

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ N ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
В.А. Осипова

Редакционный совет:

М.П. Бадер, д.т.н., профессор
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент
Л.А. Герман, д.т.н., профессор
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор
В.В. Калугин, д.т.н., доцент
А.А. Ковалев, д.т.н.
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор
А.И. Попов, д.т.н., профессор
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

Выпускающий редактор:
О.А. Кожухова

Редакция:
140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томино,
ул. Гаршина, д. 11.

Тел./факс: (495) 500-40-20
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать: 15.02.2021 г.

Журнал издается в электронном виде.
Адрес сайта: eet-journal.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Чебоксаров А.Н.

Анализ методик расчета фактической емкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при различных температурах 2

Григорьев Н.П., Воприков А.В., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 6

Герман Л.А., Серебряков А.С., Карабанов А.А., Гончаренко В.П.

Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока 10

Нестеров С.А., Казаков Ю.Б., Филиппов В.А.

Расчет и анализ процессов в многополюсном электромеханическом магнитогеологическом демпфере 18

Никитин В.В., Васильев В.А., Чжао Тяньчжун

Бесконтактная передача энергии на экипажи высокоскоростного магнитолевитационного транспорта 23

Чавычалов М.В., Набоков А.Е., Зиновьева А.С.

Моделирование вентильно-индукторных электрических машин с сокращенным объемом начальной информации 27

Татуйко П.С., Федяева Г.А., Надточей А.Г., Княгинин Д.А.

Анализ гистерезиса выходной емкости моп-транзисторов резонансных преобразователей для транспортных систем 32

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Николаев П.А., Козловский В.Н., Подгорный А.С., Саксонов А.С.

Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей 36

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ

Рахматуллин С.С.

Оптимизация транспортировки грузов на примере применения электроники и электрооборудования в мультимодальных перевозках 42

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Вышков Ю.Д., Томилиן М.М.

Моделирование системы рекуперации энергии при торможении автомобиля с суперконденсатором 47

Анализ методик расчета фактической емкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при различных температурах

// ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE ACTUAL CAPACITY OF LEAD-ACID BATTERIES AT DIFFERENT TEMPERATURES //

Чебоксаров А.Н., к.т.н., доцент,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск

В статье выполнен анализ методик расчета фактической емкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при различных температурах. Выполненный анализ показал, что оценка технического состояния аккумуляторных батарей методами оперативного диагностирования должна применяться с обязательным учетом поправочных температурных коэффициентов по емкости, причем использование рас-

смотренных методик для этих целей нежелательно, так как приводит к значительным погрешностям при температурах ниже 0°C. В статье предложены возможные пути решения данной проблемы.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, диагностирование, емкость аккумуляторной батареи, методика расчета, температура.

The article analyzes the methods for calculating the actual capacity of lead-acid batteries at different temperatures. The performed analysis showed that the assessment of the technical condition of batteries by the methods of rapid diagnostics should be applied with the mandatory consideration of the correction temperature coefficients for capacity, and the use of the considered methods for this purpose is undesirable, since it leads to significant errors at temperatures below 0°C. The article suggests possible ways to solve this problem.

Keywords: battery, diagnostics, battery capacity, calculation method, temperature.

Основной показатель исправности аккумуляторной батареи – величина ее фактической емкости. Например, в Вооруженных силах Российской Федерации подлежат списанию стартерные аккумуляторные батареи после падения их фактической емкости на половину и ниже от номинальной [1]. Срок службы батарей, при их эксплуатации в климатических зонах, отличных от умеренной (базовой климатической зоны), уменьшается. Диагностирование аккумуляторных батарей осуществляется в соответствии с Руководством [2] посредством проведения контрольно-тренировочных циклов в десятичасовом режиме разряда. В свою очередь ГОСТ Р 53165–2008 [3] предписывает проводить испытания на определение фактической емкости в двадцати часовом режиме. В любом случае испытания на определение емкости требуют больших временных и энергетических затрат, наличия

дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала. В настоящее время усилия различных ученых направлены на создание методик оперативного диагностирования (экспресс-диагностирования) [4], которое может проводиться вне стационарных условий. Такие методики строятся на основе математической модели процесса разряда батареи или отдельного аккумулятора и позволяют рассчитать доступную емкость по изменению функции отклика на заданный тестовый сигнал. Очевидное преимущество таких методик – это независимость от стационарных условий и минимальное время, необходимое для качественной оценки технического состояния диагностируемых батарей, а кроме того, возможность прогнозировать их состояние.

В большей степени емкость аккумуляторных батарей зависит от коэффициента использования активных масс, плотности электролита и темпе-

ратуры. Также в работе [5] авторами показана зависимость емкости и от объема электролита. В рамках данной работы мы ограничимся лишь зависимостью емкости от температуры для новых батарей, приняв, что вышеуказанные зависимости определены.

В каждом случае технического диагностирования аккумуляторных батарей полученное значение емкости (доступная емкость) необходимо привести к температуре +20 или +25°C для стационарных батарей [6] и к +25°C для стартерных батарей. Далее под доступной будем понимать емкость, которой обладает батарея в текущий момент времени при фактической температуре. Термин «доступная емкость» в настоящее время не регламентирован имеющимися Государственными стандартами, но он встречается в технической литературе. Стоит также отметить, что фактическую емкость необходимо определять на полностью заряженной аккумуляторной батарее при

постоянной температуре $+25 \pm 2^\circ\text{C}$. При данной температуре будет соблюдаться равенство $C_{\text{факт}} = C_{\text{дост}}$ где $C_{\text{факт}}$ – фактическая емкость батареи, $C_{\text{дост}}$ – доступная емкость батареи. В остальных случаях будем оперировать расчетной фактической емкостью $C_{\text{факт}}^{\text{расч}} = k \cdot C_{\text{дост}}$ где k – коэффициент, учитывающий изменение емкости батареи в зависимости от температуры.

Зависимости емкостей герметизированных аккумуляторных батарей различного конструктивного исполнения с номинальной емкостью десятичасового разряда от 61 до 105 А·ч [7] в диапазоне температур от -20 до $+50^\circ\text{C}$ нелинейны. Разделив значение доступной емкости десятичасового разряда, измеренное при фактической температуре, на номинальную емкость десятичасового разряда, получим данные в удобной для дальнейшей работы форме (таблица 1).

Как видим, при температуре -20°C доступная емкость батареи, в зависимости от конструкции, составляет 60-70% от номинальной десятичасового разряда. Предположим, нам известна номинальная емкость десятичасового разряда аккумуляторной батареи, тогда зависимость емкости от температуры будет описываться некоторой функцией $C = f(t)$.

Как известно, внутреннее сопротивление является основной характеристикой, влияющей на емкость батарей и, в большей степени, зависит от температуры электролита. С ростом сопротивления разрядные токи и емкость уменьшаются, поэтому методики определения величины емкости, изложенные в источниках [2, 3, 5], предписывают в случае отличия конечной температуры батареи от той, что указана в них, рассчитать фактическую емкость с учетом температурной поправки.

Так, например, значение емкости стационарных аккумуляторных батарей, измеренное при температуре, отличной от $+25^\circ\text{C}$, необходимо скорректировать, применив следующую формулу:

$$C_{\text{факт}}^{\text{расч}} = \frac{C_{\text{дост}}}{1 + \alpha \cdot (t_k - 25)} \quad (1)$$

где $C_{\text{дост}}$ – значение емкости установленного режима разряда при

Таблица 1. Емкости аккумуляторных батарей в диапазоне температур от -20 до $+50^\circ\text{C}$

Модель аккумуляторной батареи	Отношение доступной емкости к номинальной $C_{\text{дост}}/C_{\text{ном}}$ десятичасового разряда аккумуляторных батарей при температурах, $^\circ\text{C}$							
	-20	-10	0	10	20	30	40	50
DT 1265	0,6	0,73	0,82	0,89	0,95	0,99	1,01	1,02
FT 12-90	0,69	0,78	0,86	0,92	0,98	1,03	1,08	1,12
DT 12100	0,6	0,73	0,82	0,9	0,95	0,98	1,01	1,02
DTM 12100 L	0,69	0,77	0,85	0,92	0,98	1,04	1,08	1,12
HRL 12-100	0,69	0,78	0,86	0,92	0,98	1,03	1,08	1,11
FTS 12-100X	0,7	0,78	0,9	0,96	1,01	1,04	1,06	1,07
HRL 12-470 W	0,69	0,78	0,86	0,92	0,98	1,03	1,08	1,12
$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{дост}}}{C_{\text{ном}}}$	0,67	0,76	0,85	0,92	0,98	1,02	1,06	1,08

температуре аккумуляторной батареи в конце разряда, отличной от $t = +25^\circ\text{C}$;

t_k – температура электролита аккумуляторной батареи в конце разряда;

α – температурный коэффициент, который определяется эмпирически и зависит от режима разряда (например, для десятичасового режима разряда C_{10} при $U_x = 1,8 \text{ В}$, $\alpha = 0,006$);

C_{10} – емкость батареи 10-часового разряда;

U_x – напряжение аккумуляторной батареи в конце разряда.

Справедливость формулы (1) ограничена диапазоном температур от $+18^\circ\text{C}$ до $+27^\circ\text{C}$.

Построим зависимость среднего значения емкости десятичасового разряда батарей различных конструкций от температуры (рис. 1, кривая 1). В этих же координатах построим зависимость рассчитанной по формуле (1) фактической емкости от температуры (кривая 2). В идеальных условиях после расчета фактической емкости с учетом температурной поправки по формуле (1) должно соблюдаться равенство

$$C_{\text{расч 1}}^{\text{факт}} = C_{\text{ном}}$$

Из рис. 1 видно, что равенство $C_{\text{расч 1}}^{\text{факт}} = C_{\text{ном}}$ выполняется при $t = +25^\circ\text{C}$. Если пренебречь погрешностью, то диапазон справедливости расчетов по формуле (1) может быть увеличен.

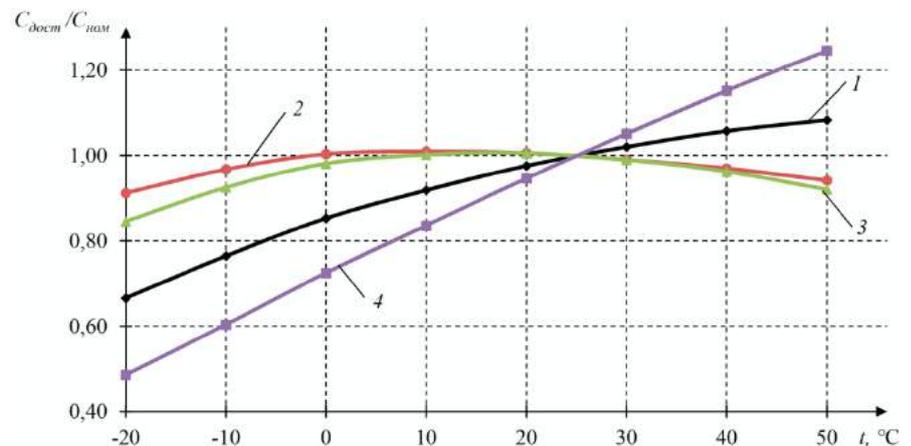


Рис. 1. Графики зависимостей емкостей аккумуляторных батарей различной конструкции от температуры: 1 – кривая зависимости среднего значения емкости десятичасового разряда аккумуляторных батарей от температуры; 2 – кривая зависимости рассчитанной по формуле (1) фактической емкости от температуры; 3 – кривая зависимости рассчитанной по формуле (2) фактической емкости от температуры; 4 – кривая зависимости рассчитанной по формуле (3) фактической емкости от температуры

Отметим, что в своих работах [8] авторы пользуются формулой 1 для приведения емкости стартерных батарей, в таком случае принимают $\alpha = 0,01$.

Несколько видоизмененная формула расчета фактической емкости в случае отличия температуры аккумуляторной батареи в конце разряда от $+25 \pm 2$ °C представлена в ГОСТ Р 53165–2008. Данная формула имеет вид:

$$C_{факт2}^{расч} = C_{дост} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_k - 25)) \quad (2)$$

Какие-либо указания в ГОСТ Р 53165–2008 о справедливости этой формулы в определенном температурном диапазоне отсутствуют. Указано лишь на возможность использования ее в случае отличия конечной температуры от $t = 25 \pm 2$ °C.

График зависимости фактической емкости аккумуляторной батареи, рассчитанной по формуле (2), представлен на рис. 1 (кривая 3).

В работе [9] авторы предлагают использовать линейную зависимость емкости в диапазоне температур от $+10$ до $+50$ °C. Данная формула имеет вид:

$$C_{факт3}^{расч} = C_{дост} \cdot (1 - \alpha \cdot (t_k - 25)) \quad (3)$$

График зависимости фактической емкости аккумуляторной батареи, рассчитанной по формуле (3), представлен на рис. 1 (кривая 4).

Выполним оценку абсолютной и относительной погрешностей, возникающих при расчетах фактической

емкости аккумуляторной батареи.

Абсолютную погрешность определим по следующей формуле:

$$\Delta = C_{факт}^{расч} - C_{ном} \quad (4)$$

Относительную погрешность определим по следующей формуле:

$$\delta = \frac{\Delta}{C_{ном}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Результаты расчетов погрешностей приведены в таблице 2.

Подводя итог, необходимо отметить, что применение рассмотренных формул (1), (2) и (3) для расчета фактической емкости аккумуляторной батареи с учетом поправочного температурного коэффициента справедливо лишь в очень узком диапазоне температур. Увеличение разности температур между конечным значением температуры t_k и температурой, установленной государственными стандартами, ведет к увеличению погрешности при расчете фактической емкости. Выбор той или иной формулы для приведения емкости также влияет на конечный результат. Выполненные расчеты фактических емкостей аккумуляторных батарей по формулам (1), (2) и (3) при $\alpha = 0,006$ показывают, что наибольшая точность достигается при применении формулы (1). В этом случае при температуре -20 °C относительная погрешность измерений составляет около 9%. Дальнейшее понижение температуры приводит к значительному росту указанной погрешности [10].

Оценка технического состояния

аккумуляторных батарей методами оперативного диагностирования при температурах ниже 0 °C должна применяться с обязательным учетом поправочных температурных коэффициентов по емкости, причем использование рассмотренных формул для этих целей нежелательно, а при температурах ниже -20 °C – неприемлемо. Также необходимо учитывать тот факт, что в зависимости от износа батареи характер рассмотренных зависимостей будет меняться, что в свою очередь повлияет на погрешности расчетов фактической емкости.

В связи с вышеизложенным возникает острая необходимость поиска путей решения данной проблемы. Наиболее простым решением является разделение температурного диапазона на несколько поддиапазонов, в каждом из которых при расчетах следует использовать свой температурный коэффициент.

Литература

1. Министерство обороны РФ. Приказы. О Нормах наработки (сроках службы) до ремонта и списания автомобильной техники, автомобильного имущества в Вооруженных Силах Российской Федерации и их применении: приказ министра обороны РФ от 16 июня 2016 года № 350.
2. Свинцовые стартерные аккумуляторные батареи: руководство [Текст]. – М.: Воениздат, 1983. – 170 с.
3. ГОСТ Р 53165–2008. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие

Таблица 2. Результаты расчетов погрешностей

t, °C	Оценка погрешностей приведенной емкости									
	$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{дост}}{C_{ном}}$	$C_{факт1}^{расч}$	$\Delta_1, \text{А}\cdot\text{ч}$	$\delta_1, \%$	$C_{факт2}^{расч}$	$\Delta_2, \text{А}\cdot\text{ч}$	$\delta_2, \%$	$C_{факт3}^{расч}$	$\Delta_3, \text{А}\cdot\text{ч}$	$\delta_3, \%$
-20	0,67	0,91	-0,09	-8,8	0,85	-0,15	-15,5	0,49	-0,51	-51,4
-10	0,76	0,97	-0,03	-3,3	0,92	-0,08	-7,5	0,60	-0,40	-39,6
0	0,85	1,00	0,00	0,3	0,98	-0,02	-1,9	0,72	-0,28	-27,5
10	0,92	1,01	0,01	0,9	1,00	0,00	0,1	0,84	-0,16	-16,4
20	0,98	1,01	0,01	0,6	1,00	0,00	0,5	0,95	-0,05	-5,4
30	1,02	0,99	-0,01	-1,0	0,99	-0,01	-1,1	1,05	0,05	5,1
40	1,06	0,97	-0,03	-3,0	0,96	-0,04	-3,8	1,15	0,15	15,2
50	1,08	0,94	-0,06	-5,8	0,92	-0,08	-8,0	1,25	0,25	24,5

технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009. – 33 с.

4. Алёшкин А.А. Метод оперативной диагностики доступной емкости свинцовых аккумуляторов (батарей) / А.А. Алёшкин, Ю.И. Бубнов, Е.Х. Протопопов, В.М. Ягнятинский // Электрохимическая энергетика. – 2013. – № 1. – С. 46-53.

5. Кочуров А.А. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышения эффективности способов их восстановления: монография / А.А. Кочуров, В.Ю. Гумелев, Н.П. Шевченко; под общ. ред. А.А. Кочурова. – Рязань: РВВДКУ. – 2012. – 252 с.

6. ГОСТ Р МЭК 60896–21–2013. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 35 с.

7. Официальный сайт производителя аккумуляторов батарей DELTA Battery [Электронный ресурс] URL: <http://www/delta-batt.com> (Дата обращения: 06.04.2021).

8. Ютт В.Ю. Электрооборудование автомобилей / В.Ю. Ютт. Учебник для ву-

зов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2006. – 440 с.

9. Варыпаев В.Н. Химические источники тока: Учеб. Пособие для хим.-технол. Спец. вузов / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасоян, В.А. Никольский; Под ред. В.Н. Варыпаева. – М.: Высш. шк. – 1990. – 240 с.

10. Гумелев В.Ю. Анализ применения различных методик для расчета фактической емкости свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при различных температурах / В.Ю. Гумелев, А.А. Постников // Автомобильная промышленность. – 2017. – №11. – С. 27 – 30.

Чебоксаров Алексей Николаевич

Родился в 1985 году. В 2007 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию (СибАДИ) по специальности «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (строительные, дорожные и коммунальные машины)». Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил диссертацию по теме

«Совершенствование технических средств диагностирования двигателей силовых установок и гидроагрегатов дорожно-строительных машин». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» СибАДИ. Имеет 33 научных труда, 4 патента.

Cheboksarov Alexey

Was born in 1985. In 2007 he graduated from The Siberian State Automobile and Highway Academy (SIBADI) with a degree in «Service of transport and technological machines and equipment (construction, road and utility machines)». Candidate of engineering sciences, associate professor. In 2011 he defended his thesis on the topic «Improving the technical means of diagnosing engines of power plants and hydraulic units of road-building machines». Has 12 years of working experience. At present he is an associate professor of «Car operation and repair» department at SIBADI. Has 33 scientific works, 4 patents.

Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ

// IMPROVEMENT OF POWER TRANSFORMERS OPERATION IN TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM 25 KV AC //

**Григорьев Н.П., к.т.н., профессор,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения, Хабаровск**

**Воприков А.В., к.т.н., доцент,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения, Хабаровск**

**Парфианович А.П., к.т.н., доцент,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения, Хабаровск**

**Трофимович П.Н., к.т.н.,
Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения, Хабаровск**

Статья посвящена вопросу повышения эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. В работе рассмотрены модели расчета термического износа и остаточного ресурса изоляции обмоток тягового трансформатора. В статье выполнен сравнительный анализ показаний

измерительных трансформаторов напряжения, подключенных к шинам РУ 25 кВ и обмоткам, соединенным с шинами при расчете износа и остаточного ресурса изоляции обмоток. Доказано повышение точности оценки износа изоляции обмоток по показаниям измерительных трансформаторов напряжения, подключенных к обмоткам силовых трансформаторов. Продление срока эксплуатации обмотки с наибольшим износом изоляции повышает срок эксплуатации трансформаторов в современных условиях. Определение прогнозного срока эксплуатации соответствующего трансформатора по термическому износу изоляции обмоток обеспечивает их мониторинг в работе.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговые подстанции переменного тока, силовые трансформаторы, срок эксплуатации, износ изоляции обмоток.

The article is devoted to the problem of efficiency power transformers operation in traction power supply system 25 kv AC. Models for calculating thermal depreciation and remaining life time of windings insulation of traction transformers are reviewed in article. The article analysis of the voltage measuring transformers indications. The voltage measuring transformers are connected to the switch gear bus-bars 25 kV and windings of power transformers for calculating thermal depreciation and remaining life time. Voltage measuring transformers indications connected to the windings of power transformers prove an increase in the accuracy of assessing the winding insulation. Extending the service life of the winding with the greatest insulation wear increases the service life of transformers in modern conditions. Determination of the predicted service life of the corresponding transformer based on thermal wear of the winding insulation ensures their monitoring in operation.

Keywords: traction power supply system, alternating current traction substations, power transformers, service life, depreciation of winding insulation.

Полигон электрической тяги на переменном токе 25 кВ России содержит значительное количество тяговых подстанций. Обычно на каждой подстанции установлено по два силовых трансформатора мощностью 25 или 40 МВ·А. Кроме преобразования электроэнергии трансформаторы выполняют функцию обеспечения ее качества в нормативных пределах посредством возможности регулирования напряжения распределительных устройств тяговых и районных потребителей.

Современная организация движения поездов направлена на по-

вышение эффективности работы железных дорог, в первую очередь, путем увеличения массы поездов. Внедряемые мероприятия, обеспечивающие рост объемов перевозок, приводят к увеличению токов электровозов и, соответственно, токов плеч питания тяговых подстанций, а также обмоток силовых трансформаторов, что повышает потери мощности.

Процесс износа изоляции обмоток силовых трансформаторов обусловлен тремя механизмами: пиролизом, гидролизом и окислением. Высокие температуры приводят к многократному увеличению интен-

сивности износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов. Особенно интенсивный износ изоляции обмоток тяговых трансформаторов наблюдается в «наиболее нагретых точках» (ННТ) [1, 2].

В настоящее время известны несколько моделей определения износа изоляции обмоток трансформаторов, основой которых является закон Аррениуса. Согласно закону, скорость химической реакции зависит от температуры, что можно показать в виде выражения [3]:

$$E = C \cdot e^{A + \frac{B}{T}}, (\text{лет}), \quad (1)$$

где C – 1 год; A и B – постоянные, устанавливаемые экспериментально для изучаемого материала (A – безразмерная величина, B – измеряется в Кельвинах); T – термодинамическая температура, К.

Для определения срока службы изоляции их обмоток при уровне рабочих температур (80-140 °C) применяется уравнение Монтзингера [1, 3]:

$$E = D \cdot e^{-p^g}, (\text{лет}), \quad (2)$$

где p – постоянная, °C-1; g – температура наиболее нагретой точки, °C; D – постоянная, лет.

В ряде стандартов (IEEE Std C57.91-1995(R2002) [3], IEC 60076-7 [4], ГОСТ 14209-85 [5] и др.) предложены методики определения термического износа изоляции.

Для определения температуры наиболее нагретой точки $\Theta_{\text{ннт}}$ обмоток применяют два метода измерений: косвенный и прямой. Наибольшее распространение получил косвенный метод измерения температуры, на основе датчика контроля температуры верхних слоев масла ($\Theta_{\text{ТО}}$), установленного в верхней части охладителя [3, 4, 6, 7].

Применяемые методы определения температуры наиболее нагретых точек ($\Theta_{\text{ннт}}$) и интенсивность износа (L) дают достаточно точный результат. В работе [6] приведен результат сравнения $\Theta_{\text{ннт}}$ обмоток силового трансформатора мощностью 107 МВА, полученный прямым и косвенным методами.

Классическая схема подключения силового трансформатора тяговой подстанции (тяговый трансформатор) системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока 25 кВ создает неравномерное распределение токов плеч в обмотках, а, следовательно, и различную интенсивность износа витковой изоляции обмоток [8]. Поэтому выработка полного ресурса изоляцией каждой обмотки силового трансформатора не выполняется. В конце срока эксплуатации тягового трансформатора по условию полного износа изоляции наиболее нагруженной обмотки остаточный ресурс изоляции менее нагруженных обмоток может быть значительным.

В работах [9 – 11] предложены технические мероприятия, позволя-

ющие снизить неравномерный износ изоляции обмоток за счет новых схем подключения с принятым [9] наименованием схем «а» и «б», алгоритм выбора схем [10], рациональное время перехода к новым схемам в процессе эксплуатации тягового трансформатора [11]. Для применения перечисленных выше мероприятий требуется определять износ изоляции обмоток в режиме реального времени.

С учетом особенностей работы тяговых трансформаторов в работе [12] предложены модели определения пофазного износа изоляции обмоток, позволяющие проводить анализ интенсивности и неравномерности износа.

В работах [12, 13] предложено при включении продольной емкостной компенсации в фидер обратного тока распределительного устройства тягового напряжения 25 кВ (РУ-25 кВ) дополнительно устанавливать измерительные трансформаторы напряжения в целях измерения напряжения тяговых обмоток.

