назад

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

1) Плотность воздушной среды является ее интегральным показателем, который зависит от метеоусловий, поэтому при проведении натурных и лабораторных испытаний токоприемника требуется в дополнение к стандартной методике испытаний проводить также измерение плотности воздуха и вносить поправки на основе этих измерений в полученные результаты.

2) Предложенный интегральный показатель плотности среды, определяемый экспериментально по скорости звука, включает в себя большинство влияющих факторов и может быть использован для корректировки результатов при расчете аэродинамических показателей.

3) Разница между аэродинамическими вертикальными силами, полученными экспериментально и с помощью методов вычислительной гидрогазодинамики, не превысила 10 %, что свидетельствует об адекватности применяемых усовершенствованных методик лабораторных и натурных испытаний токоприемника.

Список литературы

1. Measurement of the Contact Force of the Pantograph by Image Processing Technology [Text] / T. Koyama, M. Ikeda et. al. – Summaries of RTRI REPORT (in Japanese). – 2014. – QR. – Vol. 55. – No. 2. – P. 73 – 78.
2. Применение цифровых средств измерения для определения динамических характеристик устройств токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Павлов и др. // Транспорт Урала / уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2007. – № 4. – С. 76 – 79.
3. Перспективные методы исследования и оценки параметров системы токосъема при проведении линейных испытаний [Текст] / В. М. Павлов, А. С. Голубков и др. // Вестник ВНИИЖТа / Всерос. ин-т инж. ж.-д. трансп. – М. – 2008. – № 6. – С. 40 – 45.
4. Разработка контактной сети для ВСМ России [Текст] / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев и др. // Инновационный транспорт / Российская акад. трансп., Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2011. – № 1 (1). – С. 16 – 22.
5. Keil, S. Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen (Stress analysis using strain gages) [Text] / S. Keil – Cuneus – Verlag, 1995.
6. Хлебников, В. С. Аэротермодинамика элементов летательных аппаратов при стационарном и нестационарном сверхзвуковом отрывном обтекании [Текст] / В. С. Хлебников. – М.: Физматлит, 2014. – 168 с.
7. Пат. 2386552 Российская Федерация, МПК B 60 M 1/12 Паранин, А. В. Устройство для подавления автоколебаний контактной подвески [Текст] / А. В. Паранин, А. Г. Галкин, А. В. Ефимов; заявитель и патентообладатель Уральский гос. ун-т путей сообщения. – 2008138115/11; заявл. 24.09.2008; опубл. 20.04.2010. Бюл. № 11.
8. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 180 с.
9. Михеев, В. П. Совершенствование систем контактного токосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / В. П. Михеев, О. А. Сидоров. – Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 182 с.
10. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: Учебное пособие [Текст] / Н. И. Сидняев. – М.: Юрайт, 2011. – 399 с.

References

1. Measurement of the Contact Force of the Pantograph by Image Processing Technology / T. Koyama, M. Ikeda et. al. – Summaries of RTRI REPORT (in Japanese) QR 2014 Vol. 55, 2014, no.2, pp. 73 – 78.
2. Sidorov O. A., Pavlov V. M., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Zarenkov S. V. The use of digital measurement tools to determine the dynamic characteristics of the current collection devices [Primenenije tsifrovykh sredstv izmerenija dlia opredelenija dinamicheskikh kharakteristik ustrojstv tokos"ema]. *Transport Urala – The transport of the Urals*, 2007, no. 4 (15), pp. 76 – 79.
3. Pavlov V. M., Smerdin A. N., Golubkov A. S., Zarenkov S. V., Mirinos N. V., Tiurnin P. G., Zakiev E. E. Perspective methods of research and assessment of parameters of system of a tokosjem when carrying out linear tests [Perspektivnye metody issledovanija i otsenki parametrov sistemy tokos"ema pri provedenii linejnykh ispytanij]. *Vestnik VNIIGT – Bulletin of the research Institute of railway transport*, 2008, no. 6 (15), pp. 40 – 45.
4. Ivanov V. A., Galkin A. G., Kovalev A. A., Kudriashov E. V. Development of a contact network for high speed highway in Russia [Razrabotka kontaktnoj seti dlia VSM Rossii] – *Innovatsionnyj transport*, 2011, no. 1, pp. 16 – 22.
5. Keil S. Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen (Stress analysis using strain gages). – Cuneus – Verlag, 1995.
6. Khlebnikov V. S. *Aerodinamika elementov letatel'nykh apparatov pri statsionarnom i nestatsionarnom sverkhzvukovom otryvnom obtekanii* (Aerothermodynamics elements of aircraft under stationary and non-stationary supersonic separated flow). Moscow: FIZMATLIT, 2014, 168 p.

7. Paranin A. V., Galkin A. G., Efimov A. V. *Patent RU 23866552 C1*, 20.04.2010.
8. *Atmosfera standartnaja. Parametry*. GOST 4401-81. (Standard atmosphere. parameters, State Standart 4401-81). Moscow: Standarty, 1982, 180 p.
9. Mikheev V. P., Sidorov O. A. *Sovershenstvovanie sistem kontaktnogo tokos"ema s gestkim tokoprovodom* (Improvement of current collection contact with a rigid current lead). Omsk: OSTU, 2003, 182 p.
10. Sidniaev N. I. *Teorija planirovanija eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh* (Theory of planning of experiment and analysis of statistical data). Moscow: Iurajt, 2011, 399 p.

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

В. В. Харламов, В. О. Мельк, Д. И. Попов, А. В. Литвинов

АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

В статье рассмотрена программа проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей подвижного состава железных дорог. На основании рекомендаций государственных стандартов по испытаниям асинхронных двигателей составлен алгоритм проведения испытаний, учитывающий предложенные схемные решения и функциональные возможности основных средств испытаний.

Выполнение испытаний, направленных на получение данных, по которым можно судить о соответствии электрической машины стандартам и техническим условиям, является заключительным этапом перед выпуском машины в эксплуатацию. Важно обеспечить не только соответствие проведения испытаний существующим государственным стандартам, но и подобрать такой метод, схему и алгоритм испытаний, при которых потери электрической энергии при испытании будут минимальными.

Таким методом является проведение испытаний при взаимной нагрузке двигателей. Метод взаимной нагрузки долгие годы успешно применяется при испытании тяговых двигателей постоянного тока [1]. Реализация данного метода при испытании асинхронных тяговых двигателей требует применения устройств для регулирования режимов испытаний и согласования работы этих двигателей с частотой сети.

Актуальность применения данного метода при проведении испытаний асинхронных тяговых двигателей подвижного состава железных дорог не вызывает сомнений. В скором времени потребность в таких испытательных станциях возрастет в связи с широким внедрением подвижного состава с асинхронным тяговым приводом. Так, в настоящее время на сети железных дорог РФ эксплуатируется либо вводится следующий подвижной состав: электровозы (ЭП10, НПМ2, ЭП20, 2ЭС5, 2ЭС10, 2ЭС20), электропоезда (ЭН3, ЭТ4А), поезда метрополитенов, тепловозы (2ТЭ25А, ТЭМ9Н, ТЭМ35) [2].

Особенностью асинхронных тяговых двигателей, работающих на современном подвижном составе, является их работа совместно с преобразователями частоты, с помощью которых регулируются режимы работы этих двигателей. Как отмечено в ГОСТ 25941-83 [3], асинхронные двигатели, работающие совместно с преобразователями частоты, должны быть испытаны с этими же типами преобразователей. Таким образом, испытательные станции должны быть разработаны с учетом приведенного условия.

Сотрудниками ОмГУПСа была предложена схема испытаний асинхронных тяговых двигателей, обеспечивающая проведение испытаний по методу взаимной нагрузки (рисунок 1) [4, 5].

Регулирование режимов нагрузки задается с помощью установки различных частот питающего напряжения, формируемых преобразователями частоты ПЧ1 и ПЧ2. Передача электрической энергии при работе одной из асинхронных машин – АМ1 или АМ2 – в режиме генератора осуществляется через преобразователь частоты, работающий совместно с генератором, далее – по общей шине постоянного тока (ШПТ) ко второму преобразователю частоты на испытуемый двигатель [4].

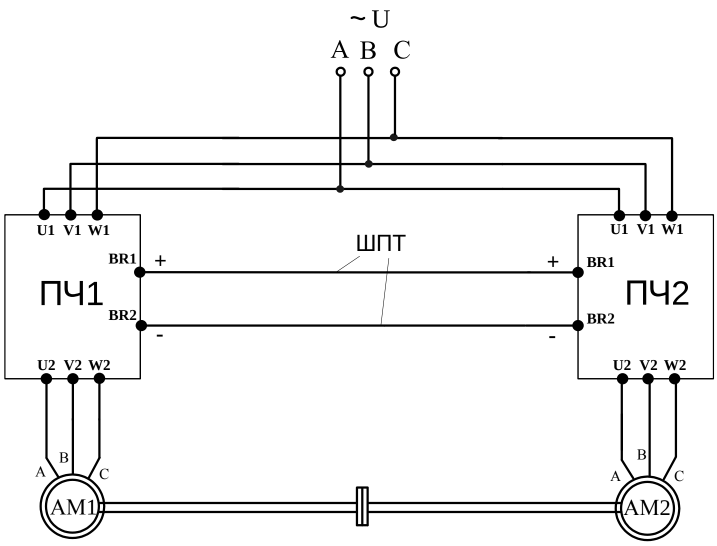


Рисунок 1 – Схема испытаний асинхронных тяговых двигателей с применением метода взаимной нагрузки

В соответствии с перечнем приемосдаточных испытаний для асинхронных тяговых двигателей [6], требований ГОСТ 11828-86 [7], ГОСТ 7217-87 [8], а также с предложенными схемными решениями [4, 9, 10] составлена последовательность проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей:

1) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса;
2) измерение сопротивления обмоток постоянному току;
3) прокрутка двигателей;
4) испытание электрической прочности междувитковой изоляции;
5) определение тока и потерь холостого хода;
6) измерение сопротивления изоляции обмотки статора;
7) измерение тока и потерь короткого замыкания;
8) измерение сопротивления изоляции обмотки статора;
9) испытание на нагревание;
10) измерение сопротивления изоляции обмотки статора;
11) испытание при повышенной частоте вращения;
12) измерение сопротивления изоляции обмотки статора;
13) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса;
14) измерение сопротивления изоляции обмотки статора;
15) вибродиагностика (выполняется на специальных стендах).

Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 11828-86 [7], специальные условия при проведении испытания методом взаимной нагрузки не требуются.

Так как асинхронные тяговые двигатели имеют сопротивление обмоток менее 1 Ом, ГОСТ 11828-86 [7] рекомендует при измерении сопротивления обмоток постоянному току использовать метод вольтметра и амперметра. Проведение такого испытания требует комплектации испытательной станции дополнительным источником постоянного тока, которым может быть аккумуляторная батарея, генератор постоянного тока, статический выпрямитель. Благодаря использованию в схемах преобразователей частоты и их конструктивному исполнению (наличие промежуточного звена постоянного тока) нет необходимости в использовании дополнительных устройств.

Для измерения сопротивления обмоток статора постоянному току необходимо следующее оборудование: амперметр и вольтметр постоянного тока; тормозной реостат; термометр* и пирометр* (* – при проведении испытания в практически холодном состоянии).

Схема для измерения сопротивления обмоток постоянному току показана на рисунке 2 (при измерении сопротивления между фазами А и В). В качестве нагрузочного сопротивления возможно использование тормозного реостата, поставляемого в комплекте с частотными преобразователями.

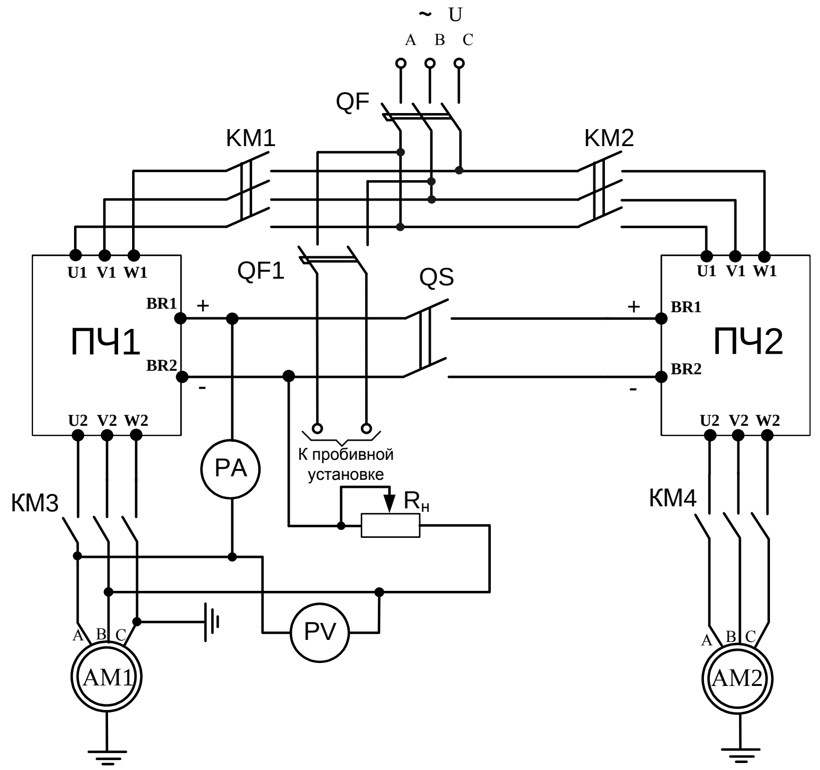


Рисунок 2 – Схема для проведения измерения сопротивления постоянному току обмоток статора асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки

Далее при измерении сопротивления обмоток осуществляются действия согласно указаниям ГОСТ 11828-86 [7].

Прокрутка асинхронных двигателей, в том числе тяговых, выполняется для достижения рабочей температуры основных частей испытуемого двигателя, в частности, подшипниковых узлов, которую необходимо измерить с помощью пирометра. Испытание проводится на холостом ходу, продолжительность зависит от мощности машины и вида испытания. Например, для асинхронных тяговых двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт при приемосдаточных испытаниях продолжительность прокрутки – 60 минут [8].

Данное испытание проводится с использованием преобразователей частоты, каждый из которых выполняет питание своего асинхронного тягового двигателя. Схема для проведения прокрутки асинхронных тяговых двигателей приведена на рисунке 3.

Испытание проводится на холостом ходу при номинальной частоте питающего напряжения, формируемого с помощью преобразователей частоты. Двигатели испытывают повышенным на 30 % напряжением, которое превышает номинальное напряжение. Испытание проводится в течение трех минут.

Повышение напряжения возможно как на входе преобразователя, так и на его выходе (со стороны питания двигателя). Однако экономически целесообразным является первый вариант, так как для этого потребуется один трансформатор, тогда как при использовании второго варианта – два, по одному на каждый испытуемый двигатель при испытании методом взаимной нагрузки.

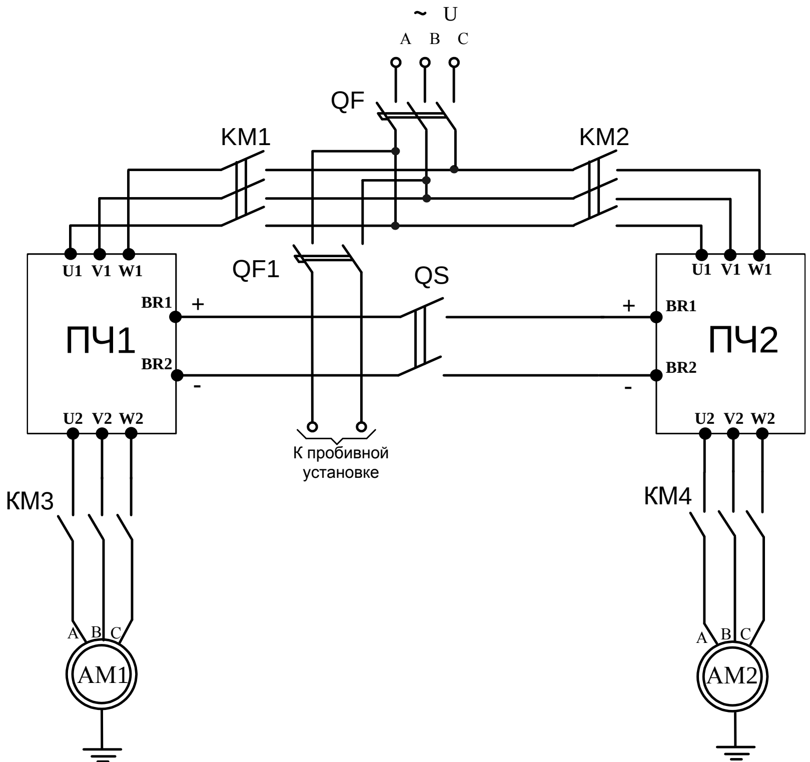


Рисунок 3 – Схема для проведения прокрутки асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки

Установка трансформатора до преобразователей частоты требует согласования с предельным значением входного напряжения этих преобразователей. Выпускаемые промышленностью преобразователи рассчитаны на широкий диапазон входного напряжения и выполняются в следующих вариантах: преобразователи с входным напряжением 380 – 480 В и преобразователи с входным напряжением 500 – 690 В.

После повышения напряжения на входе преобразователя частоты требуется задать величину напряжения на выходе преобразователя частоты, повысив величину номинального напряжения двигателя на 30 %.

Схема для выполнения испытания электрической прочности междувитковой изоляции показана на рисунке 4. Электрическая схема для проведения опыта холостого хода остается такой же, как на рисунке 4.

Испытание для определения тока и потерь короткого замыкания проводится при неподвижном состоянии валов испытуемых двигателей (рисунок 5). При этом устанавливается механическая связь валов и обеспечивается их вращение в разных направлениях, что реализуется с помощью преобразователей частоты. При испытании требуется пониженное напряжение, которое определяется по таблице 2 [8] либо путем деления номинального напряжения двигателя на коэффициент 3,8 [8].

Для подачи пониженного напряжения можно использовать возможности преобразователей частоты, изменив настройки номинальных параметров испытуемой машины. При этом исключается необходимость в применении понижающих трансформаторов, и устройств реверсирования испытуемых двигателей.

Испытание на нагревание является наиболее энергозатратным методом испытаний, так как испытуемый двигатель работает в течение одного часа под номинальной нагрузкой. Испытание проводится при механической связи испытуемых двигателей, обеспечивающей равенство частот вращения их валов. Звенья постоянного тока преобразователей частоты связаны между собой электрически для осуществления передачи вырабатываемой генератором электрической энергии машине, работающей в режиме двигателя.

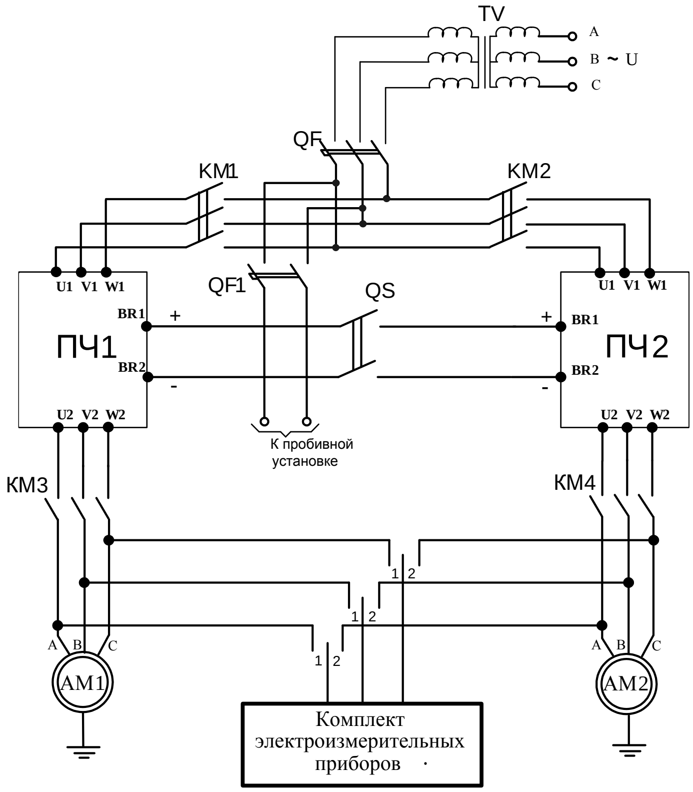


Рисунок 4 – Схема для проведения испытания электрической прочности междувитковой изоляции и опыта холостого хода асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки

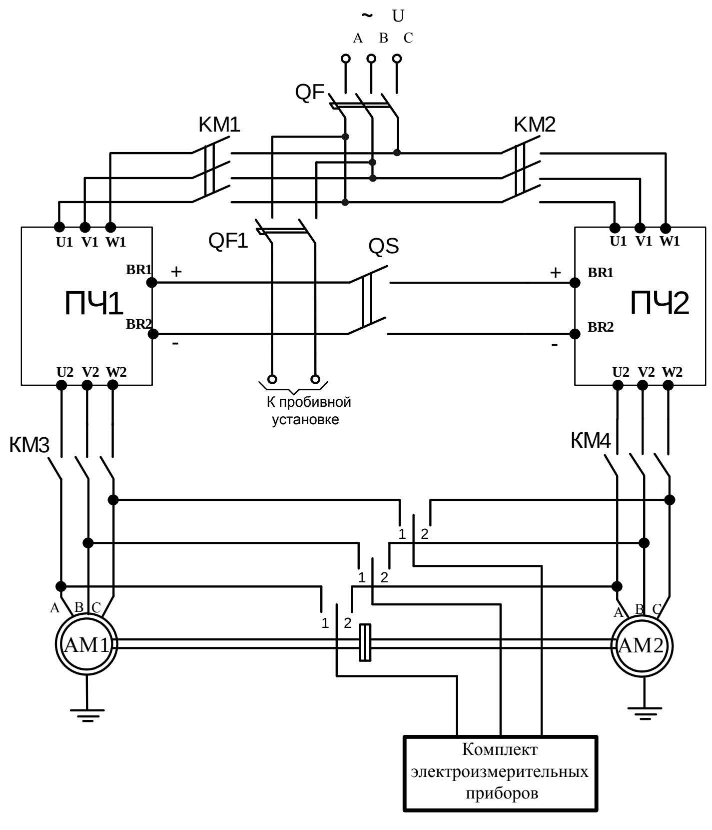


Рисунок 5 – Схема для определения тока и потерь короткого замыкания асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки

Согласно ГОСТ 11828-86 [7] испытание при повышенной частоте вращения может быть проведено путем разгона испытуемого двигателя от другой машины либо в составе многомашинного агрегата. С помощью преобразователей частоты задаются значения частоты питающего напряжения, при которых достигаются требуемые значения частоты вращения испытуемых машин.

Испытание электрической прочности изоляции проводится с использованием однофазного повышающего трансформатора, первичная обмотка которого должна быть подключена на линейное напряжение сети, вторичная – к испытуемой обмотке асинхронного тягового двигателя. Двигатели могут быть установлены на постаменте взаимной нагрузки. Предварительно нужно произвести демонтаж механического соединения валов испытуемых двигателей. Преобразователи частоты должны быть электрически изолированы от электродвигателей и сети (рисунок 6).

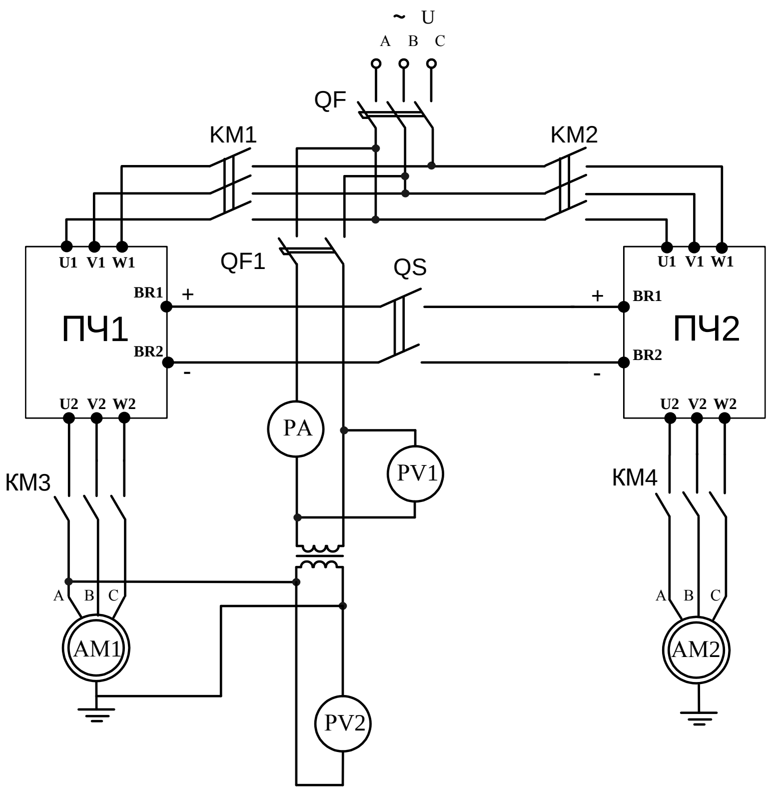


Рисунок 6 – Схема для проведения испытания электрической прочности изоляции обмоток асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки

Блок-схема алгоритма проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки приведена на рисунке 7.

К основным результатам выполненной работы следует отнести:

1) алгоритм проведения приемосдаточных испытаний асинхронных тяговых двигателей с учетом рекомендаций ГОСТ 11828-86 [7], ГОСТ 7217-87 [8] и особенностей схем взаимной нагрузки;

2) схему для определения сопротивления обмоток при испытании асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки без использования дополнительных источников постоянного тока;

3) идею проведения опыта короткого замыкания при испытании асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки за счет функциональных возможностей преобразователей частоты: без использования дополнительных тормозных устройств и понижающих трансформаторов;

4) идею проведения испытания при повышенной частоте вращения одновременно двух асинхронных тяговых двигателей в составе стенда взаимной нагрузки с помощью функциональных возможностей преобразователей частоты.

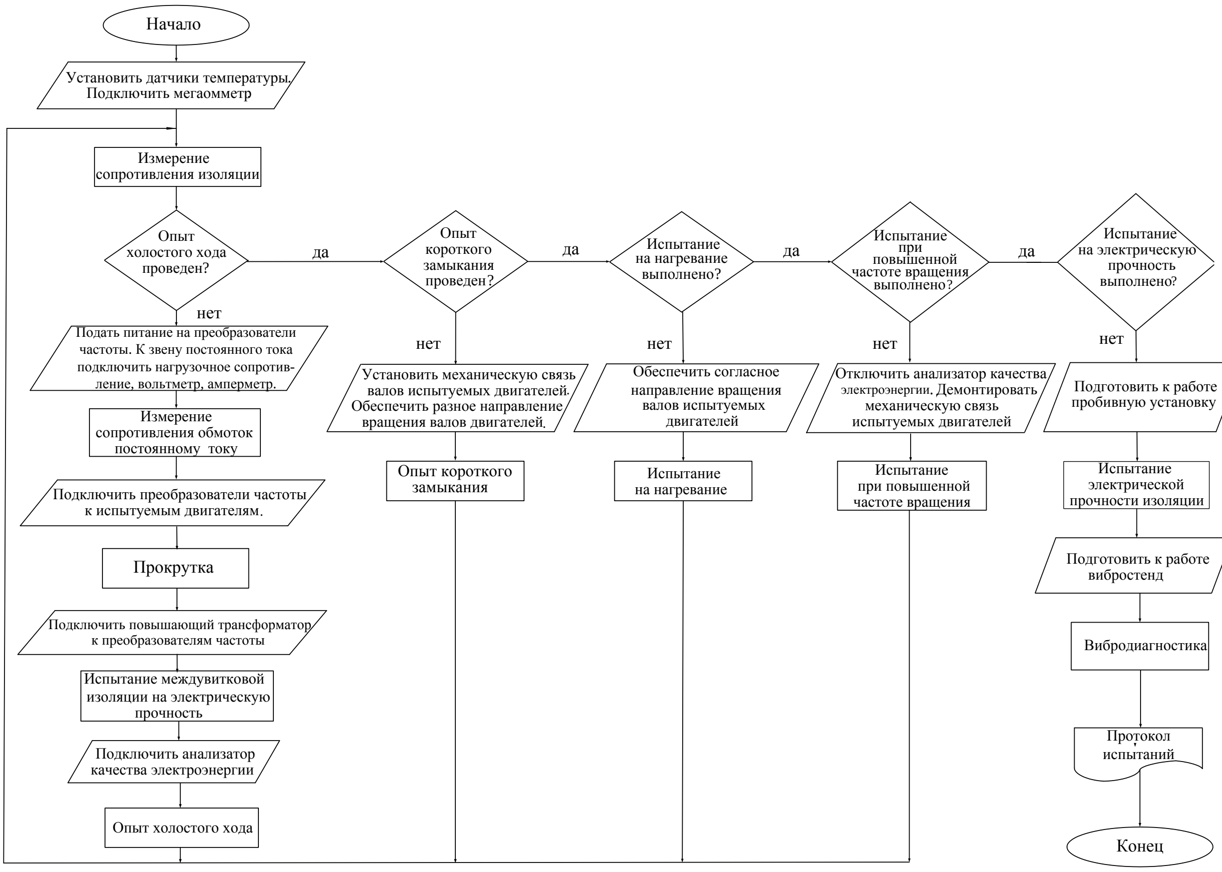


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки

Список литературы

1. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984 – 408 с.

2. Литвинов, А. В. Состояние и перспективы развития подвижного состава с асинхронным тяговым приводом в России [Текст] / А. В. Литвинов // Актуальные вопросы транспортной отрасли: проблемы и решения: Материалы всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж: Руна, 2013. – № 1. – С. 30 – 37.

3. ГОСТ 25941-83. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 30 с.

4. Пат. на полезную модель РФ, МПК 51 G01R 31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов (Россия). – № 140678; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, бюл. № 14. – 5 с.

5. Авилов, В. Д. Оценка энергетической эффективности применения метода взаимной нагрузки при испытании асинхронных тяговых двигателей [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 2 – 7.

6. Асинхронный тяговый привод локомотивов: Учебное пособие / А. А. Андрющенко, Ю. В. Бабков и др. / УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте. – М., 2013. – 403 с.

7. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003, 31 с.

8. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003, 39 с.

9. Авилов, В. Д. Методика определения потерь в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. № 1 (17). – С. 2 – 8.

10. Модернизированный стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов и др. // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 137 – 141.

References

1. Gerve G. K. Promishlennie ispitaniia electricheskih mashin (Industrial testing of electrical machines). Leningrad: Energiaatomizdat Publ., 1984, 408 p.

2. Litvinov A. V. Status and prospects of rolling stock with asynchronous traction drive in Russia [Sostoianie i perspektivi razvitiia podvignogo sostava v Rossii]. Materiali Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferencii «Aktualniie voprosi transportnoi otrasli: problemi i resheniia» (Materials of All-Russian scientific-practical conference «Topical issues of the transport sector: problems and solutions»). – Voronezh, 2013, pp. 30 – 37.

3. Mashiny electricheskie vraschauschiesia. Metody opredelenia poter' i koefficienta poleznogo deistviia, *GOST 25941-83* (Rotating electrical machines. Methods for the determination of losses and efficiency, State Standart 25941-83). Moscow, Standarty, 2003, pp. 30.

4. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. *Patent RU 140678,* 20.05.2014.

5. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. Evaluation of the energy efficiency of the method of mutual test load of asynchronous traction motors [Otcenka enrgeticheskoi effectivnosti primenenia metoda vzaimnoi nagruzki pri ispitanii asinhronnih dvigatelei]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 3 (15), pp. 2 – 7.

6. Andruschenko A. A., Babkov U. V., Zarifyan A. A. Asinhronnii tiagovii privod lokomotivov (Asynchronous traction drive locomotives). Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tcentr po obrazovaniu na geleznodorognom transporte» Publ., 2013, 403 p.

7. Mashiny electricheskie vraschauschiesia. Obschie metody ispotanii, *GOST 11828-86* (Rotating electrical machines. Common test methods, State Standart 11828-86). Moscow, Standarty, 2003, pp. 31.

8. Mashiny electricheskie vraschauschiesia. Dvigateli asinhronnie. Metody ispitanii, *GOST 7217-87* (Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods, State Standart 7217-87). Moscow, Standarty, 2003, pp. 39.

9. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. Method of determining the losses in two-tier frequency converters as part of test bench for asynchronous motors by mutual load [Metodika opredelenia poter' v dvuhzvennih preobrazovateliah chastoti v sostave stenda dlia ispitania asinhronnih dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 2 – 8.

10. Avilov V. D., Popov D. I., Dankovcev V. T., Litvinov A. V. Upgraded test stand by mutual induction motor load [Modernizirovannii stend dlia ispitanii asinhronnih dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki]. Materiali IX Mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferentsii «Povishenie tffectivnosti ekspluaracii kollektornih electromehanicheskih preobrazovatelei energii» (Materials of the IX Int. conference «Improving the efficiency of operation of the collector electromechanical energy transformations – verters»). – Omsk, 2013, pp. 137 – 141.

УДК 62.752.2, 621.8.02, 531.831

А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, Е. В. Каимов

ВИРТУАЛЬНЫЙ РЫЧАЖНЫЙ МЕХАНИЗМ: ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КАК ФОРМА ПРОЯВЛЕНИЯ РЫЧАЖНЫХ СВЯЗЕЙ

Рассматриваются особенности взаимодействия элементов динамического гасителя колебаний в виде твердого тела с двумя степенями свободы. Показано, что динамический гаситель интерпретируется в структуре механической колебательной системы с объектом защиты как дополнительная отрицательная связь, которая может быть представлена обобщенной пружиной.

Динамическая жесткость обобщенной пружины зависит от частоты внешнего возмущения и определяет проявления динамических свойств, характерных для режимов динамического гашения колебаний. Обобщенная пружина обладает свойствами квазипружины, что создает возможности различных преобразований структуры системы.

Предлагается введение понятия обобщенного передаточного отношения рычажных связей, возникающих между координатами движения элементов динамического гасителя. Формы передаточных отношений рычажных связей находятся во взаимно однозначном соответствии с системой выбранных координат. Передаточные отношения рычажных связей позволяют детализировать формы взаимных движений элементов системы.

Разработан метод построения математических моделей для оценки рычажных свойств движений механических колебательных систем.

Расчетные схемы машин и механизмов в виде механических колебательных систем, состоящих из упругодиссипативных и массоинерционных типовых элементов, могут иметь несколько степеней свободы и обладать определенными возможностями в конструктивно-технических вариациях структурных форм. Одним из направлений исследования возможностей изменения динамических свойств систем является введение дополнительных связей. Физические реализации дополнительных связей достаточно разнообразны, что предполагает поиск, разработку и использование новых элементов с нетрадиционными свойствами в виде устройств и механизмов [1, 2]. В этом отношении показательны такие задачи динамики, как защита от вибрационных возмущений. Особенностью таких задач является выделение объекта защиты (так же, как объекта управления в теории автоматического управления), относительно которого выстраивается виброзащитная система, состоящая из так называемых типовых элементов. Такие элементы чаще всего представляют собой известные в практических приложениях пружины, демпферы, амортизаторы и др. Вместе с тем могут вводиться и дополнительные связи. В ряде случаев формирование таких связей осуществляется на основе использования элементов, создающих эффекты преобразования движения и при динамических взаимодействиях [3 – 5]. Изменяются при этом и представления о структуре и динамических свойствах виброзащитной системы.

В предлагаемой статье рассматриваются возможности введения в структуры виброзащитных систем сложных или составных элементов, состоящих из элементарных звеньев. Такие образования могут обладать несколькими степенями свободы. Задача исследования заключается в развитии соответствующего методологического базиса, обеспечивающего возможности построения адекватных математических моделей в задачах динамического синтеза. В частности, определенный интерес возникает по отношению к особенностям отображения свойств рычажных связей и рычажных механизмов.

Рассматривается механическая колебательная система с тремя степенями свободы (рисунок 1).

В системе имеются объект защиты от вибраций (M_0), промежуточные массы m_2 и m_3 и упругие элементы $k_1 \div k_4$, k_{13}. Виброзащитная система состоит из блока (m_1, k_1) и опорной поверхности *I*, образующих так называемую базовую виброзащитную систему [6]. Оставшаяся часть механической колебательной системы представляет собой систему с двумя степенями свободы, реализующую определенную функцию. В частности, такая функция может быть определена в реализации режима динамического гашения колебаний.

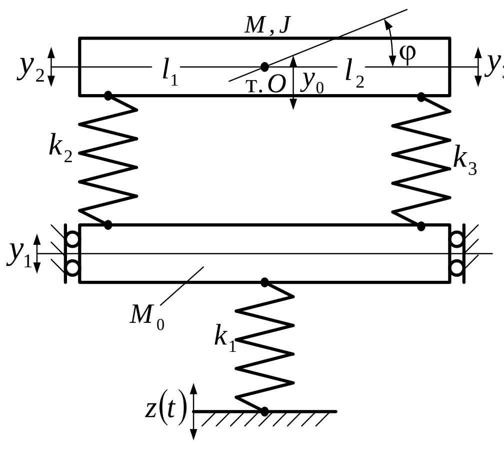


Рисунок 1 – Расчетная схема системы с динамическим гасителем в виде твердого тела на упругих опорах (k_2, k_3)

Расчетная схема на рисунке 1 отражает особенности системы: твердое тело M_0 движется прямолинейно по вертикали: твердое тело с массоинерционными параметрами M, J (ДГ) имеет центр тяжести и центр вращения в т. O (l_1 и l_2 характеризуют положение т. O). Динамический гаситель имеет две степени свободы и рассматривается в двух системах координат – y_2, y_3, а также φ и y_0. Связи между координатами движения динамического гасителя определяются соотношениями: $y_0 = ay_2 + by_3$; $\phi = c \cdot (y_3 - y_2)$; $y_2 = y_0 - l_1\phi$; $y_3 = y_0 + l_2\phi$; $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$; $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$; $c = \frac{1}{l_1 + l_2}$.

Для построения математической модели системы используется уравнение Лагранжа второго рода с последующим преобразованием Лапласа [6]. В качестве внешнего возмущения рассматриваются гармонические вибрации опорной поверхности (или основания) $z(t)$.

Коэффициенты системы дифференциальных уравнений движения в координатах y_1, y_2, y_3 представлены в таблице.

Коэффициенты уравнений движения системы с динамическим гасителем в координатах y_1, y_2, y_3

y_1	y_2	y_3
a_{11}	a_{12}	a_{13}
$M_0p^2 + k_1 + k_2 + k_3$	$-k_2$	$-k_3$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$-k_2$	$(Ma^2 + Jc^2) \cdot p^2 + k_2$	$-(Jc^2 - Mab) \cdot p^2$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-k_3$	$-(Jc^2 - Mab) \cdot p^2$	$(Mb^2 + Jc^2) \cdot p^2 + k_3$
Обобщенная сила		
k_1z	0	0

П р и м е ч а н и е : система обладает линейными свойствами и совершает малые движения относительно положения статического равновесия; силы сопротивления не учитываются.

Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления примет вид, как показано на рисунке 2 (значок «~» означает изображение по Лапласу; $p = j\omega$ – комплексная переменная).

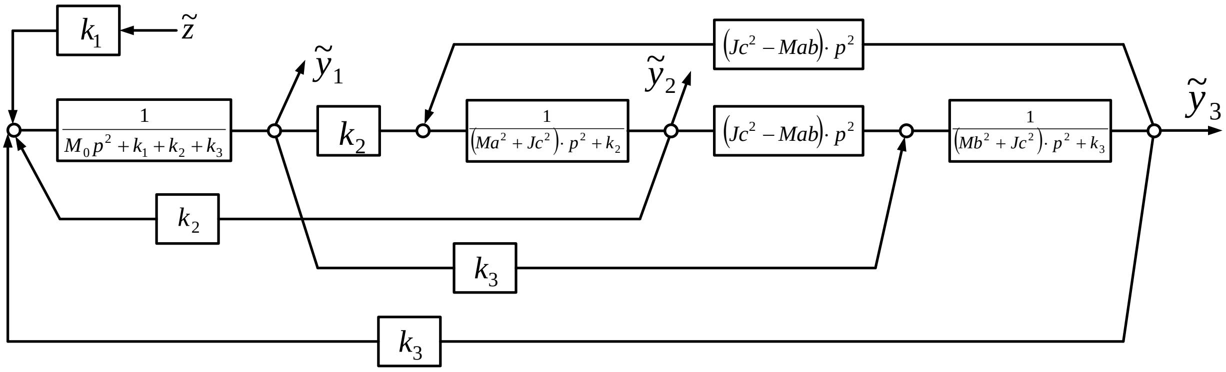


Рисунок 2 – Структурная схема-аналог уравнения движения механической системы, представленной на рисунке 1

Структурная схема на рисунке 2 состоит из трех парциальных систем с передаточными функциями: $\frac{1}{M_0 p^2 + k_1 + k_2 + k_3}$, $\frac{1}{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_2}$, $\frac{1}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_3}$. Межпарциальные связи между координатами y_2 и y_3 являются инерционными (оператор $(Jc^2 - Mab) \cdot p^2$); остальные связи между парциальными системами упругие. Так как внешнее возмущение приложено лишь к одному входу, то передаточная функция системы примет вид:

$$W(p) = \frac{\tilde{y}_1}{k_1 \tilde{z}} = \frac{(a_{22}a_{33} - a_{23}^2)}{A_0}, \tag{1}$$

где A_0 – частотное характеристическое уравнение:

$$A_0 = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}^2 - a_{22}a_{13}^2 - a_{33}a_{12}^2 + 2a_{12}a_{13}a_{23}. \tag{2}$$

Преобразуем передаточную функцию (1) к виду:

$$W(p)=\frac{\tilde{y}}{k_1\tilde{z}}=\frac{1}{a_{11}-\dfrac{a_{13}\left(a_{22}a_{13}-a_{12}a_{23}\right)-a_{12}\left(a_{33}a_{12}-a_{13}a_{23}\right)}{a_{22}a_{33}-a_{23}^2}}. \qquad (3)$$

С учетом соотношения (3) структурная схема системы после преобразований представлена на рисунке 3.

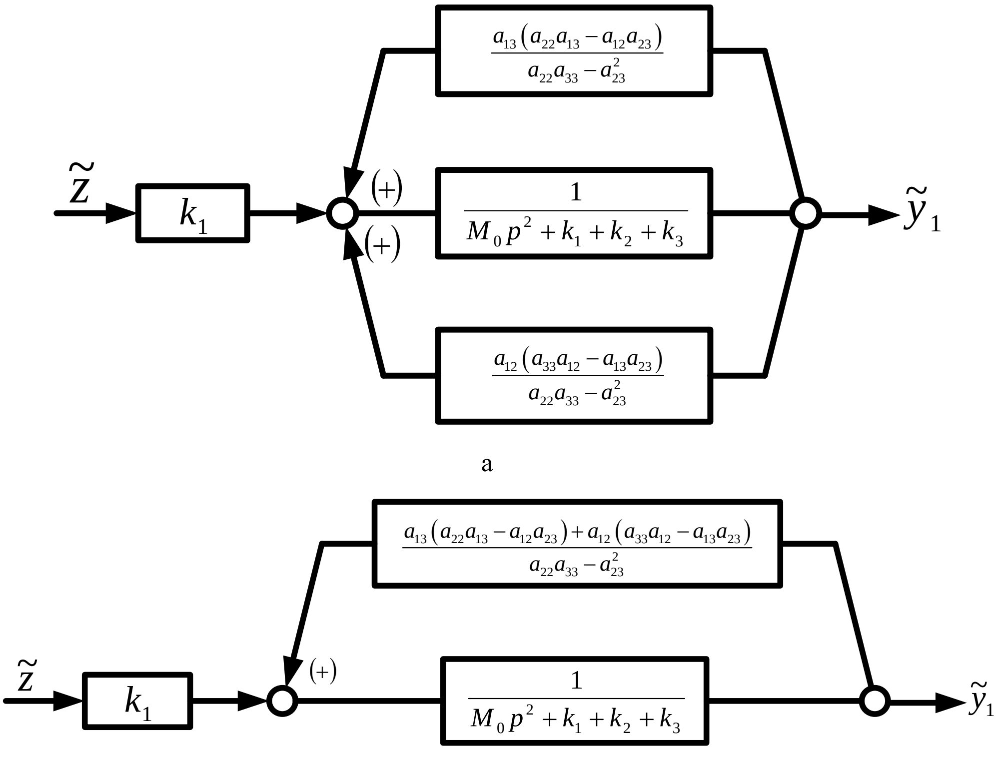


Рисунок 3 – Структурная схема: а – с выделением динамических реакций по координатам $\tilde{y}_2$, $\tilde{y}_3$, б – с определением параметров обобщенной связи

Из схемы на рисунке 3, а, в частности, следует, что динамический гаситель (ДГ) образует две обратные отрицательные связи относительно парциальной системы с объектом защиты M_0. Поскольку обратные связи (см. рисунок 3, а) находятся в параллельном соотношении, то вместо двух каналов передачи воздействий можно ввести один, что соответствует схеме на рисунке 3, б. По своей физической сущности дополнительная отрицательная обратная связь (см. рисунок 3, б) соответствует приведенной динамической жесткости обобщенной пружины, сформированной массоинерционными параметрами ДГ (M, J) и упругих элементов с жесткостью k_2 и k_3.

Более подробная интерпретация связей может быть рассмотрена с использованием вспомогательной расчетной (рисунок 4, а) и структурной (рисунок 4, б) схем.

Из представленной на рисунке 4, б схемы может быть определена динамическая жесткость обобщенных упругих элементов в цепях обратных связей на схеме, приведенной на рисунке 3, а. При этом автономно используются вспомогательная расчетная схема (рисунок 4, а), где в качестве внешнего кинематического внешнего возмущения принимается движение объекта защиты M_0 по координате $\tilde{y}_1$, и соответствующая структурная схема на рисунке 4, б. Обозначим передаточные функции как $W_{2доп}(p)$ (координата y_2) и $W_{3доп}(p)$ (координата y_3). Таким образом, получим:

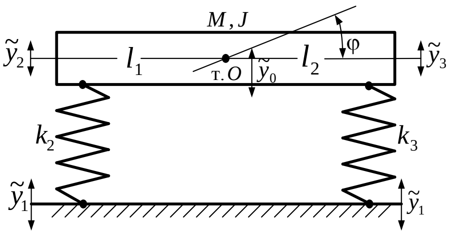
$$W_{2\text{доп}}(p)=\frac{\tilde{y}_2}{\tilde{y}_1}=\frac{a_{13}\left(a_{22}a_{13}-a_{12}a_{23}\right)}{a_{22}a_{33}-a_{23}^2}=\frac{(-k_3)\cdot\left\{\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]\cdot(-k_3)-(-k_2)\left(-Jc^2+Mab\right)\cdot p^2\right\}}{\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]\cdot\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]+\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^4}=$$
$$=\frac{k_3\cdot\left\{k_3\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]+k_2\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^2\right\}}{A_1}, \qquad (4)$$

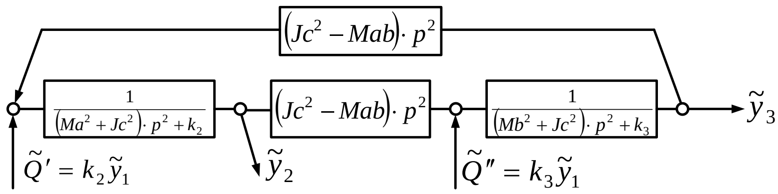
где

$$A_1=a_{22}a_{33}-a_{23}^2=\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]+\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^4. \qquad (5)$$

В свою очередь

$$W_{3\text{доп}}(p)=\frac{\tilde{y}_3}{\tilde{y}_1}=\frac{a_{12}\left(a_{33}a_{12}-a_{13}a_{23}\right)}{A_1}=\frac{(-k_2)\cdot\left\{\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]\cdot(-k_2)-(-k_3)\cdot\left(-Jc^2+Mab\right)\cdot p^2\right\}}{A_1}=$$
$$=\frac{k_2\cdot\left\{\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]\cdot k_2+k_3\cdot\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^2\right\}}{A_1}. \qquad (6)$$





а б

Рисунок 4 – Вспомогательная расчетная (а) и структурная (б) схемы, отражающие особенности динамических связей динамического гасителя

В данном случае определение $W_{2\text{доп}}(p)$ и $W_{3\text{доп}}(p)$ аналогично определению передаточных функций в системе с двумя степенями свободы (см. рисунок 4, а) при кинематическом возмущении $\tilde{y}_1$ со стороны опорной поверхности. На рисунке 4, б показаны в связи с этим эквивалентные силовые воздействия $\tilde{Q}'=k_2\tilde{y}_1$ и $\tilde{Q}''=k_3\tilde{y}_1$ так, что при рассмотрении динамических связей, если иметь в виду динамическое гашение колебаний (см. рисунок 4, а) объекта защиты (M_0), структурная схема (рисунок 4, б) имеет два входа для реализации внешних возмущений. В этом случае передаточные функции динамического гасителя при использовании структурной схемы на рисунке 4, б определяются по формулам:

$$W'(p)=\frac{\tilde{y}_2}{\tilde{y}_1}=\frac{k_2\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]+k_3\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^2}{A_1}; \qquad (7)$$

$$W''(p)=\frac{\tilde{y}_3}{\tilde{y}_1}=\frac{k_3\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]+k_2\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^2}{A_1}. \qquad (8)$$

Отметим, что числитель уравнения (7) связан с выражением (4) через множитель k_3, а уравнение (8) связано с выражением (6) через множитель k_2, т. е.

$$\frac{a_{13}\left(a_{22}a_{13}-a_{12}a_{23}\right)}{A_1}=k_3\cdot W'(p); \qquad (9)$$

$$\frac{a_{12}\left(a_{33}a_{12}-a_{13}a_{23}\right)}{A_1}=k_2\cdot W''(p). \qquad (10)$$

Таким образом, выражения (9), (10) по своей физической сути характеризуют приведенную динамическую жесткость в точках, соответствующих креплению упругих элементов k_1 и k_2, что предопределяет динамические реакции, передаваемые на динамический гаситель.

Если рассматривать структурную схему на рисунке 3, б отдельно, то можно таким же образом найти общее динамическое воздействие на объект защиты со стороны динамического гасителя, суммируя две части, определяемые выражениями (9), (10).

Что касается динамических реакций, передаваемых на объект защиты, то в этом случае структурная схема должна быть трансформирована к виду, как показано на рисунке 5.

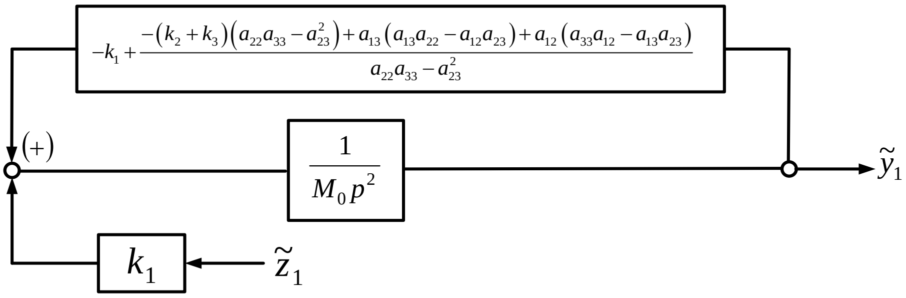


Рисунок 5 – Структурная схема с объектом защиты в качестве основного элемента (M_0)

Произведем ряд преобразований, используя выражения (4), (6), и получим выражение для передаточной функции цепи обратной связи в структурной схеме, приведенной на рисунке 5 (при упругом элементе k_1, находящемся в параллельном соединении):

$$W_{\text{доп}}(p)=\frac{-(k_2+k_3)\left(a_{22}a_{33}-a_{23}^2\right)+a_{13}\left(a_{22}a_{13}-a_{12}a_{23}\right)+a_{12}\left(a_{33}a_{12}-a_{13}a_{23}\right)}{a_{22}a_{33}-a_{23}^2}. \qquad (11)$$

При определении динамической реакции, создаваемой на объекте защиты M_0 (см. рисунок 5), обратная отрицательная связь имеет передаточную функцию:

$$W'_{\text{доп}}(p)=\frac{-(k_1+k_2+k_3)\left(a_{22}a_{33}-a_{23}^2\right)+a_{13}\left(a_{22}a_{13}-a_{12}a_{23}\right)+a_{12}\left(a_{33}a_{12}-a_{13}a_{23}\right)}{a_{22}a_{33}-a_{23}^2}. \qquad (12)$$

Зная значение выражения (12), можно найти динамическую реакцию:

$$R_{\text{дин}}=\tilde{y}_1\cdot W'_{\text{доп}}(p). \qquad (13)$$

Из анализа уравнения (13) следует, что у знаменателя передаточной функции (12) могут быть найдены две частоты динамического гашения, что соответствует корням уравнения:

$$A_1=\left[\left(Ma^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_2\right]\left[\left(Mb^2+Jc^2\right)\cdot p^2+k_3\right]-\left[\left(Jc^2-Mab\right)\cdot p^2\right]^2=0. \qquad (15)$$

На этих частотах значение коэффициента обратной связи на структурной схеме (см. рисунок 5) стремится к ∞, поэтому объект защиты будет неподвижен. Это явление можно истолковать физическим образом: приведенная динамическая жесткость обобщенной пружины, создаваемой динамическим гасителем и упругими элементами, бесконечно велика, поэтому силы, действующие на объект защиты, не вызывают упругих смещений. Существуют и другие проявления особенностей динамических свойств.

Поскольку выражение (11) определяет значения двух частот, обращающих в нулевое значение числитель передаточной функции, то система может на этих частотах иметь параметры движения, характерные для системы с одной степенью свободы (M_0, k_0).

Рассмотрим ряд частных случаев, полагая, что динамический гаситель имеет параметры ($M = 0$, $J = 0$), т. е. вместо твердого тела ДГ трансформируется в жесткий невесомый стержень. Воспользуемся выражением (11) и получим:

$$W''_{\text{доп}}(p) = \frac{-(k_2 + k_3)\cdot k_2 k_3 + k_3 k_2 k_3 + k_3 k_2 k_2}{k_2 k_3} = 0. \tag{15}$$

Выражение (15) равно нулю, что соответствует ситуации, в которой упругая система k_2, k_3 без элементов с массоинерционными свойствами динамических воздействий не создает.

При $J = 0$, а $M \neq 0$, что соответствует представлениям о динамическом гасителе как о рычаге, масса которого сосредоточена в точке вращения, но геометрические связи остаются (жесткий стержень с точечной массой в центре вращения). Тогда из уравнения (11) следует:

$$W'''_{\text{доп}}(p) = \frac{k_2 k_3 M p^2}{p^2\left(k_2 M b^2 + k_3 M a^2\right) + k_2 k_3}. \tag{16}$$

Отметим, что знаменатель передаточной функции $\tilde{y}_1 / k_1 \tilde{z}_1$ (выражение (3)) может быть преобразован к виду:

$$A_1 = \frac{1}{M_0 p^2 + k_1 + \dfrac{k_2 k_3 M p^2}{M p^2\left(k_2 b^2 + k_3 a^2\right) + k_2 k_3}}, \tag{17}$$

что дает возможность ввести в рассмотрение обобщенную пружину, работающую параллельно с пружиной жесткостью k_1. Передаточная функция обобщенной пружины зависит от частоты и характеризует, как отмечалось выше, динамическую жесткость (в операторной форме), представленную выражением (16).

Таким образом, ДГ в виде твердого тела, опирающегося через упругие элементы k_2 и k_3 на объект защиты M_0, в рамках структурных представлений [1], может рассматриваться как отрицательная дополнительная (по отношению к упругому элементу k_1) обратная связь. Физический смысл этой связи заключается в том, что она зависит от частоты внешнего воздействия. В этом смысле пружина k_1 обладает постоянной жесткостью, а обобщенная пружина имеет динамическую жесткость, которая зависит от частоты. Для примера рассмотрим некоторые частные случаи.

1. При $p \to \infty$ получим:

$$\left|W'''_{\text{доп}}(p)\right|_{p\to\infty} = \frac{k_2 k_3}{k_2 b^2 + k_3 a^2}. \tag{18}$$

При $p \to 0$ из уравнения (18) следует, что $\left|W'''_{\text{доп}}(p)\right| = 0$, т. е. в статическом состоянии динамическая жесткость физического влияния не оказывает.

При высокой частоте движение объекта защиты будет осуществляться при учете действия двух пружин, соединенных параллельно:

$$\left|W'''_{\text{доп}}(p)\right|_{p\to\infty} = k_1 + \frac{k_2 k_3}{k_2 b^2 + k_3 a^2}. \tag{18′}$$

В условиях частного случая ($J = 0$, $M \neq 0$) обобщенная пружина при частоте:

$$\omega^2_{\text{дин}} = \frac{k_2 k_3}{M\left(k_2 b^2 + k_3 a^2\right)} \tag{19}$$

приобретает динамическую жесткость $\left|W'''_{\text{доп}}(p)\right|_{\omega^2 \to \omega^2_{\text{дин}}} \to \infty$, что соответствует режиму динамического гашения, т. е., режим динамического гашения может соотноситься с увеличением до ∞ значения динамической жесткости.

2. Если принять $J \neq 0$, $M \neq 0$, то формируемые динамические связи имеют более сложный вид и характеризуются выражением:

$$W^{IV}_{\text{доп}}(p) = \frac{(k_2 + k_3) MJc^2 p^4 + Mk_2 k_3 p^2}{p^4 MJc^2 + p^2 \cdot \left[M\left(k_3 a^2 + k_2 b^2\right) + Jc^2 (k_2 + k_3)\right] + k_2 k_3}. \tag{20}$$

Выражение (20) можно рассматривать как передаточную функцию ДГ, принимая во внимание физический смысл процесса динамического гашения колебаний как введение в базовую систему (M_0, k_1) дополнительной пружины с динамической жесткостью.

Обобщенная пружина, если иметь в виду ее возможные формы соединения с другими упругими элементами, в том числе и с обобщенными пружинами, ведет себя как обычный упругий элемент с постоянной жесткостью. В работах [7, 8] обобщенную пружину было предложено назвать квазипружиной, или компактом.

В рамках структурной теории виброзащитных систем [1, 6] динамический гаситель в виде твердого тела с двумя степенями свободы может, таким образом, рассматриваться, по сравнению с традиционными элементарными типовыми звеньями (пружина, демпфер, масса и др.) механических колебательных систем как самостоятельное звено более высокого уровня сложности. Такое звено имеет передаточную функцию в виде дробно-рационального выражения, в котором числитель и знаменатель имеют одинаковый порядок (в данном случае – четвертый). Числитель в данном случае имеет частный вид, определяемый простой конфигурацией упругой системы (k_2, k_3). При более развитой системе связей полином в числителе передаточной функции (20) принимает полную форму.

Динамический гаситель колебаний является сложным элементом в механической колебательной системе (см. рисунок 1) с тремя степенями свободы. При действии внешнего возмущения со стороны основания $\tilde{z}_1$ соотношение между координатами движения $\tilde{y}_2$ и $\tilde{y}_3$ будет определяться выражением:

$$W_{32}(p) = \frac{\tilde{y}_3}{\tilde{y}_2} = i_{32}(p) = \frac{a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}}{a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}}, \tag{21}$$

где $a_{21} = -k_2$; $a_{32} = -(Jc^2 - Mab)$; $a_{31} = -k_3$; $a_{22} = (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_2$; $a_{33} = (Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_3$; $a_{21} = a_{12}$; $a_{23} = a_{32}$, что следует из таблицы.

Передаточная функция $W_{32}(p) = \tilde{y}_3 / \tilde{y}_2$ представляет собой характеристику межпарциальных связей в координатах $\tilde{y}_1 - \tilde{y}_3$. Отношение $\tilde{y}_3 / \tilde{y}_2$ можно также интерпретировать как обобщенное представление передаточного отношения твердого тела, которое представлено в виде невесомого жесткого стержня с двумя материальными точками по концам. Массы этих точек являются приведенными и определяются в системе координат $\tilde{y}_1$, $\tilde{y}_2$, $\tilde{y}_3$ значениями a_{22} и a_{33} из таблицы. В данном случае твердое тело можно рассматривать как виртуальный рычаг, точка опоры которого не является неподвижной. Однако такая форма определения рычажных связей вполне совместима с обобщенными представлениями о рычаге. Особенность представлений о таком рычаге заключается в том, что он характеризует физические детали взаимодействия парциальных систем по координатам $\tilde{y}_2$ и $\tilde{y}_3$, т. е. совпадает с координатами движения ДГ.

Очевидно, что передаточное отношение будет зависеть от частоты внешнего воздействия. Точка вращения виртуального рычага также будет иметь движение в плоскости, поскольку ДГ совершает плоское движение. Знак и величина передаточного отношения $i_{32}(p)$ характеризуют формы движения ДГ, определяемые параметрами сочетания поступательных движений материальных точек по координатам $\tilde{y}_2$ и $\tilde{y}_3$.

После преобразований выражение (21) принимает вид:

$$i_{32}(p)=\frac{M(ak_3-bk_2)p^2+Jc^2(k_2+k_3)+k_2k_3}{M(bk_2-ak_3)p^2+Jc^2(k_2+k_3)+k_2k_3}. \quad (22)$$

Передаточное отношение при $p\to 0$ принимает вид:

$$\left|i_{32}(p)\right|_{p\to 0}=1. \quad (23)$$

При $p\to\infty$ из уравнения (22) получим:

$$\left|i_{32}(p)\right|_{p\to\infty}=\frac{Jc^2(k_2+k_3)+M(ak_3-bk_2)}{Jc^2(k_2+k_3)-M(bk_2-ak_3)} \quad (24)$$

Выражение (24) соответствует соотношениям, которые выстраиваются при высокой частоте. Отметим, что формула (24) – передаточное отношение движения ДГ при различных параметрах системы. Так, например, при $k_3a = k_2b$ $i_{32}(p) = 1$, что соответствует частной форме поступательного движения динамического гасителя колебаний. При изменении знака передаточного отношения $i_{32}(p)$, который может быть отрицательным или положительным, меняется форма движения динамического гасителя, что отражается во взаимных переходах рычажных связей от рычагов первого рода к рычагам второго рода и наоборот [9].

При изменении частоты внешнего воздействия передаточное отношение $i_{32}(p)$ имеет такие особенности, когда $i_{32}(p)$ становится равным нулю или бесконечности, что соответствует, следующим частотам:

$$\omega_1^2=\frac{k_2k_3}{Jc^2(k_2+k_3)+M(k_3a-k_2b)}; \quad (25)$$

$$\omega_2^2=\frac{k_2k_3}{Jc^2(k_2+k_3)-M(k_3a-k_2b)}. \quad (26)$$

На частотах возмущения, определяемых выражениями (25), (26) режимы движения динамического гасителя колебаний носят частный характер, когда одна из координат точек твердого тела «останавливается» при увеличении значений другой координаты движения.

Переход к системе координат y_1, y_{10}, φ позволяет рассматривать особенности движения с учетом того обстоятельства, что парциальные системы ДГ имеют различные виды движения, поэтому обобщенное передаточное отношение по координатам y_0, φ будет иметь размерность в отличие от системы координат $y_1 - y_3$. Однако между обобщенными передаточными отношениями рычажных связей будет соответствие, позволяющее переходить от одной формы отношений к другой, определяя особенности рычажных связей особого типа, связанных с понятиями о виртуальном рычаге винтового типа.

Используя соотношения связи между координатами движения динамического гасителя, запишем:

$$i_{32}^*(p)=\frac{\tilde{\phi}}{\tilde{y}_0}=\frac{c(\tilde{y}_3-\tilde{y}_2)}{a\tilde{y}_2+b\tilde{y}_3}=\frac{c(i_{32}(p)-c)}{a+b\cdot i_{32}(p)}. \quad (27)$$

Из (28) следует, что:

$$i_{32}(p)=\frac{c}{c-a-b\cdot i_{32}^*(p)}. \quad (28)$$

Таким образом, $i_{32}^{*}(p)=\tilde{\phi}/\tilde{y}_0$ является передаточным отношением, характеризующим связь между вращательным и поступательным движением. Такая связь отображается винтовым соединением, что можно рассматривать как одну из форм обобщенных представлений о рычажных связях в механических колебательных системах.

Введение твердого тела на упругих опорах, взаимодействующего с объектом, совершающим вертикальные колебания, представляет собой задачу динамического гашения колебаний с динамическим гасителем нетрадиционного вида.

В рамках структурной теории виброзащитных систем такой ДГ интерпретируется как новый типовой элемент, расширяющий набор известных типовых элементов в виде линейных пружин, диссипативных и массоинерционных элементов. Такой элемент можно назвать квазипружиной, динамическая жесткость которой определяется передаточной функцией дробно-рационального вида с равными порядками полиномов в числителе и знаменателе передаточной функции. Вместе с тем квазипружина (или ДГ) может рассматриваться как дополнительная по отношению к базовой системе (объект защиты M_0 и пружина k_1) обратная отрицательная связь.

Действие квазипружины предопределяет эффекты, создаваемые динамическим гасителем колебаний. В этом смысле динамический гаситель колебаний может интерпретироваться как форма проявления свойств обобщенных пружин. Обобщенные пружины обладают свойством квазипружины.

Рычажные связи проявляются при рассмотрении форм движения элементов динамического гасителя колебаний, что может быть сделано при помощи обобщенного передаточного отношения виртуального рычага. Такое понятие формируется на основе передаточных функций межкоординатных парциальных связей и позволяет оценивать формы взаимных движений элементов при изменении частоты внешних воздействий.

Список литературы

1. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2011. – 394 с.

2. Механизмы в упругих колебательных системах: особенности учета динамических свойств, задачи вибрационной защиты машин, приборов и оборудования [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев и др. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – 187 с.

3. Хоменко, А. П. Возможности эквивалентных представлений механических систем с угловыми колебаниями твердых тел [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2014. – № 2 (42). – С. 8 – 15.

4. Елисеев, С. В. Мехатроника виброзащитных систем с рычажными связями [Текст] / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко, Р. Ю. Упырь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2009. – № 3 (23). – С. 104 – 119.

5. Белокобыльский, С. В. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи [Текст] / С. В. Белокобыльский, С. В. Елисеев, И. С. Ситов. СПб : Политехника, 2013. – 319 с.

6. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник и др. / Иркутский гос. ун-т. – Иркутск, 2008. – 523 с.

7. Елисеев, С. В. Особенности построения компактов упругих элементов в механических колебательных системах. Взаимодействия с элементами систем и формы соединения [Текст] / С. В. Елисеев, С. В. Ковыршин, Р. С. Большаков // Современные технологии. Системный ана-

лиз. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 4 (36). – С. 61 – 70.

8. Хоменко, А. П. Квазиэлементы в механических колебательных системах. Особенности систем при исключении переменных динамического состояния [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – № 2 (38). – С. 8 – 17.

9. Кинематика, динамика и точность механизмов [Текст] / Г. В. Крейнин, А. П. Бессонов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.

References

1. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. *Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh system* (Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillatory systems). Novosibirsk: Nauka, 2011, 394 p.

2. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Artyunin A. I., Parshuta E. A., Kaimov E. V. *Mekhanizmy v uprugikh kolebatel'nykh sistemakh: osobennosti ucheta dinamicheskikh svoystv, zadachi vibratsionnoy zaschity mashin, priborov i oborudovaniya* (Mechanisms in elastic oscillatory systems: features of the accounting of dynamic properties, problems of vibration protection of machines, devices and equipment). Irkutsk: IrGUPS, 2013, 187 p.

3. Khomenko A. P., Eliseev S. V. Possibilities of equivalent representations of mechanical systems with angular oscillations of rigid bodies [Vozmozhnosti ekvivalentnykh predstavleniy mekhanicheskikh sistem s uglovymi kolebaniyami tverdykh tel]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2014. no. 2 (42), pp. 8 – 15.

4. Eliseev S. V., Khomenko A. P., Upyr' R. Yu. Mechatronics of vibroprotective systems with lever ties [Mekhatronika vibrozaschitnykh system s rychazhnymi svyazyami] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2009. no. 3 (23), pp. 104 – 119.

5. Belokobyl'skiy S. V., Eliseev S. V., Sitov I. S. *Dinamika mekhanicheskikh system. Rychazhnye I uprugo-inertsionnye svyazi* (Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial and elastic ties). Saint-Petersburg, 2013, 319 p.

6. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P., Zasyadko A. A. *Dinamichskiy sintez v obobschennykh zadachakh vibrozaschity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov* (Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects). Irkutsk, 2008, 523 p.

7. Eliseev S. V., Kovyrshin S. V., Bol'shakov R. S. Features of creation of compacts of elastic elements in mechanical oscillatory systems. Interactions with elements of systems and forms of joint [Osobennosti postroeniya kompaktov uprugikh elementov v mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistemakh. Vzaimodeystviya s elementami sistem i formy soedineniya]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2012. no. 4(36), pp. 61 – 70.

8. Khomenko A. P., Eliseev S. V. Quasi-elements in mechanical oscillatory systems. Features of systems at an exception of variables of a dynamic state [Kvazielementy v mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistemakh. Osobennosti sistem pri isklyuchenii peremennykh dinamicheskogo sostoyaniya]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie - Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013. no. 2(38), pp. 8 – 17.

9. Kreynin G. V., Voskresenskiy V. V., Pavlov B. I. Provorotova E. A., Sergeev V. I. and many others. *Kinematika, dinamika i tochnost' mekhanizmov* (Kinematics, dynamics and accuracy of mechanisms). Moscow, 1984, 216 p.

УДК 629.424.3:621.436

В. А. Четвергов, Д. В. Балагин, О. В. Балагин

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ ТЕПЛОВОЗОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В статье с позиций единого жизненного цикла тепловозов, от создания до списания, рассмотрены основные факторы, влияющие на уровень их надежности. Значение этих факторов даст возможность связать математической моделью потенциальный уровень надежности, закладываемый в техническом задании на проектирование новых тепловозов, с фактической надежностью в конкретных условиях эксплуатации и на этой основе определить оптимальные параметры системы технического обслуживания и ремонта, соответствующие максимальной эффективности использования тепловоза за весь жизненный цикл.

Тепловоз как разновидность локомотивов, имея одинаковое с другими локомотивами функциональное назначение – обеспечивать силу тяги для перемещения состава вагонов, характеризуется существенными отличиями от паровозов, электровозов, газотурбовозов. Эти отличия имеют место не только в конструкции, но также в условиях эксплуатации, режимах работы и в организации и технологии технического обслуживания и ремонта. Приведенные факторы определяют некоторую специфику влияния на требуемый уровень надежности тепловоза и его узлов при их создании, а также фактическую надежность в эксплуатации, обеспечиваемую с помощью системы технического обслуживания и ремонта.

Тепловоз имеет силовую установку в виде теплового двигателя и тяговую передачу, состоящую чаще всего из электрического генератора и электрических двигателей. На тепловозе представлены практически все виды преобразования энергии. В эксплуатации происходит изменение состояния материала деталей, входящих в состав перечисленных устройств (агрегатов, узлов) для осуществления перечисленных преобразований энергии, именно под действием этих видов энергии. Так, под действием механической, электрической, тепловой, химической и электромагнитной энергии формируются процессы старения, изнашивания и разрушения, приводящие к повреждениям и отказам деталей и узлов (изнашивание путем поверхностного истирания, накопления усталостных напряжений и деформаций, перегрев, расплавление, химическая и электрохимическая коррозия, пробой изоляции и т. п.). Это приводит к многообразию видов повреждений и отказов и вызывающих их причин [1].

Применение на тепловозах в качестве силовой установки двигателей внутреннего сгорания приводит к наличию на тепловозе ряда характерных систем: воздухоснабжения, топливной, водяной, масляной и выхлопной. Основными элементами этих систем, выполняющими их главные функции, являются рабочие тела: воздух, топливо, охлаждающая жидкость, масло, отработавшие газы. В отличие от обычных деталей, из которых состоит узел или агрегат, называемых конструктивными элементами, указанные рабочие тела не имеют строгих форм, размеров, свойственных обычным деталям, и называются неконструктивными элементами, но они имеют совокупность свойств, которые обеспечивают выполнение системой заданных, необходимых для нормальной работы дизеля и тепловоза функций, если показатели этих свойств находятся в требуемых пределах. В противном случае происходит ухудшение или потеря работоспособности дизеля, т. е. повреждение или отказ.

Так, если в воздухе, направленном в цилиндры дизеля, имеется абразивная пыль, то в процессе работы будет наблюдаться интенсивный износ гильзы цилиндра, поршневых колец, приводя в итоге к неисправности цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Аналогичное требование предъявляется к дизельному топливу, поскольку наличие в нем механических примесей приводит к интенсивному изнашиванию втулки и плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД), что вызывает ухудшение герметичности, изменение цикловой подачи и снижение качества распыла топлива. Наличие в топливе влаги, а также примесей фосфора и серы отрицательно влияет на состояние деталей ЦПГ за счет повышения химической агрессивности рабочего тела в цилиндре. Приведенные примеры составляют лишь часть комплекса показателей и требований, предъявляемых к названным «неконструктивным» элементам тепловозных дизелей с позиции обеспечения их надежности в эксплуатации. Например, нормы браковочных параметров моторного масла, несоблюдение которых приводит к нарушению работы узлов и деталей, смазываемых и охлаждаемых маслом марки М14 и М12Б, включают в себя следующие параметры [3]:

– вязкость кинематическая при 100 °С (не менее 9,5 и не более 14,5 мм^2/с) – ГОСТ 33-82;
– общее щелочное число (М2 КОН на 1 г) для масел М12Б, МС-20п (0,3÷0,6) – ГОСТ 11962-76;
– температура вспышки, определяемая в открытом тигле (170 °С) – ГОСТ 4333-48;
– содержание массовой доли (следы наличия) – ГОСТ 1547-84;
– диспергирующая способность (не менее 0,35) – ГОСТ 2477-65.

Наличие на тепловозе водяной и масляной систем не только является специфической чертой конструкции тепловоза, но и осложняет его эксплуатацию в зимнее время. Во время стоянок на путях депо и нахождения в резерве необходимо применять специально разработанные способы поддержания необходимой температуры рабочих тел в этих системах. От эффективности решения указанной проблемы существенно зависит техническое состояние многих узлов дизеля и скорость изнашивания трущихся пар при запуске дизеля и работе в холодном состоянии. При неудовлетворительном температурном режиме возможно размораживание секций холодильника, приводящее к отказу тепловоза и неплановому ремонту, т. е. к снижению надежности.

Несмотря на значительную подверженность узлов и тепловоза в целом действию многих факторов, отрицательно влияющих на надежность узлов и элементов конструкции тепловоза, при проектировании не закладывают специальные схемы резервирования и применения избыточных элементов, находящихся в холодном резерве. Тем не менее можно рассматривать создание магистральных тепловозов в двух- и трехсекционном исполнении как применение горячего резерва. Это позволяет существенно повысить надежность вывода состава с тягового участка в случае отказа одной секции. К такому же эффекту в отношении повышения надежности приводит наличие двух тормозных компрессоров, возможность отключать из работы часть цилиндров в многоцилиндровых дизелях, а также отключать отказавший тяговый двигатель. В основном же безотказность тепловоза достигается соответствующим качеством и долговечностью комплектующих элементов и своевременным обнаружением и устранением повреждений в эксплуатации.