Рассмотрим пример оценки точности расчета токов обмоток с целью определения термического износа и остаточного ресурса изоляции обмоток тягового трансформатора при включении в систему контроля измерительных трансформаторов напряжения, подключенных к шинам РУ 25 кВ (схема 1) и обмоткам тяговых трансформаторов (схема 2).

Тяговая подстанция питает левое плечо тяговой сети обмоткой «ах» напряжением фазы «А» и правое плечо обмоткой «сз» напряжением фазы «В». Схема распределения токов плеч в обмотках силового трансформатора приведена на рис. 1.

Токи в обмотках тягового напряжения выразим через токи плеч питания по формулам (3) – (5) при схеме 1:

$$\dot{I}_{by} = -\frac{1}{3} I_{\Pi} e^{j(240-\varphi_{\Pi})} - \frac{1}{3} I_{Л} e^{j(-\varphi_{Л})} \quad (3)$$

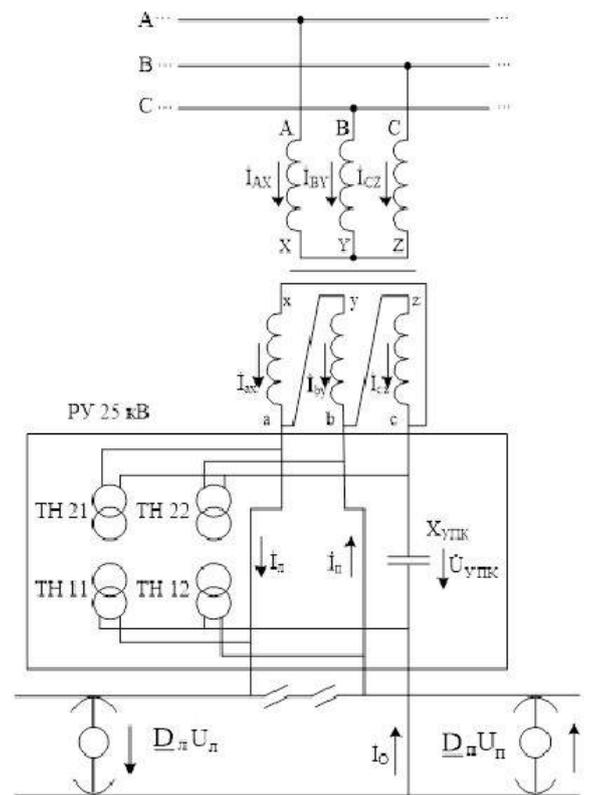


Рис. 1. Схема подключения измерительных трансформаторов напряжения

$$\dot{I}_{by} = -\frac{1}{3} I_{\Pi} e^{j(240-\varphi_{\Pi})} - \frac{1}{3} I_{Л} e^{j(-\varphi_{Л})} \quad (4)$$

$$\dot{I}_{cz} = \frac{2}{3} I_{\Pi} e^{j(240-\varphi_{\Pi})} - \frac{1}{3} I_{Л} e^{j(-\varphi_{Л})} \quad (5)$$

Падение напряжения на устройстве продольной компенсации (УПК) и ток в фидере обратного тока рассчитаем по формулам (6) – (7):

$$\Delta \dot{U}_{УПК} = -j X_{УПК} \dot{I}_O, \quad (6)$$

$$\dot{I}_O = (I_{Л} e^{-j(\varphi_{Л})} - I_{\Pi} e^{j(240-\varphi_{\Pi})}), \quad (7)$$

где $I_{Л}$, I_{Π} – токи плеч питания, $X_{УПК}$ – сопротивление УПК.

Определим напряжения обмоток тягового трансформатора, питающих плечи тяговых нагрузок:

$$\dot{U}'_{\Pi} = \dot{U}_{\Pi} + \Delta \dot{U}_{УПК}, \quad (8)$$

$$\dot{U}'_{Л} = \dot{U}_{Л} + \Delta \dot{U}_{УПК}, \quad (9)$$

Определим разность углов сдвига токов плеч ($\Delta \varphi_{\Pi}$, $\Delta \varphi_{Л}$) относительно напряжения обмоток тягового трансформатора и шин распределительного устройства соответственно левого и правого плеч:

$$\Delta \varphi_{Л} = \varphi'_{Л} - \varphi_{Л}, \quad (10)$$

$$\Delta \varphi_{\Pi} = \varphi'_{\Pi} - \varphi_{\Pi} \quad (11)$$

Таблица 1

$I_{л}, A$	$I_{п}, A$	$\varphi_{л}$	$\varphi_{п}$	$X_{УПК}, \text{Ом}$	$\dot{U}'_{л}, \text{кВ}$	$\dot{U}'_{п}, \text{кВ}$	$\varphi'_{л}$	$\varphi'_{п}$	$\Delta\varphi_{л}$	$\Delta\varphi_{п}$
1000	1000	37°	37°	2,5	24,8 e ^{-j10}	29 e ^{-j116,6}	27°	40,4°	-10°	3,4°
800	800	37°	37°	2,5	24,8 e ^{-j8}	28,3 e ^{-j117,2}	29°	39,8°	-8°	2,8°
700	700	37°	37°	2,5	24,8 e ^{-j7}	27,9 e ^{-j117,5}	30°	39,5°	-7°	2,5°

Таблица 2

$I_{л}, A$	$I_{п}, A$	$\varphi_{л}$	$\varphi_{п}$	\dot{I}_{ax}, A	\dot{I}_{by}, A	\dot{I}_{cz}, A
1000	1000	37°	37°	882 e ^{-j18}	334 e ^{j83}	882 e ^{-j176}
800	800	37°	37°	705 e ^{-j18}	266 e ^{j83}	706 e ^{-j176}
700	700	37°	37°	618 e ^{-j18}	234 e ^{j83}	617 e ^{-j176}

Таблица 3

$I_{л}, A$	$I_{п}, A$	$\varphi'_{л}$	$\varphi'_{п}$	\dot{I}'_{ax}, A	\dot{I}'_{by}, A	\dot{I}'_{cz}, A
1000	1000	27°	40,4°	928 e ^{-j12}	264 e ^{j86}	928 e ^{-j175}
800	800	29°	39,8°	735 e ^{-j13}	222 e ^{j86}	736 e ^{-j176}
700	700	30°	39,5°	641 e ^{-j14}	200 e ^{j85}	641 e ^{-j176}

где $\varphi_{л}, \varphi_{п}$ – углы сдвига токов плеч питания относительно напряжения шин, питающих соответственно левое и правое плечо; $\varphi'_{л}, \varphi'_{п}$ – углы сдвига токов плеч питания относительно напряжения обмоток тягового напряжения силового трансформатора, питающих соответственно левое и правое плечи.

Векторная диаграмма токов плеч питания, токов обмоток и напряжений плеч питания тяговых нагрузок представлена на рис.2. На диаграмме показаны напряжения обмоток, питающих плечи ($\dot{U}_{л}, \dot{U}_{п}$); напряжения плеч питания тяговых нагрузок ($\dot{U}'_{л}, \dot{U}'_{п}$); токи плеч питания ($\dot{I}_{л}, \dot{I}_{п}$); токи тяговых обмоток ($\dot{I}_{ax}, \dot{I}_{by}, \dot{I}_{cz}$) и падение напряжения на устройстве продольной компенсации в фидере обратного тока ($\Delta\dot{U}_{УПК}$).

Принимая значения токов плеч равными 700 – 1000 А, сопротивление устройств УПК 2,5 Ом, рассчитаем $\Delta\varphi_{п}, \Delta\varphi_{л}$. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Рассчитаем токи в обмотках тягового напряжения по формулам (3) – (5) при значениях углов сдвига токов плеч питания относительно напряжения шин (схема 1), питающих соответственно левое и правое плечо, равных 37 эл. градусов. Результаты представлены в таблице 2.

Рассчитаем токи в обмотках тягового напряжения по формулам (3) – (5) при значениях углов сдвига токов плеч питания относительно напряжения обмоток тягового напряжения силового трансформатора, питающих соответственно левое и правое плечо, полученных по формулам (10) – (11). Результаты расчета представлены в таблице 3.

Потери мощности на сопротивлениях обмоток силового трансформатора определяются произведением сопротивления на квадрат тока. Рассчитаем погрешность при определении потерь мощности по результатам измеренных значений токов в обмотке «i» по схемам измерения 1 и 2 по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{I_i^2 - I_i'^2}{I_i^2} \cdot 100\%$$

Погрешность расчета потерь мощности в обмотках *ax* (ΔP_{ax}), *by* (ΔP_{by}) и *cz* (ΔP_{cz}) силового трансформатора приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчета погрешностей

Токи плеч, А	$\Delta P_{ax}, \%$	$\Delta P_{by}, \%$	$\Delta P_{cz}, \%$
1000	9,67	37,5	9,67
800	8,00	30,3	8,00
700	7,04	26,9	7,35

Выводы

1. Продление срока эксплуатации обмотки с наибольшим износом изоляции повышает срок эксплуатации трансформаторов в современных условиях организации движения поездов.

2. При определении токов в обмотках тягового напряжения необходимо учитывать показания измерительных трансформаторов напряжения, подключенных к обмоткам тяговых трансформаторов.

3. В целях повышения точности расчетов термического износа и остаточного ресурса изоляции обмоток силовых трансформаторов

необходимо определять токи в обмотках тягового напряжения при значениях углов сдвига токов плеч питания относительно напряжения обмоток силовых трансформаторов.

Литература

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
2. Васин В. П. Оценки выработанного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов / В. П. Васин, А. П. Долин // Электро. – 2009. – № 2. – С. 37–41.
3. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Guide for loading mineral-oil-immersed transformers: IEEE standard C57.91:1995 (Институт инженеров электротехники и электроники) – 1995. – 65 pages.
4. Norme international standard. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7 (Международная Электротехническая Комиссия) – Geneva, Switzerland, 2005. – 122 pages.
5. Государственный стандарт. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки: ГОСТ 14209-85: утв. и введен в действие постановлением Гос. Ком. СССР по стандартам от 31 января 1985 г. №236.
6. Jean-Noël Bérubé Recent development in transformer winding temperature determination / Jean-Noël Bérubé, Jacques Aubin W. McDermid and et al. // Weidmann-ACTI's Fifth Annual Technical Conference – November 2006 – Albuquerque, NM.
7. Алексеев Б. А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии: библио-

отечка энергетика приложение к журналу «Энергетики»; Вып. 1 (133) / Б. А. Алексеев – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 88 с.

8. Григорьев Н. П. Ресурсосбережение тяговых трансформаторов подстанций схемой подключения к тяговой сети переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск: ООО Типография Иркут, 2014. – № 3 – С. 190–194.

9. Способ подключения тяговых трансформаторов в системе переменного тока 25 кВ: пат. 2540685 Рос. Федерация: МПК В60М 3/02, H02J 3/00 (2006.01) / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ДВГУПС – № 2013135890/11: заявл. 30.07.2013; опубл. 10.02.2015.

10. Григорьев Н. П. Выбор схем подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков // Вест. Ростовского гос. ун-та путей сообщ. – Ростов-на-Дону: D&V, 2014. – № 4 – С. 90–97.

11. Григорьев Н. П. Повышение ресурса обмоток тяговых трансформаторов подстанций переменного тока 25 кВ выбором схем питания тяговой сети / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, А. П. Парфианович // Наука и техника транспорта – Москва: ИИО ИМУ РОАТ МГУПС, 2015. – № 1 – С. 109–113.

12. Воприков А.В. Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока: дис. канд. техн. наук: защищена 09.02.2017; утв. 14.10.2016 / Воприков Антон Владимирович. – Хабаровск, 2017. – 122 с.

13. Тяговая подстанция переменного тока: пат. 2694889 Рос. Федерация: МПК H02B 5/00 (2006.01) В60М 3/00 (2006.01) H02J 3/00 (2006.01) / Н. П. Григорьев, А. П. Парфианович, П.Н. Трофимович; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ДВГУПС – № 2018114580: заявл. 19.04.2018; опубл. 18.07.2019.

Григорьев Николай Потапович

Родился в 1949 году. В 1977 году окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта (ХабИИЖТ) по специаль-

ности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук, доцент. В 1985 году защитил диссертацию по теме «Методы снижения транзита мощности по тяговой сети переменного тока». Опыт работы – 52 года. В настоящее время работает профессором кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС). Имеет 43 научные публикации, 15 патентов на изобретение, 6 учебников, 9 учебных пособий.

Grigoriev Nikolai

Was born in 1949. In 1977 graduated from Khabarovsk Institute of Railway Engineers (KhabIRE) with a «Railway engineer-electrician degree». Candidate of engineering sciences, assistant professor. In 1985 defended his thesis on «Methods of transit power reducing on AC current electric traction network». Has 52-year working experience. At present he is a professor at «Electric power supply systems» department at Far Eastern State Transport University (FESTU). Has 43 scientific publications, 15 patents of invention, 6 training manuals, 9 tutorials.

Парфианович Арсений Петрович

Родился в 1988 году. В 2012 году окончил Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железных дорог». Кандидат технических наук. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС). Имеет 12 научных публикаций, 4 патента на изобретение.

Parfianovich Arsenii

Was born in 1988. In 2012 graduated from Far Eastern State Transport University with a degree in «Power supply of railways». Has Ph.D in engineering sciences. In 2018 defended his thesis on «25 kV AC current traction power system efficiency improvement». Has 5-year working experience. At present he is

a senior lecturer at the «Electric power supply» department at Far Eastern State Transport University (FESTU). Has 12 scientific publications, 4 patents of invention.

Трофимович Полина Николаевна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила Дальневосточный государственный университет путей сообщения по специальности «Электроснабжение железных дорог». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС). Имеет 7 научных публикаций.

Trofimovich Polina

Was born in 1983. In 2005 graduated from the Far Eastern State Transport University with a degree in «Railways power supply». Has 13-year working experience. At present she is a senior lecturer at the «Electrical engineering, electronics and electro mechanics» department at Far Eastern State Transport University (FESTU). Has 7 scientific publications.

Воприков Антон Владимирович

В 2012 году окончил Электроэнергетический институт Дальневосточного государственного университета путей сообщения, квалификация «Инженер путей сообщений». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения». В 2017 году защитил диссертацию по теме «Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока». Работает в ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Voprikov Anton Vladimirovich

In 2012 graduated from the Electric Power Institute of the Far Eastern State Transport University, «Railway engineer». Ph.D. in Engineering Science, «Energy power supply system» department Assistant Professor. In 2017 defended the dissertation, the subject is «The increase of the efficiency of the operation of the power transformers of the traction substations of the AC railways». He works at Far Eastern State Transport University.

Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока

// THE ADJUSTABLE SETTING OF THE TRANSVERSE CAPACITIVE COMPENSATION IN THE AC TRACTION NETWORK //

**Герман Л.А., д.т.н., профессор,
Филиал Самарского
государственного университета
путей сообщения,
Нижний Новгород**

**Серебряков А. С., д.т.н., профессор,
Филиал Самарского
государственного университета
путей сообщения,
Нижний Новгород**

**Карабанов А.А.,
ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»,
Санкт-Петербург**

**Гончаренко В.П., к.т.н.,
ст. науч. сотр.,
ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»,
Санкт-Петербург**

В настоящее время для повышения пропускной способности на постах секционирования тяговой сети устанавливают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ), которые имеют недостатки: повышенные потери мощности и завышенную стоимость. Целью

данной статьи является задача усовершенствования установки СГРМ, а именно снижение потери мощности в системе тягового электроснабжения с одновременным снижением капитальных затрат на установку. С этой целью уменьшают мощность регулируемой СГРМ, а изъятую мощность заменяют на параллельно установленную нерегулируемую установку емкостной компенсации и фильтрации (ФКУ) такой же мощности с резонансными фильтрами на 150 Гц или на 150 и 250 Гц током $I_{фку}$, образуя комплексную систему регулируемой установки компенсации и фильтрации (РФКУ). Измеряют напряжения на тяговых шинах подстанций и поста секционирования и, в зависимости от потерь напряжения до поста секционирования, реализуют режимы «стабилизации напряжения» или «минимума потерь мощности» в тяговой сети.

Ключевые слова: пропускная способность, поперечная компенсация реактивной мощности, переключаемая фильтрокомпенсирующая установка.

Currently, for the purpose of increasing throughput of railways, electrified with 25 kV AC, there are static VAR generators (SVGs) installed in the catenary section points. Such SVGs have several flaws, such as increased power loss and higher cost price. The purpose of this article is the task of SVG enhancement, such as decreasing power losses in the traction network, as well as reducing its cost price. To achieve this, the power of the adjustable SVG is decreased by a certain value, and instead an unregulated filtering and compensating device is installed of the same power value, with resonance filters for 150 Hz and 250 Hz frequencies, thus forming a complex adjustable compensation and filtration system. The voltage at the substation and the catenary section points are measured, and depending of the voltage loss, several operation modes, such as «voltage stabilization» or «power loss minimization», are possible.

Keywords: Railway throughput, VAR compensation, switchable compensation and filtration system.

Существующие регулируемые установки поперечной емкостной компенсации и их недостатки

Для повышения пропускной способности железной дороги с 2015 г. в тяговой сети на постах секционирования стали устанавливать однофазные статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) на базе СТАТКОМА [1,2]. СГРМ выполнен по схеме преобразователя напряжения на основе биполярных IGBT-транзисторов (SVG) (рис.1). Основой его схемного построения является импульсный четырехквadrатный преобразователь 4q-S. Он реализует функции как автономного инвертора напряжения, так и выпрямителя в зависимости от направления потока электрической энергии и представляет собой многоуровневый инвертор из последовательно соединенных модулей H-мостов с конденсаторами $C_1 - C_n$. Устройство можно рассматривать как управляемый источник тока. СГРМ способен генерировать реактивную мощность как емкостного, так и индуктивного характера.

Полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей H-мостов. Каждое от-

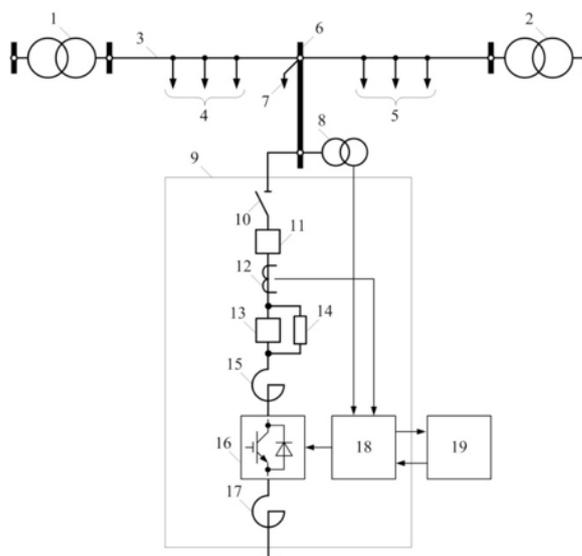


Рис. 1. Схема установки СГРМ на посту секционирования

дельное выходное напряжение модуля получается с использованием ШИМ модуляции со сдвигом фазы коммутации для каждого моста. СГРМ выполняет функции компенсации реактивной мощности, стабилизации напряжения в точке его подключения, а также мощного активного фильтра. В последнем случае для фильтрации гармоник мощность СГРМ следует увеличить на 30-35%. В СГРМ входит силовое оборудование: главный выключатель QF1 с трансформатором тока ТА, разъединители QS1 и QS2, демпфирующий резистор QF2 и реакторы L_1 и L_2 . Номинальная мощность СГРМ составляет 10, 15 и 20 Мвар. При этом гальваническая развязка цепей управления в устройствах обеспечивается оптоволоконными линиями связи.

На рис.1, где пост секционирования с СГРМ подключен к тяговой сети, питающейся от двух тяговых подстанций 1 и 2, введены следующие обозначения: 1 и 2 – левая и правая тяговые подстанции рассматриваемой межподстанционной зоны соответственно; 3 – тяговая сеть; 4 и 5 – тяговые нагрузки правого и левого участков рассматриваемой зоны относительно поста секционирования (ПС); 6 – шины ПС; 7 – фиктивная нагрузка ПС, полученная разнесением тяговой нагрузки между подстанциями и ПС; 8 – измерительный трансформатор напряжения на ПС; 9 – генератор СГРМ; 10 – разъединитель в цепи устройства СГРМ; 11 – вакуумный выключатель в цепи устройства СГРМ; 12 – измерительный трансформатор тока в цепи устройства СГРМ; 13 – вакуумный выключатель, шунтированный резистором 13 в цепи СГРМ; 14 – токоограничивающий резистор заряда; 15 – вводной реактор в цепи устройства СГРМ; 16 – блок силовых ячеек в цепи устройства СГРМ; 17 – выходной реактор в цепи устройства СГРМ; 18 – шкаф управления устройством СГРМ; 19 – расчетный блок.

В шкаф управления устройством СГРМ 18, связанный с расчетным устройством 19, заведены токовые цепи от трансформатора тока ТА 12 и цепи напряжения от трансформатора напряжения сети TV 8.

В настоящее время на сети отечественных железных дорог работают два типа регулируемых ФКУ: плавно регулируемая (статический генератор реактивной мощности – СГРМ) с использованием оборудования китайского производства на Зап-Сибирской ж.д., Северной ж.д., Горьковской ж.д. и Переключаемая ФКУ отечественной разработки на Горьковской ж.д. [5].

Алгоритм систем управления устройствами компенсации реализован на сравнении измеренного значения напряжения с заданным напряжением $U_{зад}$. По измеренному напряжению и заданной характеристике в контроллере рассчитывается и генерируется реактивный ток, необходимый для стабилизации напряжения на уровне $U_{зад}$.

Основные преимущества СГРМ по отношению к традиционному применяемым фильтрокомпенсирующим установкам ФКУ на базе косинусных конденсаторов:

1) Мощность ФКУ пропорциональна квадрату напряжения в точке их установки, поэтому их мощность резко падает в моменты снижения напряжения в контактной сети, когда нагрузка на сеть возрастает.

СГРМ при понижении напряжения обеспечивает плавное регулирование генерируемой реактивной мощности в сеть, чем обеспечивает стабилизацию напряжения в пределах своих номинальных значений мощности.

2) При отсутствии тяговой нагрузки генерация реактивной мощности ФКУ резко возрастает, когда в этом нет необходимости, что приводит к дополнительному росту напряжения – зачастую свыше 29кВ. СГРМ позволяет полностью исключить случаи превышения уровня напряжения в контактной сети максимального допустимого значения.

Отметим недостатки СГРМ: во-первых, повышенные потери мощности преобразователя и повышенный расход электроэнергии на собственные нужды СГРМ, что соизмеримо с экономией электроэнергии в тяговой сети от компенсации реактивной мощности, и, во-вторых, высокая стоимость установки (порядка 150 млн. руб при мощности 10 Мвар). О плавно регулируемых

СГРМ сказано: «... Их основное преимущество – эффективное снижение потерь напряжения и мощности в контактной сети, позволяющее решать вопросы усиления пропускной способности участка железной дороги за счет сокращения интервалов попутного следования поездов. Перспектива использования СГРМ – расшивка узких мест по уровню напряжения на ряде участков Восточного полигона **без строительства тяговых подстанций, что на порядок снижает инвестиционные затраты**» [4]. Применение плавно регулируемых СГРМ вполне возможно в ситуациях, когда рассматривается альтернативный вариант, – строительство тяговой подстанции, но пока такие варианты не встречались, хотя известны случаи консольного питания контактной сети с необходимостью установки СГРМ в конце консоли.

СГРМ успешно работают на постах секционирования железных дорог России и подтверждают возможность повышения их пропускной способности. Однако в связи с недостатками СГРМ предложен альтернативный вариант регулируемой КУ – Переключаемая ФКУ, которая уже более 7 лет надежно работает на консольном участке тяговой сети 2х25кВ Сергач – Шумерля и повышает пропускную способность межподстанционной зоны с вынужденным односторонним питанием тяговой сети [5]. Она решила проблему существенного снижения стоимости регулируемой установки, однако не в полной мере выполнила задачу эффективного снижения потерь мощности в тяговой сети.

В связи с указанным в статье предложен вариант усовершенствования схемы регулируемой компенсации СГРМ, основанный на подобном параллельном включении нерегулируемой конденсаторной батареи с реактором, регулируемом тиристорами (ТРГ), однако здесь вместо реактора с ТРГ включается СГРМ пониженной мощности [3].

Новая схема регулируемой установки поперечной емкостной компенсации РФКУ

Цель усовершенствования СГРМ – уменьшить потери мощности в си-

стеме тягового электроснабжения. Этого можно достигнуть путем включения параллельно регулируемой установки СГРМ уменьшенной мощности традиционной нерегулируемой установки поперечной емкостной компенсации ФКУ (рис.2) с одним общим выключателем Q1 и одним пусковым резистором R с шунтирующим выключателем Q2. Назовем эту регулируемую установку, преобразованную на базе СГРМ уменьшенной мощности и ФКУ, – РФКУ. Если для шунтирования резистора применяют коммутационный аппарат на 10кВ, то резистор R с высокой стороны 27,5кВ переносится на потенциал рельса (рис.2).