Поэтому уже на стадии проектирования необходимо учитывать требования, предъявляемые к надежности тепловозов при их создании с учетом условий эксплуатации. Изменение потенциального уровня надежности, заложенного при создании тепловозов, происходит при их использовании в конкретных условиях эксплуатации под действием внутренних рабочих нагрузок и внешних факторов, свойственных внешней среде на том или ином тяговом участке. Под действием этих факторов в узлах и деталях тепловоза протекают процессы, приводящие к износу, старению материала деталей, разрегулировке взаимодействующих и сопряженных элементов, к снижению и, наконец, к потере работоспособности, т. е. к отказу. Изучение (качественный и количественный анализ этих процессов) физики отказов необходимо для эффективного управления надежностью тепловозов на всех этапах их жизненного цикла. Таким образом, в процессе проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта необходимо располагать полными и достоверными данными о причинах и последствиях повреждений и отказов.

Надежность является комплексным свойством тепловоза, которое включает в себя безотказность, долговечность и ремонтопригодность, а при хранении в условиях запаса (резерва) и сохраняемость. Для конкретных типов тепловозов и условий их эксплуатации указанные аспекты надежности могут иметь различные нормируемые и фактические значения их показателей.

Требования, предъявляемые к надежности тепловозов, на стадии создания определяются общими техническими требованиями к магистральным и маневровым тепловозам, уточняются по техническим условиям на конкретный тип тепловоза и подтверждаются «Картой технического уровня и качества продукции» [1].

Перечень сборочных единиц, номенклатура и нормативные показатели долговечности, а также объемы работ при техническом ремонте (ТР) и капитальном ремонте (КР) зависят от назначения тепловоза по роду работу, конструктивного совершенства комплектующих элементов, характеризующихся значениями рабочих параметров, и условий предстоящей эксплуатации.

Значения рабочих параметров при изготовлении должны находиться в установленных границах поля допуска, т. е. уже при изготовлении рабочие параметры не детерминированы, а имеют некоторые распределение, разброс относительно среднего значения.

Кроме показателей долговечности в соответствии с техническими условиями (ТУ) на стадии создания тепловоза обычно устанавливаются нормы сменяемости основных комплектующих элементов для одной секции тепловоза за весь срок его службы и до первого капитального ремонта.

На потенциальный уровень надежности, заложенный при создании тепловозов, существенное влияние оказывают условия эксплуатации и режимы их работы. К основным физическим факторам, влияющим на надежность тепловозов, выявляемую в эксплуатации, относятся

степень совершенства конструкции, ее соответствие условиям эксплуатации и режимам работы;

совершенство технологии изготовления тепловоза и ее строгое соблюдение (качество изготовления);

климатические условия эксплуатации, параметры внешней среды;

интенсивность использования, режимы работы, определяемые видом работы (грузовые, маневровые, пассажирские).

Неполный или неправильный учет при проектировании и создании тепловоза условий и режимов его работы в период предстоящей эксплуатации, несоблюдение в конструкции тепловоза требований ремонта и контролепригодности элементов проявляются при их эксплуатации ухудшением безотказности и ремонтопригодности, сокращением долговечности [3].

В комплекс параметров внешней среды, в которой работают тепловозы, входят в следующие погодно-климатические параметры [2]: температура воздуха; атмосферное давление; влажность атмосферного воздуха; запыленность воздуха (содержание абразивных частиц); атмосферные осадки (дождь, снег, роса, иней, гололед).

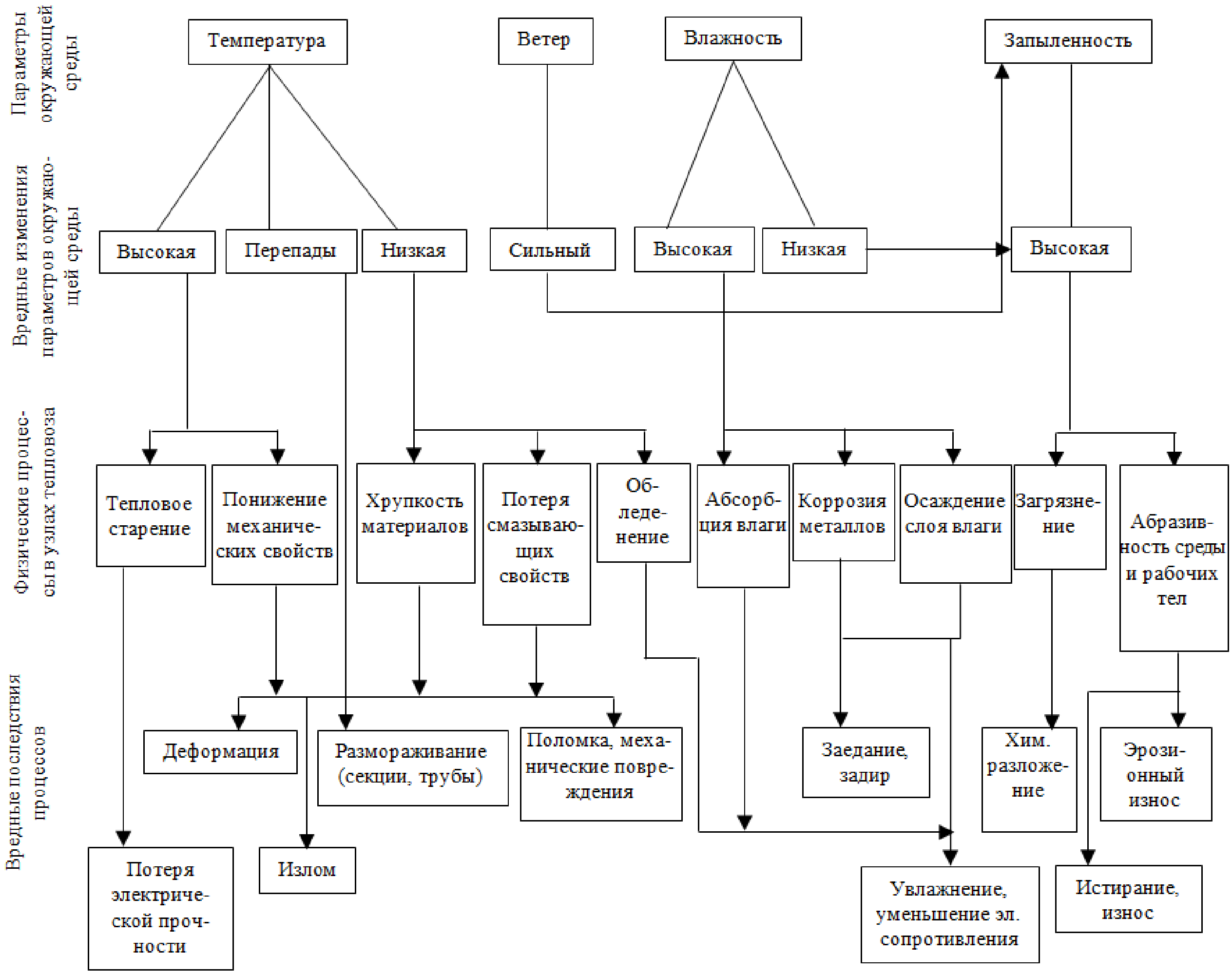
Скорость процессов, протекающих в узлах и деталях тепловозов и вызывающих снижение работоспособности и надежности, в значительной степени определяется интенсивностью использования тепловозов, режимами их работы, зависящими, в свою очередь, от следующих эксплуатационных факторов: профиль пути (величина подъемов, их частота и протяженность, количество кривых, их радиус), масса поезда, скорость движения поездов по тяговому участку.

Важнейшей характеристикой внешних условий является температура с ее сезонным изменением. В таблице 1 приведены данные о распределении времени работы инвентарного парка тепловозов Северо-Кавказской, Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог при различной температуре в трех климатических зонах сети железных дорог РФ.

Таблица 1 – Время работы тепловозов по зонам при различной температуре

Интервалы температуры воздуха, °С	Зоны, %		
	Южная	Сибирская	Забайкальская
Ниже –40	–	–	4
От –40 до –20	–	12	27
От –20 до 0	8	39	42
От 0 до +20	51	41	25
От 20 до 40	40	8	2
Выше 40	1	–	–

Воздействие окружающей среды, усиленное высокой интенсивностью использования тепловозов, на их узлы и детали приводит к нарушению работоспособности, изменению рабочих параметров и характеристик. Чтобы обеспечить безотказную и эффективную работу тепловозов, необходимо знать, какое влияние оказывают на них факторы внешней среды и системы эксплуатации. Схема этого влияния факторов внешней среды на работоспособность тепловозов, надежность деталей, узлов и тепловоза в целом приведена на рисунке [2].



Влияние параметров окружающей среды на надежность узлов и деталей тепловозов

Низкая температура зимой вызывает возрастание вибрации экипажной части и всего локомотива из-за увеличения жесткости верхнего строения пути. Это отрицательно отражается на работоспособности тяговых электродвигателей и секций радиатора холодильника. В морозные дни на головках рельсов образуется пленка – конгломерат воды, песка и пыли, которая резко снижает сцепление бандажей колесных пар с рельсами и нередко вызывает буксование колес. При этом возрастает износ бандажей. В зимнее время возможны попадание внутрь тяговых электродвигателей снега и осаждение влаги на открытых поверхностях изоляции, что приводит к ее увлажнению и ухудшению изоляционных свойств. Условия холодного климата неблагоприятны для тормозной системы тепловоза, стальных конструкций, резиновых муфт.

В летний период работа тепловозов затруднена из-за частых пылевых бурь. Твердые частицы, содержащиеся в воздухе, вызывают абразивный износ трущихся поверхностей деталей дизеля, тяговых электродвигателей и узловой экипажной части, накапливаются в фильтрах и в оребрении секций холодильника. Высокая температура воздуха способствует быстрому старению электроизоляционных материалов, потере эластичности резиновых деталей и ухудшает качество функционирования систем охлаждения воды и масла.

При высокой температуре уменьшение массы подаваемого в цилиндры воздуха ведет к понижению мощности дизеля, неполному сгоранию топлива и повышенному нагарообразованию на деталях цилиндропоршневой группы.

Существенное влияние на надежность тепловозов оказывают вид выполняемой работы, интенсивность и режимы работы. Различные виды работы тепловозов характеризуются разными уровнем используемой мощности дизеля, величиной скорости движения, частотой переключения позиций и долей времени работы на холостом ходу. В таблице 2 показано распределение (%) локомотивного парка по видам выполняемых работ.

Таблица 2 – Распределение локомотивов по видам работы

Вид работ	Все локомотивы, %	Виды тяги, %	
		электрическая	тепловозная
Грузовое движение	50	70	40
Пассажирское движение	16	24	1
Передаточное и вывозное	5	3	7
Хозяйственное движение	2,5	1	4
Подталкивание	1,5	1	3
Специально маневровая работа	24	1	27
Прочие виды работы	1	–	9

Эксплуатационные режимы работы тепловозов, их энергетических установок отличаются разнообразием, обусловленным различными видами работы, массой поездов, параметрами пути, скорости, климатическими условиями. К числу основных режимов работы тепловоза можно отнести установившийся (стационарный) и неустановившийся (нестационарный) режимы. Неустановившийся режим связан с пуском дизеля, набором и сбросом нагрузок при работе на промежуточных позициях.

Известно, что в эксплуатации доля холостого хода дизеля составляет до 50 % общего времени работы тепловоза [2]. При этом дизель используется для привода тормозного компрессора (для поддержания давления воздуха в тормозной магистрали), вентиляторов охлаждения тяговых электродвигателей и других вспомогательных агрегатов. В зимнее время доля времени на холостом ходу значительно возрастает из-за необходимости поддержания требуемого уровня температуры воды и масла в системе дизеля. Работа дизеля на холостом ходу происходит обычно в его низкотемпературном состоянии, что значительно затрудняет протекание рабочего процесса из-за чрезмерного возрастания коэффициента избытка воздуха в цилиндрах. Это приводит к снижению температуры рабочей смеси и, как следствие, к увеличению периода задержки воспламенения.

Работа топливной аппаратуры дизеля на холостом ходу характеризуется нерегулируемым впрыском топлива (пропуск подачи), неравномерным подъемом иглы форсунки, нестабильностью остаточного давления топлива в нагнетательном трубопроводе. Это вызывает изменение угла опережения впрыска топлива в цилиндры и уменьшение полноты сгорания топлива, что способствует разжижению моторного масла и, как следствие, повышает износ узлов трения дизеля. В результате снижения надежности и ресурса работоспособности дизеля ухудшается его топливная экономичность.

В условиях широкого диапазона изменения нагрузок при работе тепловозного дизеля наиболее объективным является показатель величины средней мощности дизеля $N_{\text{ср}}$ за определенный период его работы (например, за поездку). Этот показатель аккумулирует в себе все возможные реализации развиваемой мощности с учетом доли времени от общей продолжительности работы.

Для сравнения двигателей различных тепловозов более удобен для оценки степени загрузки коэффициент использования мощности

$$\upsilon_N = \frac{N_{\text{ср}}}{N_{\text{ном}}}, \tag{1}$$

где $N_{\text{ср}}$ – средняя мощность дизель-генераторной установки, кВт; $N_{\text{ном}}$ – номинальная мощность дизель-генераторной установки, кВт.

В таблице 3 приведены данные по дизелю 10Д100, характеризующие зависимость показателей повреждаемости от коэффициента использования мощности и среднего квадратического отклонения мощности

$$V_N = \frac{\sigma_N}{N_{\text{ср}}}, \tag{2}$$

где σ_N – среднее квадратическое отклонение мощности.

Таблица 3 – Показатели режимов и параметр потока отказов

Депо	υ_N	V_N	Количество неплановых ремонтов в год, приходящихся на один дизель 10Д100
А	0,426	0,43	4,95
Б	0,380	0,64	4,46
В	0,360	0,28	3,50

Данные таблицы 4 иллюстрируют тенденцию понижения надежности (рост параметра потока отказов) при увеличении степени загрузки дизеля υ_N и коэффициента вариации, характеризующего широту диапазона изменения мощности (изменчивость режима работы).

Кроме рассмотренных (объективных) условий, влияющих на надежность тепловозов, имеются и другие, которые характеризуются организацией их использования и технического содержания и поэтому могут быть отнесены не к физико-техническим и погодно-климатическим, а к организационно-техническим факторам. Основными из них являются совершенство системы технического обслуживания и ремонта тепловозов, строгое выполнение ее требований и организация обслуживания тепловозов локомотивными бригадами.

Основная задача системы технического обслуживания и ремонта тепловозов – поддерживать в заданных пределах наработки (срока службы) нормативные значения показателей надежности, установленные техническими условиями на тепловоз. Нарушение положений этой системы повышает вероятность отказов. Снижение надежности тепловозов может быть вызвано и необоснованностью установленных для данных условий эксплуатации и режимов норм межремонтных пробегов или их несоблюдением (перепробеги). К таким же последствиям приводит необоснованность или невыполнение требований и положений инструкций по перечням обязательных работ по техническому обслуживанию для данных условий эксплуатации и режимов работы, а также правил ремонта по технологии и допускам на предельное состояние по износу деталей.

Наиболее часто отказы тепловозов обусловливаются низким качеством выполнения ТО и ремонтов, особенно ТО-2 и КР, что объясняется в основном неудовлетворительным состоянием ремонтной базы локомотивных депо и локомотиво-ремонтных заводов (ремонтно-технологическое оборудование, технологические карты, средства технической диагностики), неудовлетворительной обеспеченностью депо и заводов качественными запасными частями, недостаточной квалификацией ремонтников и несовершенной организацией их труда.

Существенное влияние на уровень надежности тепловозов, оказывают квалификация локомотивных бригад, способ обслуживания локомотивов (прикрепленная или обезличенная езда), выполнение локомотивными бригадами требований ТО-1 и другие особенности, связанные с человеческими фактором.

В таблице 4 приведено распределение отказов тепловозов (%) по причинам их возникновения. Опыт эксплуатации тепловозов на железных дорогах страны показывает, что для 90 % порч в пути следования и до 70 % неплановых ремонтов обусловлены организационно-техническими факторами. При этом почти все отказы происходят по вине обслуживающего персонала (ремонтников и локомотивных бригад).

Таблица 4 – Причина порч и неплановых ремонтов

Причина отказа	Порчи, % (по годам)			Неплановые ремонты, % (по годам)		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Некачественный ремонт в условиях локомотивных депо	64,2	61,7	60,4	50,3	49,6	48,9
Неудовлетворительная эксплуатация и обслуживание со стороны локомотивных бригад	25,8	19,1	18,7	20,1	16,2	14,2
Некачественный ремонт на ремонтных заводах, конструктивные недостатки	10,0	19,2	20,9	29,6	34,2	36,9

Рассмотренные отказы, влияющие на надежность тепловозов на различных этапах жизненного цикла, можно классифицировать с позиции вызывающих их причин. Это помогает уяснить, на какой стадии создания или эксплуатации тепловоза и его комплектующих элементов следует проводить требуемые мероприятия по устранению причин отказов, что необходимо для эффективного управления надежностью. В соответствии с этим отказы классифицируются следующим образом:

конструкционный – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта;

эксплуатационный – отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и (или) норм условий эксплуатации объекта;

производственный – отказ объекта, возникший в результате нарушения установленных правил или установленного процесса изготовления на заводе-изготовителе;

ремонтный – отказ, возникший в результате нарушения установленных правил ремонта объекта или некачественного выполнения его в локомотивном депо либо специализированном ремонтном предприятии;

изготовительский – отказ, возникший по вине поставщика и включающий в себя конструкционные и производственные отказы;

потребительский – отказ, возникший по вине потребителя и включающий в себя эксплуатационные и ремонтные отказы.

Таким образом, проведенный качественный анализ факторов, влияющих на уровень надежности тепловозов на всех стадиях жизненного цикла (проектирование, создание, эксплуатация и т. д.), дает возможность количественно моделировать процессы ее изменения, что является основой для успешного решения задач повышения их надежности. Только комплексный подход к оптимизации процессов создания, использования и ремонтного обслуживания тепловозов как единого жизненного цикла даст возможность решить проблему повышения эффективности тепловозной тяги в соответствии с современными требованиями ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов: Учебник для вузов [Текст] / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков. – М.: Маршрут, 2003. – 415 с.

2. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник [Текст] / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 557 с.

3. Match Вознюк, В. Н. Надежность тепловозов [Текст] / В. Н. Вознюк, И. Ф. Пушкарев, Т. В. Ставров. – М.: Транспорт, 1991 – 159 с.

References

1. Chetvergov V. A., Puzankov A. D. *Nadezhnost' lokomotivov* (Reliability locomotives). Moscow: Marshrut Publ., 2003, 415 p.
2. Dankovtsev V. T., Kiselev V. I., Chetvergov V. A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov* (Maintenance and repair of locomotives). Moscow, 2007, 557 p.
3. Vozniuk V. N., Pushkarev I. F., Stavrov T. V. *Nadezhnost' teplovozov* (Reliability diesel locomotives). Moscow: Transport Publ., 1991, 159 p.

УДК 621.311.001.57

О. В. Гателюк, А. А. Комяков, В. В. Эрбес

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данной статье рассматривается алгоритм, позволяющий оценить эффективность внедрения энергосберегающих устройств и технологий в системах тягового и нетягового электроснабжения. С помощью методов математической статистики произведена оценка эффективности внедрения энергосберегающего устройства в системе тягового электроснабжения. В соответствии с алгоритмом представлены результаты расчетов.

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей электрической энергии в России, расходуя около 5 % электроэнергии от всего потребления страны. Энергетическая эффективность компании в современных условиях является важнейшим фактором повышения конкурентоспособности на рынке транспортных услуг. Именно поэтому ОАО «РЖД» ежегодно внедряет энергосберегающие устройства и технологии, при этом одной из главных задач остается объективная оценка их энергетической эффективности. Для решения этой задачи разработан алгоритм оценки энергетической эффективности внедрения устройств и технологий с учетом влияния производственных и климатических факторов на процесс электропотребления.

Обследование объектов железнодорожного транспорта показало, что в большинстве случаев на процесс электропотребления влияют два фактора и более [1]. Разработанный ранее алгоритм оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в сетях электроснабжения железных дорог [2] был основан на методах, которые производили отбор одного фактора из всего перечня и сравнивали расход электрической энергии до и после внедрения с учетом одного из факторов, имеющего наибольшее влияние на процесс электропотребления. Предлагаемый авторами алгоритм (рисунок) учитывает все недостатки предыдущего и содержит новые наиболее эффективные методы математической статистики. По предложенному алгоритму была произведена оценка внедрения энергосберегающего устройства на одном из участков железной дороги, по которому фиксировались расход электрической энергии, масса и количество осей пройденного состава в четном и нечетном направлениях, температура воздуха. Так как авторы оценивают энергосберегающие устройства в системе тягового электроснабжения, то в качестве зависимой переменной рассчитан удельный расход электрической энергии. Расчеты выполнены с помощью двух программ Microsoft Excel и Statistica. Алгоритм включает в себя пять этапов.

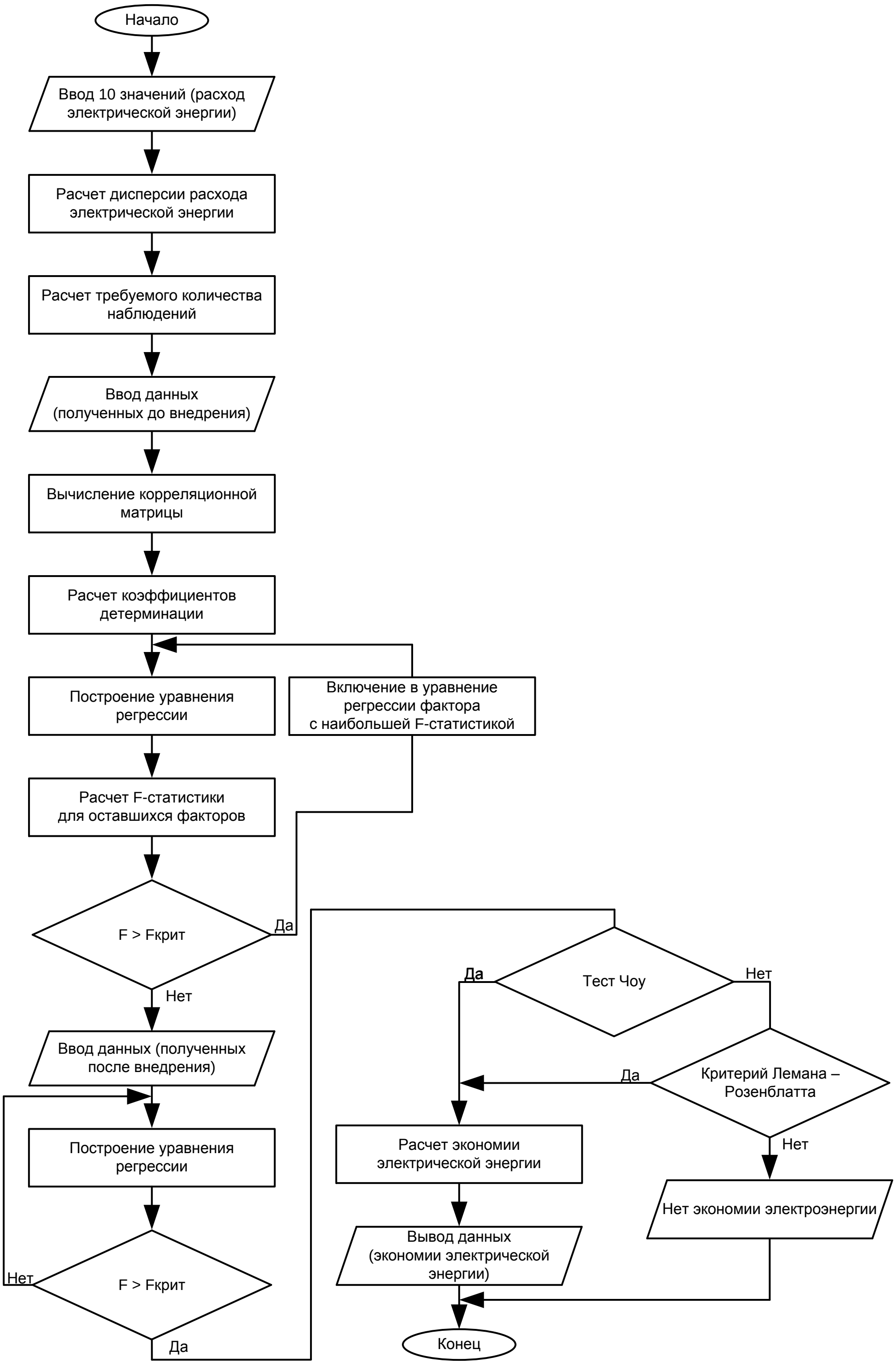
1. Расчет требуемого количества наблюдений.

Количество наблюдений, необходимых для адекватной оценки внедрения энергосберегающих устройства и технологии, зависит от дисперсии расхода электрической энергии.

Дисперсия определяется с помощью предварительного исследования. Для оценки дисперсии значений расхода электрической энергии рациональный объем выборки составляет 10 – 11 значений [3]. По полученным данным находим оценку дисперсии и из формулы предела ошибки выборки [4] выражаем требуемое количество наблюдений расхода электрической энергии:

$$n = \frac{t^2 s^2}{\Delta^2}, \qquad (1)$$

где n – требуемое количество наблюдений; t – критерий Стьюдента; s^2 – дисперсия расхода электрической энергии; Δ – допустимый размер погрешности.



Алгоритм оценки энергетической эффективности внедрения устройств и технологий

По полученным данным удельного расхода электрической энергии до внедрения энергосберегающего устройства рассчитано необходимое количество наблюдений *n*, которое составило 50 при доверительной вероятности 0,95.

2. Сбор и обработка данных, полученных до внедрения энергосберегающих устройств и технологий.

Данный этап состоит из двух действий. В первом действии производится обследование объекта, как описано в источниках [5, 6], и сбор данных в требуемом количестве по расходу электрической энергии и факторам, влияющим на процесс электропотребления. В нашем случае сбор производился по расходу электрической энергии, массе и количеству осей пройденного состава, температуре воздуха. По полученным данным для дальнейшего выполнения алгоритма рассчитывался удельный расход электрической энергии до внедрения энергосберегающего устройства.

Второе действие включает в себя обработку данных, полученных до внедрения энергосберегающего устройства или технологии, которая начинается с вычисления корреляционной матрицы парных коэффициентов корреляции факторов [7] (таблица 1). Корреляционная матрица позволяет оценить связь каждого из факторов с электропотреблением и взаимное влияние факторов. Если присутствует высокая взаимосвязь факторов друг с другом, то дальнейшая процедура шаговой регрессии удалит фактор с наименьшим влиянием на процесс электропотребления.

Из данных таблицы 1 видно, что на удельный расход электроэнергии значительное влияние оказывают масса и количество осей пройденного состава. Присутствует мультиколлинеарность между массой и количеством осей в нечетном направлении, а также между массой и количеством осей в четном направлении.

Таблица 1 – Оценка корреляционной матрицы парных коэффициентов корреляции факторов

Фактор	Масса в нечет. направл.	Количество осей в нечет. направл.	Масса в чет. направл.	Количество осей в чет. направл.	Температура	УРЭ
Масса в нечет. направл.	1,000	0,957	0,316	0,470	0,223	-0,541
Количество осей в нечет. направл.	0,957	1,000	0,385	0,536	0,264	-0,550
Масса в чет. направл.	0,316	0,385	1,000	0,670	-0,059	-0,653
Количество осей в чет. направл.	0,47	0,536	0,670	1,000	0,141	-0,520
Температура	0,223	0,264	-0,059	0,141	1,000	-0,184
УРЭ	-0,541	-0,550	-0,653	-0,520	-0,184	1,000

Для более внимательного изучения наличия связей между влияющими факторами без учета влияния удельного расхода электроэнергии рассчитываются коэффициенты детерминации. Расчеты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Анализ оценок коэффициентов детерминации влияющих факторов

Масса в нечет. направл.	Масса в чет. направл.	Количество осей в нечет. направл.	Количество осей в чет направл..	Температура
0,9217	0,4882	0,9302	0,5486	0,1338

Анализ оценок коэффициентов детерминации показал наличие тесной связи между массой в нечетном направлении и всеми остальными факторами, то же самое можно сказать и о количестве осей в нечетном направлении.

Последней частью на данном этапе является построение уравнения регрессии в виде:

$$S = b_1 r_1 + \ldots + b_n r_n + b_0, \tag{2}$$

где S – расход электрической энергии; b_1, b_n – коэффициенты уравнения регрессии; r_1, r_n – влияющие факторы; b_0 – свободный член уравнения.

Для построения уравнения регрессии используется метод шаговой регрессии с включением факторов в модель [7]. Метод включения начинается с построения уравнения регрессии с одним фактором, который имеет наибольший парный коэффициент корреляции с расходом электрической энергии. Затем вычисляем частные F-статистики для всех оставшихся факторов и включаем в уравнение регрессии фактор с наибольшей F-статистикой. Процедура заканчивается, когда F-статистики факторов не станут меньше заданного уровня критического значения. Параметры уравнения регрессии до внедрения энергосберегающего устройства, полученного с помощью метода шаговой регрессии с включением факторов в модель, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры уравнения регрессии (до внедрения энергосберегающего устройства)

Параметр	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t-критерий	Уровень значимости
Оценка свободного члена	236,9200	10,6198	22,3092	0,0000
Масса в чет. направл.	-0,0009	0,0002	-5,4011	0,0000
Масса в нечет. направл.	-0,0005	0,0002	-3,1680	0,0027
Температура	-0,5396	0,3814	-1,4150	0,1638

Такие факторы, как количество осей в четном и нечетном направлениях, метод шаговой регрессии не включил в уравнение из-за высокой взаимосвязи с другими факторами. Дополнительно для оценки качества уравнения регрессии рассчитаны значения коэффициента детерминации 0,570; значения F-критерия 20,324 при критическом значении F-критерия 2,81 (уровень значимости – 0,05; числа степеней свободы – 3 и 46) [8]. Данные параметры показывают высокое качество уравнения регрессии.

3. Сбор и обработка данных, полученных после внедрения энергосберегающих устройств и технологий.

Сбор данных в требуемом количестве производится по расходу электрической энергии и факторам, включенным в регрессионное уравнение. Далее по полученным данным после внедрения энергосберегающего устройства построено уравнение регрессии (таблица 4).

Таблица 4 – Параметры уравнения регрессии (после внедрения энергосберегающего устройства)

Параметр	Коэффициенты регрессии	Стандартная ошибка	t-критерий	Уровень значимости
Оценка свободного члена	226,8800	13,0873	17,3358	0,0000
Масса в чет.	-0,0012	0,0001	-8,7265	0,0000
Масса в нечет.	-0,0002	0,0002	-0,8399	0,4052
Температура	-0,5618	0,4763	-1,1793	0,2443

Оценка уравнения регрессии после внедрения энергосберегающего устройства производилась по коэффициенту детерминации 0,685; наблюдаемому значению F-критерия 33,315 при критическом значении F-критерия 2,81 (уровень значимости – 0,05; числа степеней свободы – 3 и 46). Указанные параметры показали высокое качество уравнения регрессии.

4. Сравнение данных до и после внедрения энергосберегающих устройств и технологий.

Сравнение полученных данных до и после внедрения энергосберегающих устройств и технологий производится с помощью теста Чоу и непараметрических методов математической статистики. В первую очередь данные сравниваются по тесту Чоу [9]. Критерий определяет произошедшие структурные изменения связей между расходом электрической энергии и влияющими на него факторами. Для этого необходимо построить три уравнения регрессии: до внедрения энергосберегающего устройства, после внедрения и по всем данным эксперимента. Нулевая гипотеза состоит в предложении о равенстве соответствующих параметров регрессии для всех уравнений. Нулевая гипотеза проверяется по фактическому значению F-критерия:

$$F_{\text{факт}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} e_i^2 - \sum_{i=1}^{n_1} e_i^2 - \sum_{i=n_1}^{n} e_i^2\right)(n-2k)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} e_i^2 - \sum_{i=n_1}^{n} e_i^2\right)k}, \qquad (3)$$

где $\sum_{i=1}^{n} e_i^2, \sum_{i=1}^{n_1} e_i^2, \sum_{i=n_1}^{n} e_i^2$ – суммы квадратов остатков уравнений регрессии, построенных по данным до внедрения, после и по всем данным; k – число параметров в уравнении.

Найденное значение $F_{\text{факт}}$ сравнивается с табличным, полученным по таблице распределения Фишера для уровня значимости α и числа степеней свободы (n – $2k$). Если $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, то изменения в процессе электропотребления признаются значимыми и далее переходим к этапу расчета экономии электроэнергии.

Если $F_{\text{факт}} < F_{\text{табл}}$, то нет оснований утверждать, что произошли изменения в процессе электропотребления и далее необходимо проверить выборки с использованием непараметрического критерия типа омега-квадрат (Лемана – Розенблатта).

В нашем примере полученное значение $F_{\text{факт}}$ = 1,028 < 2,700 (при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$), это означает, что по тесту Чоу изменений не зафиксировано и удельный расход электроэнергии сохранил свои связи с влияющими факторами. Для подтверждения полученных результатов по тесту Чоу необходимо проверить выборки по критерию типа омега-квадрат (Лемана-Розенблатта).

Критерий типа омега-квадрат (Лемана – Розенблатта) предназначен для проверки однородности двух независимых выборок. Расчет по критерию начинается с объединения элементов выборок (удельного расхода электроэнергии) и нумерации их под номерами 1 и 2. Построение таблицы подробно описано в работе [10]. Статистика критерия рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{1}{mn(m+n)}\left[m\sum_{i=1}^{m}(r_i-1)^2 + n\sum_{j=1}^{n}(s_j-1)^2\right] - \frac{4mn-1}{6(m+n)}, \tag{4}$$

где r_i и s_i – ранг значений удельного расхода электроэнергии до и после внедрения энергосберегающего устройства в общем вариационном ряду, построенном по объединенной выборке.

Критическое значение определяется по таблице квантилей предельной функции распределения статистики омега-квадрат (Крамера – Мизеса – Смирнова) [10].

Рассчитанное значение статистики критерия $A = 0{,}0302$, что меньше любого критического значения. Из этого можно сделать вывод о том, что удельный расход электроэнергии остался на прежнем уровне после внедрения энергосберегающего устройства и дальнейшее его использование считается нецелесообразным.

5. Расчет экономии электрической энергии.

В случае если один из критериев, используемых в алгоритме (Чоу или Лемана – Розенблатта) подтвердит наличие экономии электрической энергии, то рассчитывается процент экономии электрической энергии от общего потребления по формуле:

$$\text{Р}_{\text{экон}} = \frac{S_{y_1} - S_{y_2}}{S_{y_2}} \cdot 100\,\%, \tag{5}$$

где S_{y_1} – расход электрической энергии, полученный по уравнению регрессии до внедрения энергосберегающего устройства или технологии при подстановке значения фактора после внедрения; S_{y_2} – фактический расход электрической энергии после внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

Разработанный алгоритм успешно апробирован по данным, полученным на участке железной дороги при внедрении энергосберегающего устройства, прост в использовании на практике и предназначен для оценки энергетической эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системах тягового и нетягового электроснабжения.

Список литературы

1. Подход к оценке эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях электроснабжения железнодорожных узлов с учетом производственных и климатических факторов [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 257 – 263.

2. Cheremisin, V. T. Nonparametric statistical approach to evaluating the effectiveness of energy-saving devices [Текст] / V. T. Cheremisin, A. A. Komyakov, V. V. Erbes // 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Krakow, 2014. – P. 58 – 60.

3. Орлов, А. И. Эконометрика: Учебное пособие [Текст] / А. И. Орлов – М.: Экзамен, 2002. – 576 с.

4. Общая теория статистики: Учебник [Текст] / Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 656 с.

5. Эрбес, В. В. Оценка эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях железнодорожных узлов со стабильной нагрузкой [Текст] / В. В. Эрбес, О. В. Гателюк, А. А. Комяков // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013 г. – Одесса, 2013. – С. 24 – 31.

6. Комяков, А. А. О подходах к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров [Текст] / А. А. Комяков, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – Омск. – 2014. – № 2 (18). – С. 106 – 104.

7. Яновский, Л. П. Введение в эконометрику: Учебное пособие [Текст] / Л. П. Яновский, А. Г. Буховец. – М.: КноРус, 2007. – 256 с.

8. Халафян, А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных: Учебник [Текст] / А. А. Халафян. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

9. Эконометрика: Учебник [Текст] / И. И. Елисеева, С. В. Курышева и др. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 576 с.

10. Орлов, А. И. Состоятельные критерии проверки абсолютной однородности независимых выборок [Текст] / А. И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М., 2012. – Т. 78. – № 11. – С. 66 – 70.

References

1. Komyakov A. A., Erbes V. V., Kashtanov A. L. Approach to estimation of efficiency of the work energy-saving device in set of supply of the railway nodes with provision for production and climatic factor [Podkhod k otsenke effektivnosti raboty energosberegaiushchikh ustroistv v setiakh elektrosnabzheniia zheleznodorozhnykh uzlov s uchetom proizvodstvennykh i klimaticheskikh faktorov] *Pribory i metody izmerenii, kontrolia kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte* (Instruments and methods of the measurements, quality and diagnostics checking in industry and on transport). Omsk, 2013, 257 – 263 p.

2. Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Erbes V. V. Nonparametric statistical approach to evaluating the effectiveness of energy-saving devices. 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Krakow, 2014, 58 – 60 p.

3. Orlov A. I. Econometrics: textbook for high schools [Ekonometrika: ucheb. posobie dlia vuzov]. Moscow, 2002, 576 p.

4. Eliseeva I. I. Obshchaia teoriia statistiki (General theory of statistics). Moscow, 2005, 656 p.

5. Erbes V. V., Gatelyuk O. V., Komyakov A. A. Evaluating the effectiveness of energy-saving devices in railway electric networks with stable load [Otsenka effektivnosti raboty energosberegaiushikh ustroistv v setiakh zheleznodorozhnykh uzlov so stabilnoi nagruzkoi]. *Nauchnye issledovaniia i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoianie i puti razvitiia 2013 – Research and their practical application. The current status and development in 2013*, 2013, 24 – 31 p.