В связи с тем, что СГРМ может генерировать реактивную мощность емкостного и индуктивного характера, то целесообразно включить в работу половину мощности СГРМ $Q_M/2$ (где Q_M – полная генерируемая емкостная реактивная мощность, необходимая по расчету), а вторую половину мощности включить в традиционную нерегулируемую компенсацию ФКУ (рис.2), например, если $Q_M = 10$ Мвар, то мощности СГРМ и ФКУ – по 5Мвар. В этом случае при необходимой генерации РФКУ емкостной мощности до $Q_M/2$ следует в СГРМ формировать индуктивную мощность, а при необходимости – генерации РФКУ

емкостной мощности более $Q_M/2$ – в СГРМ следует формировать емкостную мощность. На рис.2 предложено установить в СГРМ один реактор L3 вместо двух по типовому варианту СГРМ (рис.1)

Планировка РФКУ по рис.2 на посту секционирования, включающая СГРМ и ФКУ, представлена на рис.3, где обозначены все элементы установки. Два реактора в СГРМ (см.рис.1) заменены на один реактор L3.

Преобразователь СГРМ состоит из 9 шкафов, в каждом из которых по 7 модулей IGBT, в каждом модуле 4 силовых транзистора (соединены два последовательно и два параллельно). Следовательно, всего последовательно соединены $9 \times 7 = 63$ модуля IGBT и $7 \times 9 \times 2 = 126$ силовых транзисторов.

Если функцию фильтрации гармоник передать от СГРМ к ФКУ, то для компенсации реактивной мощности следует учесть в СГРМ только мощность 6,5 Мвар (при исходной мощности СГРМ -10Мвар), и тогда остается уменьшенная мощность СГРМ 6,5/2 Мвар, и к ней добавляется нерегулируемая КУ такой же мощности. В результате для компенсации реактивной мощности остается та же мощность – 6,5Мвар, а фильтрацию гармоник осуществляет ФКУ.

Так как СГРМ генерирует и емкостную, и индуктивную мощность, то покажем график изменения мощности РФКУ при изменении тока нагрузки, приходящего на пост секционирования: на участке тяговой нагрузки от 0 до I3 (рис.4). На участке от 0 до I1 СГРМ будет регулируемой индуктивной мощностью компенсировать нерегулируемую мощность ФКУ, и в целом РФКУ будет генерировать емкостную мощность от 0 до $Q_M/2$. На участке тока I1-I2 СГРМ работает на холостом ходу и ФКУ генерирует мощность $Q_M/2$. И, наконец, на участке I2-I3 СГРМ генерирует емкостную мощность, и происходят генерации РФКУ емкостной мощности от $Q_M/2$ до Q_M .

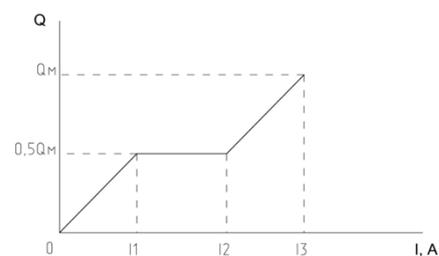


Рис.4. Изменение генерируемой мощности РФКУ

Снижение несинусоидальности в тяговой сети

Как правило, в качестве ФКУ включают фильтр на 150Гц (ФКУ₁₅₀) с последовательно соединенными реактором с индуктивностью L1 и конденсаторной батареей с емкостью C1. Однако при необходимости компенсировать и гармонику тока 250 Гц параллельно фильтру на 150Гц включают фильтр на 250Гц (рис.2). Оценим степень снижения коэффициента синусоидальности с помощью нерегулируемых ФКУ фильтров на 150Гц и при совместном включении фильтров на 150 и 250 Гц. Расчеты показали, что если установлена ФКУ с резонансным фильтром на 150Гц, то коэффициент искажения синусоиды кривой тока снижается в 2,5 раза (а коэффициент снижения искажения кривой напряжения – в 1,5 раза), а при ФКУ с двумя резонансными фильтрами на 150 и 250 Гц – снижение коэффициента несинусоидальности тока в 4,5 раза (а по напряжению в 3 раза). Указанное свидетельствует о существенном снижении несинусоидальности

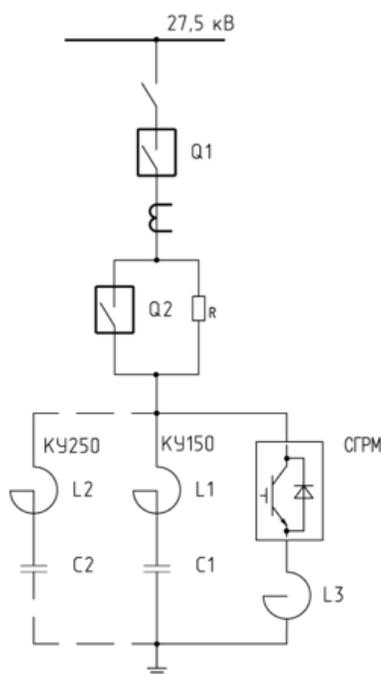


Рис.2. Новая схема регулируемой РФКУ на базе СГРМ и ФКУ

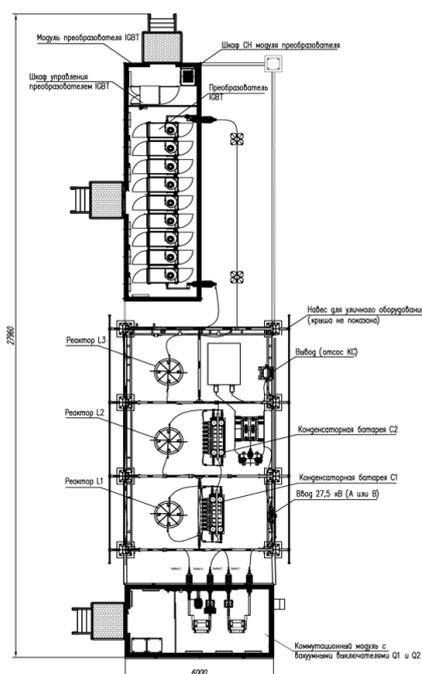


Рис.3. Планировка оборудования РФКУ

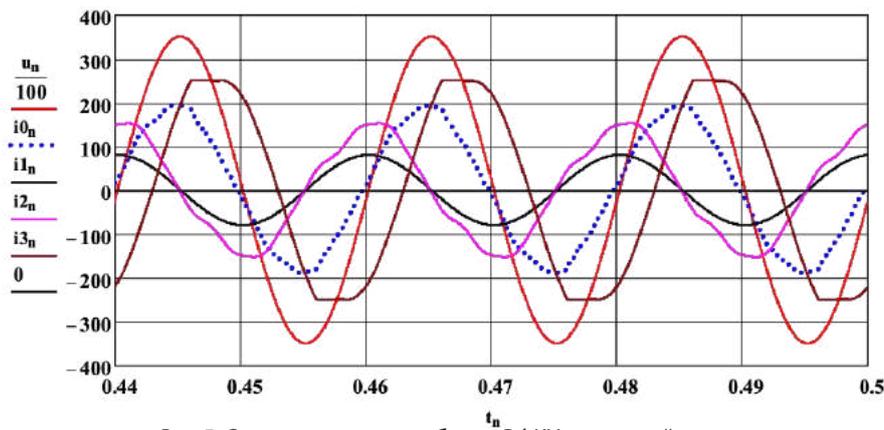


Рис.5. Осциллограмма работы РФКУ в тяговой сети

с помощью ФКУ. В точке включения фильтров гармоника напряжения 150 и 250 Гц снижаются до нуля. Важно отметить, что при СГРМ для компенсации действия гармоник они генерируются в противофазе и в ряде случаев в точке подключения СГРМ гармоники увеличиваются по сравнению с отсутствием СГРМ, что негативно сказывается на работу устройств железнодорожной автоматики рельсовых цепей (СЦБ).

Таким образом, при включении нерегулируемой ФКУ появилась возможность передать ей функцию снижения высших гармоник от СГРМ, что позволит снизить мощность последней. Здесь нужно учесть, что если в конкретной ситуации появится необходимость снизить определенную гармонику, кроме 150 и 250 Гц, то тогда нужно прибегнуть к СГРМ.

Эксплуатация СГРМ свидетельствует о том, что перед включением СГРМ (РФКУ) следует измерить (расчитать) гармоники в месте включения и на основании этих данных решать вопрос о необходимости компенсации высших гармонических. Как указано, например, для мощности СГРМ в 10 Мвар нет необходимости увеличения ее мощности на 30-35% для фильтрации гармоник, а оставшуюся мощность в 6,5Мвар можно уменьшить в два раза, то есть довести мощность СГРМ до 3,25Мвар. В итоге существующую мощность СГРМ 10Мвар снижаем до 6,5 Мвар, и далее с 6,5Мвар уменьшается до 3,25 Мвар при той же заданной общей генерируемой мощности РФКУ для компенсации реактивной мощности, то есть в итоге мощность СГРМ по рассматриваемому предложению уменьшается в $10 / 3,25 = 3$ раза.

Для примера покажем осциллограмму РКУ с нерегулируемой КУ на 150Гц (рис.5) на модели СГРМ, подключенную к посту секционирования с электровозом (ток i_{3n}). Напряжение источника питания (то есть тяговой подстанции) u_n дано в масштабе 1/100, генерируемый емкостной ток первой гармоники СГРМ – i_{1n} , ток нерегулируемой ФКУ с током первой и третьей гармоники – i_{2n} и суммарный емкостной ток ввода подстанции – i_{0n} практически в фазе с напряжением подстанции. Амплитуды токов: СГРМ – 80А, ФКУ – 150А, РКУ – 200А. Как видно, осциллограмма представляет измерение в мгновенной схеме, когда РКУ практически полностью компенсирует реактивную мощность тяговой нагрузки, приходящую к посту секционирования.

Снижение потерь мощности в РФКУ

Известно, что в преобразователях СТАТКОМ с силовыми транзисторами всегда повышенные потери мощности, превосходящие во много раз потери мощности в конденсаторных источниках реактивной мощности [6]. Рассмотрим более подробно потери мощности в СГРМ, которые определяются потерями в преобразователе и в собственных нуждах. В существующих схемах типовых вариантов СГРМ включены последовательно 63 силовых модулей Н-мостов, в каждом из которых по два последовательно включенных транзистора, на котором напряжение в прямом направлении равно не менее 2 В. Поэтому на транзисторах в прямом направлении будет $63 \times 2 \times 2 = 252$ В и, считая номинальный ток СГРМ 400-600А, потери мощности в

СГРМ составят $252 (400 - 600) 10^{-3} = (100 - 151) \text{кВт}$.

Кроме того, четыре мощных вентилятора для обдува транзисторов потребляют 45кВт. Итак, общие потери мощности составят 145....196кВт, что соизмеримо с потерями мощности в тяговой сети переменного тока. Расчеты подтверждают, во-первых, известное мнение по работе СГРМ, что общие потери мощности в тяговой сети с СГРМ на посту секционирования увеличиваются, и, во-вторых, указывают на существенный эффект по снижению потерь мощности при снижении мощности СГРМ (а следовательно, и генерируемого тока СГРМ). Следует учесть сопутствующий положительный эффект при снижении мощности СГРМ и соответственно при уменьшении потерь мощности – в уменьшении числа постоянно работающих вентиляторов.

Расчет номинальной мощности регулируемой установки

Для соблюдения требований энергосистемы по компенсации реактивной мощности мощность установки рассчитывается по известной формуле «разности тангенсов» [1]. Для повышения напряжения в тяговых сетях до нормированных значений установлены правила определения мощности установки компенсации. И наконец, для регулируемых установок компенсации, предназначенных для повышения пропускной способности, предлагается следующая формула расчета мощности [5]. Номинальная мощность РФКУ равна

$$Q_{\text{рфку}} = (U_{\text{ж}} - U_{\text{ф,мин}})U_{\text{рфку}}/X_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ф,мин}}$ – минимальное напряжение на токоприемнике тяжеловесного поезда; $U_{\text{ж}}$ – желаемое напряжение на токоприемнике тяжеловесного поезда, по опыту работы его устанавливают более 25кВ; $U_{\text{рфку}}$ – номинальное напряжение РФКУ; $X_{\text{вх}}$ – входное индуктивное сопротивление до точки включения РФКУ.

Исходные данные для расчета мощности РФКУ определяются следующим образом: $U_{\text{рфку}} = 27,5 \text{кВ}$, сопротивление $X_{\text{вх}}$ определяется для конкретного участка, если РКУ включается на посту секционирования,

то сопротивление рассчитывается с учетом питания от двух смежных подстанций, в частности, для системы 25кВ это сопротивление обычно равно 6 – 8 Ом. Если РФКУ включается на консольном участке тяговой сети, то $X_{вх} = 14 - 16 \text{ Ом}$.

Теперь о напряжении Уж. При повышении напряжения растут скорости движения поездов, что и наблюдается при установке РФКУ на посту секционирования. Совершенно ясно, что для увеличения напряжения на посту секционирования увеличивается мощность и, соответственно, стоимость РФКУ. Однако, при увеличении напряжения свыше номинального 25кВ резко возрастает потребляемая реактивная мощность электроподвижного состава. Кроме того, при повышенных напряжениях 27–28кВ, как правило, увеличиваются периоды перекомпенсации реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным потерям мощности. На наш взгляд, следовало бы на каждом участке, где планируется повышение пропускной способности, произвести расчеты всех затрат при формировании уровня напряжения РКУ 26, 27, 28кВ, после чего откорректировать мощности РКУ. По опыту работы СГРМ на Зап-Сибирской, Северной и Горьковской жд. принятый уровень напряжения 27кВ (Северная) и 28кВ (Горьковская), по всей видимости, близок к оптимальному, хотя проведенные расчеты для реальных участков показали целесообразность установить напряжение для повышения пропускной способности на уровне 27кВ [5].

Что касается напряжения Уф.мин, то его целесообразно определять по программе КОРТЭС для токоприемника тяжеловесного состава.

Итак, определили мощность РФКУ – $Q_{рфку}$. Дадим еще некоторое уточнение мощности СГРМ в РФКУ: предлагается определять ее по следующему выражению:

$$Q_{сгрм} = (0,45 - 0,5) Q_{рфку} \quad (2)$$

и, соответственно, мощность нерегулируемой ФКУ равна

$$Q_{фку} = (0,5 - 0,55) Q_{рфку} \quad (3)$$

Таким образом, мощность СГРМ будет составлять 81 – 100% от мощ-

ности нерегулируемой ФКУ, то есть меньше мощности нерегулируемой ФКУ до 19%. В частности, например, если, как было указано, $Q_{рфку} = 6,5 \text{ Мвар}$, то мощность ФКУ – 3,5Мвар, а мощность СГРМ = 3 Мвар. Это значит, что при суммарной первоначальной мощности установки 10Мвар мощность СГРМ уменьшается в $10/3 = 3,3$ раза по сравнению с существующим вариантом, и, следовательно, уменьшается стоимость установки и потери мощности в ней.

Алгоритм комплексного регулирования мощности РФКУ для повышения пропускной способности и снижения потерь мощности в тяговой сети

Для повышения эффективности тягового электроснабжения при установке поперечной емкостной компенсации на посту секционирования требуется одновременно решить две задачи: повысить пропускную способность межподстанционной зоны и уменьшить потери мощности в системе тягового электроснабжения.

Существующая установка СГРМ настроена на стабилизацию напряжения на шинах поста секционирования, и по опыту работы СГРМ на дорогах переменного тока уровень стабилизации составляет 27 – 28кВ. При этом СГРМ успешно решает задачу повышения пропускной способности, но, как указано выше, повышает общие потери мощности в системе тягового электроснабжения. Рассмотрим причины недостаточного снижения потерь мощности в тяговой сети. В существующем алгоритме управления генерируемым током СГРМ основано на расчетном напряжении холостого хода питающих подстанций (обычно 27 – 28кВ). Однако на сегодня нет метода определения этого напряжения, которое постоянно меняется на каждой подстанции в зависимости от режима питающей энергосистемы и от положения переключателей РПН трансформаторов. Это напряжение холостого хода обычно указывается интуитивно. Поэтому сегодня в правильном определении значения генерируемого емкостного тока СГРМ нет никакой уверенности. В связи с указанным можно понять,

что по заявлению эксплуатационного персонала на некоторых тяговых подстанциях с СГРМ в тяговой сети в определенные периоды наблюдаются пониженные значения коэффициента реактивной мощности (менее 0,3 – 0,2) тяговой нагрузки, то есть можно предположить, что в эти периоды существует перекомпенсация реактивной мощности, что негативно сказывается на потери мощности.

Итак, анализ показывает, что повышенные потери мощности в тяговой сети с СГРМ определяются двумя причинами:

- повышенными потерями мощности в СГРМ в модулях с транзисторами и необходимостью в дополнительной мощности на их вентиляцию;
- недостаточно эффективным снижением потери мощности в тяговой сети в связи с недостатками схемы управления СГРМ, и, в частности, в существующей схеме управления недостаточно корректно определяется постоянно изменяющаяся реактивная мощность тяговой нагрузки, приходящаяся на пост секционирования.

Поэтому для определения генерируемого емкостного тока РФКУ для компенсации реактивной мощности и снижения потерь электроэнергии в тяговой сети предлагается следующий алгоритм (рис. 6):

1. пост секционирования с РФКУ и смежные подстанции оборудуются системой телеуправления и телеизмерения;
2. уменьшают мощность регулируемой СГРМ, а изъятую мощность заменяют на параллельно установленную нерегулируемую установку емкостной компенсации и фильтрации (ФКУ) такой же мощности с резонансными фильтрами на 150Гц или на 150 и 250 Гц с током $I_{ку}$, образуя комплексную систему регулируемой компенсации и фильтрации (РФКУ);
3. формируют два режима регулирования РФКУ: режим «стабилизации напряжения» на посту секционирования или режим «минимума потерь мощности» в тяговой сети. Для этого:
 - измеряют напряжение на вводах 27,5кВ смежных тяговых под-

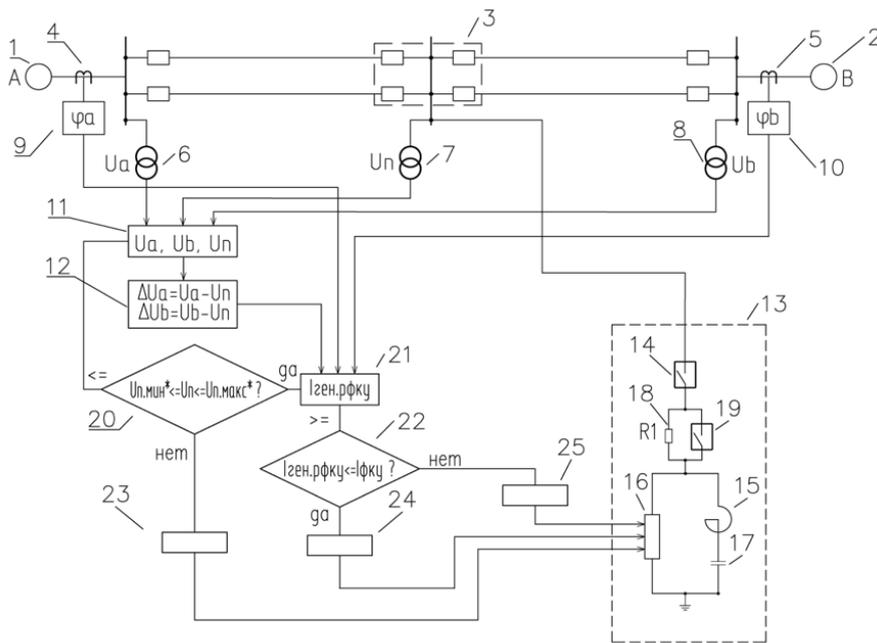


Рис.6. Схема управления РФКУ

станций и поста секционирования, а также фазы токов тяговой нагрузки φ_a и φ_b на вводах тяговых подстанций и определяют потери напряжения до поста секционирования ΔU_A и ΔU_B , и их реактивные значения, как разность напряжений подстанций и поста секционирования с учетом фазовых углов тока нагрузки;

– если уровень напряжения на посту секционирования U_n меньше установленного значения $U_{n, \text{мин}}^*$ или больше максимального значения $U_{n, \text{макс}}^*$, то устанавливается на РФКУ режим «стабилизации напряжения» на уровне $U_{\text{зад}}^*$,

– а если напряжение на посту секционирования находится в пределах $U_{n, \text{мин}}^* \leq U_n \leq U_{n, \text{макс}}^*$, то на РФКУ устанавливается режим «минимума потерь мощности» с расчетом тока генерации РФКУ по суммарной реактивной потере напряжения и по входному индуктивному сопротивлению поста секционирования $X_{вх}$

$$I_{\text{ген.рфку}} = (\Delta U_A \sin \varphi_a + \Delta U_B \sin \varphi_b) / X_{вх}, \quad (4)$$

– и если $I_{\text{ген.рфку}} \geq I_{\text{фку}}$ то СГРМ регулирует емкостной ток:

$$I_{\text{ген.сгрм}} = I_{\text{ген.рфку}} - I_{\text{фку}}, \quad (5)$$

– а если $I_{\text{ген.рфку}} < I_{\text{фку}}$ то СГРМ регулирует индуктивный ток

$$I_{\text{ген.сгрм}} = I_{\text{фку}} - I_{\text{ген.рфку}} \quad (6)$$

Переход на предлагаемую схему РФКУ (рис.6) с уменьшенной мощностью СГРМ и предлагаемый алгоритм управления СГРМ позволяет решить поставленные задачи путем комплексного регулирования мощности РФКУ, что показано на рис.5, где введены следующие обозначения: 1 и 2 – тяговые подстанции А и В; 3 – пост секционирования; 4 и 5 – трансформаторы тока вводов; 6, 7, 8 – трансформаторы напряжения шин 27,5 кВ; 9, 10 – блоки определения коэффициента реактивной мощности тяговых подстанций А и В; 11 – узел приема информации напряжений тяговых подстанций и поста секционирования; 12 – блок расчета потерь напряжения до поста секционирования; 13 – комплексная регулируемая установка РФКУ; 14 – выключатель РФКУ; 15, 17 – реактор и конденсаторная батарея нерегулируемой установки поперечной емкостной компенсации; 16 – статический генератор реактивной мощности СГРМ; 18 – пусковой резистор; 19 – шунтирующий выключатель пускового резистора; 20 – расчетный блок оценки напряжения поста секционирования; 21 – расчетный блок тока, отнесенного к посту секционирования; 22 – расчетный блок оценки реактивного тока РФКУ; 23 – блок установления режима СГРМ «стабилизация» и регулирование емкостного тока; 24 – блок установления режима СГРМ «минимум по-

терь мощности в тяговой сети» и регулирование индуктивного тока; 25 – блок установления режима СГРМ «минимум потерь мощности в тяговой сети» и регулирование емкостного тока;

Вся информация со смежных тяговых подстанций и поста секционирования поступает в расчетные блоки 12 и 21, и путем дальнейшей обработки по вышеприведенному алгоритму формируются команды управления 23, 24, 25 на управление СГРМ 16.

Оценим преимущества предлагаемой новой схемы РФКУ по сравнению с применяемой СГРМ на отечественных железных дорогах

Основная задача рассматриваемой разработки – уменьшить потери мощности РФКУ, снизить мощность СГРМ и при этом повысить технико-экономические показатели системы тягового электроснабжения.

1. Снижается мощность и стоимость РФКУ за счет замены части мощности регулируемой СГРМ для компенсации реактивной мощности на нерегулируемую ФКУ.

2. Дополнительно снижается мощность и стоимость СГРМ за счет изъятия у нее функции компенсации высших гармонических и передачи этой функции на нерегулируемую ФКУ.

3. Предложен алгоритм комплексного регулирования мощности РФКУ, в результате которого повышается пропускная способность на межподстанционной зоне и снижаются потери мощности в тяговой сети.

4. За счет снижения мощности регулируемой СГРМ по п.п.1 и 2 снижаются во столько раз и активные потери в СГРМ и на собственные нужды.

5. В связи с уменьшением времени действия режима стабилизации напряжения на посту секционирования уменьшается и время перекомпенсации реактивной мощности, следовательно, снижаются и потери мощности.

6. В связи с изъятием функции компенсации гармоник в СГРМ исключаются режимы повышенных значений гармоник в тяговой сети в точке подключения СГРМ, что повышает надежность работы СЦБ.

7. Особо значительный эффект предлагаемой разработки проявляется при усилении мощности установки компенсации на посту секционирования, когда к существующей ФКУ подключается СГРМ уменьшенной мощности по рассматриваемой разработке.

8. Так как СГРМ стабилизирует напряжение, то в результате повышается генерация мощности нерегулируемой ФКУ.

Технико-экономический эффект проявляется в следующем:

1. Снижается стоимость РКУ по сравнению с исходной мощностью СГРМ. В связи с начальными затратами на установки емкостной компенсации их стоимости изменяются не пропорционально мощностям. В частности, при сравнении стоимости РКУ и СГРМ в 10 Мвар и уменьшении мощности СГРМ в 3 раза стоимость РКУ уменьшается примерно в 1,5 – 2 раза.
2. Снижаются потери мощности в СГРМ в три раза (пропорционально снижению мощности) и снижается расход энергии собственных нужд СГРМ. Однако, так как следует учесть потери мощности в конденсаторах и фильтровом реакторе нерегулируемой КУ, то суммарно в РКУ потери мощности снижаются в два раза.
3. Снижаются потери мощности в тяговой сети в связи с более эффективным регулированием РККУ. Здесь даем приблизительную оценку снижения потерь мощности за счет снижения периодов перекомпенсации и уточнения значений тяговой нагрузки, приходящейся на пост секционирования: по сравнению с существующим режимом компенсации реактивной мощности ориентируемся на уменьшение потерь мощности на 10 – 20%.

Выводы

1. Показаны недостатки существующих регулируемых установок, в частности, в СГРМ отмечены повышенные значения потери мощности

в преобразователе и расход энергии на мощные вентиляторы, а также значительная стоимость капитальных затрат.

2. Предложена новая схема регулируемой установки РККУ, в которой удалось снизить мощность СГРМ в три раза и при этом сохранить требования по компенсации реактивной мощности и снижению уровня гармоник путем замены избыточной мощности СГРМ на традиционную нерегулируемую емкостную компенсацию с резонансными фильтрами.

3. Разработана схема управления РККУ, в которой для измерения приходящего тока тяговой нагрузки на пост секционирования предложено передавать информацию о режиме работы смежных тяговых подстанций на пост секционирования.

4. Предложенная схема РККУ в первую очередь востребована для постов секционирования тяговой сети систем 25 и 2х25кВ, где уже установлены нерегулируемые поперечные емкостные компенсации. Переоборудование установки компенсации в регулируемую РККУ позволит повысить пропускную способность межподстанционной зоны и снизить потери мощности в тяговой сети.

Литература

1. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения. Учебное пособие. М.: ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию, 2015. – 316 с.
2. Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Часть 2. Режимная автоматика. Н.Новгород, Филиал СамГУПС в Н.Новгороде. – 192с.
3. Карташов И.И., Тульский В.Н., Шаманов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии. М. Издательский дом МЭИ, 2006. – 320с.
4. Гапанович В.А. Результаты внедрения научно-технических работ и задачи на 2017г. // Железнодорожный транспорт, 2017. – с. 24-28.
5. Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Часть 2. // Режимная автома-

тика. Н.Новгород, филиал СамГУПС, 2020. – 192с.

6. Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог: монография. Княгинино: НГИЭУ, 2017. – 402с.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, член-корреспондент Российской академии транспорта. Автор более 390 научных трудов, 100 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

German Leonid

Was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a doctor of technical sciences, professor of the Department of «Engineering and technology of railway transport» branch of the Samara state University of Railways in Nizhny Novgorod. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 390 scientific works, 100 inventions and patents. He has 2 government awards.

Карабанов Артем Александрович

Родился в 1980 году. В 2002 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, направление «Электрический транс-

порт». Опыт работы – 21 год. В настоящее время работает директором проектно-конструкторского управления ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО».

Karabanov Artem Alexandrovich

Born in 1980. In 2002 graduated from the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, majoring in «Electric Transport». 21 years work experience. He works as the director of the design department of NIIIEFA-ENERGO company.

Гончаренко Владимир Павлович

Родился в 1944 году. В 1975 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина по специальности «Автоматизированные системы управления». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. В 1987 году защитил диссертацию по теме «Системы питания ускорителей заряженных частиц». Опыт работы – 50 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора по специальным проектам ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО». Автор более 100 научных трудов и патентов.

Goncharenko Vladimir Pavlovich

Born in 1944. In 1975 he graduated from the M.I.Kalinin Leningrad Polytechnic Institute majoring in «Automated Control Systems». Ph.D. in Engineering Science, senior research associate. In 1987 defended the dissertation, the subject is «The Supply systems of the charge particle accelerators». 50 years work experience. He works as the Deputy General Director for Special Projects at NIIIEFA-ENERGO now. Author of more than 100 scientific papers and patents.

Серебряков Александр Сергеевич

Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». В настоящее время работает профессором кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государствен-

ного университета путей сообщения (СамГУПС) в Нижнем Новгороде. Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Автор более 350 научных работ, в том числе 10 книг. Имеет более 50 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения.

Serebryakov Alexander

Was born in 1939. In 1961 he graduated from Nizhny Novgorod State Technical University after the name of R. E. Alekseev on specialty «Electrification of industrial enterprises and unites». He is a doctor of technical sciences, professor. He defended his doctor's dissertation with topic «Methods and means of diagnostics of insulation of electrical machines and devices of its protection». Now he is the professor of the chair «Technique and technology of railway transport» at branch of Samara StateTransport University in Nizhny Novgorod. He is corresponding member of the Russian academy of electrotechnical sciences. He is author of more than 350 scientific papers, including 10 books. He has more than 50 certificates of authorship and patents for inventions.

Расчет и анализ процессов в многополюсном электромеханическом магнито-реологическом демпфере

// CALCULATION AND ANALYSIS OF PROCESSES IN A MULTI-POLE ELECTROMECHANICAL //

**Нестеров С.А., к.т.н., доцент,
Ивановский государственный
энергетический университет,
Иваново**

**Казаков Ю.Б., д.т.н., профессор,
Ивановский государственный
энергетический университет,
Иваново**

**Филиппов В.А., к.т.н., доцент,
Ивановский государственный
энергетический университет,
Иваново**

Выполнен анализ силовых характеристик электромеханического

магнито-реологического демпфера. Рассчитаны магнитные поля и поля скоростей течения магнито-реологической суспензии. Учтено взаимное влияние магнитных и гидродинамических процессов. Исследовано влияние формы полюсов и направления токов в катушках управления многополюсного магнито-реологического демпфера.

Ключевые слова: электромеханический магнито-реологический демпфер, взаимосвязанные влияние магнитных и гидродинамических процессов, конечно-элементное моделирование.

The force characteristics of the electromechanical magnetorheological damper are analyzed. The magnetic fields and velocity fields of the magnetorheological suspension were calculated. The mutual influence of magnetic and hydrodynamic processes is taken into account. The influence of the form of poles and directions of currents in the control coils of a multi-pole magnetorheological damper has been studied.

Keywords: electromechanical magnetorheological damper, interrelated influence of magnetic and hydrodynamic processes, finite element modeling.

Введение

Применение систем амортизации с бесконтактным электромагнитным регулированием жесткости актуально для современных автомобилей и других транспортных средств. Магнито-реологическая суспензия (МРС) представляет взвесь магнитных частиц микронного размера в жидкости носителе. Вязкость МРС изменяется при изменении воздействующего магнитного поля с миллисекундной задержкой [1]. С использованием уникальных возможностей МРС разработаны оригинальные устройства, в том числе электромеханические магнито-реологические демпферы (ЭМРД). Для них возможно дистанционное регулирование силы сопротивления, характерно малое время отклика на управляющий сигнал и низкое энергопотребление [2]. ЭМРД нашли применение в автомобильной промышленности [3], ходовой части высокоскоростных поездов [4], сейсмозащите зданий и устройств.

Нелинейные влияния на свойства МРС разных факторов вызывают потребность в уточненном моделировании и анализе процессов в ЭМРД. Повышение силы сопротивления и расширение диапазона регулирования ЭМРД возможно применением улучшенных и оптимизированных конструкций магнитной системы [5], в том числе многополюсных.

Материалы и методы

Рассматривается конструкция ЭМРД с кольцевым зазором между поршнем и корпусом (рис. 1), состоящая из стального корпуса 1, заполненного МРС 2, штока 3 со стальным поршнем 4, на котором размещены катушки управления 5 и 6.

Компенсация изменения объема ЭМРД из-за движения поршня осуществляется газовой камерой 7, отделенной от МРС плавающим диском 8. Варианты конструкции поршня ЭМРД с размерами представлены на рис. 2.

Разработаны конечно-элементные модели ЭМРД. Движение порш-

ня имитировалось протеканием МРС в канале демпфера при неподвижном поршне. Это не вносит значительной погрешности в расчеты, но снижает время моделирования вследствие отсутствия необходимости перестроения конечно-элементной сетки при движении поршня.

При моделировании и анализе процессов в ЭМРД, определении силы сопротивления и диапазона динамического регулирования необходимо учитывать взаимное влияние магнитных и гидродинамических явлений, так как воздействие магнитной индукции во много раз увеличивает вязкость МРС, что влияет на характер течения МРС и силу сопротивления демпфера. Выполнялся расчет двумерных осесимметричных задач электромагнитного и гидродинамического полей в стационарной постановке с учетом их взаимного влияния. Магнитные поля рассчитывались на основе уравнений Максвелла без учета наведенных вихревых токов. Реальные магнит-

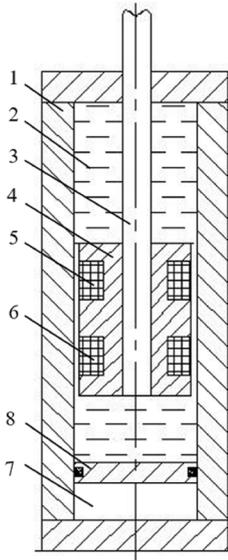


Рис. 1. Конструкция трехполюсного ЭМРД

ные свойства стали и МРС задавались нелинейными характеристиками намагничивания. В качестве граничного условия при расчете электромагнитного поля задавалось нулевое значение магнитного потенциала на границе расчетной области.

Гидродинамический расчет основывался на уравнениях Навье-Стокса, решаемых для поля скоростей и давления p

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla(\eta(B)(\nabla u + (\nabla u)^T)),$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0,$$

где ρ – плотность жидкости, u – вектор скорости, $\eta(B)$ – динамическая вязкость МРС, зависящая от индукции магнитного поля B , t – время, p – давление.

Вязкость МРС описывалась уравнением Carreau

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot [1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2},$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости течения МРС; η_{∞} – динамическая вязкость МРС (наименьшая) при стремящемся к бесконечности $\dot{\gamma}$; η_0 – динамическая вязкость МРС (наибольшая) при околонулевом $\dot{\gamma}$; K_1, n – коэффициенты. Корректное представление реологических свойств МРС и реализация взаимосвязи магнитного и гидродинамического полей возможно при задании членов данного уравнения зависящими от индукции магнитного поля. На основе экспериментально снятых реологических

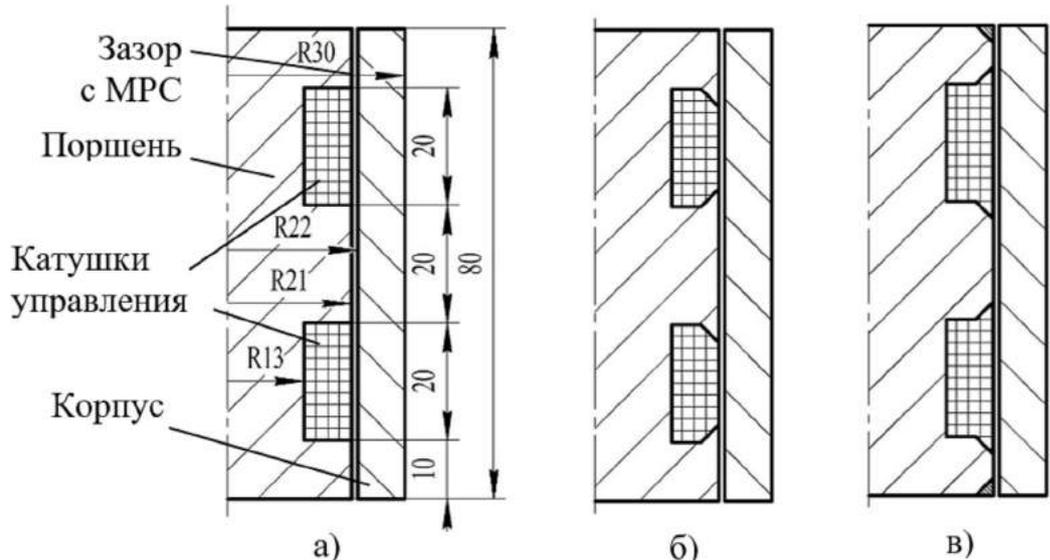


Рис. 2. Основные размеры и исследуемые конструкции поршня: а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3

кривых для используемой МРС получены зависимости параметров уравнения Carreau (рис. 3 [6]).

Изменения плотности и вязкости МРС с изменением температуры не учитывались.

Для верификации полученных результатов проведено сравнение силовой характеристики демфера с рассчитанной по аналитическим уравнениям, основанным на представлении МЖ как вязкопластичного тела Бингама с зависящим от индукции магнитного поля пределом текучести и постоянной вязкостью после начала сдвига [7]. Результирующая сила сопротивления ЭМРД в аналитической модели определяется тремя составляющими

$$F = F_{\tau} + F_{\eta} + F_{тр},$$

где F_{τ} – сила, связанная с пределом текучести МРС и зависящая от интенсивности магнитного поля, F_{η} – вязкостная сила, связанная с процессами в МРС после начала сдвига слоев МРС, $F_{тр}$ – сила трения.

Вязкостная сила определялась по соотношению

$$F_{\eta} = \frac{6\eta L Q S_{пор}}{\pi(R_{пор} + 0,5\delta)\delta^3},$$

где η – вязкость жидкости после начала сдвига (постоянная и не зависящая от скорости сдвига и индукции), δ – зазор между поршнем и корпусом, L – длина канала между поршнем и корпусом по зазору, Q – расход жидкости, равный произведению скорости движения поршня и площади его поперечного сечения, $S_{пор}$ – площадь поперечного сечения поршня, $R_{пор}$ – радиус поршня.

Предел текучести МРС зависит от индукции магнитного поля, поэтому связанные с ним перепад давления и сила сопротивления ЭМРД будут изменяться по высоте поршня L . Сила, определяемая пределом текучести МРС

$$F_{\tau} = c_1 \frac{L_1}{\delta} S_{пор} \tau_{д1} \operatorname{sgn}(v_{пор}) + c_2 \frac{L_2}{\delta} S_{пор} \tau_{д2} \operatorname{sgn}(v_{пор}) + c_3 \frac{L_3}{\delta} S_{пор} \tau_{д3} \operatorname{sgn}(v_{пор}),$$

где $v_{пор}$ – скорость движения поршня; $\tau_{д1}$, $\tau_{д2}$ и $\tau_{д3}$ – пределы текучести МРС под верхним, средним и

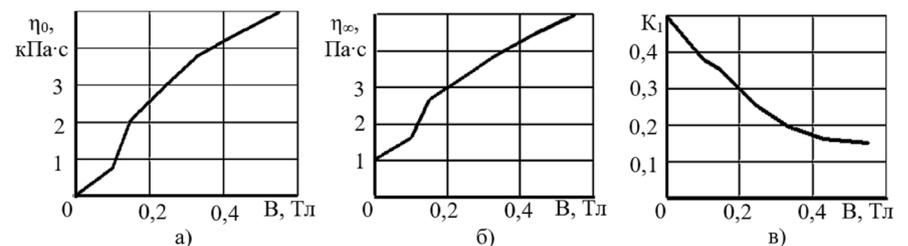


Рис. 3. Зависимости вязкости МРС при малой (а) и бесконечно большой (б) скоростях сдвига, зависимость коэффициента K_1 (в) от величины магнитной индукции

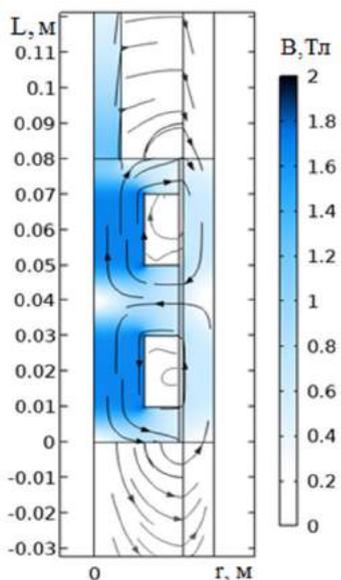


Рис. 4. Распределение магнитного поля в ЭМРД при согласном включении катушек управления

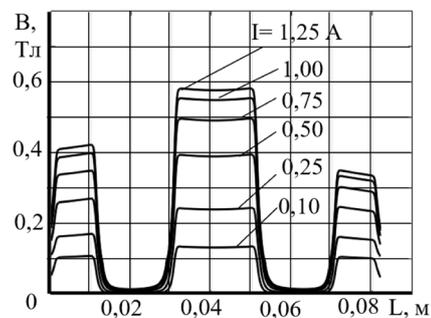


Рис. 5. Изменение магнитной индукции по высоте поршня

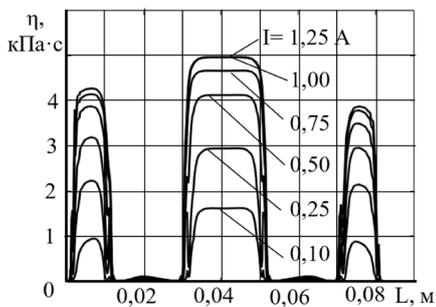


Рис. 6. Изменение вязкости МРС по высоте поршня для скорости движения поршня 0,05 м/с

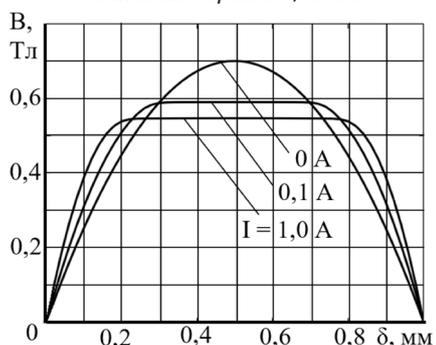


Рис. 7. Профиль скорости течения МРС в зазоре напротив середины центрального полюса для скорости поршня 0,05 м/с

нижним полюсами (рис. 2); c_1 , c_2 и c_3 – коэффициенты, зависящие от профиля скорости течения МРС в зазоре демфера, определялись по формуле

$$c = 2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0,8\pi(R_{пор} + 0,5\delta)\delta^2\tau_d}$$

Сила трения не учитывалась как в конечно-элементной модели, так и при аналитическом расчете.

Анализ результатов

Распределение магнитного поля в ЭМРД при согласном включении катушек управления представлено на рис. 4. Из анализа данных следует, что при токе в катушке 1 А центральная часть сердечника существенно насыщена и ограничивает дальнейшее увеличение магнитного потока в демфере с ростом тока в катушках управления.

Распределение магнитной индукции в зазоре демфера по высоте поршня для разных токов в катушке представлено на рис. 5. Максимумы индукций соответствуют участкам зазора, расположенным против полюсов поршня. Для всех токов магнитная индукция под верхним полюсом больше, чем под нижним полюсом, что связано с увеличением магнитной проводимости из-за наличия в демфере стального ферромагнитного штока.

Влияние магнитного поля на гидродинамические процессы в демфере учитывается через увеличение динамической вязкости МРС с ростом магнитной индукции (рис. 6). Вязкость МРС также зависит от градиента скорости течения МРС в зазоре демфера, определяемым скоростью движения поршня.

Профиль скорости течения МРС в зазоре демфера на середине

второго полюса показан на рис. 7. При отсутствии магнитного поля МРС ведет себя, как ньютоновская жидкость: ее вязкость постоянна, и профиль скорости течения имеет параболический характер. Магнитное поле, воздействуя на МРС, увеличивает ее вязкость, реологическая характеристика становится нелинейной, и в профиле скорости появляется ядро течения, в котором отсутствует сдвиг слоев МРС друг относительно друга. С ростом индукции магнитного поля предел текучести МРС возрастает, область ядра течения увеличивается.

Сила сопротивления демфера определяется отношением перепада давления по высоте поршня и площади основания поршня

$$F_{сопр} = \frac{p_1 - p_2}{\pi R_{пор}^2},$$

где p_1 – давление МРС на входе щелевого канала между поршнем и корпусом, p_2 – давление МРС на выходе из канала, $R_{пор}$ – радиус поршня.

Распределение давления в канале демфера по высоте поршня для разных токов в катушках управления представлено на рис. 8. Прослеживается рост перепада давления на поршне с ростом тока управления. Зависимости разделяются на 5 областей (зоны полюсов и межполюсных промежутков). Области с большим наклоном соответствуют течению МРС с большой вязкостью и падению давления в областях зазора напротив полюсов демфера, области с малым наклоном – падению давления в областях зазора напротив катушек управления, в которых магнитное поле практически отсутствует и вязкость МРС мала.

Результаты влияния формы полюсов поршня на распределение магнитной индукции и перепад давления (силу сопротивления демфера) по высоте поршня приведены на рис. 9. Для поршня с вариантом конструкции 2 (рис. 2, а) максимальные значения индукции в зазоре снижаются (рис. 9, а), но магнитное поле действует на МРС на участке зазора большей протяженности. Для варианта 3 с фасками на полюсах максимумы индукции под полюсами увеличиваются, но область воздействия магнитного поля на МРС снижается.

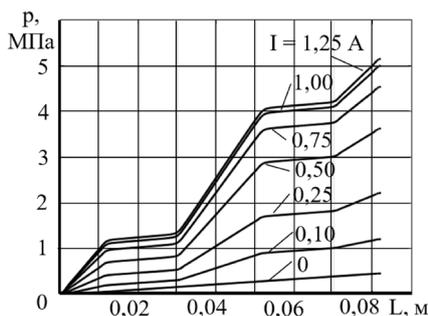


Рис. 8. Перепад давления по высоте поршня для скорости движения поршня 0,05 м/с

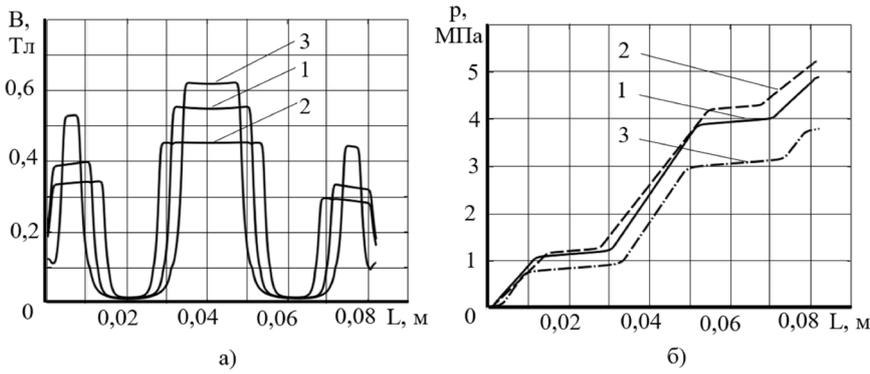


Рис. 9. Распределение магнитной индукции (а) и перепад давления (б) по высоте поршня для тока в катушках управления 1 А и скорости движения поршня 0,05 м/с: 1 – вариант магнитной системы поршня 1 (рис. 2), 2 – вариант 2, 3 – вариант 3

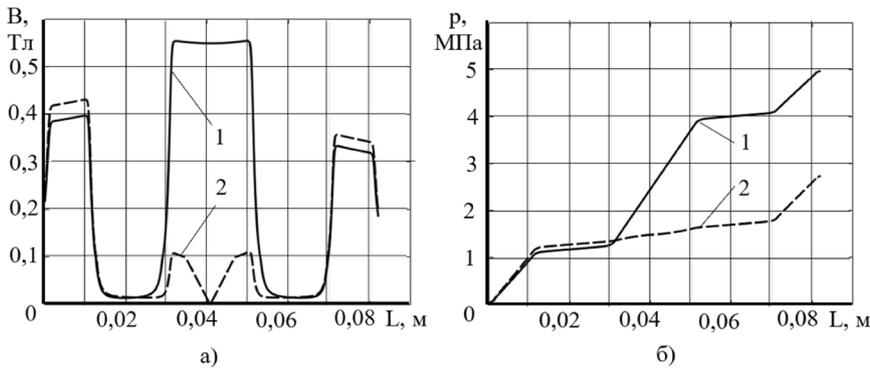


Рис. 10. Распределение магнитной индукции (а) и перепад давления (б) по высоте поршня для тока в катушках управления 1 А и скорости движения поршня 0,05 м/с: 1 – согласное включение катушек, 2 – встречное включение катушек

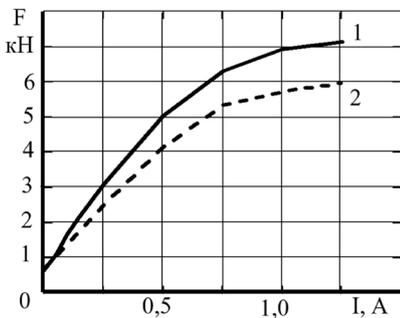


Рис. 11. Сила сопротивления демпфера: 1 – конечно-элементная модель, 2 – аналитический расчет

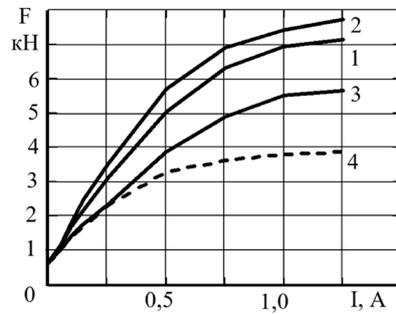


Рис. 12. Сила сопротивления демпфера для разных вариантов поршня: 1 – вариант 1, 2 – вариант 2, 3 – вариант 3, 4 – вариант 1 со встречным включением катушек

На рис. 9,б представлено изменение давления по высоте поршня для тока в катушке управления 1 А и скорости движения поршня 0,05 м/с для разных конструкций поршня. Увеличение индукции магнитного поля для варианта конструкции 3 приводит к увеличению вязкости протекающей МРС и, как следствие, большему углу наклона зависимости изменения перепада давления на участках зазора напротив полюсов. Однако увеличение объема МРС, находящейся под воздействием

магнитного поля, характерное для варианта поршня 2, преобладает над снижением вязкости, и перепад давления получается больше, чем в остальных случаях.