6. Komyakov A. A., Nikiforov M. M., Erbes V. V. About approaches to the evaluation of actual energy saving, achieved for realization of service contracts energy [O podkhodakh k otsenke fak-

ticheskoi ekonomii energeticheskikh resursov, dostigaemoi pri realizatsii energoservisnykh dogovorov]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 2, 106 – 114 p.

7. Ianovskii L. P., Bukhovets A. G. *Vvedenie v ekonometriku* (Introduction to Econometrics). Moscow, 2007. 256 p.

8. Khalafian A. A. *Statistica 6. Statisticheskii analiz dannykh* (Statistica 6. Statistical analysis of data). Moscow, 2007, 512 p.

9. Eliseeva I. I. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, 2005, 576 p.

10. Orlov A. I. Wealthy testing criteria of absolute uniformity independent samples [Sostoiatel'nye kriterii proverki absoliutnoi odnorodnosti nezavisimykh vyborok]. *Zavodskaia laboratoriia. Diagnostika materialov – Plant Laboratory. Diagnosis materials*, 2012, no. 11, T. 78, 66 – 70 p.

УДК 621.316.97

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА «АРМАТУРА – БЕТОН» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Статья посвящена совершенствованию методов исследования опор контактной сети на предмет их коррозионного разрушения. В качестве исследуемого объекта используются бетонные образцы, изготовленные в заводских условиях в соответствии с технологией изготовления железобетонных опор контактной сети и позволяющие моделировать физические процессы, происходящие в реальных опорах.

В статье описан процесс изготовления лабораторных образцов железобетонных опор контактной сети. Выполнен анализ переходного процесса для схемы замещения бетонного образца. В результате получены формулы и разработана методология для расчета параметров границы раздела «арматура – бетон». Достоверность схемы замещения подтверждена путем построения теоретической зависимости тока от времени и сравнения ее с экспериментальной.

Обеспечение безопасности движения поездов является одним из приоритетных направлений деятельности ОАО «РЖД». Для этого ежегодно проводится комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на повышение надежности работы основных электротехнических устройств и поддержание инфраструктуры предприятия в работоспособном состоянии. Стратегически важными объектами инфраструктуры ОАО «РЖД» являются железобетонные опоры контактной сети, которые подвержены коррозионному воздействию вследствие множества влияющих внешних факторов. Поэтому задача совершенствования методов определения коррозионного состояния опор контактной сети актуальна.

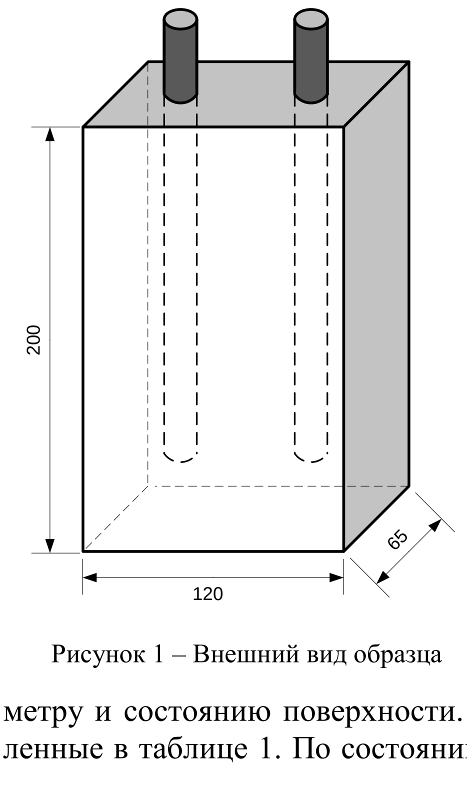


Рисунок 1 – Внешний вид образца

Для получения возможности экспериментального исследования коррозионных процессов в опорах контактной сети изготовлены лабораторные образцы – бетонные блоки, в которые уложены металлические арматурные стержни. Линейные размеры и внешний вид образца приведены на рисунке 1.

Арматура выполнена из стандартных стальных стержней, используемых для изготовления опор контактной сети. Арматурные стержни различаются по диаметру и состоянию поверхности. По диаметрам стержни разбиты на три группы, представленные в таблице 1. По состоянию поверхности идет разделение на стержни, очищенные от заводской окалины, и с окалиной. Таким образом, все стержни разбиты на шесть групп, в каждой из которых не менее восьми опытных образцов.

Таблица 1 – Основные параметры металлических стержней по группам

Диаметр стержня, мм	Средняя масса очищенного / не очищенного от окалины стержня, г	Средняя длина стержня, мм	Количество очищенных / не очищенных от окалины стержней
6	66,6 / 66,1	290	8 / 8
9	126,4 / 126,1	290	9 / 9
12	250,6 / 249,5	290	8 / 8

Бетонные образцы выполнены в заводских условиях в соответствии с технологией изготовления железобетонных опор контактной сети.

В результате экспериментального исследования образцов по схеме рисунка 2 выполнен синтез схемы замещения границы раздела «арматура – бетон» [1]. Полученная схема замещения бетонного образца (рисунок 3) теоретически подтверждена в источнике [2] и не противоречит модели, приведенной в работе [3].

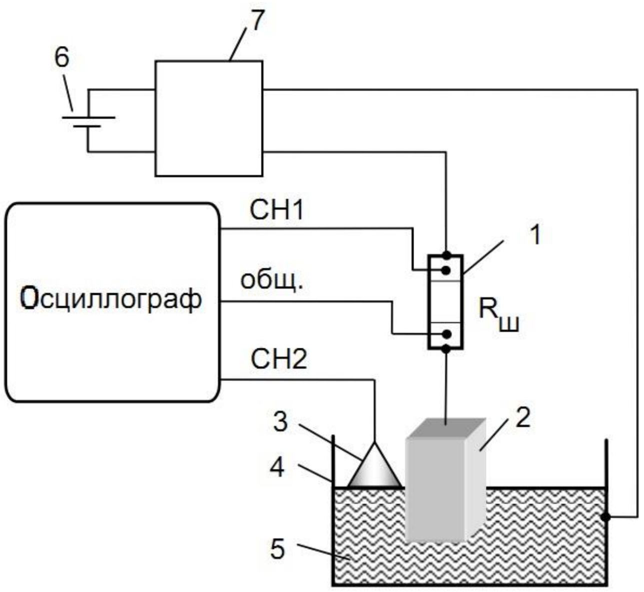


Рисунок 2 – Схема исследования образца железобетонной опоры: 1 – шунт; 2 – образец; 3 – электрод сравнения; 4 – ванна; 5 – коррозионная среда; 6 – источник; 7 – коммутатор

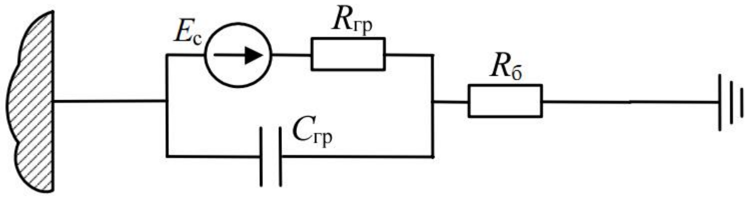


Рисунок 3 – Схема замещения границы раздела «арматура – бетон»: $E_с$ – электрохимический потенциал на границе раздела «арматура – бетон»; $R_{гр}$, $C_{гр}$ – сопротивление и емкость границы раздела «арматура – бетон»; $R_б$ – сопротивление бетона от границы раздела «арматура – бетон» до внешней границы бетонного образца

Электрохимический потенциал измеряется вольтметром относительно медносульфатного электрода сравнения. В среднем он принимает значения порядка $E_с$ = 0,4 … 0,7 В.

Чтобы получить выражения для определения параметров $C_{гр}$, $R_{гр}$ и $R_б$, предлагается использовать переходный процесс, расчет которого выполним классическим методом.

Расчетная схема приведена на рисунке 4.

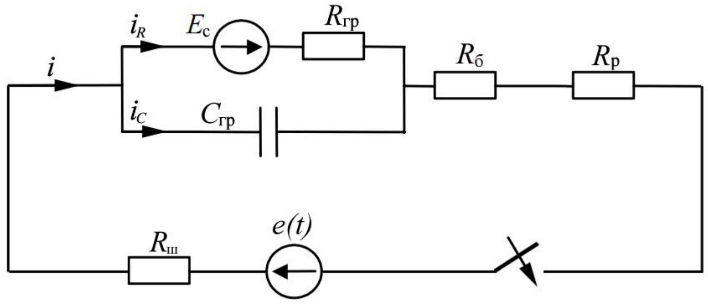


Рисунок 4 – Расчетная схема переходного процесса на образце

По сравнению со схемой замещения, приведенной на рисунке 3, в этой схеме добавляется сопротивление растеканию тока в коррозионной среде $R_р$, учитывающее участок цепи от внешней границы бетонного образца до электрода сравнения. Кроме того, на рисунке 4 показан внешний источник напряжения $e(t)$, подключаемый к схеме, и шунт $R_ш$, необходимый для определения формы кривой тока.

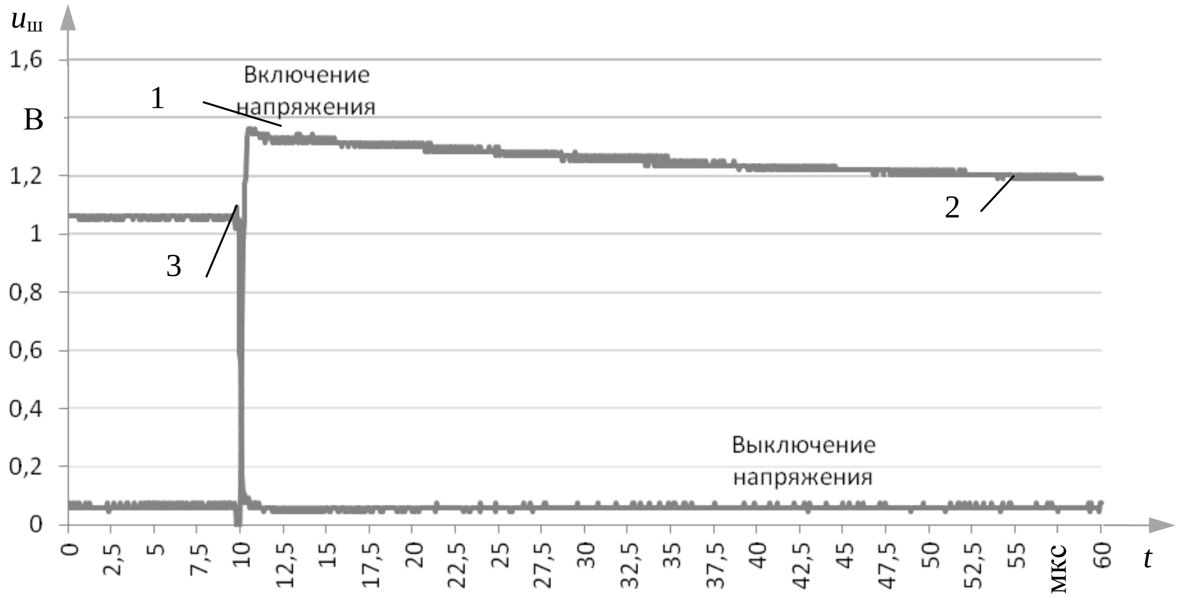


Рисунок 5 – Зависимость напряжения на шунте $u_ш(t)$ от времени при включении (т. 1 и 2) и выключении (т. 3) источника напряжения

Рассмотрим процесс поляризации опытного образца железобетонной опоры при подключении к постоянному, положительному значению напряжения $e(t) = E$. На рисунке 5 изображена осциллограмма падения напряжения на шунте при замыкании (точки 1 и 2) и размыкании (т. 3) ключа. Масштабы по напряжению и времени указаны на рисунке, однако масштаб по времени для второго графика (размыкание ключа) увеличен в 10 раз: максимальное значение не 60, а 600 мкс.

При расчете будем полагать, что включение схемы происходит в момент времени $t = 0$. На осциллограмме, представленной на рисунке 5, включение происходит в момент времени $t = 10$ мкс и соответствует точке 1.

Учитывая, что сопротивление бетона $R_б$ и сопротивление растеканию электрического тока $R_р$ в схеме замещения включены последовательно, в расчетах удобнее их учитывать вместе. Объединим их в одно сопротивление коррозионной среды:

$$R_{кс} = R_б + R_р.$$

В этом случае система дифференциальных уравнений, составляемых по законам Кирхгофа, запишется в виде:

$$\begin{cases} i = i_R + i_C; \\ i(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}) + u_C = E; \\ i_R R_{\text{гр}} - u_C = E_C. \end{cases} \tag{1}$$

До замыкания ключа $u_C(0-) = -E_C$. Тогда начальные значения тока и напряжения в схеме можно найти из системы (1), в которой с учетом закона коммутации $u_C(0+) = u_C(0-) = -E_C$. Тогда

$$i(0+)(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}) + u_C(0+) = E;$$

$$i(0+) = \frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}; \tag{2}$$

$$i_R(0+) = \frac{E_C + u_C(0+)}{R_{\text{гр}}} = 0; \qquad i_C(0+) = i(0+).$$

Измеряемое напряжение

$$u = u_C + iR_{\text{кс}} = e(t) - iR_{\text{ш}}$$

в начальный момент времени принимает значение

$$u(0+) = u_C(0+) + i(0+)R_{\text{кс}} = -E_C + \frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}} R_{\text{кс}} = \frac{ER_{\text{кс}} - E_C R_{\text{ш}}}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}. \tag{3}$$

Постоянная времени рассматриваемой цепи

$$\tau = R_{\text{Э}} C_{\text{гр}}, \text{ где } R_{\text{Э}} = \frac{R_{\text{гр}}(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}})}{R_{\text{гр}} + R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}. \tag{4}$$

Решение для тока может быть записано в виде:

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{5}$$

Принужденная составляющая при постоянном внешнем напряжении является константой и не зависит от времени. Установившееся значение тока можно найти из системы дифференциальных уравнений (1), считая, что $i_{C\text{пр}} = 0$:

$$i_{\text{пр}} = \frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{гр}}}. \tag{6}$$

Неизвестный коэффициент A_1 найдем из уравнения (5), записанного для момента времени $t = 0+$ с учетом начального условия (2):

$$\frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}} = \frac{E_C + E}{R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{гр}}} + A_1;$$

$$A_1 = (E_C + E)\frac{R_{\text{гр}}}{(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}})(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{гр}})}. \tag{7}$$

Учитывая, что $R_{\text{ш}}$ известно, а начальное значение тока $i(0+)$ можно определить по осциллограмме переходного процесса, из уравнения (2) определяем $R_{\text{кс}}$:

$$R_{\text{кс}} = \frac{E_C + E}{i(0+)} - R_{\text{ш}}. \tag{8}$$

Сопротивление $R_{гр}$ можно найти через отношение

$$\frac{i(0+)}{i_{пр}} = \frac{R_{кс} + R_{ш} + R_{гр}}{R_{кс} + R_{ш}} = 1 + \frac{R_{гр}}{R_{кс} + R_{ш}},$$

так как значение $i_{пр}$ = const и его можно получить по осциллограмме при условии, что за время, отведенное на поляризацию, переходный процесс успел завершиться. Таким образом,

$$R_{гр} = \left(\frac{i(0+)}{i_{пр}} - 1\right)\left(R_{кс} + R_{ш}\right). \quad (9)$$

Емкость $C_{гр}$ можно найти по выражению (4):

$$C_{гр} = \frac{\tau}{R_{Э}}. \quad (10)$$

Постоянная времени τ определяется графически по осциллограмме.

В случае если заряд не заканчивается на интервале отрицательного импульса ($4\tau > 20$ с), постоянную времени τ можно найти, определив по осциллограмме значение тока $i(t_1)$ в момент переключения коммутатора (t_1 = 20 с):

$$i(t_1) = i_{пр} + A_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}}; \quad (11)$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln\left(\frac{A_1}{i(t_1) - i_{пр}}\right)}. \quad (12)$$

Выполним численный расчет параметров схемы замещения $C_{гр}$, $R_{гр}$ и $R_{б}$ на примере переходного процесса, экспериментально зафиксированного на одном из образцов. На рисунке 5 изображена осциллограмма напряжения $u_{ш}(t)$, по которой осуществим измерения.

Для более точного определения значения тока в нужных точках процесс записи осциллограммы разбивается на две части: включение и выключение напряжения. Отключение схемы от источника напряжения выполняется через 40 с – время, необходимое для подготовки осциллографа к записи следующего графика и вполне достаточное для того, чтобы переходный процесс закончился.

При проведении эксперимента использовались следующие значения параметров: сопротивление шунта $R_{ш}$ = 20 Ом; измеренное значение электрохимического потенциала на границе раздела «арматура – бетон» составило –0,4 В; напряжение источника ЭДС E = 12 В.

По осциллограмме определяются следующие значения.

Начальное значение тока непосредственно после коммутации:

$$i(0+) = \frac{u_{ш}(0+)}{R_{ш}}; \quad (13)$$

$$i(0+) = 0,068 \text{ А},$$

где $u_{ш}(0+)$ = 1,36 В – напряжение на шунте непосредственно после включения источника. На осциллограмме, изображенной на рисунке 5, это значение напряжения в точке 1.

Принужденная составляющая тока определяется непосредственно перед выключением источника:

$$i_{пр} = \frac{u_{ш\,пр}}{R_{ш}}; \quad (14)$$

$$i_{пр} = 0,0525 \text{ А},$$

где $u_{ш\,пр}$ = 1,05 В – напряжение на шунте непосредственно перед выключением источника. На осциллограмме, изображенной на рисунке 5, это значение напряжения в точке 3.

Коэффициент A_1 можно найти как разность значений:

$$A_1 = i(0+) - i_{\text{пр}}; \qquad (15)$$

$$A_1 = 0,0155 \text{ А.}$$

Постоянную времени τ найдем по осциллограмме, изображенной на рисунке 5. Воспользуемся формулой (12), выбрав в качестве расчетной точку 2, которая соответствует моменту времени t_1, когда ток в цепи

$$i(t_1) = i_{\text{пр}} + 0,5A_1; \qquad (16)$$

$$i(t_1) = 0,060 \text{ А.}$$

В этом случае $u_{\text{ш}}(t_1) = i(t_1)\,R_{\text{ш}} = 1{,}2$ В. На осциллограмме это соответствует моменту времени $t_1 = 45$ мкс. По рисунку получается 55 мкс, но так как мы в расчете приняли, что коммутация произошла в момент времени $t = 0$, а на осциллограмме коммутация произошла в момент времени $t = 10$ мкс, то в результат измерения t_1 вводим поправку на 10 мкс.

Тогда постоянная времени

$$\tau = \frac{45}{\ln\left(\dfrac{A_1}{i(t_1) - i_{\text{пр}}}\right)} = \frac{45}{\ln\left(\dfrac{A_1}{i_{\text{пр}} + 0,5A_1 - i_{\text{пр}}}\right)} = \frac{45}{\ln\left(\dfrac{A_1}{0,5A_1}\right)}; \qquad (17)$$

$$\tau = \frac{45}{\ln(2)} \approx 65 \text{ мкс.}$$

Сопротивление бетона от границы раздела «арматура – бетон» до внешней границы бетонного образца $R_{\text{б}}$ можно определить только вместе с сопротивлением растеканию тока $R_{\text{р}}$, получив сопротивление коррозионной среды по формуле (8):

$$R_{\text{кс}} = \frac{E_C + E}{i(0+)} - R_{\text{ш}}; \qquad (18)$$

$$R_{\text{кс}} = \frac{0,4 + 12}{0,068} - 20 = 162,3 \text{ Ом.}$$

Сопротивление границы раздела «арматура – бетон» найдем по формуле (9):

$$R_{\text{гр}} = \left(\frac{i(0+)}{i_{\text{пр}}} - 1\right)\left(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}\right); \qquad (19)$$

$$R_{\text{гр}} = \left(\frac{0,068}{0,0525} - 1\right)\left(162,3 + 20\right) = 53,8 \text{ Ом.}$$

Емкость границы раздела «арматура – бетон» найдем через сопротивление $R_{\text{э}}$, используя выражения (4) и (10):

$$R_{\text{Э}} = \frac{R_{\text{гр}}(R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}})}{R_{\text{гр}} + R_{\text{кс}} + R_{\text{ш}}}; \qquad (20)$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{53,8(162,3 + 20)}{53,8 + 162,3 + 20} = 41,5 \text{ Ом.}$$

$$C_{\text{гр}} = \frac{\tau}{R_{\text{Э}}}; \qquad (21)$$

$$C_{\text{гр}} = \frac{65 \cdot 10^{-6}}{41,5} = 1,57 \text{ мкФ.}$$

На рисунке 6 по найденным значениям $R_{гр}$, $R_{кс}$ и $C_{гр}$ построены зависимости токов от времени для приведенной на рисунке 4 схемы замещения.

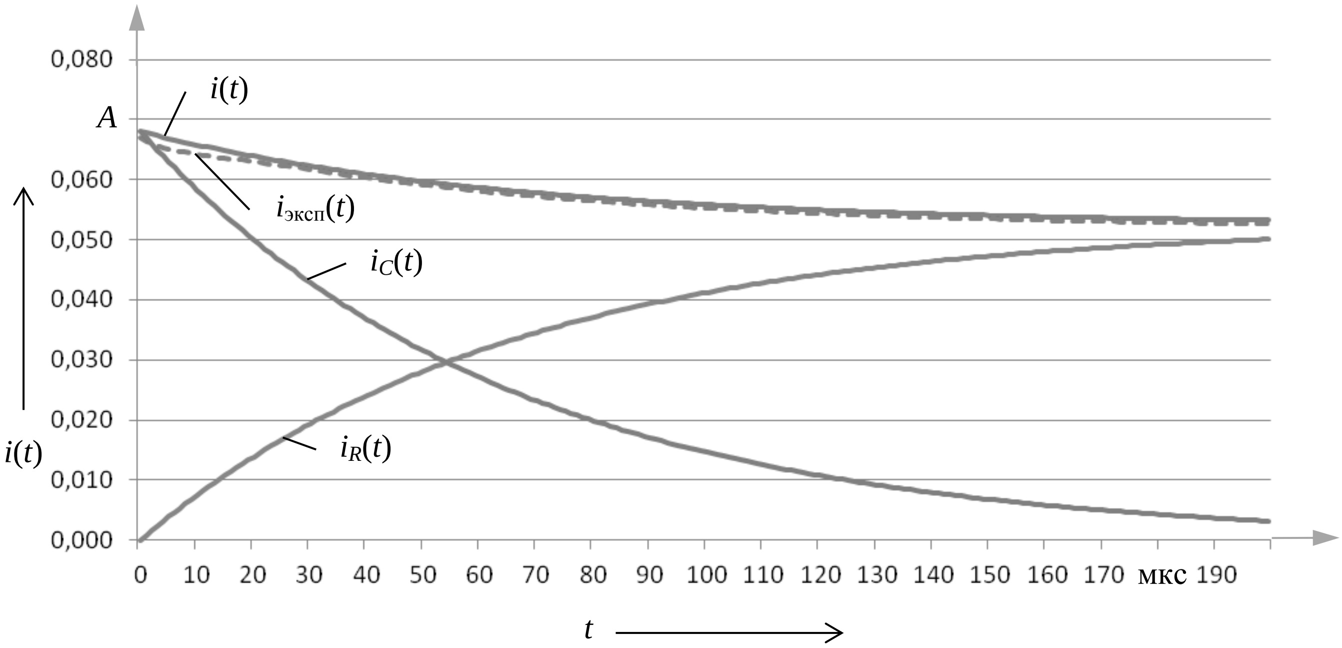


Рисунок 6 – Зависимости теоретически рассчитанных токов i, i_C, i_R и экспериментально полученного тока $i_{эксп}(t)$ от времени

В результате анализа рисунка 6 можно сделать вывод о том, что теоретически построенная кривая $i(t)$ совпадает по форме с экспериментальной кривой $i_{эксп}(t)$, полученной на основе осциллограммы напряжения на шунте (см. рисунок 5). Численная проверка выполнена по трем основным значениям:

– начальное значение тока $i(0+)$ в теоретической кривой равно 0,068А; в экспериментальной кривой, представляющей собой график напряжения $u_ш(t)$, в соответствии с уравнением (13) получилось то же самое значение;

– теоретически определенное значение тока в момент времени t_1 = 45мкс совпадает с полученным экспериментально в выражении (16): $i(t_1)$ = 0,060 А;

– теоретически полученная принужденная составляющая тока $i_{пр}$ = 0,0525 А также совпадает с принужденной составляющей, полученной экспериментально в выражении (14).

Список литературы

1. Маслов, Г. П. Методика определения параметров границы раздела «арматура – бетон» [Текст] / Г. П. Маслов, Н. Ю. Свешникова, А. В. Кандаев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск. – 2008. – № 1. – С. 282 – 286.

2. Кандаев, В. А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст]: Монография / В. А. Кандаев / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2003. – 198 с.

3. Скорчеллетти, В. А. Теоретическая электрохимия [Текст] / В. А. Скорчеллетти. – М.: Химия, 1969. – 608 с.

References

1. Maslov G. P., Sveshnikova N. Y., Kandaev A. V. Method of calculation «steel – concrete» interface region parameters. [Metodica opredeleniya parametrov granici razdela «armatura – bet-

on»]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2008, no. 1, pp. 282 – 286.

2. Kandaev V.A. *Sovershenstvovanie expluatacionnogo kontrolya korrosionnogo sostoyaniya podzemnih sooruzheniy system electrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta: Monografiia* (Improvement of corrosion state operating control for underground devices of railway power supply system: Monograph). Omsk, 2003, 198 p.

3. Skorchelletti V.A. *Teoreticheskaia elektrokhimiia* (Theoretical Electrochemistry). Moscow, 1969, 608 p.

УДК 621.311.4: 621.331

А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В статье приведены результаты моделирования и натурного испытания прибора для дистанционного контроля изоляторов контактной сети железнодорожного транспорта. Рассмотрены основные причины пробоя изоляторов. Приведена статистика отказов изоляторов контактной сети. Участок контактной сети представлен в виде модели линии с распределенными параметрами. Для создания виртуальной модели устройства и линии была выбрана программа Multisim 12.0. Описана структурная схема прибора для дистанционного контроля изоляторов контактной сети. Представлена схема проведения эксперимента на участке контактной сети полигона ОмГУПСа. Выбрана форма диагностирующих импульсов для определения возможного места положения неисправного изолятора.

Наибольшее количество событий, связанных с нарушением безопасности движения поездов в хозяйстве электрификации и электроснабжения, происходит из-за отказов в работе устройств контактной сети. В 2013 г. в результате отказов устройств контактной сети допущено 129 транспортных событий (92,8 %), электроснабжения СЦБ и тяговых подстанций – по пять (по 3,6 %) [1].

Определяющими причинами отказов контактной сети, влияющими на безопасность движения в хозяйстве электрификации и электроснабжения, являются перекрытие и разрушения изоляторов контактной сети (21 %), обрывы и пережоги проводов (19 %), разрушение зажимов (11 %), нарушение регулировки контактной сети (10 %), обрывы струн (7 %) [1].

Повреждения изолирующих элементов приводят к сбою движения поездов, а в некоторых случаях и к большим перерывам, необходимым для восстановления поврежденных конструкций. В общем объеме повреждений изоляторов преобладающими являются механические. Подобные разрушения изоляторов наиболее часто происходят при неблагоприятных метеорологических условиях (в период сильных ветров и автоколебаний проводов, при низкой температуре) в тех узлах контактной сети, где на изоляторы воздействуют высокие механические нагрузки.

Основные причины разрушения изоляторов: низкая механическая прочность при ударных нагрузках; быстрое старение в эксплуатации, особенно при низкой температуре недостатки конструкций, фиксирующих узлов; нарушение норм содержания; случаи, не связанные с эксплуатацией.

Недостаточная механическая прочность изоляторов при их защемлении и воздействии ударных нагрузок приводит к разрушению фарфора. Снижение механической прочности некоторых изоляторов при длительной эксплуатации обычно происходит из-за возникновения значительных напряжений в месте сопряжения фарфора, цементной заделки и металлической арматуры в связи с разными коэффициентами температурного расширения этих материалов. В таких местах в фарфоре возникают микро- и макротрещины, со временем развивающиеся и снижающие механическую прочность всего изолятора. Максимальная потеря прочности происходит при низкой температуре [2].

Прочность изолятора уменьшается также из-за постоянных ударных нагрузок, передающихся на них при эксплуатации. В таких случаях в фарфоре возникают также скрытые трещины, которые затем развиваются. Скрытость дефектов, которые нельзя обнаружить ни визуально, ни электрическими испытаниями, наиболее опасна в эксплуатации.

Среди известных аналогов преобладают приборы, принцип действия которых основан на анализе схем с сосредоточенными параметрами [3]. На основе предложенного метода в работе [4] разработан опытный образец переносного устройства для диагностирования изоляторов контактной сети железнодорожного транспорта. Структурная схема измерительного комплекса представлена на рисунке 1.

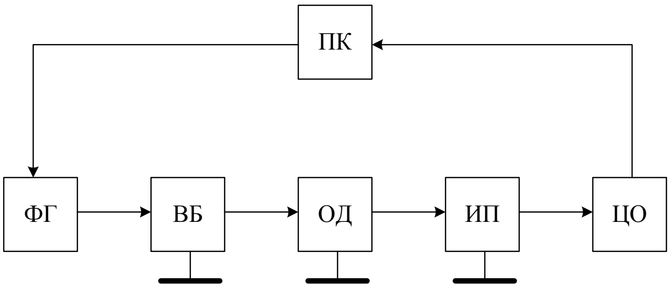


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного комплекса: ПК – персональный компьютер; ФГ – функциональный генератор; ВБ – высоковольтный блок; ОД – обьект диагностирования; ИП – измерительный преобразователь; ЦО – цифровой осциллограф

Контактную сеть постоянного тока с изолирующими элементами принято рассматривать в виде линии с распределенными параметрами. Для решения задачи контроля изолирующих элементов и оперативного определения места их повреждения необходимо использовать современное программное обеспечение. Для создания виртуальной модели устройства и сравнения с данными измерительного эксперимента была выбрана программа Multisim 12.0. Схема прибора контроля изоляции, созданная в программе Multisim, приведена на рисунке 2. От источника подается переменное напряжение 100 В на схему умножителя напряжения. С генератора прямоугольных импульсов подается сигнал на реле частотой 1 Гц. Выход IO1 подключается к контактной сети. Выход IO2 соединен с рельсом.

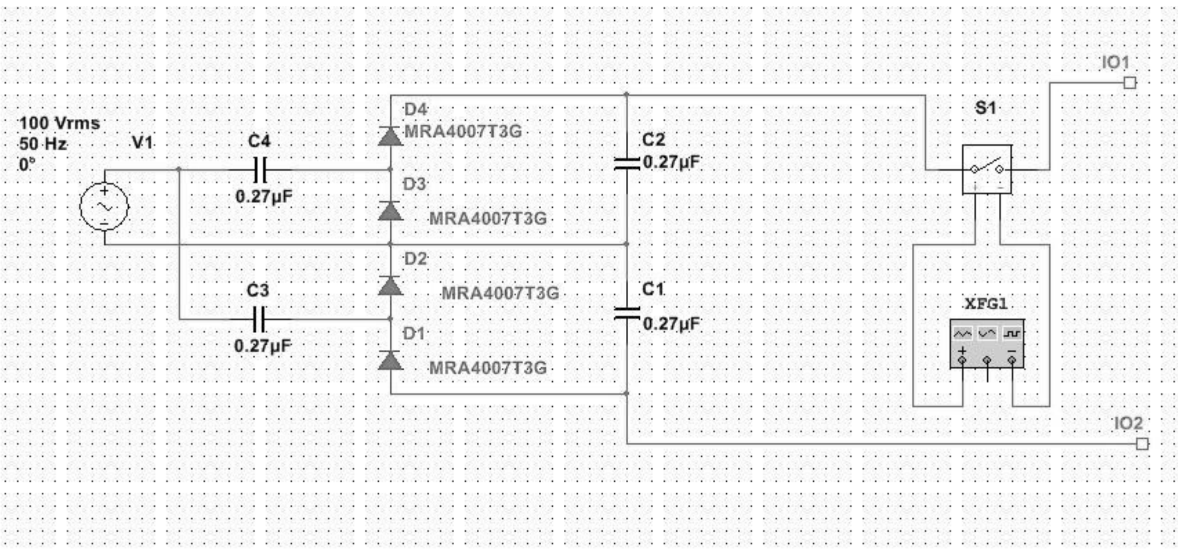


Рисунок 2 – Схема переносного прибора диагностирования изоляторов в программе Multisim

В качестве тестовых воздействий выбраны прямоугольные импульсы, имеющие непрерывный спектр высших гармоник. Поскольку объект диагностирования представлен комплексным сопротивлением, каждая из составляющих гармоник входного напряжения будет по-разному влиять на форму выходного сигнала. Схема измерительного эксперимента, реализованного в программе Multisim, представлена на рисунке 3. Каждый изолятор представлен в виде параллельно соединенных активного и емкостного сопротивлений. Каждый изолятор по очереди становился потенциально неисправным (его сопротивление уменьшалось до 500 кОм). Каждый пролет имел длину 50 м и комплексное сопротивление 0,03 Ом [5].

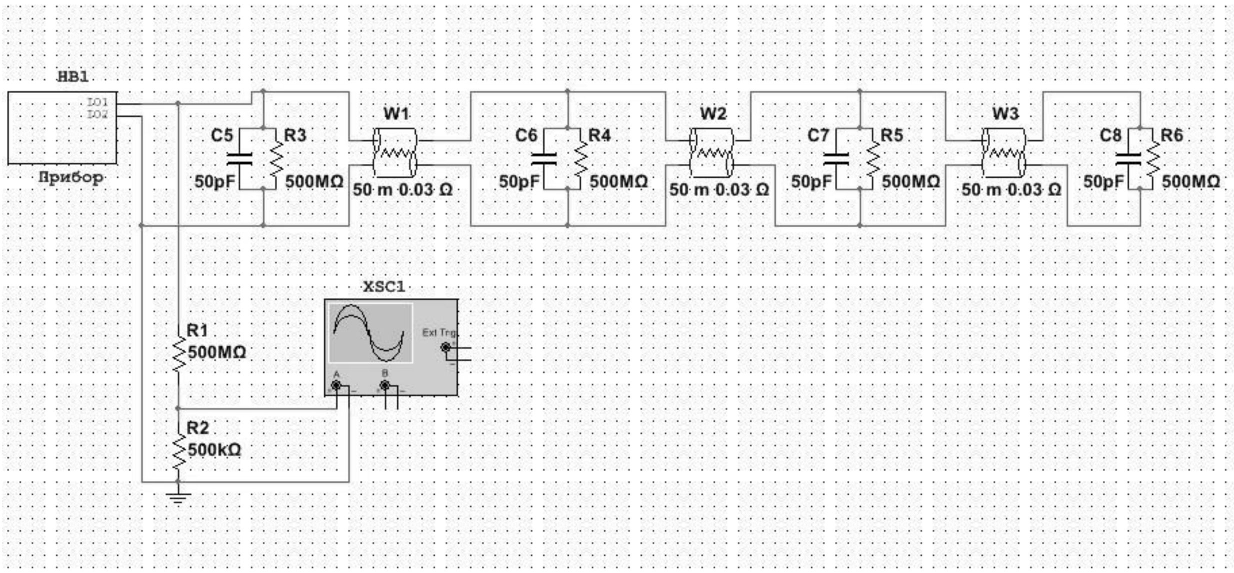


Рисунок 3 – Схема измерительного эксперимента на линии с исправными изоляторами в программе Multisim

Последовательность прямоугольных импульсов характеризуется длительностью, амплитудой и периодом следования единичного импульса. Осциллограмма исправной линии приведена на рисунке 4. Все изоляторы имеют активное сопротивление 500 МОм и суммарную емкость 50 пФ [6]. При прохождении импульса через линию происходит заряд с последующим разрядом изоляторов.

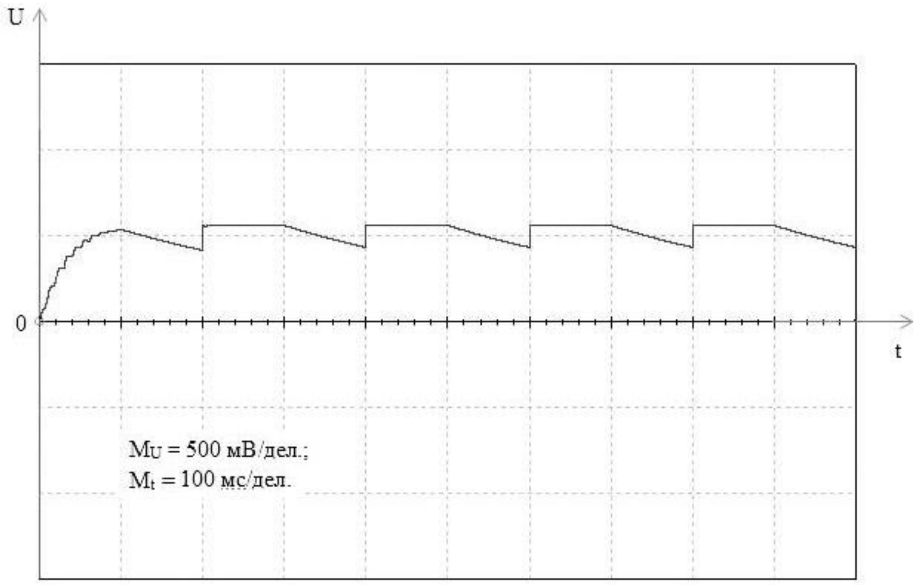


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного сигнала исправной линии в программе Multisim

На рисунке 5 представлены результаты моделирования с поврежденным изолятором в различных точках линии: 1 – неисправный изолятор находится в начале линии, 2 – в середине, 3 – в конце линии. Как видно из осциллограмм на рисунках 4, 5, чем дальше находится неисправный изолятор, тем выше амплитуда измеряемого сигнала и тем сильнее спад заднего фронта импульса. Кроме того, при наличии в линии неисправного изолятора, возникают пульсации высокого уровня выходного импульса напряжения. Сигнал, поступающий в линию, шунтируется неисправным изолятором, сопротивление которого значительно (в тысячу раз) меньше, чем у исправных изоляторов.

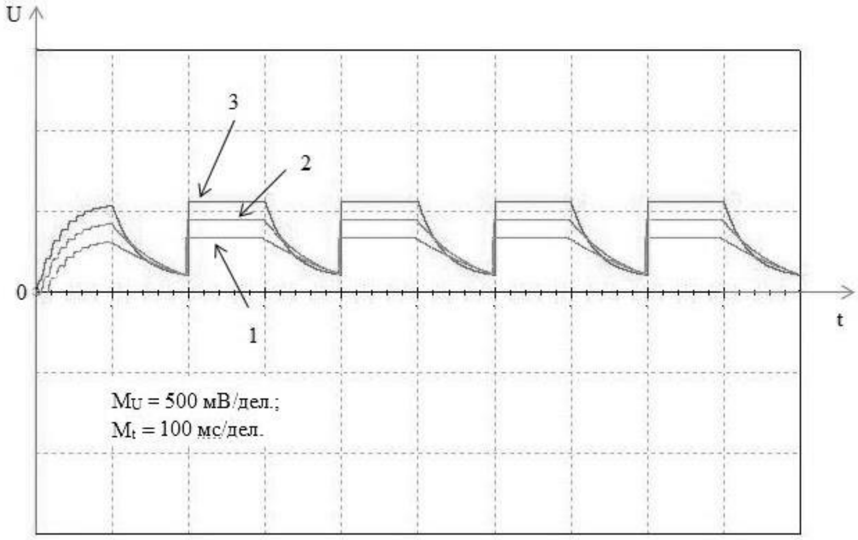


Рисунок 5 – Осциллограммы выходного сигнала линии в трех режимах

На рисунке 6 представлена схема проведения эксперимента (по диагностированию изоляторов) на участке контактной сети учебного полигона ОмГУПСа. Неисправный изолятор (НИ) соединялся с контактной сетью и рельсовым заземлением в положениях 1 – 3, как показано на рисунке 6. Подключение прибора контроля изоляторов (ПКИ) к контактной сети осуществлялось при помощи измерительной штанги (ИШ). Для эксперимента были выбраны подвесные фарфоровые тарельчатые изоляторы типа ПФ-70 [7].

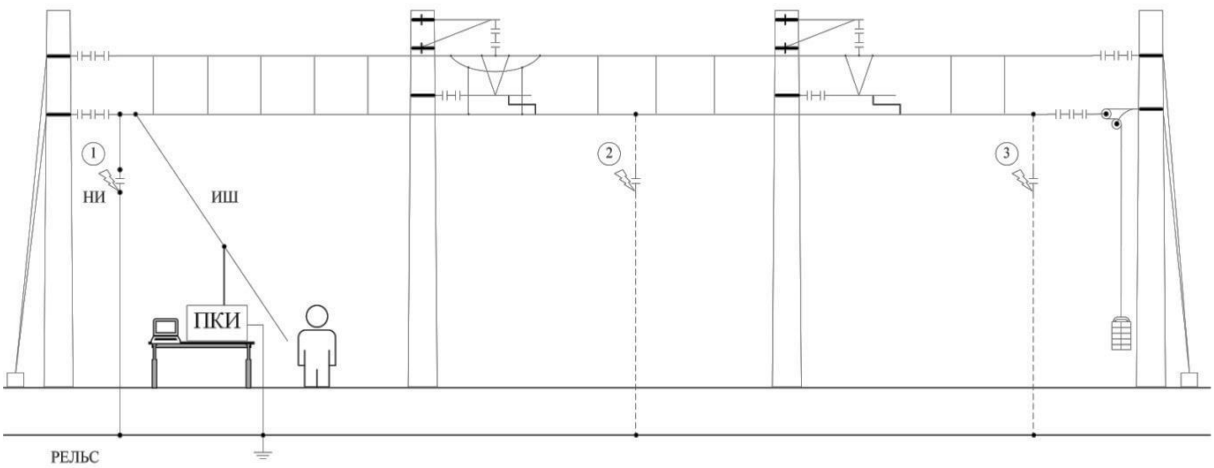


Рисунок 6 – Схема проведения эксперимента по диагностированию изоляторов на участке контактной сети

На рисунке 7 приведена осциллограмма выходного сигнала исправного участка. Неисправный изолятор не включен в линию (режим холостого хода).

Как видно из приведенной на рисунке 7 осциллограммы, на реальном участке также происходит разряд эквивалентной емкости на входные цепи измерительного делителя напряжения. Это видно по характерному спаду заднего фронта импульса.

На рисунке 8 показаны наложенные осциллограммы диагностирующих импульсов при расположении неисправного изолятора в положениях 1 – 3 участка контактной сети (см. рисунок 6).

При подключении неисправного изолятора в положения 1 – 3, как и при моделировании, наблюдается увеличение разряда, которое можно объяснить уменьшением эквивалентного активного сопротивления реального участка. Как видно из осциллограммы на рисунке 7, наличие на участке неисправного изолятора приводит к увеличению спада заднего фронта импульса, что объясняется интенсивным разрядом его внутренней емкости. Кроме того, при размещении неисправного изолятора на близком расстоянии от начала линии наблюдалось уменьшение амплитуды прямоугольных импульсов. Это можно объяснить тем, что внутреннее сопротивление неисправного изолятора ($R_{НИ}$ = 500 кОм) шунтирует входную цепь измерителя. По мере удаления от места проведения измерений амплитуда сигнала увеличивается.

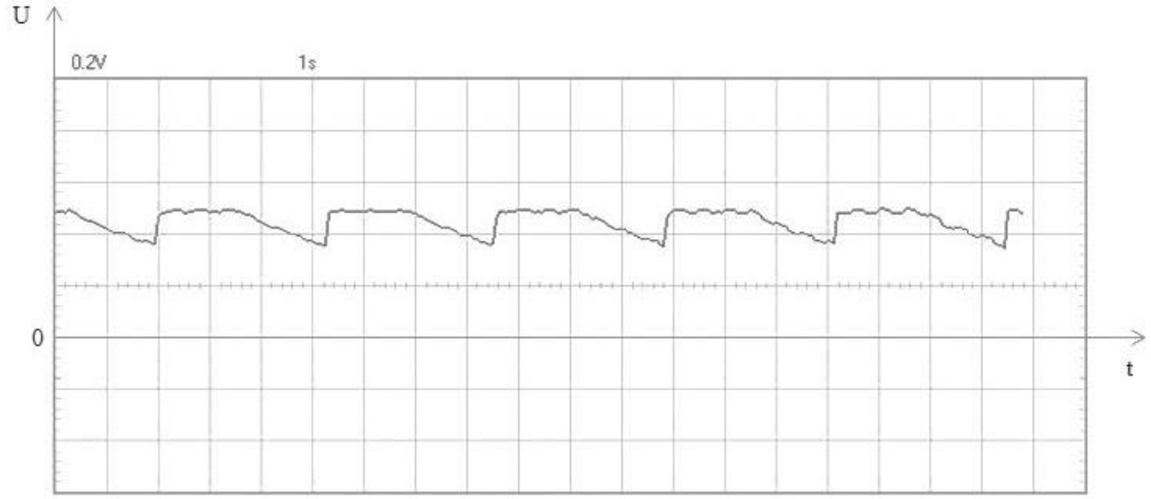


Рисунок 7 – Осциллограмма выходного сигнала исправного участка

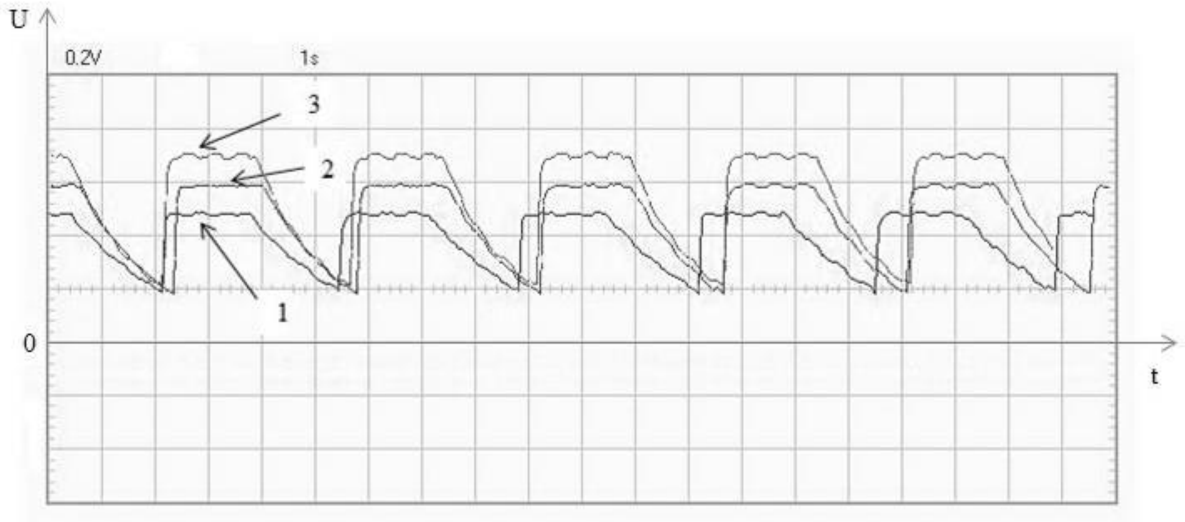


Рисунок 8 – Осциллограммы выходного сигнала участка с неисправным изолятором в трех режимах

Таким образом, наличие на участке неисправных изоляторов сопровождается изменением формы диагностирующих импульсов, а расстояние до неисправного изолятора определяется изменением амплитуды сигнала.

Данный метод диагностирования позволяет выявить наличие и местоположение дефектных изоляторов, поврежденных в результате механического воздействия на них (сколы, трещины, деформации). Рекомендуемым способом выявления наличия неисправного изолятора на участке контактной сети является накопление и последующее сравнение образцовых и измеренных сигналов. Работы, выполняемые по предложенной технологии, позволяют сократить время на поиск и устранение неисправностей изоляции контактной сети железных дорог. Диагностирование состояния изоляции контактной сети можно будет проводить с помощью дополнительного оборудования, установленного в вагоне-лаборатории контактной сети (ВИКС) или непосредственно на тяговых подстанциях.

Список литературы

1. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2013 г. [Текст]. – М., 2014. – 100 с.

2. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.

3. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий: Справочник. ЦЭ МПС [Текст]. – М.: Транспорт, 2001. – 512 с.

4. Кузнецов, А. А. Разработка технических средств и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока [Текст] / А. А. Кузнецов, Е. А. Кротенко, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 4. – С 110 – 116.

5. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

6. Резевиг, Д. В. Техника высоких напряжений: Учебник [Текст] / Д. В. Резевиг. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

7. Каталог изоляторов для контактной сети и ВЛ электрифицированных железных дорог [Текст]. – М.: Трансиздат, 2000.

References

1. *Analiz raboty khoziaistva elektrifikatsii i elektrosnabzheniia v 2013 g.* (Analysis of the farm electrification and power supply in 2013). Moskow, 2014, 100 s.

2. Mikheev V. P. *Kontaktnye seti i linii elektroperedachi* (Contact network and power lines). Moscow: Marshrut, 2003, 416 p.

3. *Normativno – metodicheskaia dokumentatsiia po ekspluatatsii kontaktnoi seti i vysokovol'tnykh vozdushnykh linii. Spravochnik* (Normative – methodical literature concerning the operation of contact network and high-voltage transmission overhead lines. Directory). Moscow: Transport, 2001, 512 p.

4. Kuznetsov A. A., Krotenko E. A., Kuz'menko A. Iu. Development of technical means and methods of monitoring the status of iso-lators catenary DC [Razrabotka tekhnicheskikh sredstv i metodiki kontrolia sostoianiia izo-liatorov kontaktnoi seti postoiannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 4. pp 110 – 116.

5. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Power supply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.

6. Rezevig D. V. *Tekhnika vysokikh napriazhenii* (High Voltage Equipment). Moscow: Energiia, 1976, 488 p.

7. *Katalog izoliatorov dlia kontaktnoi seti i VL elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Product insulators for overhead lines and contact network of electrified railways). Moscow: Transizdat, 2000.

УДК 621.315.65

Т. А. Несенюк, Б. С. Сергеев, А. П. Сухогузов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ 6 – 10 кВ

В связи с негативными последствиями, вызываемыми неисправностью изоляторов в воздушных линиях 6 – 10 кВ, предложено контролировать состояние штыревого изолятора устройством, срабатывающим при прохождении через изолятор тока пробоя. Описана работа устройства для определения дефектов изоляторов. Приведены схемы замещения подключения сигнального устройства к изолятору ВЛ. Рассмотрены основные

процессы, происходящие в системе «изолятор – опора ВЛ» в исправном состоянии и при наличии дефекта с учетом геометрической емкости, тока абсорбции, тока сквозной проводимости, включенных в составляющие поверхностного тока пробоя.

Параметры функционирования воздушных линий (ВЛ) 6 – 10 кВ определяют надежность работы устройств электроснабжения, в том числе участков воздушной линии для питания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта, линий продольного электроснабжения и линий СЦБ. Неисправность изоляции ВЛ может привести к значительным экономическим потерям, вызванным недоотпуском потребителям электроэнергии и разрушением элементов системы электроснабжения. Происходит ускоренное старение изоляции, возникают явления феррорезонанса, от которых в сетях 6 – 10 кВ чаще всего повреждаются трансформаторы напряжения и слабонагруженные силовые трансформаторы, работающие в режиме, близком к холостому ходу [1].

Однофазные замыкания ВЛ представляют большую опасность для жизни оказавшихся поблизости людей, служат источником электротравм и нередко являются причиной несчастных случаев. На железобетонных опорах при замыкании на землю происходит повреждение бетона. От протекания тока в наиболее нагретых местах плавится арматура, происходит нагревание опоры и грунта. При этом опора оказывается под потенциалом, который создает шаговые напряжения и напряжения прикосновения, опасные для людей и животных.

Для устранения указанных негативных последствий функционирования ВЛ необходимо решение двух основных задач, позволяющих улучшить эксплуатационные показатели железных дорог. Первая из них заключается в необходимости минимизации времени на точное определение места неисправности ВЛ эксплуатационным штатом дистанций электроснабжения и в последующем ее устранении. Существующие методы обнаружения неисправности не дают возможности определить место отказа тех или иных элементов ВЛ, например, с точностью до конкретной опоры линии.

Решение второй задачи предполагает обнаружение предотказного состояния элементов ВЛ, которое потенциально приведет к последующему нарушению функционирования линии электроснабжения. В известных методах диагностики ВЛ такая возможность практически отсутствует.

Значительная часть отказов ВЛ обусловлена неисправностью изоляторов. Можно выделить в основном два вида неисправностей изоляторов: катастрофические (быстрые) и медленные. Первый вид отказов обусловлен, например, пробоем изоляции, в частности, из-за грозового разряда или дефектов материала изолятора. Вторые вызываются постепенным снижением качества изоляции, например, за счет поверхностного загрязнения, образования проводящих дорожек при частичных разрядах и др. Если первый вид неисправностей изоляторов может быть зарегистрирован контрольно-защитными устройствами и системами подстанций, то регистрация вторых практически невозможна. Поверхностное искровое перекрытие может привести к последующему катастрофическому отказу изолятора со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями. На рисунке 1 представлены дефекты и характерные процессы в изоляторе, которые могут привести к пробою.

На рисунке 2 приведена обобщенная схема ВЛ участка воздушной линии электропередачи. Здесь в качестве примера показана ВЛ с одной трехфазной линией и с двумя питающими подстанциями (П/С). На протяжении длины линии размещены опоры, условно показанные так: 1, 2,…(N – 1), N. Длина линии $L_л$ может достигать нескольких десятков километров и зависит от многих факторов, в том числе и от вида тяги. В соответствии с этим количество N опор участка дороги может достигать нескольких сотен. Очевидно, что это может привести к значительным затратам времени по поиску отказа изолятора.

Условная схема замещения одной фазы, учитывающая только реактивные параметры рассматриваемой линии, на примере одной фазы приведена на рисунке 3, где L_0 – удельная индуктивность одного километра линии, C_0 – удельная емкость одного километра линии, $L_{ВК}$ – собственная удельная внутренняя индуктивность источника питания $E_ф$.

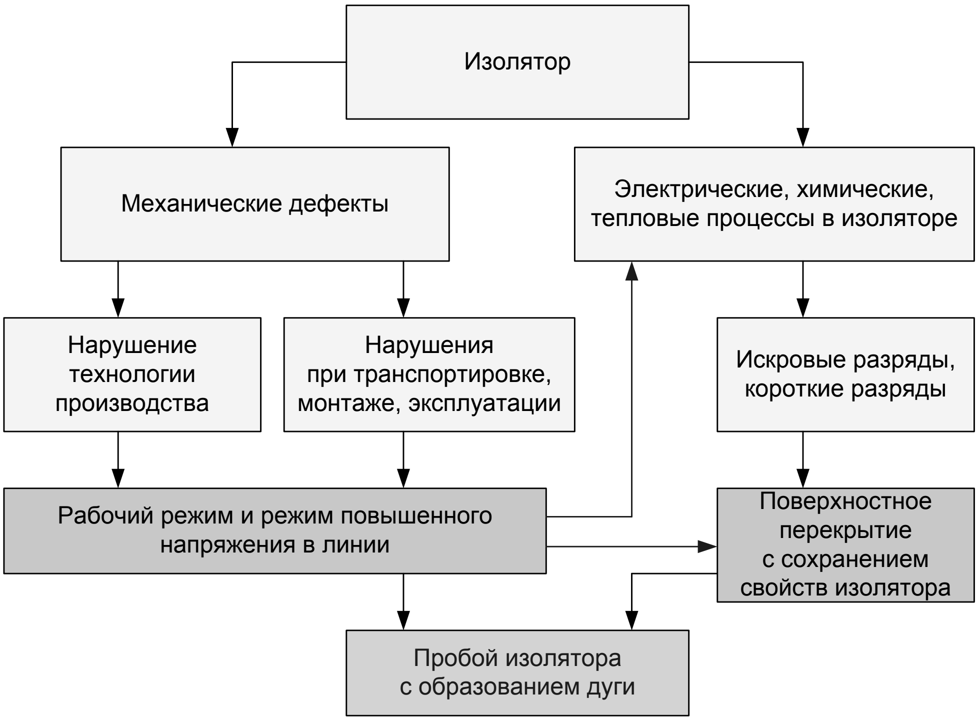


Рисунок 1 – Дефекты и процессы в изоляторе

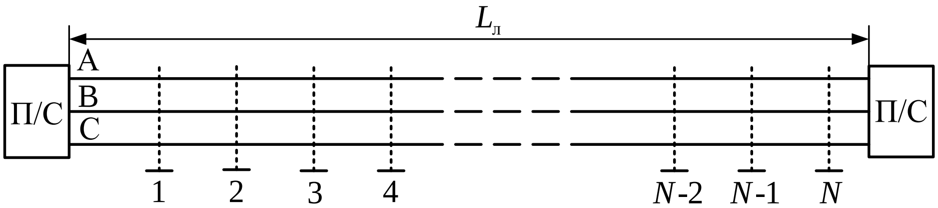


Рисунок 2 – Обобщенная схема высоковольтной воздушной линии 6 – 10 кВ

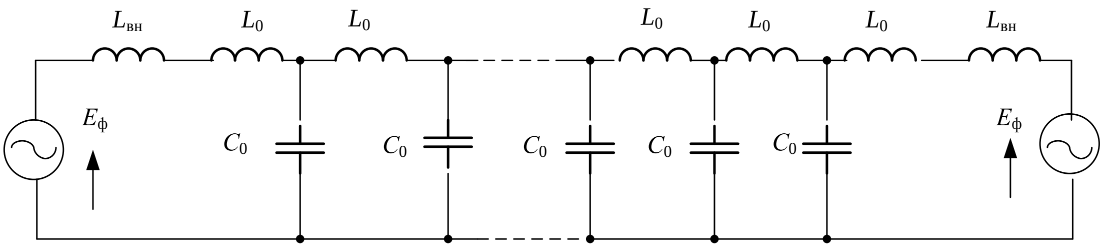


Рисунок 3 – Условная схема замещения одной фазы воздушной линии

Данная схема замещения актуальна при анализе переходных процессов в линии, например, при пробое или дуговом разряде на изоляторе с образованием однофазного замыкания на землю. В установившемся режиме, в частности, при поверхностном разряде на изоляторе достаточно учитывать свойства источников питания $E_ф$ и их внутреннюю индуктивность $L_{вн}$, так как $L_{вн} \gg L_0$.

Индикация неисправного состояния каждого изолятора позволит осуществить индивидуальный подход к диагностике с учетом особенностей изготовления, монтажа, эксплуатации и местных внешних воздействующих факторов, при этом увеличится точность нахождения места повреждения до конкретно отказавшего изолятора.

Для контроля состояния изоляторов ВЛ 6 – 10 кВ предложено устройство, принципиальная схема которого приведена на рисунке 4 [2]. При отсутствии устройства ток проходил от ЛЭП 10 кВ через неисправный изолятор на заземленную несущую конструкцию, включающую в себя штырь с траверсой или крюк 10, спуск 6 и заземление 7.

Предлагаемое устройство работает следующим образом: с провода 8 линии электропередачи из-за разности потенциалов между пробитым изолятором 1 и заземленной несущей конструкцией 6 при пробое изолятора начинает протекать ток, который проходит через токопроводящую пленку 3 крепежного элемента 2, с выступающей части 9 которого по проводнику 4 через сигнальное устройство 5 поступает на заземленную конструкцию 6. При прохождении тока через сигнальное устройство 5 последнее срабатывает.

Применение предложенного устройства значительно сократит время поиска поврежденного изолятора и может предотвратить аварийное состояние системы электроснабжения.

В отличие от конструкции типового изолятора данное предложение предполагает установку удлиненного пластмассового колпачка для крепления корпуса изолятора к заземленному штырю или крюку. Колпачок покрывается токопроводящей пленкой 3. Покрытие позволяет улавливать ток изолятора в любом месте пробоя, т. е. дает возможность контролировать не только сквозной, но и поверхностный ток.

Рассмотрим основные процессы, происходящие в системе «изолятор – опора» воздушной линии 6 – 10 кВ как в исправном состоянии, так и при наличии в изоляторе дефектов.

При установившемся режиме работы схема замещения с изолятором, имеющим сигнальное устройство и элементы заземления, с достаточной степенью точности представлена на рисунка 5.

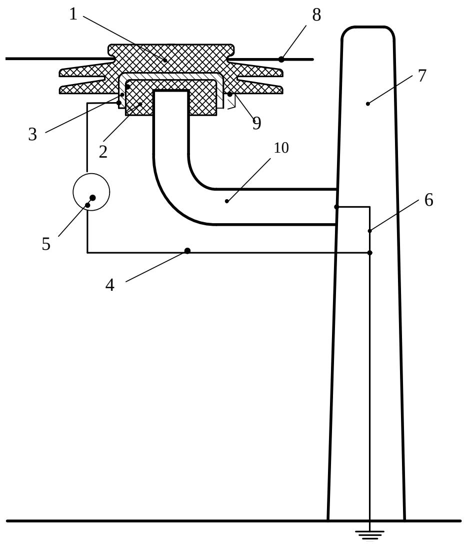


Рисунок 4 – Схема устройства для выявления дефектов изоляторов

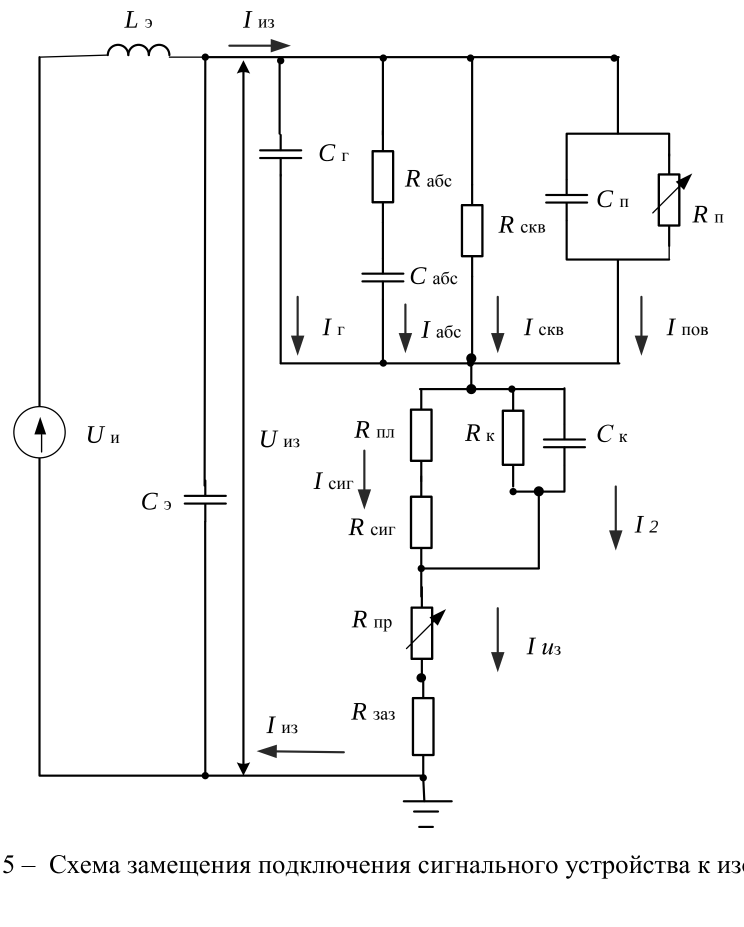


Рисунок 5 – Схема замещения подключения сигнального устройства к изолятору ВЛ

Из рисунка 5 видно, что в ограничении переменных токов изолятора определенную роль могут играть параметры токопроводящей пленки, крепежного элемента, сигнального устройства и заземленной несущей конструкции. Анализ действительных значений сопротивлений данных элементов показывает, что в установившемся режиме работы можно пренебречь составляющими этих величин. На рисунке 5 указаны эквивалентная индуктивность источника питания $L_Э$ и проводников линии, эквивалентная емкость линии $C_Э$ на участке до расчетной точки. Для удобства расчета ограничимся анализом условий питания линии с одной из подстанций.

Изолятор характеризуется параметрами геометрической емкости $C_г$, абсорбционными значениями $R_{абс}$ и $C_{абс}$, сопротивлением сквозной проводимости $R_{скв}$, поверхностными параметрами $R_п$ и $C_п$. На схеме рисунка 5 обозначены сопротивление токопроводящей пленки крепежного узла $R_{пл}$, активное сопротивление $R_к$, емкость крепежного узла $C_к$, сопротивления сигнального устройства $R_{сиг}$ и заземленной несущей конструкции $R_{пр}$ и сопротивление заземлителя $R_{заз}$.

Ток заряда геометрической емкости $C_г$ определяется материалом и размерами изолятора [3]. Емкостная составляющая этого тока практически неизменна в процессе эксплуатации и определяется по формуле:

$$i_г = \omega \cdot C_г \cdot U_{из}. \quad (1)$$

Возможные изменения тока геометрической емкости могут быть обусловлены лишь колебаниями приложенного напряжения $U_{из}$.

Значение тока абсорбции зависит от наличия дефектов, неоднородностей в изоляции, изоляционного материала. В полярных диэлектриках, к которым относится электротехнический фарфор и стекло, ток абсорбции дополнительно создается за счет ориентации дипольных молекул под действием переменного электрического поля. На параметры $R_{абс}$ и $C_{абс}$ в значительной степени оказывает влияние увлажнение, особенно при наличии открытых пор из-за некачественного изготовления или нарушения покрытия при монтаже и эксплуатации.

Как установлено [4], ток абсорбции имеет активную и реактивную составляющие, величины которых определяются по формулам активной составляющей

$$i_{абс} = U_{из}\frac{G_{абс}\,\omega^2\tau^2}{\omega^2\tau^2\ +1} \quad (2)$$

и реактивной составляющей

$$i_{абс}^{//} = U_{из}\frac{B_{абс}\,\omega\,\tau}{\omega^2\tau^2\ +1}, \quad (3)$$

где $G_{абс}$ – активная проводимость, соответствующая току абсорбции;

$B_{абс}$ – реактивная проводимость, соответствующая току абсорбции;

τ – время затухания тока абсорбции до 1/e первоначального значения.

Реактивная составляющая абсорбционного тока может превышать ток геометрической емкости в 8 – 10 раз.

Ток сквозной проводимости $I_{скв}$ определяется величиной приложенного напряжения $U_{из}$ и сопротивлением изоляции $R_{из}$ постоянному току:

$$i_{скв} = \frac{U_{из}}{R_{скв}} = U_{из} \cdot G_{из}\,, \quad (4)$$

где $G_{из} = \frac{1}{R_{из}}$ – проводимость изоляции.

Составляющие поверхностного тока изменяются в широких пределах. Здесь влияние оказывают объем и вид загрязнения, влажность и климатические условия окружающей среды, радиация и механические воздействия. Комплекс общего сопротивления поверхностного слоя можно представить в виде:

$$Z_{п} = \frac{R_{п}(-jX_{п})}{R_{п}-jX_{п}}\frac{R_{п}+jX_{п}}{R_{п}+jX_{п}} = \frac{R_{п}\cdot X_{п}{}^2}{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2} - j\,\frac{R_{п}{}^2\cdot X_{п}}{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2} = R_{п} - jX_{п}, \qquad (5)$$

$$R_{п}^{/} = \frac{R_{п}\cdot X_{п}{}^2}{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2}, \qquad (6)$$

где $R_{п}^{/}$ – активная составляющая эквивалентного поверхностного сопротивления.

$$X_{П}^{/} = \frac{R_{п}{}^2\cdot X_{п}}{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2}. \qquad (7)$$

где $X_{п}{}^{/}$ – реактивная составляющая эквивалентного поверхностного сопротивления.
Тогда модули составляющих поверхностного тока будут определяться по уравнениям:

$$i_{пов}^{/} = \frac{U_{из}}{R_{п}^{/}} = U_{из}\frac{R_{п}{}^2+X_{п}}{R_{п}\quad\cdot X_{п}^2}; \qquad (8)$$

$$i_{пов}^{//} = \frac{U_{из}}{X_{п}^{/}} = U_{из}\frac{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2}{R_{п}{}^2\cdot X_{п}}. \qquad (9)$$

Результирующий активный ток изолятора

$$\dot{I}_{а} = \dot{I}_{скв} + \dot{I}_{пов}^{/} + \dot{I}_{абс}^{/}, \qquad (10)$$

а реактивный ток изолятора

$$\dot{I}_{р} = \dot{I}_{г} + \dot{I}_{пов}^{//} + \dot{I}_{абс}^{//}. \qquad (11)$$

Таким образом, активная и реактивная составляющие будут формировать результирующий ток изоляции в установившемся режиме работы. Комплекс этого тока определяется уравнением:

$$\dot{I}_{и} = \dot{I}_{а} + \dot{I}_{р}\,, \qquad (12)$$

тогда

$$\dot{I}_{из} = \dot{U}_{из}\left(\frac{1}{R_{скв}} + G_{абс}\frac{\omega^2\cdot\tau^2}{\omega^2\cdot\tau^2+1} + \frac{R_{п}{}^2+X_{п}}{R_{п}\cdot X_{п}^2} + j\omega\frac{\omega\cdot\tau}{\omega^2\cdot\tau^2+1} + j\omega G_{г} + j\frac{R_{п}{}^2+X_{п}{}^2}{R_{п}{}^2\cdot X_{п}}\right). \qquad (13)$$

В этом случае ток сигнального устройства может быть найден по уравнению:

$$\dot{I}_{сиг} = \dot{I}_{из}\frac{R_{к} - j\dfrac{1}{\omega\cdot C_{к}}}{R_{пл}+R_{сиг}+R_{к} - j\dfrac{1}{\omega\cdot C_{к}}}. \qquad (14)$$

Из формулы (14) следует, что для увеличения доли сигнального тока необходимо добиваться существенного уменьшения сопротивления сигнального устройства $R_{сиг}$ и токопроводящей пленки $R_{пл}$ относительно значений активного сопротивления крепежного элемента $R_{к}$ и его емкостной составляющей, что необходимо учитывать при разработке сигнального устройства.

Тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) определяется отношением активных токов изоляции к реактивным составляющим. В исправном состоянии эта величина для изоляции из электротехнических фарфора и стекла и им подобных составляет 0,01 – 0,03 [6]. Следовательно, в нормальном режиме активными составляющими токов изоляции можно пренебречь с достаточной степенью точности. Измерения емкостных параметров штыревых изоляторов типа ШФ-10Г показали, что их собственная емкость $C_г$ в исправном состоянии характеризуется величиной 4 – 5 пФ. При переменном напряжении 6 кВ и частоте 50 Гц протекающий по изолятору ток с учетом абсорбционной составляющей составит не более 0,1 – 0,15 мА, а при напряжении 10 кВ – не более 0,2 мА.

При анализе искровых поверхностных разрядов встречаются рекомендации определять напряжение искрового разряда исходя из напряженности 10 кВ/см, однако некоторые авторы предлагают за основу принимать величину 4 – 6 кВ/см. В то же время известно, что напряженность поверхностного перекрытия на границе «твердый диэлектрик – воздух» в ряде случаев понижается до уровня 2 – 4 кВ/см, поэтому в лаборатории техники высоких напряжений УрГУПСа были проведены эксперименты с целью определения токов поверхностного перекрытия фарфоровых изоляторов типа ШФ-10Г.

Поверхность изолятора искусственно подвергалась напылению и увлажнению с целью получения искровых разрядов при рабочих уровнях напряжения амплитудой 15 – 20 кВ. Измерения показали, что расчетным током искрового разряда можно считать величину 10 – 15 мА при средней напряженности перекрытия 2 – 3 кВ/см. Очевидно, что в составе этих токов присутствуют и емкостная, и активная составляющие поверхностных токов.

Приведенный выше анализ касается установившегося режима работы, когда даже поверхностное перекрытие в виде искрового разряда фактически не приводит к нарушению нормального режима эксплуатации ВЛ; искровой разряд на поверхности может исчезать в результате деионизации воздуха в «нулевую паузу», уменьшения величины перенапряжения, испарения влаги на поверхности. Значительную опасность представляют дуговые разряды и электрические пробои изоляции, при которых за счет резкого снижения напряжения на изоляторе фактически происходит переходный режим однофазного замыкания на землю.

Дуговой разряд или дуга на поверхности изолятора принципиально отличается от искрового поверхностного разряда относительно невысоким напряжением в дуге 30 – 100 В и, следовательно, значительными токами, величина которых будет определяться не столько напряжением источника питания, сколько близостью поврежденного изолятора к емкостным элементам дефектной фазы (см. рисунок 3) и соседних фаз трехфазной системы (см. рисунок 2). Фактически в этой системе возникает переходный процесс. Необходимо отметить, что индуктивные элементы линии и источника в начальный момент переходного процесса по законам коммутации отделяют источник питания от места замыкания. Возникающие при этом в изоляторе емкостные токи ограничиваются запасом энергии на ближайших емкостях и активным характером цепи замыкания. В дальнейшем по мере снижения первых бросков тока питание точки замыкания на землю будет осуществляться и от источника через индуктивные элементы линии с выходом на установившийся режим работы. В этом случае ток замыкания на землю может быть найден по известной формуле [5]:

$$I_з = 3U_и \cdot \omega \cdot C_ф = 3U_и \cdot 2\pi f \cdot C_ф, \tag{15}$$

где $C_ф$ – емкость одной фазы относительно земли.

Величина протекающих емкостных токов в начальный период является достаточно сложным параметром [5], споры по поводу выбора коэффициента надежности, коэффициента броска будут продолжаться до тех пор, пока для каждой конкретной линии не получены данные по максимальному емкостному току фидера, числу потребителей, условиям защиты нейтрали питающего трансформатора. Приводимые в литературе расчетные формулы имеют погрешность от 40 до 80 % и, как правило, являются эмпирическими. В качестве примера можно сослаться на работу [5], где приведены полученные опытные значения емкостного тока на уровне 19 А при максимальном значении переходного тока 138 А, т. е. коэффициент броска составил не менее 8.

Электрический или электротепловой пробой внутренней структуры диэлектрика характеризуется разрушением внутримолекулярных связей и определяется качеством самого диэлектрика, формой воздействия напряжения и множеством других факторов, однако фактическое создание проводящего канала оказывается, как правило, аналогичным поверхностному дуговому разряду, т. е. происходит резкое падение напряжения электрического поля и рост тока замыкания. Дуговой разряд и внутренний пробой изоляции выводят из строя изолятор, создавая режим однофазного замыкания на землю. Эти нарушения работы изоляционных структур должны быть положены в основу анализа реальных токов для целей диагностики.

Выбирая конструкцию сигнального устройства и его тока срабатывания, необходимо учитывать параметры изолятора и элементы линии электропередачи. При контроле изолятора величина тока срабатывания сигнального устройства должна быть уточнена опытными измерениями на расчетном участке линии в различных точках, например, в начале линии, в середине и в конце линии с учетом нагрузок подключаемых потребителей электрической энергии. Ожидаемые при этом токи в линиях 6 – 10 кВ могут составлять от десятков миллиампер до десятков ампер в зависимости от переходной составляющей тока.