Использование двух катушек на поршне, кроме увеличения протяженности поршня, позволяет применять встречное и согласованное включение катушек, что может расширить диапазон регулирования силовой характеристики. Распределение магнитной индукции по высоте поршня при встречном и со-

гласном включении катушек представлено на рис. 10,а. При встречном включении катушек магнитное поле под средним полюсом значительно уменьшается, под крайними полюсами незначительно возрастает. При снижении тока в катушках управления и уменьшении насыщения сердечника поршня относительное увеличение индукции под крайними полюсами при встречном включении катушек по сравнению с согласным включением увеличивается при практически неизменной картине магнитного поля под средним полюсом.

Изменение давления по высоте поршня для тока в катушке управления 1 А для случаев встречного и согласного включения катушек управления представлено на рис. 10,б. Из-за сильного уменьшения магнитного поля под средним полюсом перепад давления (а значит и сила сопротивления демпфера) при встречном включении существенно уменьшаются.

Из сравнения сил сопротивления ЭМРД, полученных по результатам численного конечно-элементного и аналитического расчетов (рис. 11), следует, что обе разработанные модели адекватны и обеспечивают хорошую точность расчетов. При аналитическом расчете сила сопротивления получается несколько меньше, чем при численном моделировании, так как область воздействия магнитного поля на текущую МРС ограничена размерами полюсов и не учитывается магнитное поле в области зазора напротив катушек управления. Однако аналитическая модель обеспечивает более быстрое получение результатов расчетов и меньшую сложность при моделировании.

На рис. 12 представлено изменение силы сопротивления ЭМРД с ростом тока в катушке управления для разных вариантов конструкции поршня.

Увеличение протяженности областей канала, в которых на текущую МРС воздействует магнитное поле, расширяет динамический диапазон регулирования силы сопротивления ЭМРД по сравнению с вариантом увеличения интенсивности магнитного поля на менее протяженных

участках зазора. При чрезмерном сближении краев полюсов демпфера возрастают магнитные потоки рассеяния между полюсами, проходящие в MPC вдоль зазора. Однако влияние на вязкость MPC магнитного поля, направленного вдоль течения, существенно слабее, чем влияние на вязкость MPC поперечного магнитного поля. При встречном включении катушек сила сопротивления ЭМРД значительно снижается по сравнению с согласным включением. Применять этот способ для регулирования силовой характеристики не рационально.

Выводы

Разработанная численная конечно-элементной модели позволяет проводить уточненный анализ силовых характеристик многополюсных электромеханических магнитореологических демпферов с учетом влияния магнитных и гидродинамических процессов при электромагнитном управлении.

Исследовано влияние формы полюсов на характеристики многополюсного магнитореологического демпфера. Выявлено, что увеличение протяженности областей канала, в которых на текущую MPC воздействует магнитное поле, расширяет динамический диапазон регулирования силы сопротивления ЭМРД по сравнению с вариантом увеличения интенсивности магнитного поля на менее протяженных участках зазора.

Литература

1. Kalurkar S.L., Darade P.D., Korade D.N. A Review on Magneto Rheological Fluid Preparation and Its Testing Using Rheometer // *International Journal of Engineering Science and Computing*. – 2016. – Vol. 6, Iss. 7. – P. 8390-8393.
2. Muhammad A., Yao X., Deng Z. Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control // *Journal of Marine Science*

and Application. – 2006. – vol. 5, no. 3. – P. 17–29.

3. Ahamed T.I., Sundarajan R., Prasaath T. G., Raviraj V., Implementation of magneto-rheological dampers in bumpers of automobiles for reducing impacts during accidents // *Procedia Engineering*. – 2014. – vol. 97. – P. 1220–1226.

4. Lau Y.K., Liao W.H. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2005. – vol. 219, no. 4. – P. 261–276.

5. Zheng J., Li Z., Koo J. H., Wang J. Magnetic circuit design and multiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. – vol. 6. – Article ID 402501.

6. Нестеров С.А. Разработка моделей электромеханического магнитореологического демпфирующего устройства с учетом взаимного влияния физических полей // *Вестник ИГЭУ*. – Иваново, 2017. – Вып. 3. – С.48–53.

7. Zhu X., Jing X., Cheng L. Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2012. – 23(8). – P. 839–874.

Нестеров Сергей Александрович

В 2011 году окончил Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2019 году защитил кандидатскую диссертацию «Совершенствование моделей и конструкций поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов». Доцент кафедры «Электромеханика» ИГЭУ. Автор более 50 научных работ.

Nesterov Sergey Alexandrovich

In 2011 he graduated from ISPU with a degree in electromechanics.

In 2019 defended his PhD thesis «Improvement of models and designs of piston electromechanical magnetorheological dampers». Associate professor of the department «Electromechanics» at ISPU. Author of more than 50 scientific works.

Казаков Юрий Борисович

В 1976 году окончил Ивановский энергетический институт имени В. И. Ленина. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» ИГЭУ, действительный член АЭН РФ. В 2000 году защитил диссертацию по теме «Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей». Автор более 300 научных работ.

Kazakov Yuri Borisovich

In 1976 graduated from IEl. Doctor of Technical Sciences, professor, the head of the chair «Electromechanics» at ISPU, full member of the AES RF. In 2000 defended his thesis for the degree of doctor of technical sciences. Author of more than 300 scientific works.

Филиппов Василий

Александрович

В 2014 году окончил магистратуру Ивановского энергетического института имени В. И. Ленина по направлению «Электромеханика». Кандидат технических наук, доцент. В 2021 году защитил диссертацию. Старший преподаватель кафедры «Электромеханика» ИГЭУ. Автор более 40 научных работ.

Filippov Vasily Aleksandrovich

In 2014 graduated from ISPU Master's degree in «Electromechanics». In 2021 he defended his PhD thesis. Senior lecturer at the Department of «Electromechanics» at ISPU. Author of more than 40 scientific works.

Бесконтактная передача энергии на экипажи высокоскоростного магнитолевитационного транспорта

// WIRELESS POWER TRANSMISSION TO THE CARRIAGE
OF HIGH SPEED MAGNETOLEVITATIONAL TRANSPORT //

**Никитин В.В., д.т.н., доцент,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
Санкт-Петербург**

**Васильев В.А., к.т.н.,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
Санкт-Петербург**

**Чжао Тяньчжун,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
Санкт-Петербург**

Проблема бесконтактной передачи электрической энергии на движущиеся экипажи является актуальной для высокоскоростного наземного транспорта на магнитном подвесе, а также для подзаряда

бортовых аккумуляторных батарей автомобильного и городского автономного транспорта с электрическим приводом. Наилучшими технико-экономическими показателями обладают системы бесконтактной передачи мощности на основе явления электромагнитной индукции. В статье рассмотрены принципы бесконтактной индуктивной передачи энергии, системы передачи энергии, используемые для энергообеспечения собственных нужд высокоскоростных экипажей TRANSRAPID, а также предложены технические решения для бесконтактной передачи энергии на движущиеся экипажи на основе линейных генераторов с источником постоянного тока и с использованием постоянных магнитов.

Ключевые слова: бесконтактная передача электрической энергии, высокоскоростной наземный транспорт.

The problem of wireless transmission of electrical energy to moving carriages is relevant for high-speed transport on a magnetic suspension, as well as for recharging on-board batteries of automobile and urban autonomous transport with an electric drive. The best technical and economic indicators are possessed by wireless power transmission systems based on the phenomenon of electromagnetic induction. The article discusses the principles of non-contact inductive power transmission, power transmission systems used to supply power for their own needs of high-speed TRANSRAPID vehicles, and also proposed technical solutions for wireless power transmission to moving vehicles based on linear generators with a direct current source and using permanent magnets.

Keywords: noncontact transmission of the electrical energy, high-speed land transport.

Введение

Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом, экипажи которого способны развивать скорости до 400-450 км/ч и более, может в ближайшей перспективе составить конкуренцию авиационному транспорту при перевозках на расстояния до 1000 км. В магнитолевитационных транспортных системах указанного скоростного диапазона для создания тягового усилия используются линейные синхронные двигатели, первичная часть которых в виде трехфазной обмотки, создающей бегущее магнитное поле, размещается на путевом полотне, а вторичная часть в виде электромагнитов, питаемых постоянным током (TRANSRAPID, Германия, Китай), или сверхпроводниковых магнитов

(MLU, Япония), размещается на экипаже. Необходимость стабильного энергоснабжения бортовых магнитов тяги и левитации при высоких скоростях движения делает актуальной проблему обеспечения надежной передачи электрической энергии на движущиеся экипажи. При высоких скоростях движения надежность контактного способа передачи энергии через токоприемник может быть недостаточна; альтернативным вариантом является бесконтактная передачи энергии. Следует заметить, что бесконтактная передача электрической энергии является актуальной не только для экипажей высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе, но и для подзарядки бортовых систем хранения энергии автономного электротранспорта [1], ведутся так-

же исследования по бесконтактным системам подзаряда аккумуляторных батарей и тягового энергоснабжения железнодорожного подвижного состава [2].

Существуют следующие способы бесконтактной передачи электроэнергии:

- путем электромагнитного излучения на основе микроволновых и лазерных технологий;
- с помощью электрической индукции;
- с помощью электромагнитной индукции.

Последний способ зачастую подразделяют на передачу путем индуктивной связи и передачу с использованием резонанса в индуктивно связанных цепях [3]. Из этих способов по энергетической эффективности, расстоянию между

передающей и приемной катушками и уровню передаваемых мощностей наиболее приемлемым вариантом для передачи энергии на движущийся экипажи высокоскоростного наземного транспорта является передача с помощью электромагнитной индукции.

Бесконтактная передача энергии на основе резонанса в индуктивно связанных цепях

Простейший вариант электрической схемы замещения системы передачи энергии, в которой используется резонанс в индуктивно связанных цепях, представлен на рис. 1.

Система уравнений, описывающая процессы в этой схеме при питании от источника синусоидального напряжения, имеет вид:

$$u = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt - M \frac{di_2}{dt},$$

$$0 = -M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + R_H i_2,$$

где R_1, R_2, R_H – активные сопротивления первичной, вторичной цепи и нагрузки;

L_1, L_2 – собственные индуктивности передающей и принимающей катушек;

C_1, C_2 – емкости конденсаторов в первичной и вторичной цепях;

M – взаимная индуктивность первичной и вторичной цепей.

Записав эти уравнения в комплексной форме, можем выразить токи в контурах:

$$I_1 = \frac{Z_2 U}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2},$$

$$I_2 = \frac{j \omega M U}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2},$$

где

$$Z_1 = R_1 + j \omega L_1 + \frac{1}{j \omega C_1},$$

$$Z_2 = R_2 + j \omega L_2 + \frac{1}{j \omega C_2} + R_H.$$

Если параметры цепей подобраны так, что имеет место резонанс, КПД передачи энергии может быть выражен в виде [4]:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_H}{[R_1(R_2 + R_H) + (\omega M)^2] (R_1 + R_H)}.$$

Из приведенного выражения видно, что КПД бесконтактной передачи энергии при прочих равных условиях будет увеличиваться с ростом частоты ω . Однако увеличение частоты ограничивается характеристиками реактивных элементов системы, а также коммутационной способностью полупроводниковых приборов преобразователя частоты, используемого в качестве источника питания. В большинстве практически реализованных систем с использованием резонанса в магнитно-связанных контурах бесконтактная передача энергии осуществляется при уровнях мощностей 100...1000 Вт на частотах до единиц Меггерц на расстояния до 1 м при $\eta = 0,4...0,6$ [3]. Следует также отметить, что указанные системы являются, как правило, стационарными и выполнены с неподвижными друг относительно друга передающей и приемной катушками.

Наибольшую практическую сложность представляет определение взаимной индуктивности первичной и вторичной цепей. Для случая неподвижных контуров их взаимную индуктивность в общем случае можно найти, используя приведенное ниже выражение [5], если представить передающую и приемную катушки в виде линейных контуров, поперечными размерами которых можно пренебречь:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{D} \cos \theta,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

dl_1, dl_2 – ориентированные элементарные отрезки контуров l_1, l_2 передающей приемной катушек;

D – расстояние между элементами dl_1, dl_2 ;

θ – угол между элементами dl_1, dl_2 .

Бесконтактная передача энергии на основе электромагнитной индукции

Одним из вариантов бесконтактной передачи энергии на движущийся

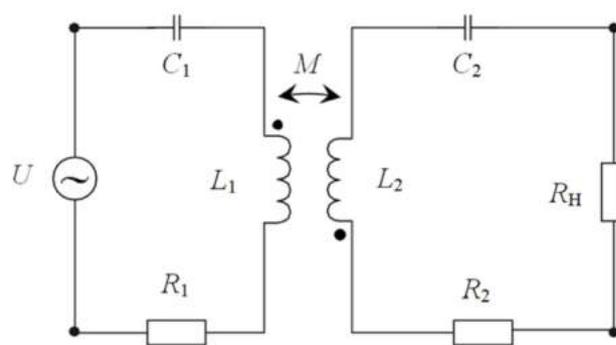


Рис. 1. Схема замещения бесконтактной системы передачи энергии с использованием резонанса в магнитно-связанных контурах

ся экипажи магнитолевитационного высокоскоростного транспорта, реализованных в транспортной системе TRANSRAPID, является использование линейного генератора, который предназначен для питания бортовых потребителей:

- электромагнитов подвеса;
- потребителей собственных нужд (систем климат-контроля, освещения, информирования пассажиров и др.);
- подзаряда аккумуляторной батареи.

Принцип действия линейного генератора основан на индуктировании ЭДС в витках обмотки, размещенной в полюсных наконечниках бортовых электромагнитных модулей, переменной составляющей магнитного поля, возникающей при движении вдоль зубчатой структуры статора линейного синхронного двигателя, размещенной на путевом полотне [6, 7].

Для индуктирования ЭДС в движущейся приемной катушке высокоскоростного экипажа можно предложить также иные технические решения. В частности, возможен вариант, когда вдоль путевого полотна будет уложен кабель, питающийся от регулируемого источника постоянного тока, при этом прямой и обратный провода этой питающей линии должны быть уложены с транспозицией через определенное расстояние (рис. 2, а). При этом за счет транспозиции проводников будет создаваться постоянное во времени и переменное-полюсное (по продольной координате) магнитное поле, при движении вдоль которого в экипажной приемной катушке будет наводиться ЭДС. Частота и амплитуда ЭДС будут зависеть от тока в пи-

тающей линии, скорости движения, шага транспозиции проводников и расстояния между питающей линией и приемной катушкой. Переменно-полюсное магнитное поле может быть создано также при размещении постоянных магнитов вдоль путевого полотна (рис. 2, б). Преимуществом такого варианта по сравнению с предыдущим является возможность отказаться от источника тока и отсутствие потерь мощности на создание переменного-полюсного магнитного поля; к недостаткам следует отнести невозможность регулирования пер-

вичного тока и высокую стоимость постоянных магнитов.

Бесконтактная передача энергии на высокоскоростные экипажи TRANSRAPID

Энергообеспечение собственных нужд высокоскоростных экипажей TRANSRAPID, в первую очередь электромагнитов подвеса, осуществляется с помощью линейных генераторов индукторного типа (рис. 3). На экипаже размещаются электромагнитные модули, каждый из которых состоит из двенадцати электромагнитов

подвеса экипажа и возбуждения линейного синхронного двигателя. На поверхностях электромагнитов уложены витки обмотки линейного генератора, в которых при движении экипажа переменной составляющей магнитного поля, возникающей за счет зубцовой структуры ферромагнитопровода статора линейного синхронного двигателя, индуцируется переменная ЭДС. Поскольку амплитуда и частота ЭДС линейного генератора зависит от скорости движения экипажа, питание потребителей собственных нужд осуществляется через выпрямитель при скоростях движения 100–200 км/ч и более [6].

На экипажах TRANSRAPID бортовые электромагнитные модули совмещают в себе ряд функций:

- создают магнитное поле возбуждения линейного синхронного двигателя;
- обеспечивают подъемную силу в системе подвеса экипажа;
- служат для размещения обмотки линейного генератора.

По этой причине ЭДС линейного генератора зависит от тока возбуждения линейного двигателя и величины воздушного зазора в системе подвеса экипажа [7, 8].

При движении с малыми скоростями вблизи остановочных пунктов и на стоянке была предложена и реализована бесконтактная система электроснабжения на основе линейного трансформатора (ЛТ), принципиальная схема которой представлена на рис. 4.

Энергия от внешней системы электроснабжения 20 кВ, 50 Гц трансформируется в напряжение 400 В, 50 Гц, после чего преобразуется по частоте в напряжение 400 В, 20 кГц. Первичная обмотка линейного трансформатора представляет собой проводящую петлю, уложенную вдоль путевого полотна, вторичная (приемная) катушка расположена на бортовом электромагните системы подвеса. Воздушный зазор между первичной и вторичной частями линейного трансформатора составляет около 40 мм. Для обеспечения энергетической эффективности в системе использованы последовательно включенные конденсаторы, обеспечивающие резонанс в магнитно-связанных контурах первичной и вторичной обмоток трансформатора [9].

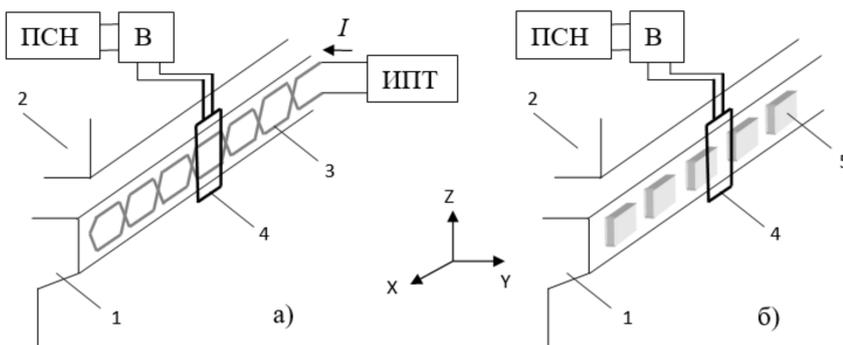


Рис. 2. Линейный генератор на основе источника постоянного тока (а) и постоянных магнитов (б): 1 – путевое полотно, 2 – экипаж, 3 – питающий кабель с транспозицией проводников, 4 – экипажная приемная катушка, 5 – постоянные магниты с чередующейся намагниченностью по оси Y, ИПТ – источник постоянного тока, В – выпрямитель, ПСН – потребители собственных нужд

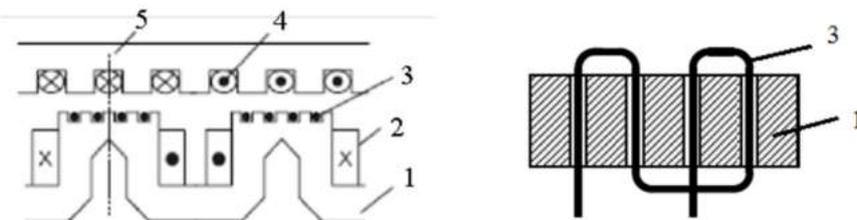


Рис. 3. Схема линейного генератора экипажа TRANSRAPID (слева) и порядок соединения проводников обмотки линейного генератора (справа). На экипаже: 1 – ферромагнитопровод бортового электромагнитного модуля, 2 – катушка электромагнита подвеса экипажа и возбуждения линейного синхронного двигателя, 3 – обмотка линейного генератора. На путевом полотне: 4 – обмотка статора линейного синхронного двигателя, 5 – ферромагнитопровод статора линейного синхронного двигателя

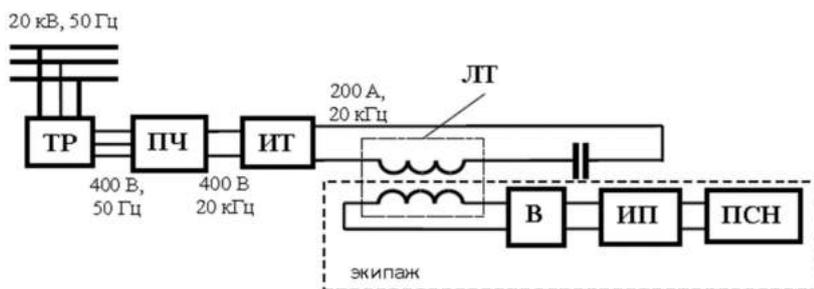


Рис. 4. Бесконтактная система энергоснабжения экипажа TRANSRAPID на основе линейного трансформатора. ТР – трансформатор, ПЧ – преобразователь частоты, ИТ – источник тока, ЛТ – линейный трансформатор, В – выпрямитель, ИП – импульсный преобразователь, ПСН – потребители собственных нужд.

Заключение

Проблема обеспечения надежной бесконтактной передачи энергии при уровнях мощностей порядка до 10...100 кВт на расстояния порядка 10...30 см с высокой эффективностью является актуальной не только для высокоскоростного наземного транспорта на магнитном подвесе, но и для городского транспорта с электроприводом, и в перспективе – для железнодорожного подвижного состава. В настоящее время для энергообеспечения бортовых потребителей экипажей высокоскоростного наземного транспорта TRANSRAPID применяются линейные генераторы индукторного типа (при движении со скоростями свыше 100 км/ч) и линейные трансформаторы повышенной частоты (на стоянке и при движении с малыми скоростями вблизи остановочных пунктов). В качестве альтернативных вариантов бесконтактных систем энергообеспечения могут быть предложены линейные генераторы с источником постоянного тока и транспозицией проводников, укладываемых вдоль путевого полотна, а также линейные генераторы на основе постоянных магнитов, размещаемых на путевом полотне и образующих переменного-полюсное (по продольной координате) магнитное поле.

Литература

1. Triviño, A.; González, J.M.; Aguado, J.A. Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review. *Energies* 2021, 14, 1547. <https://doi.org/10.3390/en14061547>.
2. Kiwon Hwang, Seonghwan Kim, Seongkyu Kim, Yangbae Chun and Seungyoung Ahn. Design of Wireless Power Transfer System for Railway Application. *IJR International Journal of Railway*. Vol. 5, No. 4 / December 2012, pp. 167–174.
3. Rehman M., Nallagowden N., Baharudin Z. A Review of Wireless Power Transfer System Using Inductive and Resonant Coupling. *Journal of Industrial Technology* 26 (1), December 2018. pp. 1–24.
4. Yan Sun, Changyoung Lee, Youngjae Han. Conceptual Design of Contactless Power Transfer System for Yigh Speed Maglev. 2014 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway. 2014년도 한국철도학회 추계 학술대회 논문집

5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. М., Энергоатомиздат, 1986.
6. Guo Liang, Lu Qinfen and Ye Yunyue. FEM Analysis of the Linear Generator EMF in Maglev. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. Nanjing, China, 27–29 Sept., 2005. Volume 3, pp. 2112–2115.
7. Andriollo M., Martinelli G., Morini A. and Tortella A. Optimization of the On-Board Linear Generator in EMS-MAGLEV Trains (Periodical Style), *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, vol. 33, no.5, pp.4224–4226.
8. Гулин С.А., Никитин В.В., Середа Г.Е., Середа Е.Г. Системы электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом // *Сетевой Электронный Журнал «Транспортные системы и технологии»*. – 2016. – Т. 2. – №3. – С. 70–83. doi: 10.17816/transsyst20162370-83
9. Bauer M., Becker P. and Zheng Q. Inductive Power Supply (IPS®) for the Transrapid. *Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Proc. 19th Intern. Conf., Dresden, 13–15 October 2006, pp. 227–232.