Список литературы

1. Несенюк, Т. А. Диагностика и поиск неисправных изолирующих конструкций на воздушных линиях в системе с изолированной нейтралью [Текст] / Т. А. Несенюк // Энергобезопасность и энергосбережение / Московский ин-т энергобезопасности и энергосбережения. – М. – 2013. – № 1. – С. 29 – 31.

2. Пат. 2503076 Российская Федерация, МПК Н 01 В17/42. Устройство для определения дефектов в изоляторах [Текст] / Т. А. Несенюк; заявитель и патентообладатель Уральский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012120948/07; заявл. 22.05.12; опубл. 27.12.13.

3. Мусаэлян, Э. С. Наладка и испытание электрооборудования электростанций и подстанций: Учебник [Текст] / Э. С. Мусаэлян. – М.: Энергия, 1979. – 464 с.

4. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов [Текст] / Б. М. Тареев. – М.: Энергия, 1982. – 320 с.

5. Шалин, А. И. Замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ, расчет уставок ненаправленных токовых защит [Текст] / А. И. Шалин // Новости электротехники. – Спб. – 2013. – № 5 (83). – С. 58 – 61.

6. Электротехнический справочник. Общие вопросы. Электротехнические материалы [Текст] / В. Г. Герасимов, П. Г. Грудинский и др. – М.: Энергия, 1980. – Т. 1. – 520 с.

References

1. Neseniuk T. A. diagnostics and troubleshooting insulating structures on the WHO-stuffy lines in a system with isolated neutral [Diagnostika i poisk neispravnykh izoliruiushchikh konstruktsii na voz-dushnykh liniiakh v sisteme s izolirovannoi neitral'iu]. *Energobez-opasnost' i energosberezhenie – Energy security and energy efficiency*, 2013, no. 1, pp. 29 – 31.

2. Neseniuk T. A. *Patent* RU 2503076, 27.12.13.

3. Musaelian E. S. *Naladka i ispytanie elektrooborudovaniia elektrostantsii i pod-stantsii* (Commissioning and testing of electrical power stations and sub-stations). Moscow: Energiia, 1979, 464 p.

4. Tareev B. M. *Fizika dielektricheskikh materialov* (Physics dielectric materials). Moscow: Energiia, 1982, 320 p.

5. Shalin A. I. Earth faults in networks of 6 – 35 kV calculation of setting non-directional overcurrent protection [Zamykaniia na zemliu v setiakh 6 – 35 kV raschet ustavok nenapravlennykh tokovykh zashchit]. *Novosti elektrotekhniki – News electrical engineering*, 2013, no. 5 (83), pp. 58 – 61.

6. Gerasimov V. G., Grudinskii P. G. *Elektrotekhnicheskii spravochnik. Obshchie voprosy. Elektrotekhnicheskie materialy* (Electrical Engineering Handbook. General questions. Electrotechnical materials). Moscow: Energiia, 1980, 520 p.

УДК 621.317

В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин

ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Выполнен анализ допустимого диапазона флюктуации фазы сигнала на входе цифрового измерительного устройства при исследовании фазовых соотношений в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта, характеризующихся высоким уровнем помех.

Исследование фазовых соотношений гармонических составляющих тока и напряжения в тяговых сетях переменного тока на железнодорожном транспорте имеет важное значение для оценки эффективности применения фильтросимметрирующих устройств и компенсаторов реактивной мощности. Результаты моделирования мощных инверторных преобразователей [1] подтверждают необходимость фазовых измерений для оценки адекватности полученных моделей с учетом высших гармоник. При этом необходимо учитывать, что тяговые сети железнодорожного транспорта характеризуются высоким уровнем случайных помех [2], особенно в процессе искрения между токоприемником электровоза и контактным проводом.

В источнике [3] предложен способ измерения сдвига фаз, позволяющий существенно повысить точность измерения в указанных условиях. В статье [4] выполнен анализ работоспособности этого способа измерения в условиях, когда преобразование «фазовый сдвиг – код» в цифровом фазометре ограничено пределами ±180 °, а флюктуации фазы сигнала – не более ±360 °. Такое соотношение сигнала и помехи обычно выражается в неоднозначности показаний цифрового фазометра с усреднением за время измерения и невозможности зафиксировать окончательный результат измерения в условиях помех, возникающих в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта. В этих работах доказывается, что при нормальном законе распределения мода функции плотности вероятности фазы сигнала является наиболее информативным параметром в указанных условиях и дает наибольшую точность оценки.

В основе предложенного способа лежит алгоритм идентификации моды сигнала на выходе преобразователя «фазовый сдвиг – код». При наличии высокого уровня помех разность между максимальным и минимальным значениями функции плотности вероятности на выходе преобразователя «фазовый сдвиг – код» уменьшается, что усложняет условия идентификации моды. Поэтому необходимы дополнительные исследования эффективности этого способа в условиях тяговых сетей переменного тока железнодорожного транспорта.

Основная задача данной работы состоит в том, чтобы на основе численного метода решения уравнений и математического моделирования процесса преобразования «фазовый сдвиг – код» в среде Matlab/Simulink найти максимально допустимый диапазон флюктуации фаз гармоник тока и напряжения для предложенного способа измерения сдвига фаз и оценить полученные результаты.

Структурная схема устройства, реализующего способ, описанный в работе [3], на основе микропроцессорного контроллера, представлена на рисунке 1. Цифровой фазометр содержит преобразователь «фазовый сдвиг – код» (ПФС-К), формирователь функции плотности вероятности (ФФПВ) и идентификатор моды функции (ИМФ) плотности вероятности $P_y(\varphi)$.

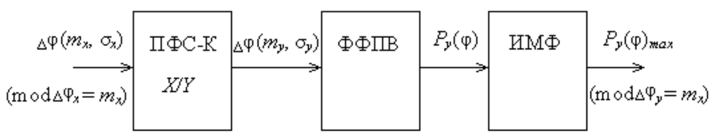


Рисунок 1 – Структурная схема помехоустойчивого микропроцессорного цифрового фазометра

За каждый период входных сигналов осуществляется преобразование «фазовый сдвиг – код» в диапазоне ±180 °, что искажает функцию плотности вероятности реального процесса при значениях флюктуации фазы сигнала, больших, чем ±180 °. Пример такого искажения функции $P_x(\varphi)$ с нулевым математическим ожиданием приведен на рисунке 2.

Для оценки предельно допустимого значения среднеквадратичного отклонения (СКО) флюктуации фазы σ_{max} рассмотрим частный случай, когда на вход фазометра с диапазоном измерения $\pm\pi$ поступает сигнал, фаза которого изменяется в пределах $\pm 2\pi$, и найдем максимальное значение СКО, при котором описанный способ еще сохраняет работоспособность.

Нелинейность статической характеристики ПФС-К фазометра аналогична переполнению разрядной сетки микропроцессора, когда от максимального (по модулю) отрицательного числа происходит скачок к максимальному положительному значению, и наоборот. Предложенный способ сохраняет работоспособность, если разность между значениями максимума и минимума функции плотности вероятности $P_y(\varphi)$ на выходе ПФС-К будет больше нуля, упрощенную математическую модель которого можно представить в виде:

$$P_x(0) + 2P_x(2\pi) - 2P_x(\pi) > 0\,, \tag{1}$$

где $P_x(\varphi)$ – функция плотности вероятности Гаусса на входе ПФС-К при $m_x = 0$:

$$P_x(\varphi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}}\,. \tag{2}$$

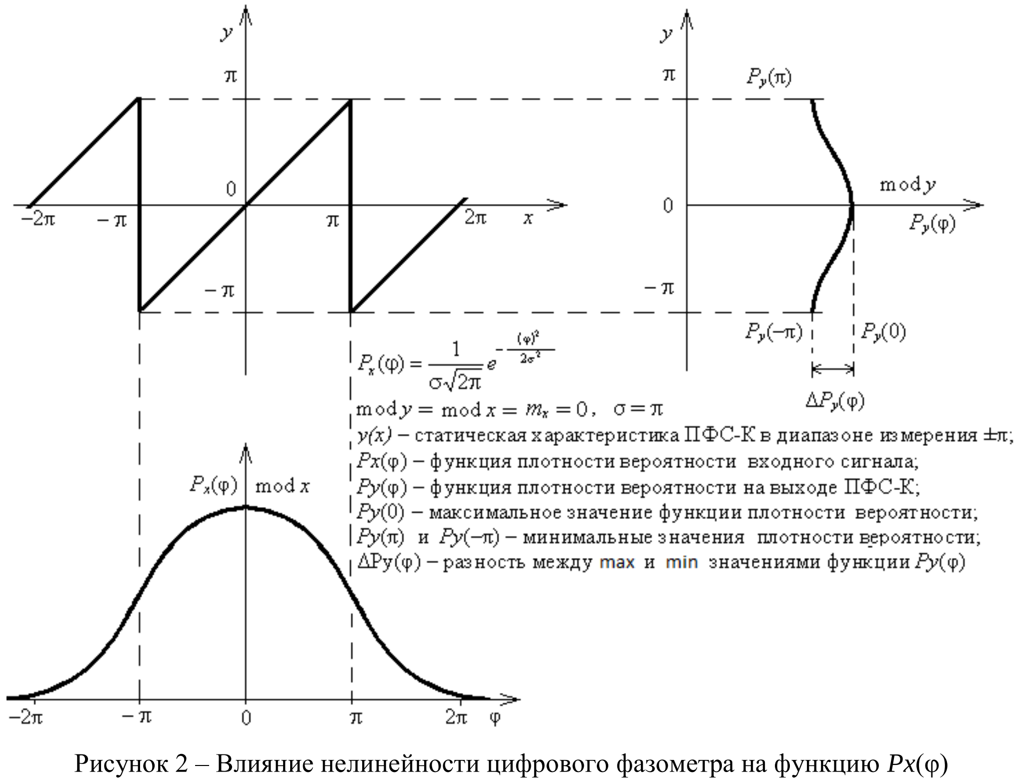


Рисунок 2 – Влияние нелинейности цифрового фазометра на функцию *Px*(φ)

Если неравенство (1) справедливо, то функция $P_y(\varphi)$ остается одномодальной (в данной статье используется терминология, принятая в статье [5]), т. е. теоретически возможно будет идентифицировать моду этой функции, а предложенный способ будет оставаться работоспособным в указанных условиях при любых значениях σ.

Для доказательства справедливости неравенства (1) подставим в него функцию $P_x(\varphi)$, описываемую выражением (2),

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(0)^2}{2\sigma^2}} + \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(2\pi)^2}{2\sigma^2}} + \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\pi)^2}{2\sigma^2}} > 0 \tag{3}$$

и сократим общий множитель при условии, что $\sigma \neq 0$. Учитывая, что первое слагаемое в выражении (3) равно единице, получим:

$$1+2e^{-\frac{4(\pi)^2}{2\sigma^2}}+2e^{-\frac{(\pi)^2}{2\sigma^2}}>0\,. \tag{4}$$

Для доказательства справедливости неравенства (4) (с учетом допустимого диапазона изменения $0<x<1$) произведем замену переменной в этом выражении:

$$x=e^{-\frac{\pi^2}{2\sigma^2}}, \tag{5}$$

в результате получим неравенство:

$$x^4-x+0{,}5>0. \tag{6}$$

Для проверки справедливости неравенства (6) необходимо найти решение уравнения четвертой степени:

$$x^4-x+0{,}5-c=0, \tag{7}$$

где c – параметр, при увеличении которого неравенство (6) сначала преобразуется в уравнение (7), а затем знак неравенства изменяется на противоположный. Будем увеличивать параметр c до тех пор, пока в уравнении (7) не появится хотя бы один действительный корень.

В теоретическом плане решение уравнения четвертой степени (7) в общем виде представляет сложную задачу, поэтому обратимся к интернет-ресурсу «Математика онлайн» [6] и найдем минимальное значение параметра c, существование положительного значения которого и будет доказывать справедливость неравенства (6). Результаты двух решений, позволяющих найти предельное значение параметра c, представлены на рисунках 3 и 4.

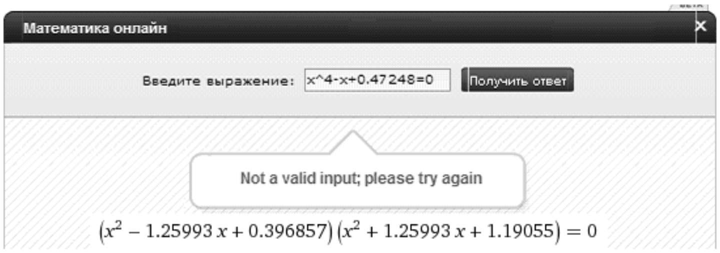


Рисунок 3 – Результат обращения к Интернет-ресурсу «Математика онлайн» –
действительных корней уравнение не имеет

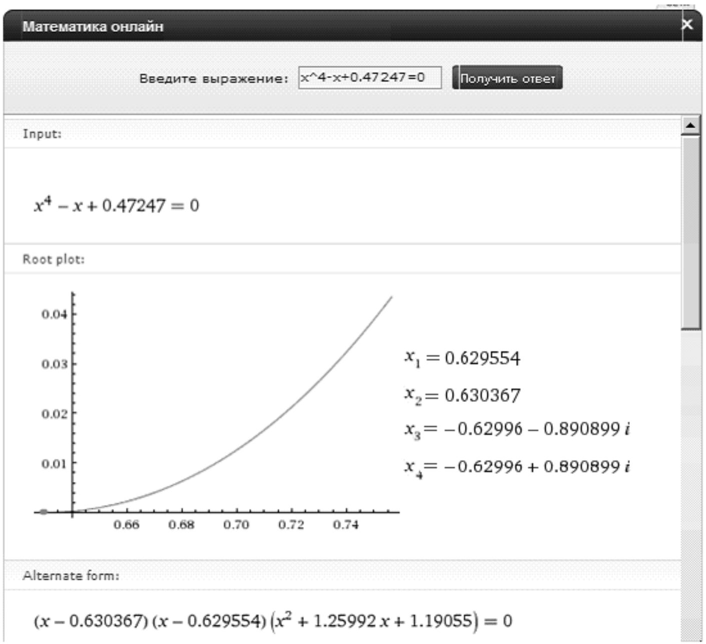


Рисунок 4 – Результат обращения к интернет-ресурсу «Математика онлайн» –
имеются два действительных корня уравнения

Результаты вычислений на основе численных методов для остальных допустимых значений параметра c представлены в таблице.

Значения действительных корней уравнения в зависимости от параметра c

Значение параметра c в уравнении (7)	Действительные корни уравнения $x^4 - x + 0{,}5 - c = 0$	
	x_1	x_2
0,02752 (5,504 %)	Нет	Нет
0,02753 (5,506 %)	0,629554	0,630367
0,05000 (10 %)	0,527322	0,722519
0,10000 (20 %)	0,436204	0,790512
0,20000 (40 %)	0,309132	0,868218
0,30000 (60 %)	0,201654	0,921699

Следует обратить внимание на то, что справедливость неравенства (6) нарушается только при значениях параметра c > 0,02753. Таким образом, наличие положительного значения c > 0 доказывает работоспособность исследуемого способа измерения сдвига фаз в диапазоне флюктуации фазы входного сигнала ±2π при любых значениях СКО в пределах $0 < |\sigma| < \pi$.

При практической реализации предложенного способа измерения сдвига фаз в алгоритме идентификации моды после построения функции плотности вероятности на выходе ПФС-К значение заданного порога, определяемого параметром c, ограничивает область допустимых значений СКО входного сигнала, при которых способ сохраняет свою работоспособность.

Значение σ_{max} можно найти путем подстановки в выражение (5) действительных корней x_1 и x_2 уравнения (7), взятых из таблицы,

$$x_1 = e^{-\frac{\pi^2}{2\sigma_{1\max}^2}}; \tag{8}$$

$$x_2 = e^{-\frac{\pi^2}{2\sigma_{2\max}^2}} \tag{9}$$

и логарифмирования их правых и левых частей.

После несложных алгебраических преобразований получаем относительное значение нижней границы рабочей области исследуемого способа измерения сдвига фаз

$$\frac{\sigma_{1\max}}{\pi} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln x_1}}, \tag{10}$$

и верхнюю границу этой же области

$$\frac{\sigma_{2\max}}{\pi} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln x_2}}. \tag{11}$$

Зависимость относительного максимально допустимого значения σ_{max}/π от параметра c представлена на рисунке 5, где область А соответствует значению порогового параметра c, при котором мода на выходе ПФС-К не является информативным параметром и не может быть использована в качестве результата измерения сдвига фаз в условиях высокого уровня помех. Область В соответствует допустимым значениям параметра c, при которых функция плотности вероятности на выходе ПФС-К остается одномодальной и способ [3] сохраняет работоспособность.

Результаты расчетов подтверждают, что исследуемый способ измерения с 20 %-ным пороговым параметром c (в алгоритме идентификации моды функции плотности вероятности) допускает СКО флюктуации фазы сигнала на входе ПФС-К до 0,79π с сохранением установленной точности, что соответствует СКО фазы входного сигнала 142 °.

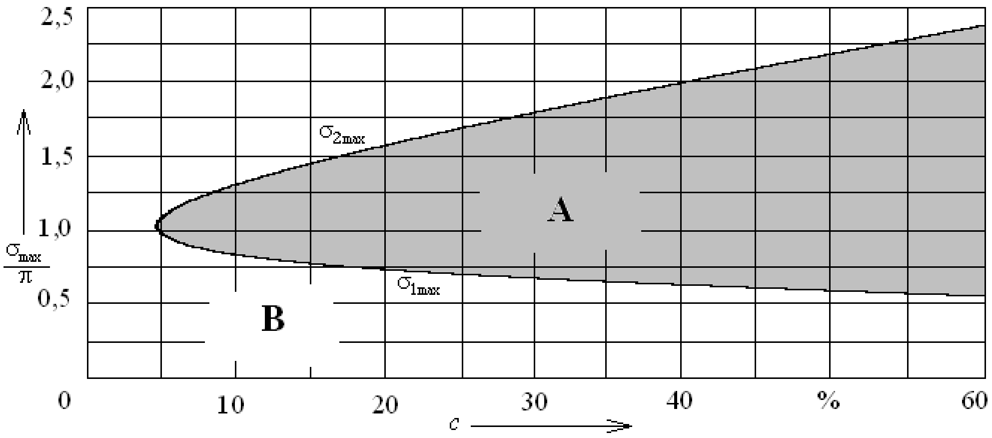


Рисунок 5 – Взаимное расположение областей А и В при изменении параметра *c*

Моделирование влияния нелинейной характеристики преобразователя «фазовый сдвиг-код» на результат измерения цифрового фазометра реализовано в среде Matlab/Simulink.

Структурная схема для моделирования ПФС-К представлена на рисунке 6.

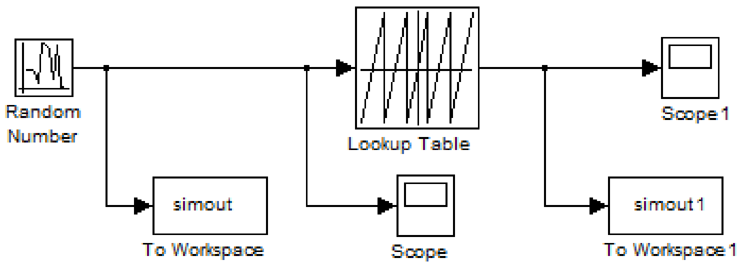
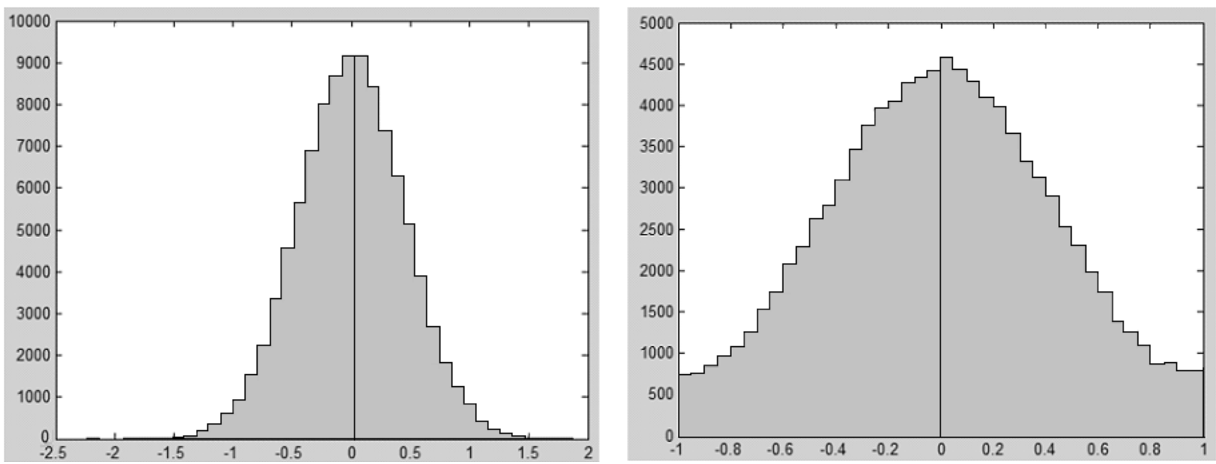


Рисунок 6 – Структурная схема модели ПФС-К в среде Matlab/Simulink

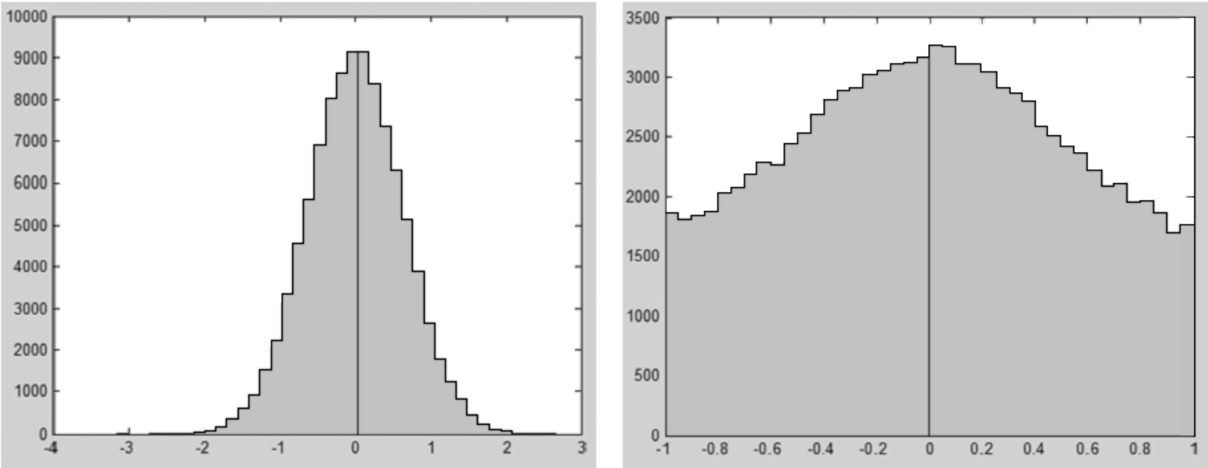
На входе ПФС-К (Lookup Table) формируется случайный процесс с нормальным законом распределения (Random Number), имеющий нулевое математическое ожидание и различные значения СКО (в относительных единицах, кратных π), гистограммы которых представлены соответственно на рисунках 7, а – 10, а. Гистограммы функций (плотности вероятности сдвигов фаз) на выходе ПФС-К (в относительных значениях от –1 до +1) представлены на рисунках 7, б – 10, б, что соответствует реальному диапазону измерения цифрового фазометра от –π до +π.



а б

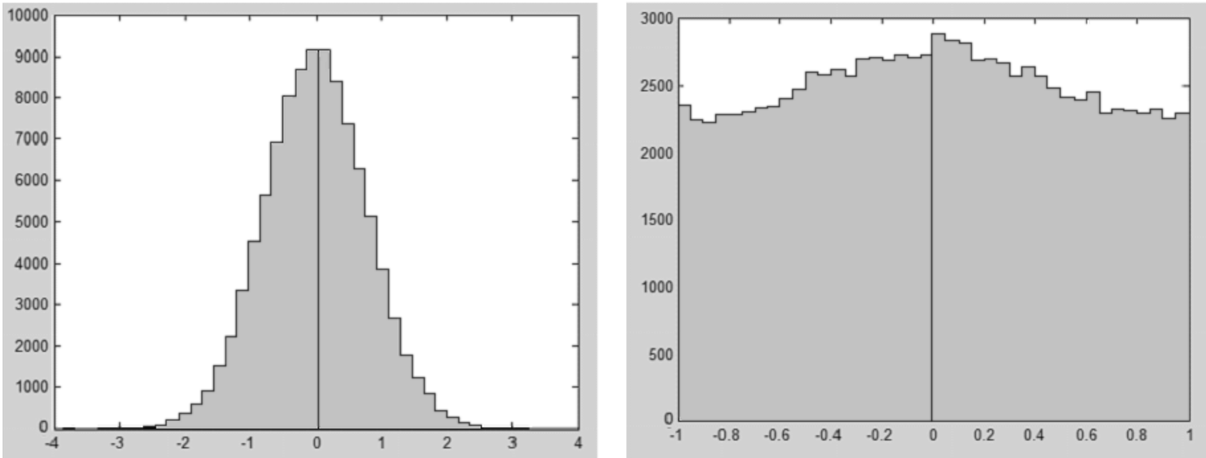
Рисунок 7 – Гистограммы входного (а) и выходного (б) сигналов ПФС-К при СКО = 0,2

Результаты моделирования ПФС-К в среде Matlab/Simulink подтверждают, что гистограммы функции плотности вероятности на выходе (см. рисунки 7, б – 10, б) в диапазоне преобразования от $-\pi$ до $+\pi$ остаются одномодальными даже при СКО = 0,8π.



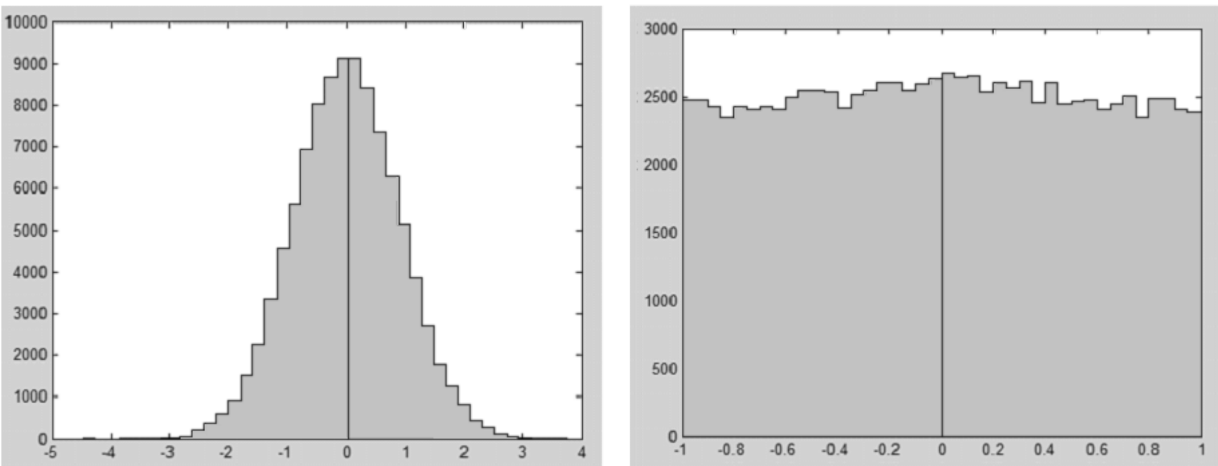
а б

Рисунок 8 – Гистограммы входного (а) и выходного (б) сигналов ПФС-К при СКО = 0,4



а б

Рисунок 9 – Гистограммы входного (а) и выходного (б) сигналов ПФС-К при СКО = 0,6



а б

Рисунок 10 – Гистограммы входного (а) и выходного (б) сигналов ПФС-К при СКО = 0,8

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

результаты моделирования помехоустойчивого микропроцессорного цифрового фазометра на основе численных методов подтверждают работоспособность исследуемого способа измерения [3] и предложенной математической модели ПФС-К в указанных условиях;

описываемый способ гарантирует высокую точность измерения фаз гармоник тока и напряжения в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта при среднеквадратичном отклонении флюктуации фазы до 142 °.

Список литературы

1. Комякова, О. О. Гармонический анализ сетевого тока преобразователя, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети [Текст] / О. О. Комякова, Т. В. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4. – С. 55 – 63.

2. Сырецкая, А. О. Экспериментальные исследования электромагнитных помех на тяговых подстанциях [Текст] / А. О. Сырецкая, Н. К. Слептерева, К. С. Зуб // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 1. – С. 63 – 69.

3. Петров, В. В. Измерение сдвигов фаз в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 4. – С. 69 – 77.

4. Петров, В. В. Фазовые измерения в условиях высокого уровня случайных помех [Текст] / В. В. Петров. // Материалы всерос. науч.-техн. интернет-конференции с междунар. участием «Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности» / Омский гос. ун-т путей сообщений. – Омск, 2014. – С. 116 – 123.

5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1973. – 831 с.

References

1. Komiakova O. O., Komiakova T. V. Harmonic analysis of current network transmitter operating in the inverter mode, at asymmetric nonsinusoidal voltage supply [Garmonicheskii analiz setevogo toka preobrazovatelia, rabotaiushchego v invertornom rezhime, pri nesimmetrichnom nesinusoidal'nom napriazhenii pitaiushchei seti]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin,* 2010, no. 4, pp. 55 – 63.

2. Syretskaia A. O., Sleptereva N. K., Zub K. S. Experimental study of electromagnetic interference on the traction substations [Eksperimental'nye issledovaniia elektromagnitnykh pomekh na tiago-vykh podstantsiiakh]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 1, pp. 63 – 69.

3. Petrov V. V., Kogut A. T., Lavrukhin A. A. Measurement of phase shifts in traction networks AC railway trans-goad transport [Izmerenie sdvigov faz v tiagovykh setiakh peremennogo toka zheleznodo-rozhnogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 69 – 77.

4. Petrov V. V. Phase measurement in a high level of random noise [Fazovye izmereniia v usloviiakh vysokogo urovnia sluchainykh pomekh]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatsionnye i upravliaiushchie sistemy na transporte i v promyshlennosti»* (Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Internet-conference with international participation «Information and control systems for transport and industry). Omsk, 2014, pp. 116 – 123.

5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers). Moscow: Nauka, 1973, 831 p.

УДК 625.12.033.38

А. М. Абдукаримов

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ТЕЛЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ОТСЫПАННОГО ИЗ ЛЕССОВИДНОЙ СУПЕСИ

Работа посвящена экспериментальному исследованию земляного полотна из отсыпанного из лессовидной супеси, а именно особенностям вибродинамического воздействия, возникающего при прохождении подвижного состава, установлению характера затухания колебаний, полученных аналитического выражения, которая может быть использована для оценки несущей способности земляного полотна к вибродинамической нагрузке.

Эксперименты по исследованию колебательного процесса на земляном полотне, отсыпанном лессовидными грунтами, проходили в Кашкадарьинской области. Скорость следования грузовых составов на этом участке составляла до 60 км/ч при ширине колеи 1520 мм.

Основной целью натурных экспериментов было определение закономерности распространения колебаний по телу земляного полотна и за его пределами.

Результаты натурных экспериментов по исследованию колебательного процесса на теле земляного полотна по глубине и поперек пути, отсыпанного лессовидном грунтом, в зависимости от скорости движения грузовых поездов представлены на рисунках 2 – 6, на рисунке 1 представлен поперечный разрез пути на перегоне Ташгузар – Байсун.

Колебательный процесс лессовидных грунтов железнодорожного земляного полотна зависит от таких факторов, как скорость движения поездов, нагрузки на ось и тип поездов. Кроме того, на колебание грунтов будут оказывать влияние такие факторы:

– конструктивные особенности и состояние ходовых частей;
– вид, свойство и состояние самих грунтов;
– конструкция и состояние верхнего строения пути;
– толщина балластного слоя и вид составляющего его материала;
– погонные нагрузки на путь и др.

Измерение амплитуды колебания на теле земляного полотна выполнялось в двух направлениях поперечного сечения приведенные результаты по всем составляющим амплитуды колебания во всем диапазоне изменения скоростей по прямолинейным зависимостям.

Исследование производилось на экспериментальном участке с скреплениями типа КБ. Анализ натурных экспериментов свидетельствует о различной интенсивности затухания амплитуд колебания.

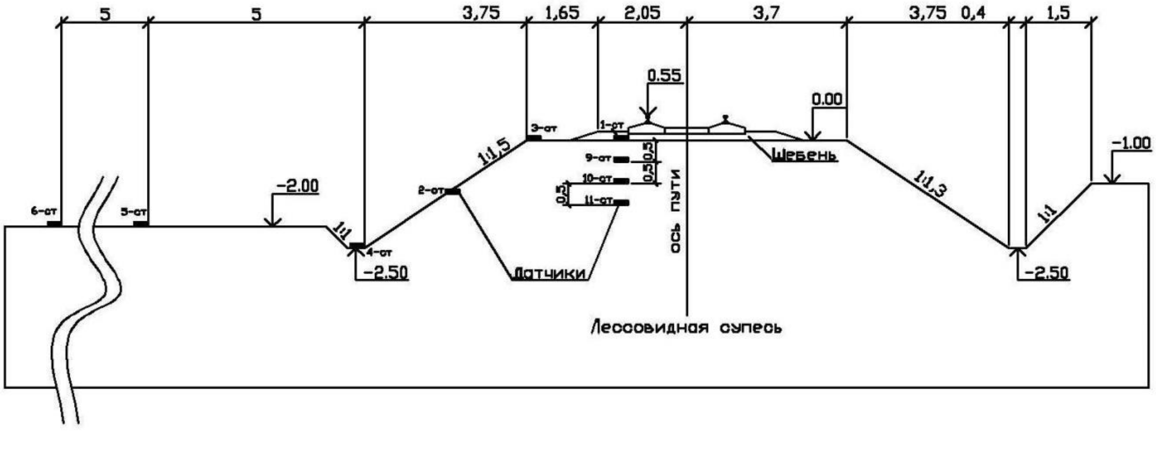


Рисунок 1 – Поперечный разрез пути на перегоне Ташгузар – Байсун

Анализируя величину амплитуды смещения на различных глубинах в сечении у торца шпалы, можно сделать вывод о том, что на глубине 0,7 м происходит значительное уменьшение результирующих амплитуд колебаний по сравнению с глубиной 0,2 м (рисунок 2). Так, на глубине 0,2 м при скорости 60 км/ч значение результирующей амплитуды колебания составили 411 мкм, а на глубине 0,7 м под подошвой шпал – 185 мкм, что в 2,2 раза меньше. На глубине 1,2 м эта амплитуда составила уже 161 мкм при той же скорости движения поездов, что в 1,2 раза меньше, чем результирующие амплитуда смещения на глубине 0,7 м. На глубине 1,7 м результирующая амплитуда колебания составила 133 мкм, что меньше в 1,2 раза, чем на глубине 1,2 м. Таким образом, можно сделать вывод о том, что затухание результирующей амплитуды колебаний по глубине имеет непрямолинейный характер. Аналогичный вывод можно сделать по вертикальной составляющей.

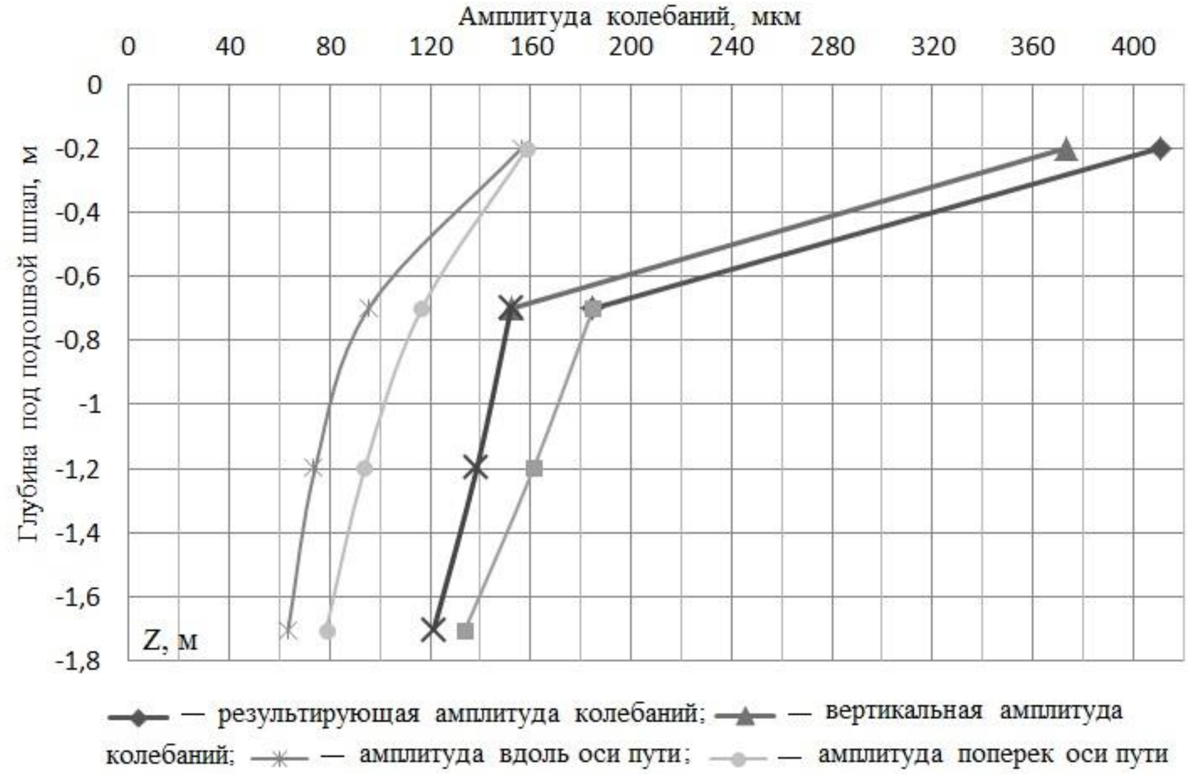


Рисунок 2 – Затухание амплитуды колебаний по глубине земляного полотна под подошвой шпал при движении грузового поезда со скоростью 60 км/ч

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о различной интенсивности затухания вертикальной и горизонтальной амплитуды колебаний в теле земляного полотна в вертикальном направлении. Наибольшая интенсивность у вертикальной составляющей, а наименьшая у горизонтальной вдоль оси пути. При изменении глубины от 0,2 до 0,7 м амплитуда вертикальных колебаний уменьшается с 374 до 152 мкм, т. е. в 2,5 раза. Горизонтальная амплитуда поперек оси пути уменьшается с 158 до 117 мкм, т. е. в 1,4 раза. Соответственно горизонтальные смещения вдоль оси пути уменьшаются с 156 до 96 мкм или в 1,6 раза. На глубине от 0,7 до 1,7 м в сечении у торца шпалы интенсивность затухания по всем составляющим приблизительно одинакова. Вертикальные колебания у торца шпалы по глубине от 0,7 до 1,7 м уменьшились в 1,3 раза, горизонтальные вдоль и поперек оси пути уменьшились в 1,4 раза. Следует признать, что интенсивности затухания по всем составляющим в данном диапазоне глубины идентичны. Следовательно, вертикальная амплитуда колебаний распространяется на большую глубину, чем горизонтальная.