Никитин Виктор Валерьевич

Родился в 1966 году. В 1988 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта, квалификация – инженер путей сообщения-электромеханик. Доктор технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Теоретические исследования электромагнитной совместимости сверхпроводникового электрооборудования с электрооборудованием традиционного исполнения». Профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС). Опыт работы – 33 года. Имеет знак «200 лет транспортному образованию России», благодарность Министра транспорта России. Автор более 80 научных трудов.

Nikitin Viktor Valerievich

Born in 1966. In 1988 graduated from the Leningrad Institute of Railway Transport Engineers as a railway engineer-electromechanician. Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor. In 2004 defended the

dissertation, the subject is «Theoretical studies of the electromagnetic compatibility of the super conductive electrical equipment with the conventional electrical equipment». Professor of the Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department of the St. Petersburg State Transport University. 33 years work experience «200 years of transport education in Russia» award, note of acknowledgment of the Minister of Transport of Russia. Author of more than 80 scientific papers.

Васильев Виталий Алексеевич

Родился в 1983 году. В 2007 году окончил Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), квалификация «Инженер путей сообщения». Кандидат технических наук. В 2012 году защитил диссертацию по теме «Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока». Доцент кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС. Общий трудовой стаж – 15 лет. Имеет 16 публикаций в рецензируемых журналах.

Vasiliev Vitaly Alekseevich

Born in 1983. In 2007 graduated from the St. Petersburg State Transport University, railway engineer. Ph.D. in Engineering Science In 2012 defended the dissertation, the subject is «The improvement of the energy efficiency of DC electric trains». St. Petersburg State Transport University Electric traction department Associate Professor. 15 years work experience 16 publications in peer-reviewed journals.

Чжао Тяньчжун

Родился в 1994 году. В 2019 году окончил магистратуру Петербургского государственного университета путей сообщения по программе «Электрический транспорт». В настоящий момент является аспирантом кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» (ПГУПС).

Zhao Tianzhong

Born in 1994. In 2019 he graduated from the St. Petersburg State Transport University under the program «Electric Transport». He is a post-graduate student of the Electrical Engineering and Heat Power Engineering department now (St. Petersburg State Transport University).

Моделирование вентильно-индукторных электрических машин с сокращенным объемом начальной информации

// SWITCHED RELUCTANCE ELECTRIC MACHINES SIMULATION WITH REDUCED AMOUNT OF INITIAL INFORMATION //

Чавычалов М.В., к.т.н.,
Ростовский государственный
университет путей сообщений,
Донской государственный
технический университет,
Ростов-на-Дону

Набоков А.Е., ст. преп.,
Ростовский государственный
университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону

Зиновьева А.С., студентка,
Ростовский государственный
университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону

Вентильно-индукторные электрические машины отличаются от остальных типов электрических машин математическим описанием. В статье приведен используемый в настоящее время вариант моделирования с применением поисковых таблиц. С целью снижения объема предварительной информации о вентильно-индукторной машине предложено вместо поисковых таблиц использовать описание функции фазного потокосцепления от угла поворота ротора с помощью ряда Фурье.

Ключевые слова: вентильно-индукторная электрическая машина,

моделирование, предварительная информация, поисковая таблица, ряд Фурье.

Switched reluctance motors differ from traditional types of electric machines in their mathematical descriptions. The article presents the currently used simulation options using lookup tables. In order to reduce the volume of SRM initial data, it is proposed to use the description of phase flux linkage with Fourier series instead of lookup tables.

Keywords: switched reluctance motor, simulation, initial information, Fourier series, lookup table.

Вентильно-индукторные электрические машины (ВИМ) являются сравнительно новым типом электромеханического преобразователя энергии. От традиционных электрических машин постоянного и переменного тока ВИМ отличаются отсутствием на роторе проводников и постоянных магнитов, что значительно упрощает и удешевляет их производство. Обмотка статора выполняется в виде сосредоточенных катушек, что также положительно влияет на стоимость и технологичность производства.

Кроме значительных отличий в части производства ВИМ отличается также математическим описанием. Поскольку магнитное поле в воздушном зазоре не вращается, а величина магнитного потока определяется сразу рядом факторов: дискретный характер коммутации фаз, зависимость магнитного сопротивления магнитной системы от угла поворота ротора, то нет возможности описать ВИМ на основе уравнений обобщенной электрической машины.

За последнее десятилетие компьютерные технологии получили повсеместное распространение, и вычислительные мощности стали доступны каждому исследователю, что послужило развитием имитационного моделирования для ВИМ. Имитационное моделирование позволяет построить достаточно точную математическую модель без аналитического описания непосредственной зависимости между интересующими переменными, но при этом четко воспроизводит алгоритм работы электропривода при различных параметрах управления и с сохранением логической структуры протекания процессов во времени. В настоящее время имитационная модель ВИМ фактически представляет виртуальный испытательный стенд, для работы которого требуются большие вычислительные мощности современных компьютеров, при этом еще практически невозможно добиться качественного и количественного моделирования в режиме реального времени.

Вместе с тем задача синтеза компактного и несложного в численных расчетах математического описания ВИМ должна быть решена для получения качественных и эффективных систем управления на основе наблюдателей состояния.

Известные варианты имитационных математических моделей ВИМ в различном виде используют табличную информацию зависимости фазного потокосцепления от тока и угла поворота ротора. Рассмотрим подробнее используемые в настоящее время варианты математического описания ВИМ.

Традиционное описание

Уравнение электрического баланса для фазы ВИМ имеет вид [1, 2]:

$$u_{\phi} = i_{\phi} \cdot R + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt},$$

где u_{ϕ} – фазное напряжение, i_{ϕ} – фазный ток, R – активное сопротивление фазы.

Электромагнитный момент на валу ВИМ является суммой момен-

тов, производимых токами фаз (фазных моментов). Последние определяются уравнением:

$$T_{ph}(\theta, i) = \left. \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta} \right|_{i=const},$$

где W_c – коэнергия, определяемая как

$$W_c(\theta, i) = \int \psi(\theta, i) di \Big|_{\theta=const}$$

Механическая часть вентильно-индукторного двигателя описывается уравнениями:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum_{n=1}^{N_{ph}} T_{ph}(\theta, i_n) - T_L - B \cdot \omega,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot N_R \cdot 180 / \pi,$$

где ω – частота вращения ротора, J – приведенный к валу двигателя момент инерции, N_{ph} – число фаз ВИД, T_L – момент нагрузки на валу двигателя, B – коэффициент трения, N_R – число зубцов ротора.

Рассматривая фазное потокоцепление как функцию двух переменных, раскроем производную и получим:

$$u_\phi = i_\phi \cdot R + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} = i_\phi \cdot R + \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \omega + L_a(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt},$$

где $L_a(\theta, i)$ – дифференциальная индуктивность, $\frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i}$ – коэффициент ЭДС вращения.

При компьютерном моделировании ВИД с использованием описанных выше уравнений потребуются начальная информация о ВИД в виде трех поисковых таблиц: $L_a(\theta, i)$, $\frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i}$ и $T_{ph}(\theta, i)$, что снижает скорость расчета и увеличивает вероятность погрешности вычислений.

При использовании другого подхода фазное потокоцепление рассматривается как:

$$\psi(\theta, i) = i \cdot L_s(\theta, i),$$

где L_s – статическая индуктивность. Уравнение электрического баланса тогда принимает вид:

$$u_\phi = i_\phi \cdot R + \frac{di}{dt} \cdot L_s(\theta, i) + i \cdot \frac{dL_s(\theta, i)}{dt} =$$

$$= i_\phi \cdot R + \frac{di}{dt} \cdot L_s(\theta, i) + i \cdot \omega \cdot \frac{dL_s(\theta, i)}{d\theta}$$

При таком подходе также потребуются три поисковые таблицы:

$$L_s(\theta, i), \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} \text{ и } T_{ph}(\theta, i),$$

что позволяет предположить, что скорость расчета и вероятность погрешности вычислений будут примерно такими же, как и при использовании первого подхода. При этом можно ограничиться двумя поисковыми таблицами $L_s(\theta, i)$ и $T_{ph}(\theta, i)$, но в режиме реального времени производить операцию численного дифференцирования статической индуктивности по времени, что также потребует дополнительных затрат времени расчета.

Третий традиционный подход состоит в рассмотрении фазного тока как функции угла поворота ротора и потокоцепления. Тогда электрическая часть фазы ВИД описывается уравнениями:

$$\psi = \int (u - i \cdot R)$$

$$i = f(\theta, \psi)$$

Использование этого подхода предполагает значительное сокращение начальной информации о ВИД, поскольку потребуются только две поисковые таблицы: $i(\theta, \psi)$ и $T_{ph}(\theta, i)$. В то же время использование этого подхода сопряжено с вычислением алгебраических петель. Современные средства моделирования, например MATLAB/Simulink, успешно решают такие задачи, но при реализации наблюдателей состояния могут возникнуть повышенные требования к вычислительным способностям микроконтроллера системы управления.

Описанные подходы к математическому моделированию ВИД являются традиционными и апробированными многими специалистами. В то же время для реализации наблюдателей состояния или бездатчиковых систем управления на основе этих подходов требуется наличие поисковых таблиц. При этом точность расчета координат двигателя растет с возрастанием объема этих таблиц. В то же время увеличивается и время расчета.

Подход описан в [3, 4] и основан на использовании динамической модели ВИД и измеренных значений напряжения и тока.

Использование ряда Фурье

Измеренное значение тока активной фазы является основой для определения текущего значения индуктивности. Зависимость фазной индуктивности от положения ротора представлена в виде ряда Фурье. Обычно принимают первые три гармоники. При этом уравнение для фазной статической индуктивности записывается как

$$L_o = \sum_{n=0}^2 L_n(i) \cos(n \cdot N_r \theta + \phi_n), n = 0, 1, 2,$$

где n – номер гармоники, N_r – число зубцов ротора, ϕ_n – сдвиг по фазе.

Предполагая, что $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$, а также учитывая, что индуктивность максимальна при $\theta = 0$ и минимальна при $\theta = \pi/N_r$, уравнение для дифференциальной индуктивности можно представить в виде:

$$L_o = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos(N_r \cdot \theta) + L_2(i) \cdot \cos(2 \cdot N_r \cdot \theta)$$

Коэффициенты в приведенном выше уравнении определяют с использованием значений индуктивности при согласованном ($\theta = 0$), рассогласованном ($\theta = \pi/N_r$) и среднем ($\theta = \pi/2N_r$) положениях (L_a, L_u и L_m соответственно):

$$L_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right],$$

$$L_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right]$$

При этом значения индуктивности в согласованном и среднем положениях определяются как полиномы степени k :

$$L_a = \sum_{n=0}^{n=k} a_n \cdot i^n,$$

$$L_m = \sum_{n=0}^{n=k} b_n \cdot i^n$$

Коэффициенты полиномов a и b определяются по кривым индуктивности, полученным опытным путем или с использованием метода конечных элементов.

Уравнение электрического равновесия фазы при описании статической индуктивности рядом Фурье записывается как

$$u_\phi = i_\phi \cdot R + \left[\left(L_0(i) + i_\phi \frac{\partial L_0(i)}{\partial i_\phi} \right) + \left(L_1(i) + \right. \right.$$

$$+ i_{\phi} \frac{\partial L_1(i)}{\partial i_{\phi}} \cdot \cos(N_r \theta) + \left(L_2(i) + i_{\phi} \frac{\partial L_2(i)}{\partial i_{\phi}} \right) \cdot \cos(2 \cdot N_r \theta) \cdot \frac{di_{\phi}}{dt} + [-N_r L_1(i) \cdot \sin(N_r \cdot \theta) - N_r L_2(i) \cdot \sin(N_r \cdot \theta)] \cdot i_{\phi} \cdot \omega$$

Электромагнитный момент на валу ВИД может определяться уравнением:

$$T_{ph} = \frac{1}{2} \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i^2$$

Главное преимущество описанного метода – отсутствие поисковой таблицы. Необходимо учитывать, что решающее значение имеет точность определения коэффициентов полиномов. Кроме того, метод не подходит для ВИМ с неравномерным воздушным зазором.

Пренебрегая насыщением магнитопровода, описанный подход позволяет ограничиться тремя значениями индуктивности для расчета фазного тока. Это значительно сокращает объем начальной информации о ВИД, но также в значительной мере редуцирует зависимость фазной индуктивности от угла поворота ротора, что может повлечь возникновение погрешностей вычислений в наблюдателях состояния. Это особенно важно для бездатчиковых и позиционных электроприводов.

Модернизированное использование ряда Фурье

Предлагаемый подход также состоит в использовании ряда Фурье для описания зависимости $L_s(\theta)$. Однако амплитуды гармонических колебаний определены не на основе значений индуктивности в трех угловых положениях ротора, а методом наименьших квадратов. Это позволяет построить математическое описание зависимости $L_s(\theta)$, не ограничиваясь двумя первыми гармониками. Поскольку в зависимости от профиля зубца ротора характер изменения индуктивности при повороте ротора может отличаться, рационально принимать во внимание несколько гармоник. При этом гармонический состав функции $L_s(\theta)$ может быть различным для разных двигателей. Для сокращения объема начальной информации может быть использован факторный анализ для выявления более значащих гармо-

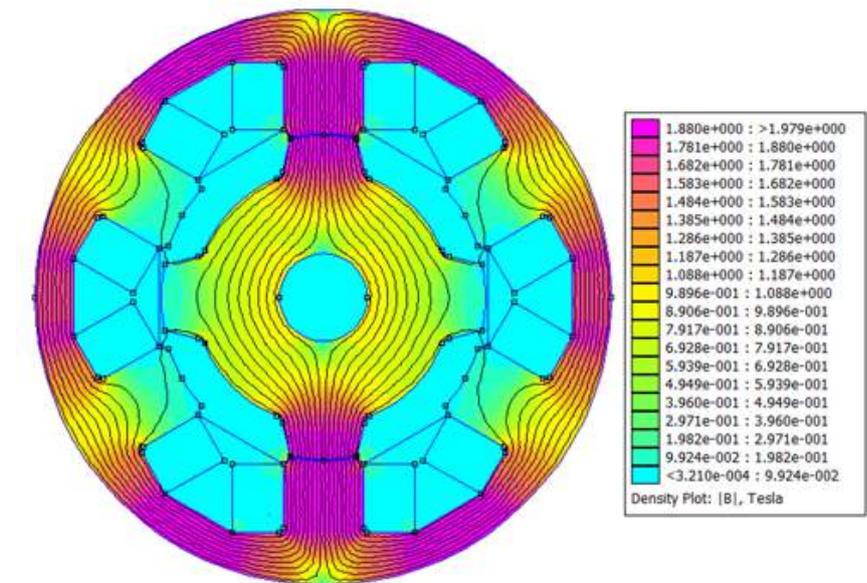


Рис. 1. Картина магнитного поля ВИМ 6/4

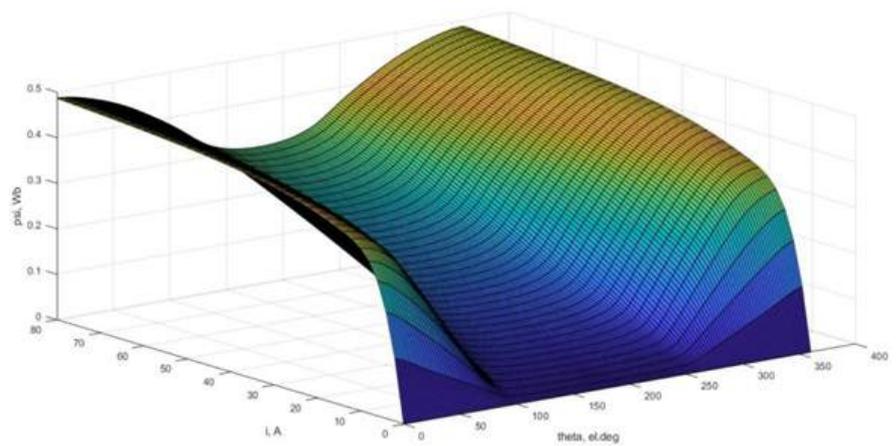


Рис. 2. Зависимость $\psi(\theta, i)$

ник. Также для сокращения объема начальной информации рационально пренебрегать насыщением магнитопровода для ВИД, в которых при номинальном значении тока магнитная индукция в зазоре не достигает значения насыщения.

Индуктивность в данном случае определяется уравнением

$$L_s(\theta) = \sum_{n=0}^k A_n \cos(n \cdot N_r \theta)$$

Поскольку объем вычислений тригонометрических функций может быть значительным при учете нескольких гармоник в функции $L_s(\theta)$, расчет фазного тока рационально производить как функции угла поворота ротора и потокосцепления:

$$\psi = \int (u - i \cdot R),$$

$$i = \frac{\psi}{L_s} = \frac{\psi}{\sum_{n=0}^k A_n \cos(n \cdot N_r \theta)}$$

Описанный подход, с одной стороны, не требует большого объема данных для проведения моделирования, а с другой – позволяет учесть возможные особенности магнитопровода ВИМ, что особенно важно как при расчете и оптимизации новых электрических машин, так и в системах управления.

Результаты моделирования

Моделирование серийно изготавливаемой ВИМ конфигурацией зубцовой зоны 6/4 с использованием описанного выше подхода, основанного на ряде Фурье, выполнено в среде MATLAB/Simulink. Для оценки адекватности такой математической модели приведены также результаты моделирования при использовании традиционного подхода с поисковой таблицей зависимости фазного тока от потокосцепления и угла поворота ротора.

Для получения численных значений поисковой таблицы фазного

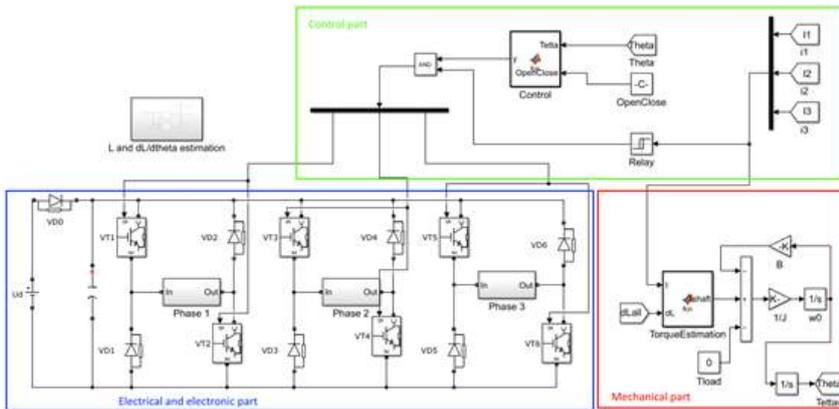


Рис. 3. Имитационная компьютерная модель

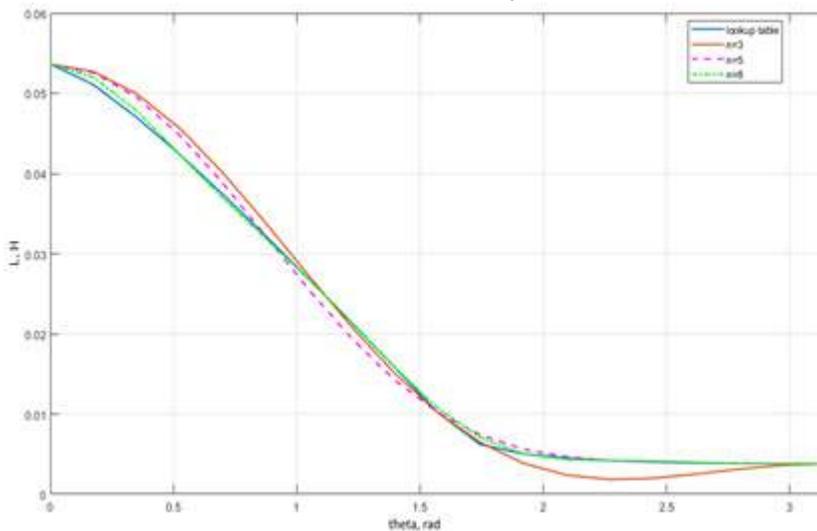


Рис. 4. Зависимости $L(\theta)$

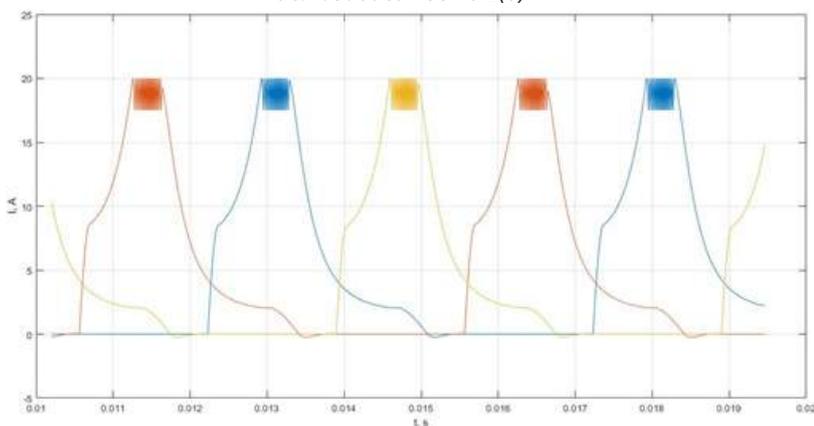


Рис. 5. Фазные токи при моделировании ВИД при $n = 3$

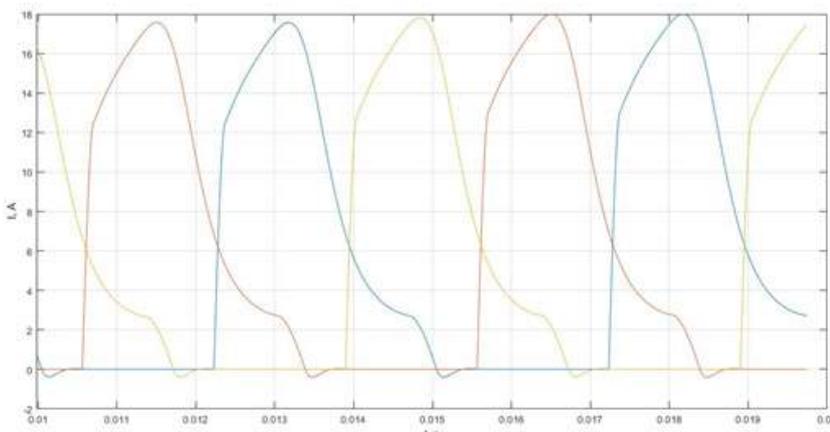


Рис. 6. Фазные токи при моделировании ВИД при $n = 5$

потокосцепления в функции тока и угла поворота ротора были проведены расчеты магнитного поля методом конечных элементов с использованием программы FEMM 4.2. Картина магнитного поля исследуемой машины при согласованном положении ротора показана на рис. 1. Результаты расчетов сведены в матрицу $\psi(\theta, i)$, представленную в виде поверхности на рис. 2. Промежуточные значения потокосцепления получены путем интерполяции кубическими сплайнами.

Компьютерная модель (рис. 3) состоит из электрической и механической частей, а также части управления. В электрической части моделируется полупроводниковый преобразователь на основе IGBT, выполненный по схеме асимметричного моста. Предполагается, что источник постоянного напряжения обладает бесконечной мощностью и нулевым внутренним сопротивлением. Блоки фазных обмоток реализуют вычисление фазных токов в соответствии с выбранным вариантом математического описания. В зависимости от значений фазных токов и частоты вращения часть управления может реализовывать как одноимпульсный режим коммутации фаз, так и токовый коридор с заданными ограничениями тока. Блок *OpenClose* отвечает за установку углов открытия и закрытия ключей преобразователя, блок *Relay* позволяет задавать ограничения тока для режима токового коридора, при этом коммутация ключей выполнена в жестком варианте (верхний и нижний ключи коммутируются одновременно).

Поскольку описанный подход позволяет производить моделирование при различном числе гармоник, принято описание функции $L_s(\theta)$ числом гармоник 3, 5 и 8 (рис. 4).

Результаты моделирования представлены ниже в виде зависимостей фазных токов от времени при работе ВИМ на холостом ходу при частоте вращения ротора 2000 об/мин (рис. 5–8).

Вывод

По результатам моделирования видно, что при $n = 5$ получены фазные токи, наиболее близкие к апробированному варианту с поис-

ковыми таблицами. При этом объем исходных данных значительно снижен. Использование предложенного подхода к математическому моделированию ВИМ позволит значительно упростить структуру наблюдательных и бездатчиковых систем управления, а также ускорить вычисления при оптимизации параметров вентильно-индукторных электроприводов с учетом динамических режимов.

Литература

1. Miller T.J.E. Switched reluctance motor and their control. – Magna physics publishing and Oxford University Press, 1993.
2. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. – Magna physics publishing, 2001.
3. Hongwei G., Salmasi F.R., Ehsani M. Inductance model-based sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed, IEEE Transactions on power electronics, vol. 19, pp. 1568 – 1573, 2004.
4. Fahimi B., Emadi A., Sepe R.B. Four-quadrant position sensorless control in SRM drives over the entire speed range, IEEE Transactions on power electronics, vol. 20, pp. 154 – 163, 2005.

Чавычалов Максим Вячеславович

Родился в 1988 году. В 2010 году окончил Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС) по специальности «Электрический транспорт железных дорог». Кандидат технических наук. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Бездатчиковое определение положения ротора в системе управления вентильно-индукторного электропривода». Опыт работы – 9 лет. В настоящее время работает доцентом кафедр «Тяговый подвижной состав» и «Электротехника и электроника» ФГБОУ ВО РГУПС. Имеет около 40 публикаций в рецензируемых журналах, 3 патента на изобретения.

Chavychalov Maxim

Was born in 1988. In 2010 he graduated from the Rostov State University of Railways (RSTU) with a degree in «Electric Railway Transport».

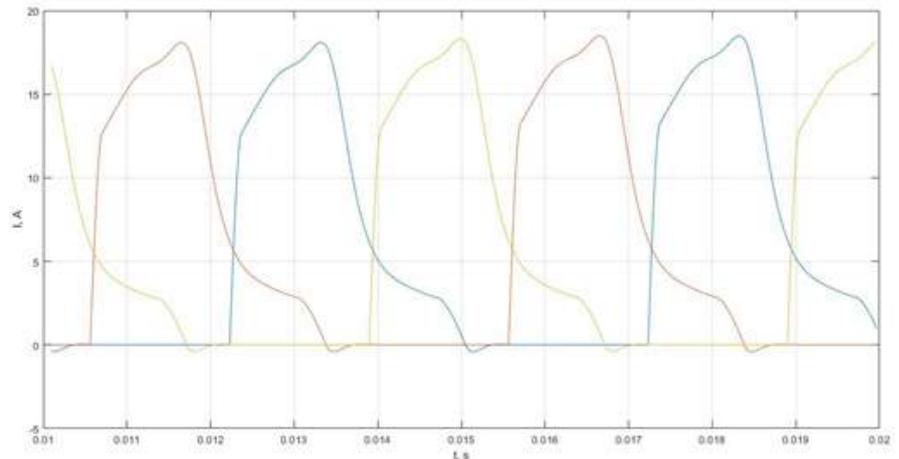


Рис. 7. Фазные токи при моделировании ВИД при $n = 8$

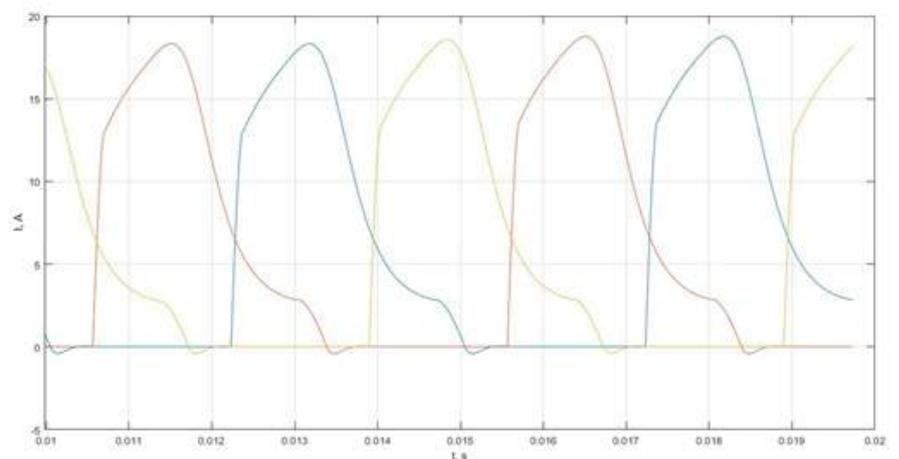


Рис. 8. Фазные токи при моделировании ВИД при использовании поисковых таблиц

Candidate of Technical Sciences. In 2013 he defended his thesis on the topic «Sensorless determination of the position of the rotor in the control system of the valve-inductor electric drive». Work experience is 9 years. At present he works as an associate professor in the departments «Traction rolling stock» and «Electrical engineering and electronics» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RGUPS. He has about 40 publications in peer-reviewed journals, 3 patents for inventions.

Набоков Александр Евгеньевич

Родился в 1979 году. В 2001 году окончил Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС) по специальности «Локомотивы». Опыт работы – 17 лет. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Строительная механика» ФГБОУ ВО РГУПС.

Имеет 12 публикаций в рецензируемых журналах.

Nabokov Alexander

He was born in 1979. In 2001 he graduated from Rostov State Transport University (RGUPS) with a degree in «Locomotives». Work experience is 17 years. At present he works as a senior lecturer at the Department of «Structural Mechanics» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RGUPS. He has 12 publications in peer-reviewed journals.

Зиновьева Анжелика Сергеевна

Родилась в 2000 году. В настоящее время является студенткой ФГБОУ ВО РГУПС.

Zinovieva Angelica

She was born in 2000. At present she is a student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RGUPS.

Анализ гистерезиса выходной емкости моп-транзисторов резонансных преобразователей для транспортных систем

// ANALYSIS OF THE HYSTERESIS OF THE OUTPUT CAPACITANCE OF MOSFETS OF RESONANT CONVERTERS FOR TRANSPORT SYSTEMS //

Татуйко П.С.,
ОАО «Авангард», Санкт-Петербург

Федяева Г.А., д.т.н., доцент,
Брянский государственный
технический университет, Брянск

Надточей А.Г.,
АО «БАЗ», Брянск

Княгинин Д.А.,
АО «Транснефть – Дружба», Брянск

С целью повышения энергоэффективности резонансных полупроводниковых преобразователей для транспортных систем разработана методика, позволяющая выявить наличие и исследовать характер гистерезиса выходной емкости

Для повышения энергоэффективности транспортных средств необходимо исследование и совершенствование как применяемых в составе электрооборудования транспорта полупроводниковых компонентов [1;2], так и электронных преобразователей электроэнергии [3;4] с целью уменьшения потерь энергии во всех режимах работы. Силовые полупроводниковые ключи в рабочем режиме характеризуются статическими и динамическими потерями электрической энергии, причем для МОП-транзисторов ряд динамических процессов обусловлен явлением перезаряда выходной емкости [1]. Для резонансных топологий устройств [5] и устройств, работающих в режиме переключения при нулевом напряжении, процессы перезаряда выходной емкости крайне важны, так как они оказывают существенное влияние на общую эффективность преобразователя. Поэтому на стадии проектирования необходимо выявление гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора

МОП-транзисторов при работе на высоком напряжении, а также оценить динамические потери в транзисторе, обусловленные гистерезисом выходной емкости. Создана испытательная установка и проведены экспериментальные исследования, демонстрирующие наличие гистерезиса выходной емкости n-канальных Mosfet-транзисторов, приведены результаты экспериментов

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, МОП-транзистор, выходная емкость, гистерезис, методика исследования, динамические потери

с целью определения возможности использования данного транзистора в разрабатываемой электротехнической системе.

Функционирование МОП-транзистора в составе статического преобразователя может сопровождаться гистерезисом выходной емкости, который характеризуется неоднозначной зависимостью выходной емкости транзистора от изменения напряжения сток-исток в процессе работы преобразователя. Традиционные методы обнаружения гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора неприменимы при работе полупроводникового ключа на высоком напряжении, предпочтительном в преобразователях электротранспорта с точки зрения снижения электрических потерь. Поэтому для анализа данного явления целесообразно

In order to increase the energy efficiency of resonant semiconductor converters for transport systems, a technique has been developed that allows identifying the presence and investigating the nature of the hysteresis of the output capacitance of MOSFETs when operating at high voltage, as well as evaluating the dynamic losses in the transistor due to the hysteresis of the output capacitance. A test facility was created and experimental studies were carried out demonstrating the presence of hysteresis of the output capacitance of n-channel Mosfet transistors, the results of experiments are presented.

Keywords: semi-conductor converter, MOSFET, output capacitance, hysteresis, research methodology, dynamic losses

применить схему Сойера-Тауэра, используемую при определении физических характеристик сегнетоэлектрических пленок [6]. Предлагаемая для исследования МОП-транзистора схема приведена на рис. 1.

В состав схемы, позволяющей оценить гистерезис выходной емкости МОП-транзистора на высоком напряжении, входит высоковольтный генератор напряжения V_d , который представляет собой полумостовой преобразователь, работающий с заданной частотой и заданным

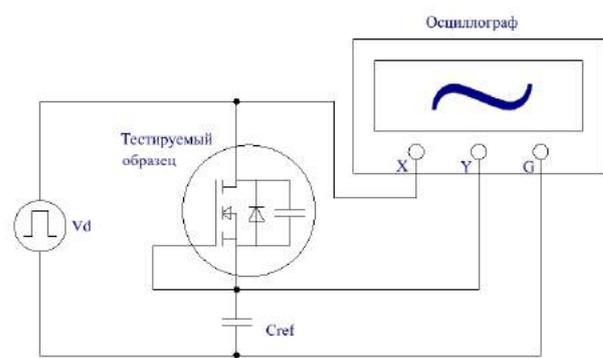


Рис. 1. Схема Сойера-Тауэра для определения гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора

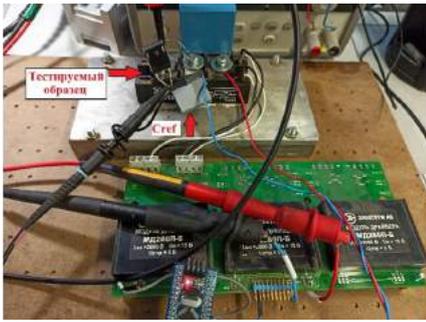


Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда для определения гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора

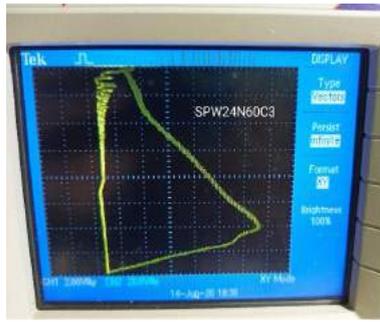


Рис. 3. График, иллюстрирующий гистерезис выходной емкости транзистора SPW24N60C3 в процессе заряда-разряда

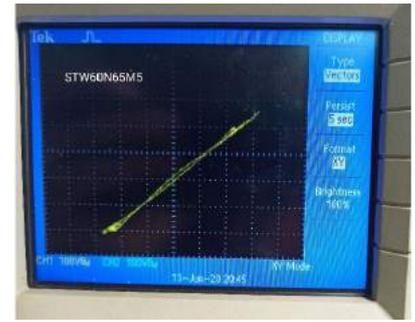


Рис. 4. График, иллюстрирующий гистерезис выходной емкости транзистора STW60N65M5 в процессе заряда-разряда

коэффициентом заполнения. Данный полумостовой преобразователь подключается к высоковольтному источнику постоянного напряжения, который определяет величину напряжения сток-исток тестируемого образца, в данном случае использован источник Agilent 6035A. Транзистор подключается к средней точке полумостового преобразователя и общему выводу. Для более точного определения гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора в схеме присутствует эталонный конденсатор Cref. Важно, чтобы данный конденсатор был рассчитан на напряжение не ниже амплитудного значения напряжения высоковольтного генератора, имел малые потери и низкую зависимость величины емкости от приложенного напряжения.

С целью снижения влияния эталонного конденсатора на гистерезис выходной емкости МОП-транзистора величина емкости данного конденсатора должна быть много больше величины выходной емкости МОП-транзистора. Перечисленным выше условиям соответствуют пленочные полипропиленовые конденсаторы. При проведении исследований использовались 2 типа конденсаторов: BFC233812224 фирмы Vishay и B32652A2222J189 фирмы Epcos. Данный выбор связан с тем, что у исследуемых транзисторов наблюдается большой разброс выходной емкости, ввиду чего точность и наглядность результатов измерений существенно зависят от номинала эталонной емкости.

В качестве тестируемых образцов использовались 2 типа МОП-транзисторов – SPW24N60C3 и STW60N65M5. При проведении исследований выполнялись следующие условия:

- максимальная величина напряжения, подаваемого с генератора на тестируемые образцы, – 400 В;
- частота следования импульсов – от 1 до 100 кГц;
- длительность импульсов – 50% от величины периода.

Для графического отображения гистерезиса выходной емкости использовался осциллограф Tektronix TP52024B в режиме измерения XY. Внешний вид испытательного стенда с конденсатором BFC233812224 приведен на рис. 2.

Перед началом измерения затвор транзистора принудительно подключается к истоку с целью исключения перехода транзистора в ключевой режим и исключения влияния его работы на результаты измерений. Заряд выходной емкости Q_{OSS} МОП-транзистора равен величине заряда на эталонном конденсаторе C_{ref} и вычисляется как

$$Q_{OSS} = C_{ref} \cdot U_Y, \quad (1)$$

где C_{ref} – емкость эталонного конденсатора, U_Y – напряжение на эталонном конденсаторе относительно общего вывода.

Напряжение сток-исток МОП-транзистора U_{DS} определяется по формуле:

$$U_{DS} = U_X - U_Y, \quad (2)$$

где U_X – напряжение на стоке транзистора относительно общего вывода.

На рис. 3 и 4 приведены графики, демонстрирующие явление гистерезиса выходной емкости n-канальных Mosfet-транзисторов SPW24N60C3 (рис. 3) и STW60N65M5 (рис. 4). Следует отметить, что при изменении частоты импульсов от 1 кГц до 100 кГц гистерезис выходной емкости изменяется незначительно.

Анализируя полученные результаты измерений, можно сделать вывод, что транзистор SPW24N60C3 имеет существенный гистерезис выходной емкости в процессе заряда-разряда. В то же время транзистор STW60N65M5 имеет незначительный гистерезис выходной емкости и является идеальным решением для применения в преобразователях, работающих в цепях с резонансным переключением силовых полупроводниковых ключей, что отображено в технической документации на данный компонент [7].

Величина электрических потерь P_{HysOSS} , характеризующихся гистерезисом выходной емкости транзистора, определяется площадью между кривыми заряда и разряда данной емкости.

$$P_{HysOSS} = f \cdot E_{Hys} = f \cdot (E_{OSS,Ch} - E_{OSS,Disch}) \quad (3)$$

где f – частота импульсов; $E_{OSS,Ch}$ – величина энергии, необходимой для заряда выходной емкости; $E_{OSS,Disch}$ – величина энергии, выделяемой при разряде выходной емкости.

Энергия, необходимая для заряда выходной емкости, определяется выражением:

$$E_{OSS,Ch} = \int_0^{Q_{max}} U_{DS}(Q_{OSS}) dQ_{OSS} \quad (4)$$

Энергия, необходимая для разряда выходной емкости, определяется выражением:

$$E_{OSS,Disch} = \int_{Q_{max}}^0 U_{DS}(Q_{OSS}) dQ_{OSS} \quad (5)$$

Используя формулы (1–5) и результаты эксперимента, можно определить динамические потери, вызываемые явлением гистерезиса выходной емкости МОП-транзистора. По результатам эксперимента

(рис. 3) следует отметить, что максимальный гистерезис выходной емкости МОП-транзистора наблюдается при малых напряжениях сток-исток (до 100-200 В). Данное явление связано с физическими особенностями структуры полупроводниковых приборов [8].

В итоге можно констатировать, что предложенная методика позволяет выявить наличие и исследовать характер гистерезиса выходной емкости МОП-транзисторов при работе на высоком напряжении, а также оценить динамические потери в транзисторе, обусловленные гистерезисом выходной емкости, что очень важно для обеспечения энергоэффективной работы резонансных статических преобразователей для транспортных систем.

Литература

1. J.B. Fedison, M. Fornage, M.J. Harrison and D.R. Zimmanck, «Coss Related Energy Loss in Power MOSFETs Used in Zero-Voltage-Switched Applications», APEC 2014 Proceedings, 2014 – pp. 150 – 156.
2. D. A. Knyagin, E. A. Kulchenkov, S. B. Rybalka, A. A. Demidov Study of characteristics of n-p-n type bipolar power transistor in small-sized metalpolymeric package type SOT-89: 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (St. Petersburg, Russia, May 25 – 28, 2021).
3. P.S. Tatuiko, G.A. Fedyaeva, V.V. Kobishanov; V.P. Fedorov Energy-efficient half-bridge voltage converter for vehicle electrical systems //Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2019 1st International Conference, – IEEE: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947476. – P. 461 – 464.
4. Татуйко П.С., Федяева Г.А., Иньков Ю.М., Беззубенко А.И. Развитие и повышение энергоэффективности систем электродвижения на автомобильном транспорте// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 6. – С. 14 – 18).
5. Татуйко П.С., Федяева Г.А., Беззубенко А.И. Исследование резонансных преобразователей напряжения// Сборник научных трудов IV

Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», – Брянск. – 2020. – с. 196 – 199.

6. Чеботаренко О.Б. Исследование характеристик сегнето-пьезоматериалов по петлям диэлектрического гистерезиса на частоте 50 Гц. Учебно-методическое пособие. – Ростов-на-Дону: Изд. ФГОУ ВПО «Южный Федеральный Университет», 2008 – 26 с.

7. STFW60N65M5, STW60N65M5. N-channel 650 V, 0.049 Ω, 46 A MDmesh™ V Power MOSFET in TO-247, TO-3PF – Technical Documentation. STMicroelectronics, Rev 2, 2011 – p. 16.

8. J. Roig, F. Bauwens, «Origin of Anomalous COSS Hysteresis in Resonant Converters With Superjunction FETs», Electron Devices, IEEE Transactions on, vol.62, №9, 2015 – pp.3092-3094.

Татуйко Павел Станиславович

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил Брянский государственный технический университет по специальности «Промышленная электроника». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает начальником сектора в ОАО «Авангард», является начальником отдела «Силовая электроника». Призер международного конкурса «Инновационная радиоэлектроника». Имеет 10 научных работ и 1 патент РФ.

Tatuiko Pavel Stanislavovich

Born in 1989. In 2013 graduated from the Bryansk State Technical University majoring in the «Industrial Electronics». 8 years work experience. He works as the head of the section at «Avangard company», and is the head of the «Power Electronics» department. Winner of the «Innovative radio electronics» international competition. 10 scientific papers and 1 patent of the Russian Federation.

Федяева Галина Анатольевна

Родилась в 1957 году. В 1979 году окончила Брянский институт транспортного машиностроения по специальности «Городской электрический транспорт». Доктор технических наук, доцент. В 2008 году защитила диссертацию по теме «Прогнозирование динамиче-

ских процессов при нестационарных и аварийных режимах тягового электропривода с асинхронными двигателями». Опыт работы (в том числе инженером-конструктором в бюро электрооборудования Брянского машиностроительного завода) – 28 лет. В настоящее время является профессором кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета. Удостоена Почетной грамоты Минобрнауки России. Имеет 165 научных работ и 25 патентов РФ.

Fedyaeva Galina

She was born in 1957. In 1979 she graduated from Bryansk Transport Machine Building Institute majoring in «Urban electric transport». Doctor of Technical Sciences, associate professor. In 2008 she defended the thesis with topic «Forecasting of dynamic processes in nonsteady and emergency modes of traction electric drive with induction motors». She has 28 years of work experience. At present she works as professor at Electronic, radio-electronic and electro-technical systems department of Bryansk State Technical University. She has 165 scientific works and 25 patents.

Надточей Андрей Григорьевич

Родился в 1990 году. В 2009 году окончил Брянский строительный техникум им. профессора Н.Е. Жуковского по специальности «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий». В 2021 году – Брянский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время является ведущим инженером-конструктором АО «БАЗ» (г. Брянск). Автор 4 научных работ.

Nadtochey Andrey Grigorievich

Born in 1990. In 2009 he graduated from the N.E. Zhukovsky Bryansk Construction College, majoring in «Installation, adjustment and operation of the electrical equipment

of the industrial and civil buildings». In 2021 graduated from the Bryansk State Technical University majoring in «Electric Drive and Automation of the industrial units and process system». 8 years work experience He is the leading design engineer at the Bryansk Automobile Plant (Bryansk). He is the author of the 4 scientific papers.

Княгинин Дмитрий Александрович

Родился в 1998 году. В 2021 году окончил Брянский государственный технический университет по специальности «Промышленная электроника и микропроцессорная техника». В настоящее время работает инженером 1 категории АО «Транснефть – Дружба» (г. Брянск). Имеет 5 научных работ и 1 патент РФ.

Knyaginin Dmitry Alexandrovich

Born in 1998. In 2021 graduated from the Bryansk State Technical University majoring in «Industrial Electronics and Microprocessor Technology». He works as the 1st category engineer at the «Transneft-Druzhba» company (Bryansk). 5 scientific papers and 1 patent of the Russian Federation

Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей

// THE MULTIFACTORIAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE ROAD CONDITIONS ON THE ERROR-RATE PERFORMANCE OF THE ON-BOARD ELECTRICAL SYSTEM OF THE VEHICLES //

**Николаев П.А., д.т.н.,
АО «АВТОВАЗ», Тольятти**

**Козловский В.Н., д.т.н.,
профессор, Самарский
государственный технический
университет, Самара**

**Подгорный А.С., к.т.н.,
Самарский государственный
технический университет, Самара**

**Саксонов А.С., аспирант,
Самарский государственный
технический университет, Самара**

В работе представлены результаты многофакторного исследования влияния дорожной обстановки на параметры помехоустойчивости бортового электротехнического комплекса легковых автомобилей к электромагнитным воздействиям в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: легковой автомобиль, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, эксплуатация.

The paper presents the results of the multifactorial study of the influence of the road situation on the parameters of the error-rate performance of the on-board electrical system of motor cars to the electromagnetic influences during operation.

Keywords: motor car, error-rate performance, electromagnetic compatibility, operation.

В современных конструкциях автотранспортных средств (АТС) вопросам обеспечения помехоустойчивости бортового электротехнического комплекса к электромагнитным воздействиям начинают уделять все больше внимания.

Наиболее актуальными, ввиду высокой степени интеграции систем с микропроцессорным управлением, являются проблемы помехоустойчивости, т.к. сбои и отказы, возникающие при воздействии электромагнитных помех, могут привести к различного рода последствиям [1 – 4]. Для минимизации рисков в эксплуатации АТС решения закладываются на этапе разработок как самих изделий электротехнических систем, так и бортового электротехнического комплекса в целом. Конечным этапом подтверждения правильности подходов к помехоустойчивости являются испытания. В этом направлении разработан свод международных стандартов [5 – 14]. Кроме того, автопроизводители, как правило, разрабатывают собствен-

ные внутренние стандарты и нормы, содержащие специфические требования к помехоустойчивости электрооборудования автомобилей в процессе испытаний [16 – 18]. Общий подход проведения тестов рассматривает взаимодействие одного автомобиля и одного источника помех. Также в существующих регламентах автомобиль рассматривается как статический объект. Даже несмотря на то, что на динамометрическом стенде имитируются ездовые циклы.

Испытания в большинстве случаев проводят в безэховой камере, что позволяет их стандартизировать и обеспечить повторяемость результатов за счет поддержания заданных условий, что немаловажно при доработке и обеспечении соответствия бортового электротехнического комплекса автомобилей требованиям по ЭМС. Существующий подход минимизирует риски помехоустойчивости электрооборудования в эксплуатации, но не позволяет полностью их исключить. Это связано с тем, что сложно в процессе

испытаний обеспечить условия многофакторности электромагнитной обстановки (ЭМО).

Реальная электромагнитная обстановка обладает изменчивостью. Помимо существующей в конкретной области в данный интервал времени некоторой группировки источников помех значимым фактором, влияющим на помехоустойчивость электротехнических систем от электромагнитных воздействий, является дорожная обстановка. Причем важным элементом в учете ЭМО является дорожное покрытие, транспорт, здания, сооружения, ограждения, эстакады. Они могут перенаправлять электромагнитную энергию.

В простейшем случае «автомобиль – дорога – источник внешнего излучения» в отсутствии прочих составляющих (рис. 1) напряженность электрического поля в некоторой точке определяется суперпозицией прямой и отраженной волн от источника

$$E_{\Sigma} = E_{\text{пр}} + E_{\text{отр}}, \quad (1)$$

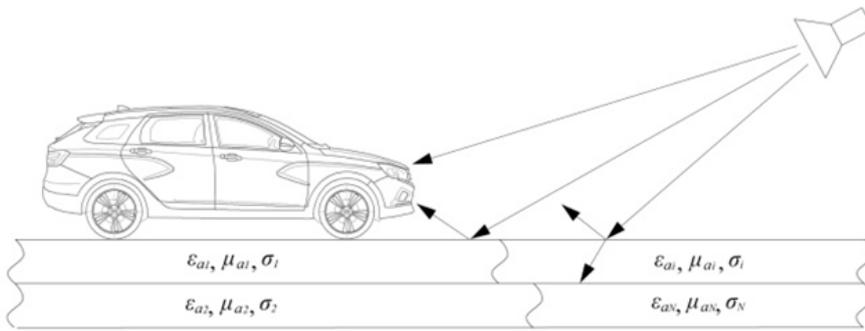


Рис. 1. Система «автомобиль – дорога – источник внешнего излучения»

где $E_{пр}$ и $E_{отр}$ – прямая и отраженная электрические составляющие напряженности ЭМП.