Для оценки интенсивность затухания колебаний по глубине выражается показателем K_1, который определяется отношением амплитуд смещений, зарегистрированных на некоторой глубине (Z) от уровня основной площадки насыпи (A_z), к амплитудам, зарегистрированным на ее поверхности (A_0).

В интенсивности затухания колебаний (рисунок 3) наблюдается неравномерность. От глубины 0,2 до 0,7 м эти колебания затухают крайне интенсивно. Так, показатель K_1 изменяется с 1 до 0,44, т. е. уменьшается в 2,2 раза.

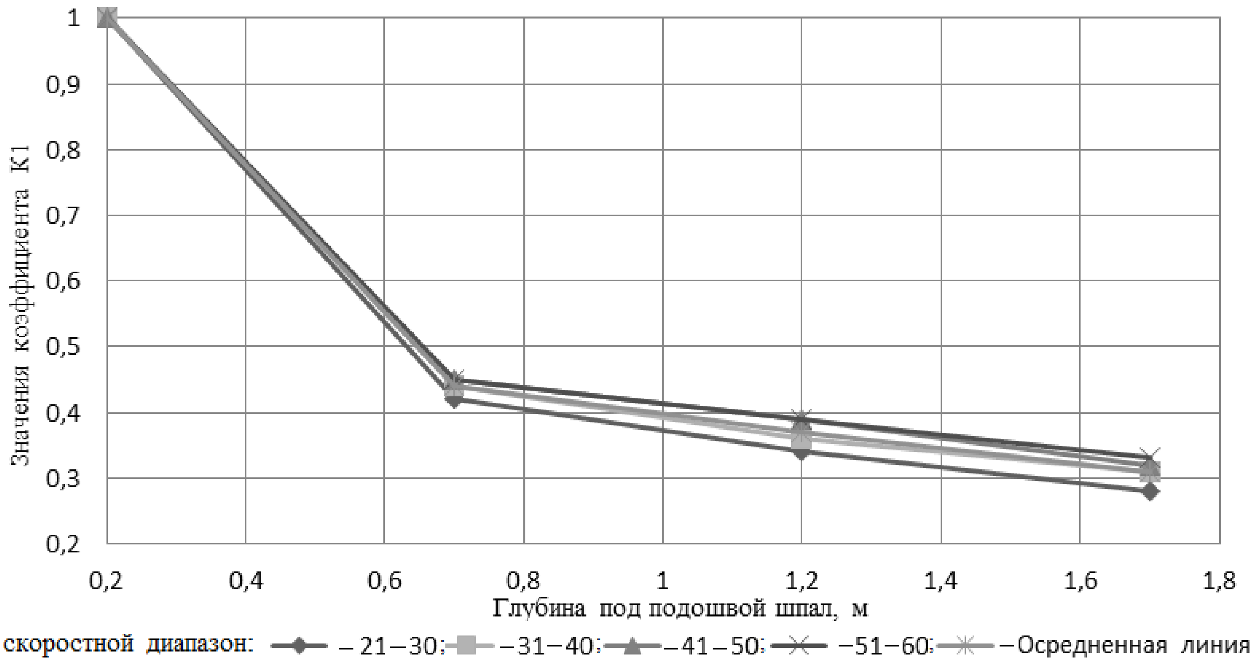


Рисунок 3 – Изменение коэффициента $К_1 = \frac{A_z}{A_0}$ по глубине полотна

При увеличении глубины от 0,7 до 1,2 м значение этого показателя снизилось еще в 1,2 раза, а от 1,2 до 1,7 м показатель K_1 уменьшился в 1,1 раза. Следовательно, зависимость изменения коэффициента K_1 явно нелинейная.

Таким образом, в зависимости от загасания результирующих амплитуд колебаний при толщине балластного слоя 0,2 м под подошвой шпал четко прослеживается две зоны в пределах рассматриваемых глубин от 0,2 до 1,7 м: 1 – зона до глубины 0,5 м от уровня основной площадки земляного полотна, 2 – зона от глубины 0,5 до 1,5 м.

Для расчета прочности основной площадки земляного полотна, отсыпанного из лессовидной супеси, в дальнейшем требуется знать закон распространения колебаний, поэтому одной из важнейших задач исследований является установление аналитической зависимости для расчета амплитуды результирующих колебаний в любой точке земляного полотна. Для выявления этой зависимости перестроим график, приведенной на рисунке 3, в полулогарифмических координатах. В итоге получаем практически прямолинейные зависимости $ln(K_1)$ в диапазоне глубины от 0,2 до 0,7 м и от 0,7 до 1,7 м, что представлено на рисунке 4.

По графику на рисунке 4 легко определяются угловые коэффициенты, которые будем называть коэффициентами затухания колебаний. Таким образом, получим:

для первой зоны –

$$ln(K_1) = (z - 0{,}2) \cdot \delta_1^1; \quad (1)$$

для второй –

$$ln(K_1) = (z - 0{,}2) \cdot \delta_1^2, \quad (2)$$

где $\delta_1^{\,1}$ – коэффициент затухания колебаний в диапазоне глубины от 0,2 до 0,7 м под подошвой шпал, 1/м;

$\delta_1^{\,2}$ – коэффициент затухания колебаний в диапазоне глубины от 0,7 м и более под подошвой шпал, 1/м.

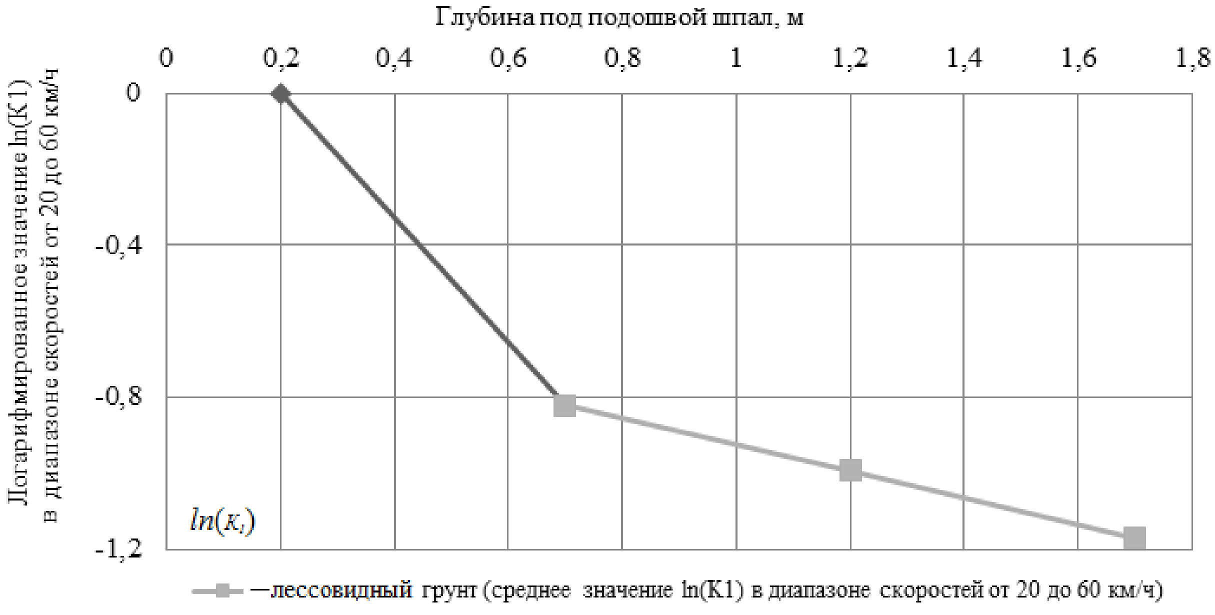


Рисунок 4 – Изменение коэффициента lnK_1 по глубине полотна

Тогда, учитывая, что

$$К_1 = \frac{A_z}{A_0} \rightarrow \ln(K_1) = \ln(\frac{A_z}{A_0}) \rightarrow A_z = A_0 \cdot e^{lnK_1}, \quad (3)$$

и выражения (1) и (2), можно показать:

$$A_z = A_0 \cdot e^{-\varphi(z)\cdot\delta_1^1 - \varphi\prime(z)\cdot\delta_1^2}; \quad (4)$$

$$\phi(z) = \begin{cases} z - 0{,}2 & \text{при } z \le 0{,}7 \text{ м}, \\ 0{,}5 & \text{при } z > 0{,}7 \text{ м}; \end{cases}$$

$$\phi'(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } z \le 0{,}7 \text{ м}, \\ z - 0{,}7 & \text{при } z > 0{,}7 \text{ м}, \end{cases}$$

где z – глубина рассматриваемой точки по вертикали от подошвы шпалы, м.

Значения коэффициентов загасания результирующих амплитуд колебаний по глубине земляного полотна, отсыпанного из лессовидной супеси, при следовании грузовых составов со скоростями от 20 до 60 км/ч составляют в первой зоне от 0,2 до 0,7 м под подошвой шпал $\delta_1{}^1$ = 1,64 1/м, а во второй зоне – от 0,7 до 1,7 м при $\delta_1{}^2$ = 0,350 1/м.

Оценка затухания результирующих колебаний в горизонтальном направлении, перпендикулярном оси пути, осуществлялась по показателю K_2, который определим соотношением результирующих амплитуд смещений, зарегистрированных на некотором расстоянии от торца шпалы (A_y), к амплитудам, зарегистрированным на основной площадке у торца шпалы A_0. Изменение показателя коэффициента K_2 приведено на рисунке 3.

$$K_2 = \frac{A_y}{A_0}, \quad (5)$$

где A_y – результирующая амплитуда колебаний на расстоянии y от торца шпалы, мкм;

A_0 – то же у торца шпалы на глубине 0,2 м под подошвой шпал, мкм.

Анализ зависимости, приведенной на рисунке 5, показывает, что выявляется две зоны затухания колебания. Первая зона находится в диапазоне от 0 до 3,8 м, где происходит крайне интенсивное загасание уровня вибродинамического воздействия. Так, при удалении на 2 м от торца шпалы коэффициент K_2 уменьшается с 1,0 до 0,35, т. е. результирующие амплитуды смещений снизились в 2,9 раза, при удалении на 4 м от торца шпалы такие амплитуды снизились в 4,3 раза с 1,0 до 0,23.

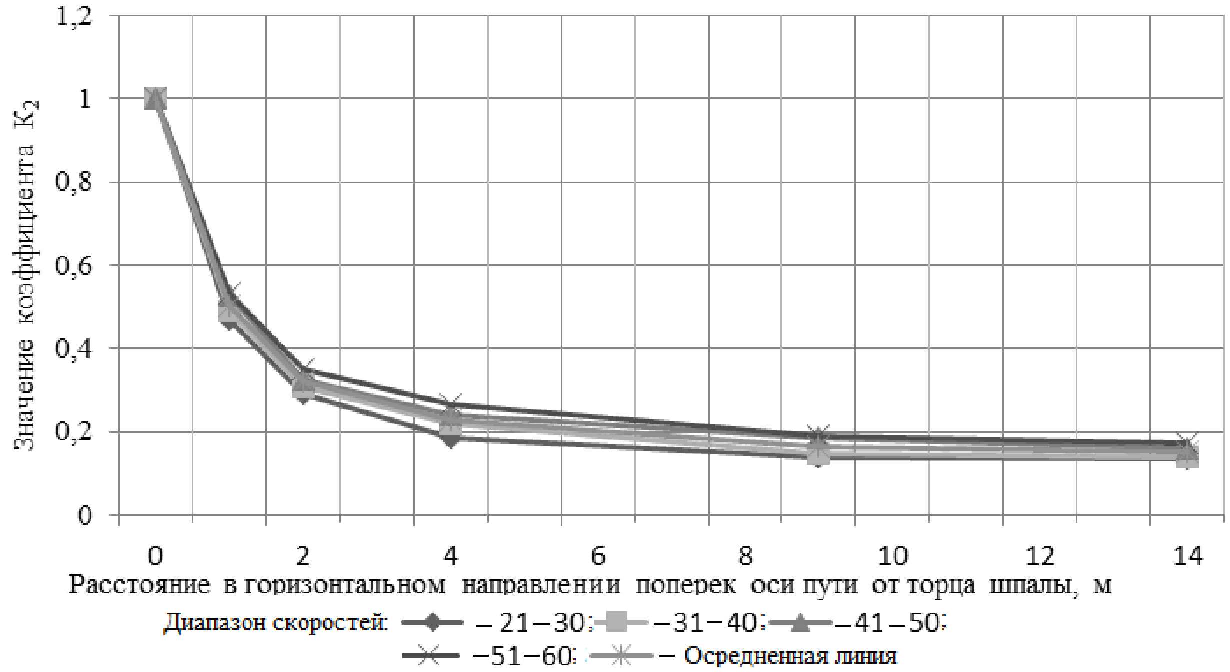


Рисунок 5 – Загасание амплитуд колебаний в горизонтальном направлений
поперек оси пути в диапазоне скоростей от 20 до 60 км/ч

Вторая зона находится в диапазоне расстояний от 3,8 м до расстояний, при которых амплитуды смещений стремятся к нулю. В этой зоне наблюдается крайне слабое затухание колебаний по зависимости, близкой к прямолинейной.

Для выявления характера затухания значения коэффициентов прологарифмированы, которая меняется на расстояний 5,18 м. В пределах двух зон зависимость прямолинейная. Исходя из этого можно графически определить значений этих коэффициентов, которые составили 0,43 1/м для первой зоны и 0,03 1/м для второй зоны.

Тогда

$$A_y = A_0 \cdot e^{-\delta_2^1 \cdot \phi(y) - \delta_2^2 \cdot (y-1,35)}; \tag{6}$$

$$\phi(y) = \begin{cases} (y-1,35) & \text{при } y \le 5,18 \text{ м,} \\ 3,8 & \text{при } y > 5,18 \text{ м,} \end{cases}$$

где A_0 – результирующая амплитуда колебаний на основной площадке земляного полотна под подошвой шпалы, мкм;

δ_2^1 – коэффициент затухания колебаний в первой зоне, $\delta_2^1 = 0,43$ [1/м];

δ_2^2 – коэффициент затухания колебаний во второй зоне, $\delta_2^1 = 0,03$ [1/м];

y – расстояние от оси пути, м;

1,35 – размер полушпалы, м.

В многочисленных исследованиях И. В. Прокудина, Г. Н. Стояновича, А. Ф. Колоса и других авторов установлено увеличение значений амплитуды колебаний на откосной части насыпей [1, 2, 3].

С учетом этого зависимость (6) представляется в виде:

$$A_y = A_0 \cdot e^{-\delta_2^1 \cdot \phi(y) - \delta_2^2 \cdot (y-1,35) - \delta_3 \cdot h_i}; \tag{7}$$

$$h_i = \begin{cases} 0, & \text{при } y \le 0{,}5 \cdot B_{\text{пл}}; \\ (y - 0{,}5 B_{\text{пл}}) \cdot tg\alpha_1, & \text{при } y > 0{,}5 \cdot B_{\text{пл}}, \end{cases} \tag{8}$$

где α_1 – угол заложения откоса насыпи, град.;

$B_{\text{пл}}$ – ширина основной площадки земляного полотна, м;

h_i – высота откоса над рассматриваемой точкой, м;

δ_3 – коэффициент загасания колебаний в откосной части насыпи, который по данным экспериментальных исследований составил 0,152 1/м;

Распространение колебаний в теле полотна и за его пределами одновременно в вертикальном и горизонтальном направлениях выражение для расчета амплитуд колебаний принимает вид:

$$A_{zy} = A_0 \cdot e^{-\phi(z)\cdot\delta_1^1 - \phi'(z)\cdot\delta_1^2 - \delta_2^1\cdot\phi(y) - (y-1{,}35)\cdot\delta_2^2 + \delta_3\cdot h_i}, \tag{9}$$

где A_{zy} – результирующая амплитуда в точке с координатами z и y, мкм;

A_0 – максимальная вероятная результирующая амплитуда колебаний грунтов основной площадки земляного полотна, мкм;

z, y – координаты рассматриваемой точки (z – глубина от подошвы шпалы; y – расстояние от торца шпалы в направлении поперек оси пути), м.

Достоверность зависимости (9) проведена сопоставлением величин амплитуд результирующих колебаний с экспериментальными данными.

Величины экспериментальных и расчетных амплитуд колебаний при скорости 60 км/ч

Координаты установки датчиков по телу земляного полотна и за его пределами, м	Измеренная амплитуда колебания $A_{\text{экс}}$, мкм	Расчетная амплитуда колебания $A_{\text{расч}}$, мкм	Погрешность, %
z = 0; y = 0	411	411	0
z = 0; y = 1	218	221	10
z = 1,00; y = 5,6	145	159	9
z = 2,0; y = 7,5	110	107	2
v = 2; y = 12,5	79	73	8
z = 2; y = 15,75	72	79	10
z = 1,75; y = 5,6	127	141	11
z = 2,25; y = 5,6	85	101	16
z = 0,5; y = 0	185	185	0
z = 1; y = 0	161	157	2
z = 1,5; y = 0	134	134	0

Сопоставительный анализ показал хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных. Максимальная погрешность при расчете составила 16 % и наблюдается на расстоянии от оси пути 5,6 м, на глубине 2,2 м под подошвой шпал во всем скоростном диапазоне. Такую погрешность следует признать допустимой при исследовании динамических процессов.

Экспериментальные исследования затухания колебаний в теле земляного полотна в трех направлениях и обработкой данных для выявления его характера позволили получить аналитическое выражение, дающее достаточно высокую сходимость, что является основой для оценки уровня вибродинамических воздействия и несущей способности земляного полотна.

Список литературы

1. Прокудин, И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку [Текст]: Дис... докт. техн. наук: 05.22.06 / Прокудин Иван Васильевич. – Л., 1982. – 458 с.

2. Андреев, Г. Е. Экспериментальное исследование боковых давлений при высоких скоростях движения [Текст] / Г. Е. Андреев // Новое в технике и технологии. Транспорт. – М. – 1969. – С. 24 – 58.

3. Вялов, С. С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния слабого грунта, подстилаемого малосжимаемой толщей [Текст] / С. С. Вялов, А. Л. Миндич // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. – 1977. – № 1. – С. 26.

4. Колос, А. Ф. Исследование влияния вибродинамической нагрузки на прочностные характеристики лессовидной супеси [Текст] / А. Ф. Колос, А. М. Абдукаримов // Известия ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент. – 2011. – № 4. – С. 7.

References

1. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemljanogo polotna iz glinistyh gruntov, vosprinimajushhih vibrodinamicheskih nagruzku* (Strength and deformability of the railway roadbed of clayey soils that receive vibrodynamic load). Doctor's thesis, Leningrad, 1982, 458 p.

2. Andreev G. E. Experimental study of lateral pressure at high speeds [Jeksperimental'noe issledovanie bokovyh davlenij pri vysokih skorostjah dvizhenija]. *Novoe v tehnike i tehnologii. Transport – New in equipment and technology*. *Transport*, 1969, pp. 24 – 58.

3. Vjalov S. S., Mindich A. L. Experimental study of stress-strain state of the soft soil, low compressibility of underlying strata [Jeksperimental'noe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija slabogo grunta, podstilaemogo maloszhimaemoj tolshhej]. *Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov – Foundations, foundations and soil mechanics*, 1977, no. 1, pp. 26.

4. Kolos A. F., Abdukarimov A. M. The study of the influence of dynamic vibration load on the strength characteristics of loess sandy loam [Issledovanie vliyaniya vibrodinamicheskoy nagruzki na prochnostnie harakteristiki leossovidnoy supesi]. *Izvtstiya TashIIT – TashIIT Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 7.

УДК 625.172

Н. И. Карпущенко, А. В. Быстров, П. С. Труханов

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ ПО ТЕКУЩЕМУ СОДЕРЖАНИЮ ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВАГОНОВ – ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Представлены методика и результаты исследований информации, получаемой вагонами-путеизмерителями о состоянии рельсовой колеи, для планирования путевых работ по устранению неисправностей пути. Проанализированы виды, степени неисправностей по существующей методике их оценки, а также длина отступлений от норм содержания рельсовой колеи, что стало возможным при использовании последних версий программного обеспечения путеизмерителей системы КВЛ-П. Определены объем и очередность производства ремонтно-путевых работ: неотложных, первоочередных и плановых в зависимости от конструкции пути и времени года. Сделан вывод о работоспособности и действенности представленной методики.

Текущее содержание пути заключается в систематическом проведении плановых и неотложных работ, обеспечивающих ликвидацию неисправностей и причин, порождающих их. Предупреждение появления неисправностей и их своевременное устранение являются основными принципами текущего содержания пути и сооружений [1].

При участковой системе ведения путевого хозяйства работа укрупненной бригады производится в соответствии с требованиями инструкции [2] на основе годового плана дистанции по текущему содержанию пути.

Оперативное планирование ремонтно-путевых работ осуществляются по результатам проходов вагонов-путеизмерителей, последние версии программного обеспечения которых позволяют определять длину неисправностей.

В связи с тем, что работы текущего содержания пути по сезонам года различаются по номенклатуре, объемам и организации, планирование работ должно осуществляться на год и на сезон (летний, осенний, зимний и весенний) в соответствии с инструкцией [1].

Оценка состояния рельсовой колеи определяется для километров и участков пути, обслуживаемых подразделениями путевого хозяйства, на основании суммарной балловой оценки отступлений от норм содержания рельсовой колеи.

Количественная и качественная оценка состояния пути служит оценкой качества работы бригад и дистанции пути в целом по устранению локальных отступлений рельсовой колеи.

Отклонения геометрических параметров рельсовой колеи от номинальных значений (отступления и неисправности) оцениваются в зависимости от их величины и категории пути (максимальной скорости движения поездов на участке).

Отдельные отступления характеризуются величиной (амплитудой), длиной и координатой (положением по пикетажу). Координатой отступлений по перекосам, просадкам, рихтовке и коротким горизонтальным неровностям считается середина отрезка между пиковыми значениями, координатой отступлений по плавным отклонениям уровня и ширине колеи – середина отрезка между точками начала и конца отступления данной степени. Длина отступлений определяется с точностью до 0,5 м.

Отклонения от норм содержания пути – отступления – подразделяются на четыре степени (качественная оценка отступлений). Разделение отклонений от норм содержания пути на степени производится по приближению к предельным значениям, требующим ограничения скоростей движения поездов и в зависимости от потребности в проведении необходимых путевых работ:

отступления, требующие ограничения скорости движения или его закрытия и проведения неотложных работ, являются отступлениями четвертой (IV) степени (неисправностями);

отступления, близкие по величине к предельным значениям, по которым ограничивается скорость. Эти отступления устраняются в первоочередном порядке – третья (III) степень;

отступления, устраняемые в плановом порядке – вторая (II) степень;

отклонения, не превышающие установленные ТУ допуски и не требующие устранения при текущем содержании пути, – первая (I) степень. Они учитываются при оценке изменений состояния пути во времени и планировании профилактических путевых работ машинными комплексами.

Для каждого отступления начисляются штрафные баллы. Для отступлений по просадкам, перекосам и рихтовке, характеризующих неровности рельсовой колеи, величина балла рассчитывается в зависимости от их величины с учетом влияния характеристик отступления на динамику взаимодействия пути и подвижного состава.

Количественная оценка километра устанавливается как сумма штрафных баллов всех отступлений второй степени и выше, их сочетаний, выявленных на километре, и приводится к длине километра.

Обнаруженные вагоном-путеизмерителем отступления и неисправности отмечаются на графической диаграмме следующим образом: сужение – Суж; уширение – Уш; просадка – Пр; перекос – П; плавное отклонение уровня – У; отступление в плане по рихтовке – Р; сочетание угла в плане с перекосом – Р+П; сочетание угла в плане с просадкой – Р+Пр; сочетание трех и более отступлений по рихтовке – 3Р; сочетание трех и более просадок – 3 Пр; сочетание трех и более перекосов – 3 П; сверхнормативная короткая горизонтальная неровность рельсовой нити в плане – Р(4).

Для перекосов, просадок, отступлений в плане и сочетаний отступлений, требующих ограничения скорости движения порожних вагонов до 60 км/ч, дополнительно печатается «прж». Характеристики отступлений III степени выделяются подчеркиванием, характеристики неисправностей, требующих ограничения скорости движения, выделяются жирным шрифтом.

Штрафная балловая оценка индивидуального отступления устанавливается в зависимости от его степени, амплитуды и длины. Чем больше степень и амплитуда отступления, тем больше величина балла. Для одного типа отступления при одинаковом значении амплитуды значение балла тем больше, чем меньше длина отступления.

Балловая оценка начисляется за каждый отдельный перекос, каждую просадку или рихтовку. Балловая оценка уширения, сужения и плавных отклонений уровня начисляется в зависимости от протяженности (длины) отступления.

Планирование работ, как правило, осуществляется по данным проходов вагона-путеизмерителя в период сентябрь – ноябрь на апрель – май будущего года и в период апрель – май на июнь – ноябрь текущего года. Планирование осуществляется в автоматизированном режиме с помощью соответствующего программного обеспечения.

В результате формируется ведомость «План проведения планово-предупредительных работ», в которой указаны координаты участков пути, их протяженность, среднее количество отступлений, приведенное к пикету, установленные скорости движения. Форма ведомости представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент журнала учета и контроля устранения отступлений 3-й и 4-й степени и отступлений, повлекших за собой выдачу ограничений скорости движения поездов

ПД	Отступление									Скорость пасс/гр/прж, км/ч	
	КМ	ПК	метры, м	наименование	степень	амплитуда, мм	длина, м	штрафной балл	число поворотов	установленная	ограничение
1	32	1	1	П	3	17	18	31		120/80/80	
2	65	5	473 480	ПржР+Пр Р Пр		16 16	18 4	100		120/80/80	-/-/60
3	74	7	661	У	3	22	4	22		120/80/80	
4	107	8	796 805	ПржР+Пр Р Пр		15 12	12 6	15		120/80/80	
5	108	8	718	П	4	26	19	300		120/80/80	
6	108	10	945	Р	3	32	20	50	1	120/80/80	40
7	110	3	233	Пр	3	21	3	21		120/80/80	
8	120	3	296	П	4	17	7	300		120/80/80	60
9	135	10	931 940	Р+Пр Р Пр		25 21	18 3	15		120/80/80	

Для определения очередности проведения работ участки пути ранжируются в порядке убывания среднего количества отступлений. При одинаковом среднем количестве отступлений больший приоритет получает кривой участок пути, затем участок с наименьшей длиной. Наивысшую первую очередность проведения работ получает участок с наибольшим значением среднего количества отступлений и наименьшей длиной.

Методика определения затрат труда на текущее содержание пути с использованием данных вагонов-путеизмерителей реализована на Болотнинской дистанции пути Западно-Сибирской дирекции инфрастуктуры.

Участок, обслуживаемый дистанцией: двухпутный, электрифицированный, оборудован кодовой автоматической блокировкой. Путь относится к первому классу, группе Б, второй категории (1Б2). Развернутая длина главных путей составляет 231 км, из них 212 км – бесстыковой путь, 189 км лежит на железобетонных шпалах со скреплением КБ; 23 км – со скреплением ЖБР и 19 км – звеньевой путь на деревянных шпалах со скреплением ДО.

Грузонапряженность по одному пути составляет 69,4 млн. ткм брутто на километр в год, по два пути – 62,7 млн ткм брутто на километр в год. Протяженность кривых участков – 79, 19 км, что составляет 34,5 % от развернутой длины главных путей.

Сводные данные по параметрам неисправностей рельсовой колеи на бесстыковом пути со скреплением КБ И ЖБР по результатам 12 проходов вагонов-путеизмерителей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводные данные по параметрам неисправностей бесстыкового пути

Параметры		Единицы измерения	Неисправности рельсовой колеи						Суммарное количество, шт
			сужение	уширение	уровень	перекос	просадка	рихтовка	
Скрепление КБ									
Лето	Количество неисправностей	шт.	54	326	664	680	476	104	2304
	Доля от общего количество неисправностей	%	2,34	14,15	28,82	29,51	20,66	4,51	79
	Суммарная длина неисправностей ΣL	м	130	847	2740	9867	1880	2392	
	Средняя длина $L_{ср}$	м	2,41	2,6	4,13	14,51	3,95	23	
	Суммарная длина, приходящаяся на один километр	м	0,69	4,48	14,5	52,21	9,95	12,65	
Зима	Количество неисправностей	шт.	120	274	523	440	150	103	1610
	Доля от общего количества неисправностей	%	7,45	17,02	32,48	27,33	9,32	6,4	69
	Суммарная длина неисправностей ΣL	м	303	744	2298	6595	606	2459	
	Средняя длина $L_{ср}$	м	2,53	2,72	4,39	14,99	4,04	23,87	
	Суммарная длина, приходящаяся на один километр	м	1,6	3,94	12,16	34,94	3,21	13,01	
Скрепление ЖБР									
Лето	Количество неисправностей	шт.	17	91	160	240	190	53	751
	Доля от общего количество неисправностей	%	2,26	12,12	21,3	31,96	25,3	7,06	79
	Суммарная длина неисправностей, ΣL	м	33	254	720	3483	761	1280	
	Средняя длина $L_{ср}$	м	1,94	2,79	4,5	14,51	4,01	24,15	
	Суммарная длина, приходящаяся на один километр	м	0,7	5,5	15,5	75,7	16,5	27,8	
Зима	Количество неисправностей	шт.	20	159	188	148	133	128	776
	Доля от общего количество неисправностей	%	2,58	20,49	24,23	19,07	17,14	16,49	61
	Суммарная длина неисправностей ΣL	м	48	455	860	2180	539	2840	
	Средняя длина $L_{ср}$	м	2,4	2,86	4,57	14,73	4,05	22,19	
	Суммарная длина, приходящаяся на один километр	м	1,2	9,9	18,7	47,4	11,5	61,7	

Из данных таблицы 2 следует, что наибольшую длину имеют неровности по рихтовке 22 – 24 м, а наименьшую – по сужению колеи 2 – 2,5 м. Наибольший удельный вес имеют отклонения рельсов по уровню, просадкам и перекосам: летом – 79 %, зимой 61 – 69 %.

В зимнее время количество просадок пути снижается в 1,5 – 2 раза из-за большей стабильности пути, а удельный вес неисправностей по рихтовке возрастает в такой же пропорции, особенно при скреплении ЖБР. Связано это с тем, что при замерзании балласта выправка пути в плане при этой конструкции практически невозможна.

В таблице 3 приведены данные по затратам труда на устранение неисправностей рельсовой колеи при различных конструкциях пути, определенные с учетом длины неисправностей и норм затрат труда на их устранение [3].

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что наиболее стабильной является рельсовая колея на бесстыковом пути со скреплением КБ, наименее стабильной – на звеньевой конструкции с деревянными шпалами. Здесь для содержания рельсовой колеи требуется затрачивать труда в 2,3 раза больше по сравнению с бесстыковой конструкцией со скреплением КБ. Затраты труда возрастают по всем позициям, и особенно сильно на регулировку ширины колеи и рихтовку пути.

Таблица 3 – Затраты труда на устранение неисправностей рельсовой колеи, чел.-ч в год

Вид неисправностей рельсовой колеи	Наименование выполняемых работ	Конструкция верхнего строения пути		
		бесстыковой путь со скреплением КБ	бесстыковой путь со скреплением ЖБР	звеньевой путь со скреплением ДО
Отклонения по уровню, просадки, перекосы	Исправление просадок и перекосов пути на щебеночном балласте подбивкой шпал электрошпалоподбойками	44,6	42,4	69,8
	Выправка пути по уровню на величину до 10 мм укладкой или заменой регулировочных прокладок	17,3	20,3	41,8
Отклонения по направлению (нарушение рихтовки)	Регулировка рельсошпальной решетки в плане гидравлическими рихтовщиками	7,4	12,6	25,8
Нарушение ширины рельсовой колеи	Регулировка ширины рельсовой колеи	2,9	4,2	27,9
Всего:		72,2	79,5	165,3

Затраты труда на содержание рельсовой колеи при бесподкладочном скреплении ЖБР в 1,1 раза больше, чем при скреплении КБ, прежде всего из-за нестабильности ширины колеи и состоянии пути в плане, особенно в зимнее время.

Затраты труда на выправку пути подбивкой шпал электрошпалоподбойками в 2 – 2,5 раза больше по сравнению с выправкой укладкой регулировочных прокладок на бесстыковом пути и в 1,7 раза больше на звеньевом пути с деревянными шпалами.

Соотношение затрат труда на очередность устранения неисправностей рельсовой колеи по данным проходов вагонов-путеизмерителей приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Соотношение затрат труда на устранение неисправностей рельсовой колеи при различных конструкциях пути и очередности работ

Конструкция пути	Очередность путевых работ и их объем, чел.-час			
	неотложные	первоочередные	плановые	суммарные
Бесстыковой со скреплением КБ	0,09	2,29	69,82	72,2
Бесстыковой со скреплением ЖБР	1,18	2,98	75,34	79,5
Звеньевой со скреплением ДО	4,2	11,8	149,3	165,3

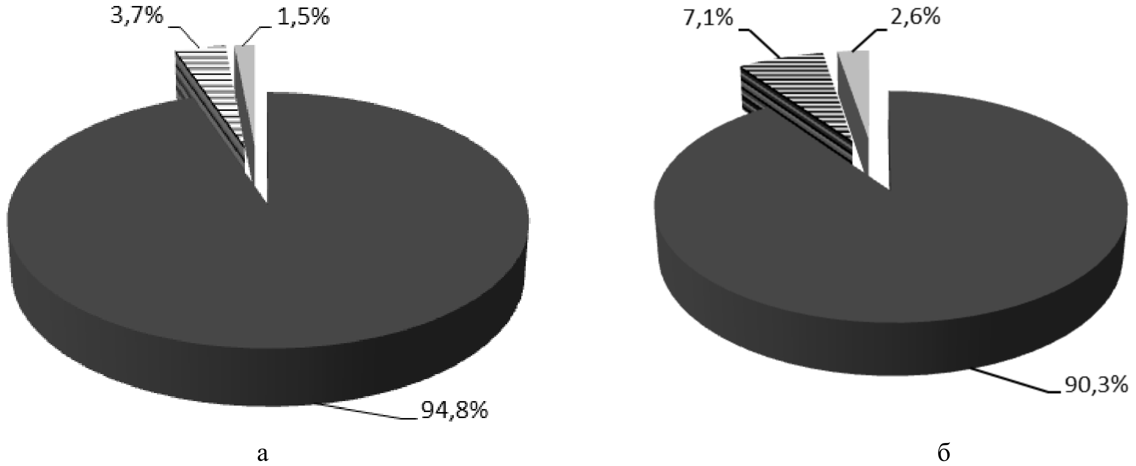
Из данных таблицы 4 и секторной диаграммы, представленной на рисунке, следует:

основной объем работ на регулировку рельсовой колеи затрачивается в плановом порядке;

неотложные работы колеблются от 0,1 % при железобетонных шпалах и скреплении КБ до 2,6 % при деревянных шпалах и скреплении ДО.

Первоочередные работы составляют 3,7 – 7,1 %.

Анализ информации, получаемой с вагонов-путеизмерителей, показал, что ее можно использовать для определения вида и протяженности неисправностей рельсовой колеи объема и очередности выполнения путевых работ по их устранению.



Секторные диаграммы распределения затрат труда в процентах на устранение неисправностей рельсовой колеи при конструкциях пути: а – бесстыковой; б – звеньевой: – неотложные работы; – плановые; – первоочередные

Список литературы

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Текст]. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2012. № 2791 р / ОАО «РЖД». – М., 2012. – 234 с.

2. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи, планированию работ и мерам по обеспечению безопасности движения по показаниям путеизмерительных вагонов [Текст] / ЦПТ-46/18. Утверждена ОАО «РЖД» 24.08.2009 / ОАО «РЖД». – М., 2009. – 170 с.

3. Нормы времени на работы по ремонту верхнего строения пути [Текст] / ОАО «РЖД». – М.: Маршрут, 2004. – 456 с.

References

1. *Instrukciya po tekuschemu soderjaniyu jeleznodorojnogo puti. Rasporiazhenie OAO «RZhD» ot 29.12.2012 № 2791 r* (Instructions for the track current maintenance. Disposal of OAO «Russian Railways» of 29.12.2012 № 2791 r). Moscow, 2012, 234 p.

2. *Instrukciya po ocenke sostoyaniya relsovoi kolei_ planirovaniyu rabot i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvijeniya po pokazaniyam puteizmeritelnih vagonov. Rasporiazhenie OAO «RZhD» ot 24.08.2009* (Instruction for the track assessment, work planning and train operation safety according to the data obtained by track management cars. Disposal of OAO «Russian Railways» of 24.08.2009). Moscow, 2009, 170 p.

3. *Normi vremeni na raboti po remontu verhnego stroeniya puti. OAO «RJD»* (Time Regulations for repair of the permanent way. JSC «Russian Railways»). Moscow, 2004, 456 p.

УДК 629.42:629.4.054

К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аблялимов Олег Сергеевич
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, ул. Адылходжаева, 1, Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТашИИТ.
Тел.: (81099871) 299-03-94.
E-mail: icenter@tashiit.uz

Представлены результаты исследований по изучению условий движения высокоскоростных поездов с активной и пассивной системами наклона кузовов вагонов в кривых участках железнодорожного пути с учетом организации движения и эксплуатации электропоезда «Afrosiyob» на участке Ташкент – Самарканд Узбекской высокоскоростной железной дороги.

Ключевые слова: *исследование, результат, высокоскоростной поезд, движение, электропоезд, железнодорожный путь, участок, система наклона, кузов, вагон, кривая, эксплуатация, условие, направление, этап, скорость, радиус, расчет*.

TO THE INVESTIGATIONS OF THE MOVEMENT PROCESS OF HIGH-SPEED TRAINS IN THE CURVED DIRECTIONS OF RAILWAY TRACK.

Ablyalimov Oleg Sergeyevich
Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TIRTE).
Ph. D., assistant professor of the department «Lokomotives and locomotive economy», TIRTE.
1, Mirobad region, Adilkhodjaev str., Tashkent, 100167, Republik of Uzbekistan.
Phone: (81099871) 299-03-94.
E-mail: icenter@tashiit.uz

The results of the investigations on the study condition movement of high-speed trains with active and passive systems inclination of body of the carriage in the curved directions of railway track with the registrations of the organizes in the movement and exploitation of the electric trains «Afrosiyob» in the direction Tashkent – Samarkand of the Uzbek railway track are presented are presented.

Keywords: *investigation, result, the high-speed train, movement, the electric train, railway track, the direction, the system inclination, the body, the carriage, the curved, exploitation, condition, direction, the stage, the speed, the radius, calculation*.

УДК 621.331:621.331

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ В МЕЖПОДСТАНЦИОННОЙ ЗОНЕ СРЕДСТВАМИ MATLAB

Бардушко Валерий Данилович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: barvadan@iriit.irk.ru

Ушаков Владислав Анатольевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

При моделировании систем тягового электроснабжения, отражающем электрические процессы взаимодействия системы тягового электроснабжения и подвижных электрических нагрузок (электровозов и электропоездов), одним из элементов которых является организация имитации передвижения поездов в пространстве. Эффект перемещения поездов в имитационном моделировании (ИМ) в среде MatLab по заданному графику движения на анализируемом участке приводит к необходимости последовательного переключения моделей электроподвижного состава (ЭПС) к тяговой сети таким образом, что реализуется эффект его перемещения по участку. Однако в этом случае возникают процессы, реально не имеющие места в действительности. Это связано с реализацией дискретного способа моделирования перемещения, характеризующегося тем, что ЭПС, находящийся на одной ячейке – модели тяговой сети в один момент времени, в последующий скачком переходит на другую. При этом ЭПС предыдущей ячейки отключается, а на ячейку следующей включается. При этом возникают не существующие в действительности процессы коммутации, искажающие результаты исследований.

Методу снижения отрицательных последствий от таких искажений и посвящена данная статья.

Ключевые слова: *имитационное моделирование, система тягового электроснабжения электроподвижной состав, предвключенный режим электровоза, модельное время, дискретность коммутации, осциллограммы токов, осциллограммы амплитуд гармоники, Total Harmonic Distortion.*

THE METHOD OF SIMULATING MOVEMENT OF LOCOMOTIVES IN MERPTTAZINOL ZONE BY MEANS OF MATLAB

Bardushko Valeriy Danilovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Electricity transport», ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: barvadan@iriit.irk.ru

Ushakov Vladislav Anatolievich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Ph. D., assistant professor of the department «Electricity transport», ISTU.

When modeling the traction power supply systems, reflecting the processes of interaction of electric traction power supply and mobile electrical loads (electric and electric) is one of the elements of movement imitation organization trains in space. The effect of moving trains in simulations (MI) in MatLab on schedule at the analyzed site traffic necessitates sequential switching models of electric rolling stock (EPS) to the traction network, so that its effect is realized by moving the site. However, in this case, there really is not the processes taking place in reality. This is due to the realization of the simulation method of discrete movements, characterized in that the CSE, one located on a cell – the traction network model at one time, thereafter jumps to another. While EPS previous cell is switched off and switched on the next cell. Thus there does not exist in reality switching processes that distort the results of the studies. Methods to reduce the negative consequences of such distortions are addressed in this article.

Keywords: *simulation, the system of electric traction power supply structure, the upstream electric mode, simulated time, discrete switching waveform currents, waveform amplitude harmonics, Total Harmonic Distortion.*

УДК 621.436

РАЗРАБОТКА ПРИБЛИЖЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЯЗИ ПРОЦЕССОВ ВПРЫСКА И СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ЛОКОМОТИВОВ

Ведрученко Виктор Родионович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Крайнов Василий Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Лазарев Евгений Сергеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: Incoe@yandex.ru

Предложена формальная методика построения приближенной математической модели связи закона подачи топлива и индикаторного процесса сгорания с учетом преимущественно физических свойств жидкого топлива: вязкости, плотности, сжимаемости и поверхностного натяжения, влияющих на цикловую подачу при других заданных константах горючего.

Ключевые слова: *система впрыска топлива в дизеле, процесс сгорания, случайные функции, идентификация, корреляционная функция, оператор, математическая модель*.

DEVELOPMENT OF AN APPROXIMATE MATHEMATICAL MODEL OF COMMUNICATION PROCESSES OF INJECTION AND COMBUSTION OF FUEL IN DIESEL POWER PLANTS LOCOMOTIVES

Vedruchenko Viktor Rodionovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Krajnov Vasily Vasilevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Lazarev Evgeniy Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: Incoe@yandex.ru

The subject of the study were made of the injection and combustion in diesel locomotives and ships, which are the most difficult to analyze, operate and forecasting facility management (processes in the cylinder of a diesel engine), where the conversion of thermal energy released during the combustion of fuel into mechanical work takes place through a series of successive physico-chemical, thermal, mass transfer and thermodynamic transformations which together constitute the circular irreversible and unlocked the duty cycle. However, the direct study of the operating cycle is still difficult complexity of the totality of the factors influencing the course of the process as a whole.

The aim of the work was to establish an empirical connection laws fuel supply and combustion process in diesel cylinder it, ie the creation of methods of calculating these processes together.

One approach to establishing formal relations and the possibility of subsequent numerical modeling of combustion processes and communication of the law the fuel in a diesel engine is the use of the theory of automatic control, which developed methods of identification, taking into account the processes of management system in the form of a model of a cybernetic system.

It is concluded that the numerous experimental and computational studies suggest that the dynamics of the fuel significantly affects the combustion process in a diesel engine, and, consequently, its power and economic performance. Then to establish a formal link (model) combustion processes and the law the fuel used machine control theory (TAU), which uses and develops methods for the identification, considering processes management system in the form of a cybernetic circuit. Assumed that the full range of processes in the combustion chamber since the start of the fuel supply to the end of its combustion is a complex dynamic system of self-governing.

The formulation was based on statistical methods for solving the problem of identification, where the input variable and its response (the law of supply and indicator diagram - experimental curves) are stationary random functions, and object management (combustion) is classified as a one-dimensional linear lumped.

As a criterion of proximity to the object used criterion of the minimum of the expectation of a given function of the difference of the input signals and the object model.

It is noted that there is currently no accurate method for calculating the finished analytically binding processes fuel supply, mixture formation and combustion in a diesel engine. Therefore, there is not yet calculated optimum injection characteristics suitable for the calculation and simulation processes in diesel engines of various types.

It was found that, other things being equal, the law determined by the rate of injection of fuel injected. Striving to achieve injection with increasing speed in order to reduce the cycle dynamics, as well as more efficient use of the air charge in a distant "corners" of the combustion chamber (the latter portion of fuel, with a maximum speed to penetrate into the remotest corners).

It is shown that in most cases it is necessary for the administration of the mathematical description of establishing the relationship between input and output variables, based on which can be worked out such a control object, which would ensure achievement of the intended target operation of the facility. With regard to the solution of a specific problem the most common case is when and exposure and response will be functions of the same argument.

Thus, determining the experimental data of the conditional expectation of the output variable with respect to the input, we obtain the optimal (in the sense of the criterion of minimum mean square deviation) Estimates of the object.

Given the accepted method of identification and characteristics of the problem, the best operator in the class of linear operators, and not among all possible random variables. This study was based on the principle of superposition, which is performed for a linear operator.

Using the hypothesis that the investigated signals have the property of ergodicity with respect to the correlation functions.

The adoption of the hypothesis of ergodicity possible to determine the correlation functions centered on the realization of a random process, ie, combustion process, as successive cycles.

Noted that most fully identifiable objects are described in terms of the state space. Under the state of the object understood set of values, fully define its position at any given time.

Proposed a model of the considered dynamic objects to choose a system of differential equations.

In view of the above, the proposed approximation algorithm to determine the dynamic characteristics of the combustion process, ie, the agent object in the class of linear operators, which was presented as a system of differential equations representing the desired mathematical model.

Keywords: *fuel injection system in a diesel engine, the combustion process, a random function, identification, correlation function, operator, mathematical model.*

УДК 629.44

НОВЫЙ ПОДХОД К ОЧИСТКЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Матяш Юрий Иванович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел: +7-906-918-56-17.
E-mail: vvh@omgups.ru

Кирпиченко Евгений Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел: +7-906-918-56-17.
E-mail: vvh@omgups.ru

Клюка Владислав Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел: +7-913-628-78-87.
E-mail: vvh@omgups.ru

В статье рассмотрены существующие способы решения проблемы по повышению степени очистки сжатого воздуха в тормозной системе подвижного состава. Представлены недостатки данных способов и предложен принципиально новый способ очистки сжатого воздуха, ранее не применяемый на подвижном составе.

Ключевые слова: *тормозное оборудование, сжатый воздух, конденсат, винтовой компрессор.*

A NEW APPROACH TO CLEAN AIR FOR RAILWAY

Matyash Jury Ivanovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35. Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sei. Tech., the professor of the departament «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: +7-906-918-56-17.
E-mail: vvh@omgups.ru

Kirpichenko Evgeniy Mikhailovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35. Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Teacher of the department «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: +7-950-334-53-67.
E-mail KirpichenkoEM@omgups.ru

Klyuka Vladislav Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35. Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., senior lecturer, head of the department «Railway cars and car enterprise», OSTU.
Phone: +7-913-628-78-87.
E-mail: vvh@omgups.ru

The article considers the existing methods for solving problems to improve the purification of compressed air in the brake system of the rolling stock. Presents the disadvantages of these methods and proposed a fundamentally new method of purification of compressed air, not previously used on rolling stock.

Keywords: *brake equipment, compressed air, condensate, screw compressor*

УДК 629.424.3:621.436

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ УЗЛОВ ТЕПЛОВОЗОВ

Овчаренко Сергей Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, ректор университета, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Балагин Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Балагин Дмитрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

В статье рассмотрены этапы реализации комплексной системы бесконтактного теплового контроля основных узлов и систем тепловозов. Представлены разработанные методики оценки технического состояния секций холодильников, электрических машин и топливной аппаратуры высокого давления тепловозов с использованием тепловизионного метода контроля.

Ключевые слова: *термограмма, топливная аппаратура, математическая модель, дизель, тепловизионный контроль, топливный трубопровод высокого давления, топливный насос высокого давления, форсунка, цилиндр, тяговый электродвигатель, система охлаждения тепловоза.*

IMPLEMENTATION OF INTEGRATED THERMAL CONTROL CONTACTLESS KNOTS DIESEL LOCOMOTIVES

Ovcharenko Sergey Mikhailovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., rector, head of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Balagin Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Balagin Dmitry Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

In article stages realization of complex systems non-contact thermal control of the main knots and systems locomotives are considered. The developed techniques of an assessment technical conditions sections refrigerators, electrical machines and the fuel equipment of a high pressure locomotives with use thermovision control method are presented.

Keywords: *heat pattern, fuel equipment, mathematical model, diesel engine, thermovision control, pipeline of a high pressure, fuel pump of a high pressure, fuel injectors, cylinder, traction electric motor, locomotive cooling system.*

УДК 629.47:658.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛЯ

Овчаренко Сергей Михайлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, ректор университета, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Минаков Виталий Анатольевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.

Ведрученко Виктор Родионович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Приводятся результаты исследования возможности применения искусственных нейронных сетей в задачах идентификации предотказного состояния дизеля типа Д49 по результатам спектрального анализа картерного масла. Полученные результаты необходимы для разработки программного обеспечения по оценке степени износа деталей тепловозного дизеля по результатам спектрального анализа моторного масла.

Ключевые слова: *тепловозный дизель, искусственные нейронные сети, обучение нейронной сети, диагностирование дизеля, спектральный анализ моторного масла.*

USING NEURAL NETWORKS TO THE PROBLEM IDENTIFICATION OF CATASTROPHIC WEAR PARTS OF DIESEL

Ovcharenko Sergey Mikhailovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., rector, head of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Minakov Vitaliy Anatolievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Vedruchenko Viktor Rodionovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Power system», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.
E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

The results of the study the possibility of using artificial neural networks in identification problems failure status diesel D49, the results of spectral analysis of the crankcase oil. The obtained results are needed to develop software for evaluation of the degree of wear and tear as a result of the diesel locomotive spectral analysis of engine oil.

Keywords: *diesel, artificial neural networks, neural network training, diagnosing of diesel, spectral analysis of engine oil.*

УДК 621.336

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОКОПРИЕМНИКА ЗА СЧЕТ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Смердин Александр Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: 8-913-141-15-00.

Чепурко Алексей Евгеньевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.
Тел.: 8-951-413-44-35.
E-mail: Alexey.Chep@inbox.ru

Горюнов Владимир Николаевич
Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.
Тел.: (3812) 21-75-24.

В статье приведены усовершенствованные методики аэродинамических натурных и лабораторных испытаний токоприемника. Предложено считать плотность среды ее интегральным показателем. Рассматривается влияние плотности воздуха на приведенные виды испытаний и обоснована необходимость внесения поправок при анализе результатов для корректной обработки полученных данных.

Ключевые слова: *токоприемник, рациональная аэродинамическая характеристика, аэродинамическое устройство, аэродинамическая подъемная сила, профиль крыла, натурные и лабораторные испытания, аэродинамическая труба, угол атаки, тензометрия.*

IMPROVEMENT OF TECHNIQUES FOR LABORATORY AND FIELD TESTS OF THE SUSCEPTOR BY CONTROLLING THE DENSITY OF THE AIR ENVIRONMENT

Smerdin Alexander Nikolayevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Power supply of rail transport», OSTU.
Tel.: 8-913-141-15-00.

Chepurko Alexey Evgenyevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Lecturer of of the department «Life safety and ecology», OSTU.
Tel.: 8-951-413-44-35.
E-mail: Alexey.Chep@inbox.ru

Goryunov Vladimir Nikolaevich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., Professor of of the department «Power supply of industrial enterprises», OmSTU.
Tel.: (3812) 21-75-24.

In article advanced techniques of laboratory and natural aerodynamic researches of a pantograph and its elements are considered. It is specified that carrying out modeling by means of computational fluid dynamics methods doesn't allow to replace pilot studies completely now. Need of correction of the received results because of influence of change of density of the environment during experimental studies locates. Density of the environment is offered to consider it as an integrated indicator. The main methods of measurement of density of the environment are given, their advantages and shortcomings are listed. The conclusion is drawn that it is most expedient to use ultrasonic measuring instruments to control of an indicator of density. The principle of operation of these measuring instruments is described. The example of use of an advanced technique of laboratory researches of the aerodynamic device for regulation of force of contact pressing of a current collector is given.

Researches were conducted for device wing angles of rotation from zero to fifteen degrees with an interval of five degrees. After that aerodynamic characteristics of a wing of the aerodynamic device were under construction and comparison to results of modeling was carried out by means of a computing hydraulic gas dynamics them.

The results received in OSTU laboratory well were correlated with results of computational fluid dynamics modeling that testified to adequacy of the applied technique.

Keywords: *pantograph, rational aerodynamic characteristics, aerodynamic devices, aerodynamic lift, the wing profile, field testing, laboratory testing, wind tunnel, angle of attack, strain measurement.*

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Харламов Виктор Васильевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.

Мельк Владимир Оскарович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.

Попов Денис Игоревич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Литвинов Артем Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Преподаватель кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: artyom_hawk@mail.ru

В статье рассмотрена программа проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей подвижного состава железных дорог. На основании рекомендаций государственных стандартов по испытаниям асинхронных двигателей составлен алгоритм проведения испытаний, учитывающий предложенные схемные решения и функциональные возможности основных средств испытаний.

Ключевые слова: *алгоритм, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, испытания, метод взаимной нагрузки, подвижной состав железных дорог.*

ALGORITHM FOR TESTING ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS RAILWAY ROLLING STOCK ON APPLYING THE METHOD MUTUAL LOAD

Harlamov Victor Vasilyevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Doctor of technical science, professor, the head of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.

Melk Vladimir Oskarovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Railway rolling stock», OSTU.

Popov Denis Igorevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Litvinov Artyom Valerievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Instructor of department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: artyom_hawk@mail.ru

The article shows the relevance of applying the method of mutual test load of asynchronous traction motors of railway rolling stock. On the basis of the recommendations of existing standards in testing of asynchronous motors is made up of a sequence of acceptance testing of asynchronous traction motors provided in the form of an algorithm. In line with the scheme proposed for testing procedures on the use of the basic equipment of the circuit. The analysis of the main types of tests, the comparison of the classical means for testing the functionality of the inverters eliminated the *need for additional DC sources in determining the resistance of the stator windings, additional brake and step-down transformers during short circuit and experience to carry out simultaneous testing of two induction motors increased speed at the stand of mutual load.*

Keywords: *algorithm, frequency converter, induction motor, testing, method mutual load, railway rolling stock.*

УДК 62.752.2, 621.8.02, 531.831

ВИРТУАЛЬНЫЙ РЫЧАЖНЫЙ МЕХАНИЗМ: ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КАК ФОРМА ПРОЯВЛЕНИЯ РЫЧАЖНЫХ СВЯЗЕЙ

Хоменко Андрей Павлович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор, ректор ИрГУПСа.
Тел.: (3952) 63-83-11.
E-mail: homenko@irgups.ru

Елисеев Сергей Викторович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор, г. н. с. – директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 59-84-28.
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Каимов Евгений Витальевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Младший научный сотрудник Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-26.
E-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

Рассматриваются особенности взаимодействия элементов динамического гасителя колебаний в виде твердого тела с двумя степенями свободы. Показано, что динамический гаситель интерпретируется в структуре механической колебательной системы с объектом защиты как дополнительная отрицательная связь, которая может быть представлена обобщенной пружиной.

Динамическая жесткость обобщенной пружины зависит от частоты внешнего возмущения и определяет проявления динамических свойств, характерных для режимов динамического гашения колебаний. Обобщенная пружина обладает свойствами квазипружины, что создает возможности различных преобразований структуры системы.

Предлагается введение понятия обобщенного передаточного отношения рычажных связей, возникающих между координатами движения элементов динамического гасителя. Формы передаточных отношений рычажных связей находятся во взаимно однозначном соответствии с системой выбранных координат. Передаточные отношения рычажных связей позволяют детализировать формы взаимных движений элементов системы.

Разработан метод построения математических моделей для оценки рычажных свойств движений механических колебательных систем.

Ключевые слова: *рычажные связи, передаточные отношения, обобщенная пружина, динамическое гашение, квазипружина.*

VIRTUAL LEVER MECHANISM: DYNAMIC DAMPING OF OSCILLATIONS AS FORM OF MANIFESTATION OF LEVER TIES

Khomenko Andrey Pavlovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Doc. Tech. Sci, the full professor, rector of ISTU.
Phone: (3952) 63-83-11.
E-mail: homenko@irgups.ru

Eliseev Sergey Viktorovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Doc. Tech. Sci, the full professor, chief researcher – director of Scientific-educational center of modern technology, system analysis and modeling, ISTU.
Phone: (3952) 59-84-28.
E-mail: eliseev_s@inbox.ru

Kaimov Evgeniy Vitalevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia.
Junior researcher of Scientific-educational center of modern technology, system analysis and modeling, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-26.
E-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

Features of interaction of elements of a dynamic quencher of oscillations in the form of a rigid body with two degrees of freedom are considered. It is shown that the dynamic quencher is interpreted in structure of mechanical oscillatory system with object of protection as additional negative tie which can be presented by the generalized spring.

Dynamic ruggedness of the generalized spring depends on the frequency of external indignation and defines manifestations of dynamic properties, characteristic for the modes of dynamic blanking out of oscillations. The generalized spring possesses properties of a quasi-spring that creates possibilities of various transformations of structure of system.

Introduction of concept of the generalized transmission ratio of the lever ties arising between coordinates of the movement of elements of a dynamic quencher is offered. Forms of the transfer relations of lever ties are in univocity with system of the chosen coordinates. The transfer relations of lever ties allow to detail forms of mutual movements of elements of system.

The method of creation of mathematical models is developed for an assessment of lever properties of movements of mechanical oscillatory systems.

Keywords: *lever ties, the transfer relations, the generalized spring, dynamic damping, quasi-spring.*

УДК 629.424.3:621.436

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ ТЕПЛОВОЗОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Четвергов Виталий Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: ChetvergovVA@omgups.ru

Балагин Дмитрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

Балагин Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-17.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

В статье с позиций единого жизненного цикла тепловозов, от создания до списания, рассмотрены основные факторы, влияющие на уровень их надежности. Значение этих факторов даст возможность связать математической моделью потенциальный уровень надежности, закладываемый в техническом задании на проектирование новых тепловозов, с фактической надежностью в конкретных условиях эксплуатации и на этой основе определить оптимальные параметры системы технического обслуживания и ремонта, соответствующие максимальной эффективности использования тепловоза за весь жизненный цикл.

Ключевые слова: *надежность, дизель, жизненный цикл, сохраняемость, безотказность, долговечность и ремонтопригодность, отказ, функциональные факторы.*

THE ANALYSIS OF THE FACTORS DEFINING RELIABILITY OF LOCOMOTIVES AT VARIOUS STAGES LIFES CYCLE

Chetvergov Vitaly Alekseeivich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.

Balagin Dmitry Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginDV@omgups.ru

Balagin Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport Univirsity (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph.D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-72.
E-mail: BalaginOV@omgups.ru

In article from positions of uniform life cycle locomotives, from creation before write-off, the major factors influencing the level of their reliability are considered. Value of these factors will give the chance to connect mathematical model the potential level of reliability put in the specifica-

tion on design of new locomotives with the actual reliability in specific conditions of operation and on this basis to determine the optimum parameters systems of maintenance and repair corresponding to maximum efficiency of use locomotives for all life cycle.

Keywords: *reliability, diesel engine, life cycle, keeping, non-failure operation, durability and maintainability, refusal, functional factors.*

УДК 621.311.001.57

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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) 44-23-57.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Комяков Александр Анатольевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: tskom@mail.ru

Эрбес Виктор Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: erbes-viktor@mail.ru

В данной статье рассматривается алгоритм, позволяющий оценить эффективность внедрения энергосберегающих устройств и технологий в системах тягового и нетягового электроснабжения. С помощью методов математической статистики произведена оценка эффективности внедрения энергосберегающего устройства в системе тягового электроснабжения. В соответствии с алгоритмом представлены результаты расчетов.

Ключевые слова: *методы математической статистики, энергетическая эффективность, энергосберегающие устройства и технологии, тест Чоу, критерий типа омега-квадрат (Лемана – Роземблатта).*

APPROBATION OF ALGORITHM EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ENERGY-SAVING DEVICES AND TECHNOLOGIES IN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Gatelyuk Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the departament «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812) 44-23-57.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

Komyakov Alexandr Anatolievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the departament «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: tskom@mail.ru

Erbes Viktor Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the departament «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: erbes-viktor@mail.ru

This paper describes an algorithm evaluating the effectiveness of energy-saving devices and technologies, based on the methods of mathematical statistics. Diagram presented in the article. It can be applied in the traction system and power supply without traction. Approbation of the algorithm is executed in the traction power supply system. The developed algorithm includes five stages:

1. Stage calculate the required number of observations. The basis of this stage is to evaluate the dispersion and calculating on it the desired number of observations.

2. Stage of the collection and processing of data obtained before the implementation of energy-saving devices and technologies. Collection is carried out on of electricity consumption and factors influencing the process of electricity consumption. Processing includes the calculation of the correlation matrix, the coefficients of determination and the parameters of the regression equation.

3. Stage of the collection and processing of data obtained after the implementation of energy-saving devices and technologies. Data collection is carried out according to the parameters selected in step 2 and the processing is done by the calculation of the parameters of the regression equation.

4. Stage of comparing the data before and after the introduction of energy saving devices and technologies. Comparison of the data obtained before and after the introduction of energy saving devices and technologies produced using the Chow test and nonparametric mathematical statistics such as omega-square (Lehmann-Rosenblatt).

5. Stage of calculating electric power saving. The calculation is made on the consumption of electricity obtained by the regression equation before the introduction of energy-saving devices or technology by substituting the values of the factor after implementation and actual consumption of electricity after the introduction of energy-saving devices or technology.

Approbation of the algorithm was successful.

Keywords: *methods of mathematical statistics, energy efficiency, energy-saving devices and technologies, the Chow test, criterion of omega-square (Lehmann-Rozemblatta).*

УДК 621.316.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА «АРМАТУРА – БЕТОН» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

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.

Авдеева Ксения Васильевна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, преподаватель 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.

Статья посвящена совершенствованию методов исследования опор контактной сети на предмет их коррозионного разрушения. В качестве исследуемого объекта используются бетонные образцы, изготовленные в заводских условиях в соответствии с технологией изготовления железобетонных опор контактной сети и позволяющие моделировать физические процессы, происходящие в реальных опорах.

В статье описан процесс изготовления лабораторных образцов железобетонных опор контактной сети. Выполнен анализ переходного процесса для схемы замещения бетонного образца. В результате получены формулы и разработана методология для расчета параметров границы раздела «арматура – бетон». Достоверность схемы замещения подтверждена путем построения теоретической зависимости тока от времени и сравнения ее с экспериментальной.

Ключевые слова: *коррозия, граница раздела, опоры контактной сети, поляризация, переходный процесс, лабораторные образцы*.

CALCULATING «STEEL – CONCRETE» INTERFACE REGION PARAMETERS WITH A HELP OF TRANSIENT PROCESS ANALYSIS

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.

Avdeeva Ksenia Vasilyevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., teacher of the departament «Information and communication systems and information security», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-23.

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.

The article is about defining corrosion state of overhead structures underground part. Specially designed concrete models are used for experiments and calculations. These models are made with the fabric technology of overhead structures creation.

«Steel – Concrete» interface region parameters are calculated with a help of transient process which situated when DC power supply is connected to the scheme. There is a formulas and a methodic for calculation needed parameters. In the end of the article theoretical curve is located. It exactly coincides with an experimental curve.

Keywords: *corrosion, interface region, overhead structures, railway, polarization, transient process, concrete models.*

УДК 621.311.4: 621.331

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Кузнецов Андрей Альбертович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.
E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Кузьменко Антон Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Инженер кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-88.
E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

В статье приведены результаты моделирования и натурного испытания прибора для дистанционного контроля изоляторов контактной сети железнодорожного транспорта. Рассмотрены основные причины пробоя изоляторов. Приведена статистика отказов изоляторов контактной сети. Участок контактной сети представлен в виде модели линии с распределенными параметрами. Для создания виртуальной модели устройства и линии была выбрана программа Multisim 12.0. Описана структурная схема прибора для дистанционного контроля изоляторов контактной сети. Представлена схема проведения эксперимента на участке контактной сети полигона ОмГУПСа. Выбрана форма диагностирующих импульсов для определения возможного места положения неисправного изолятора.

Ключевые слова: *контактная сеть, неисправный изолятор, длинная линия, моделирование, прямоугольный импульс, форма сигнала, прибор для диагностирования изоляции.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF SIMULATION RESULTS AND EXPERIMENTAL DATA DEVICE REMOTE DIAGNOSTICS INSULATOR CONTACT SYSTEMS

Kuznetsov Andrey Albertovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Tech. Sci., professor of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-88.
E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Kuzmenko Anton Yurievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Engineer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.
E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

The article presents results of modeling and full-scale testing of the device for remote diagnosis insulators catenary railway transport. The main causes of breakdown of insulators. Presents statistics of failure catenary insulators. The plot of the contact network is presented in the form of the line model with distributed parameters. To create a virtual model of the device and the line was selected program Multisim 12.0. Described by a block diagram of the device for remote monitoring catenary insulators. Shows the principle of operation of the device to control the catenary insulators. Present a scheme of the experiment at the site of contact network OSTU landfill. Parameters are calculated area of contact network. Chosen form of diagnosing pulses to determine the possible location of the faulty insulator.

Keywords: *contact network, a faulty insulator, long line, modeling, rectangular pulse waveform, device for the diagnosis of exclusion.*
УДК 621.315.65

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ 6 – 10 кВ

Несенюк Татьяна Анатольевна
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Аспирант, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.
E-mail: TNesenuk@mail.ru

Сергеев Борис Сергеевич
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины», УрГУПС.
E-mail: sergeew@uralmail.com

Сухогузов Александр Петрович
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
Кандидат технических наук, профессор, руководитель секции «Основы электротехники» кафедры « Электрические машины», УрГУПС.
E-mail: ASuhoguzov@toe.usurt.ru

В связи с негативными последствиями, вызываемыми неисправностью изоляторов в воздушных линиях 6 – 10 кВ, предложено контролировать состояние штыревого изолятора устройством, срабатывающим при прохождении через изолятор тока пробоя. Описана работа устройства для определения дефектов изоляторов. Приведены схемы замещения подключения сигнального устройства к изолятору ВЛ. Рассмотрены основные процессы, происходящие в системе «изолятор – опора ВЛ» в исправном состоянии и при наличии дефекта с учетом геометрической емкости, тока абсорбции, тока сквозной проводимости, включенных в составляющие поверхностного тока пробоя.

Ключевые слова: *изолятор, воздушная линия электропередачи напряжением 6 – 10 кВ, ток замыкания на землю, диагностика, устройство для определения неисправного изолятора.*

DETERMINATION PROCEDURE OF THE CONDITION OF THE INSULATORS USED IN AN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE OF 6 – 10 KV

Nesenyuk Tatiana Anatolievna
Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, Russia.
Graduate student, senior lecturer of the department «Electrical transport», USURT.
E-mail: TNesenuk@mail.ru

Sergeev Boris Sergeevich
Ural State University of Railway Transport (USURT).
66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, Russia.
Dr. Tech. Sci., professor of the department «Electric machines», USURT.
E-mail: sergeew@uralmail.com

Sukhoguzov Alexander Petrovich
Ural State University of Railway Transport (USURT).
66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, Russia.
Ph. D., head of section «Fundamentals of electrical engineering», of the department «Electric machines», USURT.
E-mail: ASuhoguzov@toe.usurt.ru

In connection with the negative effects caused by the fault of the insulators used in an overhead power transmission line of 6 – 10 kV, it is suggested controlling a condition of a post insulator by the device that responses when breakdown current goes through an insulator. The work of the device for identification of insulators defects is described. Equivalent circuits of an alarm device connection with an insulator in an overhead power transmission line are given. The basic processes, that occur in a system of a supporting insulator of an overhead power transmission line in a serviceable condition and if there is a defect in view of geometric capacitance, absorption current, steady leakage current and surface current of breakdown, are considered.

Keywords: *insulator, overhead power transmission line of 6 – 10 kV, ground fault current, diagnostics, device for identification of insulators defects.*
УДК 621.317

ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Петров Владимир Владимирович
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: PetrovVV@omgups.ru

Когут Алексей Тарасович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: kogutat@gmail.com

Лаврухин Андрей Александрович
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: lavruhinaa@gmail.com

Выполнен анализ допустимого диапазона флюктуации фазы сигнала на входе цифрового измерительного устройства при исследовании фазовых соотношений в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта, характеризующихся высоким уровнем помех.

Ключевые слова: *фаза, измерение, нелинейность, диапазон, помехи, вероятность, мода, точность.*

APPLICATION OF THE NOISE-PROTECTION METHOD OF MEASUREMENT OF PHASE DISPLACEMENT IN THE TRACTIVE NETWORKS OF THE POWER SUPPLY OF RAIL TRANSPORT

Petrov Vladimir Vladimirovich
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: PetrovVV@omgups.ru

Kohut Alexey Tarasovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Automation and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: kogutat@gmail.com

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich
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: lavruhinaa@gmail.com

Is executed the analysis of the permissible range of the fluctuation of the phase of signal on the entrance of digital measuring device with a study of phase relationships in the tractive networks of the power supply of rail transport, characterized by high noise level.

Keywords: *phase, measurement, nonlinearity, range, noise, probability, mode, accuracy.*

УДК 625.12.033.38

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ТЕЛЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ОТСЫПАННОГО ИЗ ЛЕССОВИДНОЙ СУПЕСИ

Абдукаримов Абдувахоб Макамбаевич
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, ул. Адылходжаева, 1, Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство», ТашИИТ.

Тел.: (99871) 299-03-80.
E-mail: abdukarimov@tashiit.uz

Работа посвящена экспериментальному исследованию земляного полотна, отсыпанного из лессовидной супеси, а именно особенностям вибродинамического воздействия, возникающего при прохождении подвижного состава, установлению характера затухания колебаний, полученных аналитического выражения, которая может быть использована для оценки несущей способности земляного полотна к вибродинамической нагрузке.

Ключевые слова: *железнодорожный путь, земляное полотно, лессовидный грунт, колебательный процесс, амплитуда колебаний.*

STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF FLUCTUATIONS IN THE BODY OF THE SUBGRADE, FILLED FROM LOESS SANDY LOAM

Abdukarimov Abduvakhob Makambaevich
Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TIRTE).
1, Mirobad region, Adilkhodjaev str., Tashkent, 100167, Republik of Uzbekistan.
Ph. D., assistant of the department «The construction of railways, road and road facilities», TIRTE.
Phone: (99871) 299-03-80.
E-mail: abdukarimov@tashiit.uz

The work is devoted to experimental study of the roadbed, filled from loess-like sandy, namely, characteristics dynamic vibration impacts arising from the passage of rolling stock, to establish the nature of the damped oscillation, the analytical expressions that can be used to estimate the bearing capacity of the subgrade to the dynamic vibration load.

Keywords: *railway track, subgrade, loess soil sand, oscillation, the oscillation amplitude.*

УДК 625.172

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ ПО ТЕКУЩЕМУ СОДЕРЖАНИЮ ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВАГОНОВ-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Карпущенко Николай Иванович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.
Тел.: (383) 328-04-18.
E-mail: kni@stu.ru

Быстров Антон Викторович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории «Путеиспытательная», СГУПС.
E-mail: bystrovanton@ya.ru

Труханов Павел Станиславович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории «Путеиспытательная», СГУПС.
E-mail: gaiwer123@mail.ru

Представлены методика и результаты исследований информации, получаемой вагонами-путеизмерителями о состоянии рельсовой колеи, для планирования путевых работ по устранению неисправностей пути. Проанализированы виды, степени неисправностей по существующей методике их оценки, а также длина отступлений от норм содержания рельсовой колеи, что стало возможным при использовании последних версий программного обеспечения путеизмерителей системы КВЛ-П. Определены объем и очередность производства ремонтно-путевых работ: неотложных, первоочередных и плановых в зависимости от конструкции пути и времени года. Сделан вывод о работоспособности и действенности представленной методики.

Ключевые слова: *рельсовая колея, вагон-путеизмеритель, неотложные, первоочередные, плановые, ремонтно-путевые работы.*

TRACK MAINTENANCE PLANNING USING THE DATA OF TRACK MEASUREMENT CARS

Karpuschenko Nikolai Ivanovich
Siberian State Transport University (SSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Track and track facilities», SSTU.
Phone: (383) 328-04-18.
E-mail: kni@stu.ru

Bystrov Anton Viktorovich
Siberian State Transport University (SSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student, engineer of the research laboratory department «Track testing», SSTU.
E-mail: bystrovanton@ya.ru

Trukhanov Pavel Stanislavovich
Siberian State Transport University (SSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student, engineer of the research laboratory department «Track testing», SSTU.
E-mail: gaiwer123@mail.ru

The method and research results of information obtained by track management cars about the track state for planning track repair work to eliminate track defects have been shown. The defect types and their degrees measured by the relevant assessment method as well as the lengths of deviation from the rules of track maintenance have been analyzed. This was possible due to the latest versions of the software installed into track management cars of the КВЛ-П system. The scope and sequence of repair track work depending on their urgency, top-priority and schedule under structural and seasonal conditions has been determined. The conclusion concerning the efficiency of the presented method has been made.

Keywords: *track, track management car, urgent, top-priority, scheduled, track repair work.*

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 А4 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 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 лаконичен и четок, свободен 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 в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

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 А4 (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.

Редколлегия оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Редактор – Майорова Н. А.
Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.
Номер ISSN – 2220-4245.
Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.
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.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 19.12.2014.
Тираж 500 экз.