Особенностью рассматриваемой системы является то, что параметры отраженной волны зависят от электромагнитных свойств среды, на которую она падает. Исходя из известных соотношений [17], коэффициент отражения от границы двух сред определяется отношением:

$$k_{отр} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

где Z_1 – характеристическое сопротивление воздуха, равное 377 Ом; Z_2 – характеристическое сопротивление дороги, равное

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}}}, \quad (3)$$

где σ – проводимость.

Как следует из приведенных выражений, параметры $E_{отр}$ зависят от свойств грунта и применяемых в дорожном строительстве материалов.

По существующей классификации дороги подразделяются на капитальные, облегченные, переходные и низшие. Первые два вида

строятся с применением цементных конструкций или асфальта. Два последних состоят из щебня, гравия и прочих грунтов.

Применение соответствующей технологии укладки дорожного полотна выбирается из учета весовой нагрузки. Магистрали, развязки и основные городские улицы, как правило, должны выдерживать большой поток автотранспорта, в том числе и грузового. Поэтому в технологиях их укладки распространена армированная металлическая сетка. Ряд дорог делается из армированных бетонных блоков. За счет применения в дорожном полотне металлических конструкций коэффициент отражения можно принять равным -1. Действительно, в этих случаях большая часть электромагнитной энергии отражается от границы раздела двух сред.

Переходные и низшие дороги в основном являются грунтовыми. Их электромагнитные свойства очень сильно зависят от состава. Так, средняя проводимость сухой почвы составляет 10^{-3} См/м, а глины – 0,1 См/м. Сильное влияние на электромагнитные свойства грунта оказы-

вают осадки. Максимальная проводимость влажной почвы составляет 2×10^{-2} См/м, а у глины – 1 См/м. Расчеты по (2) и (3) показывают, что у грунтовых дорог коэффициент отражения может достигать -0,2.

Как известно, путь отраженного от дороги луча больше прямого на величину Δ . Соответственно, если в Δ укладывается целое n число полуволн, то в зависимости от поляризации и числа n в точке схождения лучей на данной частоте будет соответствующий экстремум амплитуды поля. Совершенно очевидно, что суммарная амплитуда прямой и отраженной волн больше, чем амплитуда прямой волны. Отсюда следует вывод, что на капитальных и облегченных дорогах, где в технологиях применяется армирование металлическими сетками, автомобиль будет попадать в более сложную электромагнитную обстановку, а значит, вероятность появления проблем с помехоустойчивостью бортового электротехнического комплекса будет больше на магистралях и городских улицах. Поставленный эксперимент подтвердил данный вывод (рис. 2 и рис. 3). Исследования распределения напряженности электромагнитных полей в подкапотном пространстве автомобиля LADA NIVA в зависимости от расстояния до источника излучения проводились в безэховой камере АВТОВАЗ. Начальное расстояние автомобиля до излучающей антенны составляло 6 м, а конечное – 1,2 м. Шаг изменения расстояния – 0,6 м. В каждой позиции проводились измерения напряженности электромагнитных полей

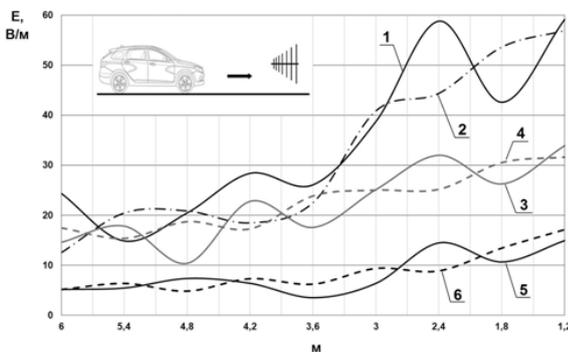


Рис. 2. – Распределение напряженности ЭМП в подкапотном пространстве Лада Нива в зависимости от расстояния до источника излучения: 1 – 200 МГц, металлический пол; 2 – 200 МГц, пол покрыт РПМ; 3 – 650 МГц, металлический пол; 4 – 650 МГц, пол покрыт РПМ; 5 – 1 ГГц, металлический пол; 6 – пол покрыт РПМ

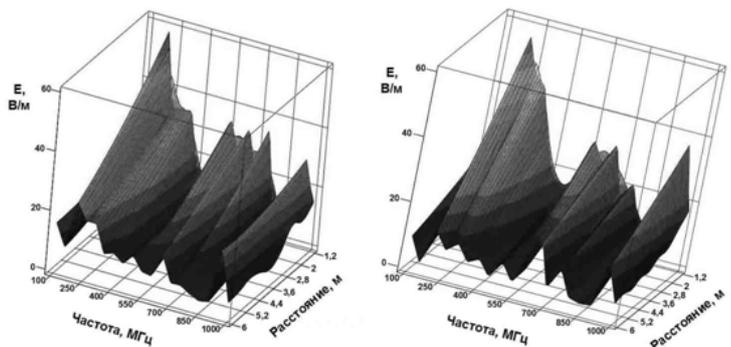


Рис. 3. Трехмерное распределение напряженности ЭМП в подкапотном пространстве LADA NIVA в зависимости от расстояния до источника излучения: а) металлический пол; б) пол покрыт РПМ

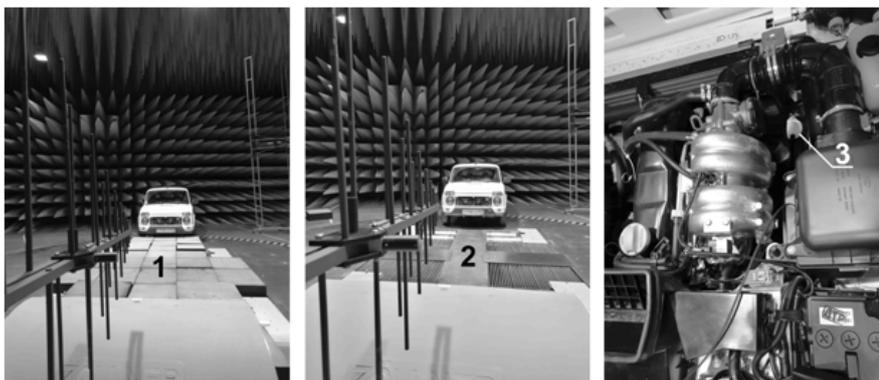


Рис. 4. Внешний вид расположения испытательных объектов в эксперименте исследования влияния дорожного покрытия на уровень ЭМП: а) пол покрыт РПМ; б) металлический пол; в) расположение датчика ЭМП в подкапотном пространстве LADA NIVA; 1 – пол покрыт РПМ; 2 – металлический пол; 3 – датчик ЭМП

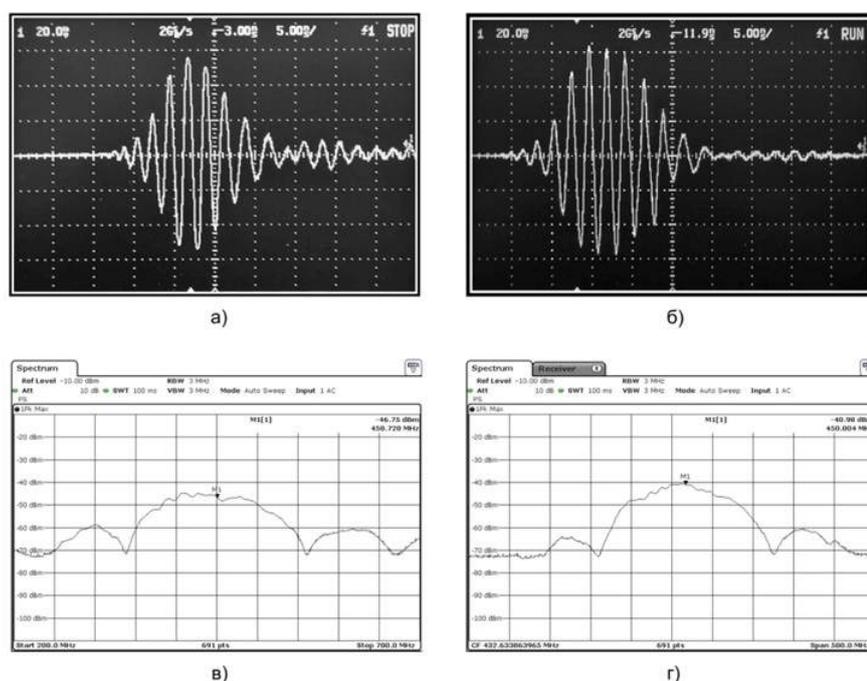


Рис. 5. Импульсное воздействие: а) прямой сигнал; б) сумма прямого и отраженного сигналов; в) спектр прямого сигнала; г) спектр суммы прямого и отраженного сигналов

в подкапотном пространстве автомобиля в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц с шагом перестройки по частоте 50 МГц при двух вариантах пола (металлический и покрытый радиопоглощающим материалом (РПМ) (рис. 4)), имитирующих соответствующие дорожные покрытия с армирующей металлической сеткой и сухую грунтовую дорогу. Датчик поля ЕМС 20 располагался в подкапотном пространстве.

Как видно из результатов эксперимента (рис. 2), распределение по расстоянию напряженности электрической составляющей электромагнитных помех (ЭМП) с металлическим полом имеет более выраженные экстремумы по сравнению с полом, по-

крытым РПМ. И как очевидно, в позициях, где происходит суммирование поля прямой и отраженной волн, уровень ЭМП больше, чем уровень ЭМП с минимизированной отраженной составляющей.

В процессе движения автомобиля с некоторой скоростью источник излучения из-за изменения разности хода лучей попадает в минимумы и максимумы электромагнитного поля. В этом случае наведенные в бортовых цепях помехи амплитудно-модулированы. Глубина модуляции зависит от коэффициента отражения и в предельном случае при $k = -1$, $M = 1$. Если автомобиль на некоторой скорости проходит расстояние между максимумом и мини-

мумом поля, то частота модуляции наведенной помехи равна:

$$\Omega = \frac{2v}{\lambda}, \quad (4)$$

где v – скорость АТС, а λ – длина волны излучения.

Как видно из (4), с увеличением скорости автотранспортного средства (АТС) и частоты излучения увеличивается частота модуляции. Расчеты показывают, что ее значения лежат в области низких частот. Так, при частоте излучения 2 ГГц и скорости 100 км/ч частота модуляции равна 370 Гц.

Если источник помех излучает непрерывное узкополосное ЭМП, то наибольшее число проблем с электромагнитной совместимостью происходит вследствие превышения в схемах порогового значения сигнал/шум. Помехи воздействуют на бортовой электротехнический комплекс АТС длительное время, подавляя полезные сигналы в бортовой сети. Как правило, данный вид электромагнитных помех имеет узкий энергетический спектр, и для эффективного воздействия необходимо совпадение частоты излучения с резонансными частотами бортового электротехнического комплекса автомобиля, которые с позиции электродинамики являются сложными антеннами, и их частотные характеристики определяются многими факторами, начиная от формы кузова и заканчивая топологией печатных плат, схемотехническим исполнением и структурой микросхем [4]. Если источник создает импульсное ЭМП, то, в основном, нарушения функционирования связаны с искажением информации в период времени действия помехи, т.е. имеет место быть вероятностный характер воздействия. Но при этом помеха имеет более широкий спектр, чем непрерывная, который в общем случае обратно пропорционален длительности импульса [18], что повышает вероятность совпадения с резонансными частотами АТС.

При воздействии импульсного излучения для практики представляется интерес рассмотреть двух случаев:

- сложение прямого и отраженного сигналов при небольшой задержке, когда время задержки меньше половины длительности импульса (рис. 5);

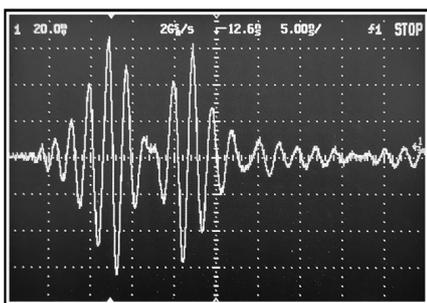


Рис. 6. Прямой и отраженный сигналы, разнесенные во времени

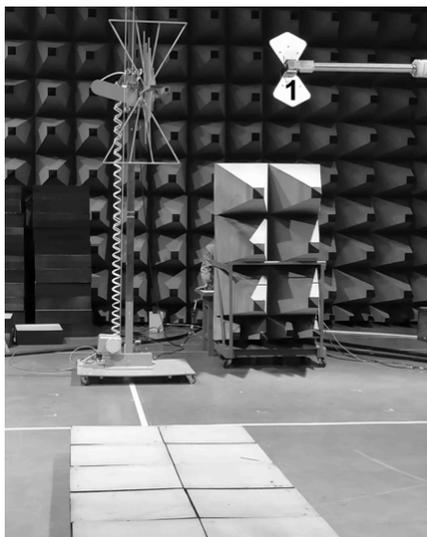


Рис. 7. Внешний вид расположения испытательных объектов в эксперименте исследования параметров импульсных сигналов: 1 – излучающая широкополосная антенна Schwarzbeck 420NJ



Рис. 8. Общий вид эксперимента по исследованию влияния дорожной обстановки: 1 – исследуемый автомобиль; 2 – автомобиль-отражатель; 3 – излучающая антенна

- большая задержка отраженного сигнала по отношению к прямому, когда корреляционная функция близка или равна нулю (рис. 6).

В первом случае вследствие линейности преобразования Фурье на АТС воздействует сигнал с суммарной спектральной плотностью энергии, которая больше, чем у прямого импульса. Средняя мощность воздействующего сигнала будет равна

$$P_{\Sigma} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |S_{\text{пр}}(\omega_n) + S_{\text{отр}}(\omega_n)|^2, (5)$$

При коэффициенте отражения от дороги близком к -1

$$P_{\Sigma} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |S_{\text{пр}}(\omega_n) + S_{\text{пр}}(\omega_n)|^2 = 4 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |S_{\text{пр}}(\omega_n)|^2 (6)$$

Из (6) видно, что в предельном случае средняя мощность суммарного сигнала в 4 раза больше, чем прямого. Это подтверждается результатами измерений спектров, представленных на рис. 5.

Если спектр суммарного воздействия перекрывает резонансные частоты АТС, то вероятность достижения наведенной помехи порога помехоустойчивости и, соответственно, нарушения работоспособности бортового электрооборудования возрастает.

Во втором случае, при большой задержке отраженного сигнала относительно прямого (рис. 6), происходит удвоение частоты следования импульсов излучения. Соответственно, увеличивается вероятность искажения полезной информации.

Эксперименты, результаты которых представлены на рис. 5 и 6, проведены в безэховой камере. В качестве излучателя применялась широкополосная дипольная антенна Schwarzbeck 420NJ, а в качестве приемной использовалась логопериодическая антенна EMCO 3142. Для уменьшения отраженной волны от металлического пола использовался РПМ (рис. 7). Задавались следующие параметры импульсного сигнала: несущая частота – 450 МГц, длительность – 10 нс.

Случаи модели «автомобиль – дорога – источник внешнего излучения» достаточно распространены. Но в процессе эксплуатации, особенно в городах, взаимная конфигурация АТС относительно окружающей обстановки более сложная и динамически изменяющаяся. Добавляются дополнительные отражатели: дорожные ограждения, движущийся автотранспорт, эстакады, ЛЭП и т.п. Модель уже включает в себя множество отражателей. Общее выражение воздействующего электрического поля в области пространства, куда попадает АТС, можно записать в виде

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N E_{i\text{max}} e^{j(\omega t - kr_i - \varphi_i)}, (7)$$

где $E_{i\text{max}}$ – амплитуда i -ой составляющей электрического поля;

k – волновое число;

r_i – модуль радиуса-вектора луча, пришедшего с некоторого направления. Для прямой волны r равно расстоянию от АТС до источника излучения, а для отраженных составляющих – сумме расстояний от источника до отражающей поверхности и от отражающей поверхности до АТС; φ_i – изменение фазы колебаний при падении волны на отражающую поверхность. Для прямой волны очевидно, что $\varphi_1 = 0$. Если электрический вектор поля параллелен плоскости падения отражающей поверхности, то $\varphi_i = 0$, а если перпендикулярен, то $\varphi_i = \pi$. При условии равенства всех фазовых набегов $kr_i + \varphi_i$ произойдет сложение электрического поля.

Как следует из (7), в эксплуатации АТС электромагнитная обстановка динамически изменяется, и, в зависимости от взаимного расположения объектов, поле может самофазироваться. В случае, если некоторое пространство ограничено большими по площади проводящими объектами (большегрузными автомобилями, металлическими дорожными ограждениями, армированной дорогой, сетью троллейбусных проводов), то могут образовываться динамические объемные резонаторы. Так как расстояния между параллельными проводящими объектами составляют как минимум несколько метров, то и низшие частоты резонаторов лежат в коротковолновом диапазоне.

Экспериментальные исследования подтверждают принципиальную возможность появления динамических электромагнитных резонаторов. На рис. 8 показан общий вид взаимного расположения испытательных объектов. Исследуемый автомобиль LADA Granta (№1) помещался в электромагнитное поле, созданное суперпозицией прямой и отраженных от пола и рядом стоящего автомобиля-отражателя LADA XRAY (№2) волн. Как видно из результатов (рис. 9), в зависимости от набега фаз в исследуемом диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц имеются

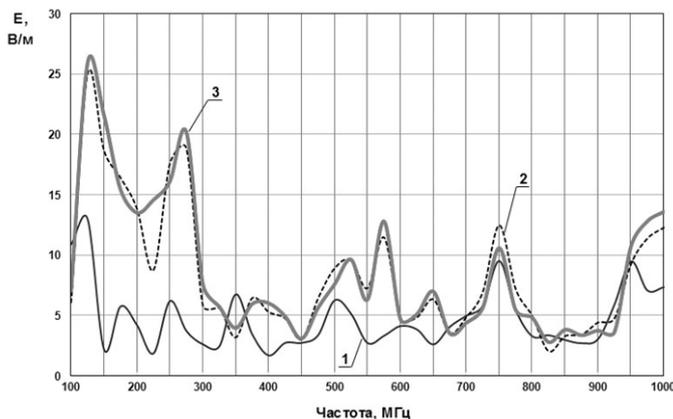


Рис. 9. Результаты эксперимента по исследованию влияния дорожной обстановки на уровень ЭМП подкапотном пространстве автомобиля: 1 – напряженность поля прямой волны; 2 – суперпозиция прямой и отраженной от металлического пола волн; 3 – суперпозиция прямой и отраженных от пола и автомобиля-отражателя волн

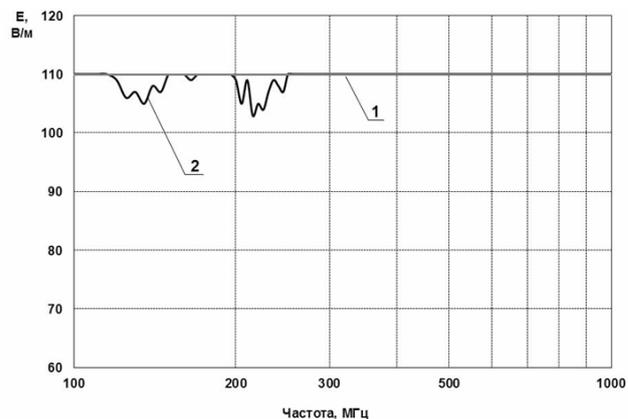


Рис. 10. Характеристика помехоустойчивости контроллера системы управления двигателем АТС: 1 – без автомобиля-отражателя; 2 – с автомобилем-отражателем

экстремумы по отношению к двум вариациям: «прямая волна» и «суперпозиция прямой и отраженной от пола волн». Наиболее характерное усиление ЭМП наблюдается в диапазоне от 130 – 275 МГц и 950 МГц – 1 ГГц. Ослабление наиболее выражено в области 350 МГц и 825 МГц.

В эксперименте измерение электромагнитного поля производилось в подкапотном пространстве автомобиля №1. Калибровка воздействующего поля с уровнем 10 В/м в диапазоне частот 100 МГц – 1 ГГц осуществлялась в соответствии с методом ISO 11451-2 [8] при отсутствии автомобилей в испытательной зоне.

Вышеописанный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что в более сложной динамически меняющейся дорожной обстановке имеется вероятность настройки в конкретный момент времени на некоторую частоту электромагнитного резонатора, сформированного дорожными объектами. При совпадении усиленного воздействия с резонансными частотами АТС повышается вероятность нарушения работоспособности бортового электрооборудования.

Как видно из рассмотренного, параметры электромагнитного поля являются случайной функцией. Соответственно, в одном и том же месте в разные моменты времени реакция АТС на воздействие будет различна. Направление прихода отраженной составляющей электромагнитного поля может совпасть с направлением эффективного приема АТС на частоте излучения, что и будет причиной нарушения работоспособности бортового электрооборудования.

Проведенные исследования подтверждают вывод о влиянии отражающих поверхностей на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса АТС (рис. 10). В эксперименте взаимное расположение автомобилей соответствовало конфигурации, представленной на рис. 8. Калибровка воздействующего поля уровня 110 В/м осуществлялась без автомобилей в соответствии с ISO 11451-2 [8]. В первом испытании автомобиль №1 (рис. 8) с работающим двигателем выдержал тестовое немодулированное воздействие 110 В/м в диапазоне частот 100 – 1000 МГц. Затем в испытательной зоне был размещен автомобиль-отражатель, и цикл повторился. На частотах 120 – 245 МГц из-за воздействия помех происходила остановка двигателя, которые искажали сигнал в информационном канале датчика положения коленчатого вала, что нарушало работоспособность контроллера системы управления двигателем. Минимальный порог помехоустойчивости составил 103 В/м на частоте 215 МГц.

Таким образом, электромагнитная обстановка в заданной области при одинаковой мощности стороннего источника динамически меняется из-за влияния погодных условий, электромагнитных свойств дороги и взаимной конфигурации дорожных объектов. При движении автомобиля по направлению к источнику излучения из-за отражения от дороги в бортовой сети наводятся помехи с частотой и глубиной модуляции, зависящей от скорости, длины волны и проводимости дороги. Наиболее

сложная электромагнитная обстановка создается при равенстве фаз приведенных волн от всех окружающих отражающих поверхностей. В этом случае вероятность нарушения работоспособности АТС максимальна.

Литература

1. T. Rybak, M. Steffka. Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC). 1st ed. Kluwer Academic Publishers. 2003. 310 p.
2. 2020 Automotive EMC guide. Interference technology guide series. 2020. 26 p.
3. 2021 Automotive EMC guide. Interference technology guide series. 2021. 29 p.
4. Козловский, В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2. / Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Пьянов М.А.// Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 2. С. 19-28.
5. Николаев П.А., Кечиев Л.Н. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств – М.: Грифон, 2015. – 424 с.
6. Regulation No. 116. Anti-theft and alarm systems. Addendum 115. Revision 6. UNITED NATIONS. Geneva, 2019. 95 p.
7. ISO 11451-1. Road vehicles. Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 1: General principles and Terminology. Third edition. Geneva, 2015. 25 p.
8. ISO 11451-2. Road vehicles. Vehicle test methods for electrical

disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 2: Off-vehicle radiation sources. Third edition. Geneva, 2015. 25 p.

9. ISO 11451-3. Road vehicles. Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 3: On-board transmitter simulation. Third edition. Geneva, 2015. 54 p.

10. ISO 10605. Road vehicles. Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge. Second edition. Geneva, 2008. 50 p.

11. CISPR 25. Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. Fourth edition. Geneva, 2016. 156 p.

12. ISO 7637-2. Road vehicles – Electrical disturbances from conduction and coupling. Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only. Third edition. Geneva, 2011. 48 p.

13. ISO 16750-1. Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Part 1: General. Second edition. Geneva, 2006. 20 p.

14. ISO 16750-2. Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Part 2: Electrical loads. Fourth edition. Geneva, 2012. 28 p.

15. Product specification 36 – 00 – 808. Resistance to electrical disturbances and electromagnetic compatibility instructions concerning electrical, electronic and pyrotechnic equipment. RENAULT. 2008. 124 p.

16. Procurement specification 9.90110. Automotive electric and electronic devices. Fiat Group Automobiles. 2007. 56 p.

17. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования – Л.: Энергия. 1975. – 109 с.

18. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы – М.: Советское радио. 1971. – 672 с.

Козловский Владимир Николаевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2010 году защитил докторскую диссертацию по теме «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой

«Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Автор 400 научных работ, из них более 300 в изданиях ВАК, 20 монографий, 40 статей в международных базах Scopus и Web of Science.

Kozlovskiy Vladimir

Was born in 1976. In 1999 he graduated from the Togliatti Polytechnic Institute with a degree in «Electrical equipment for cars and tractors». Doctor of technical sciences. In 2010 he defended his doctoral dissertation on the topic «Ensuring the quality and reliability of the electrical system of cars». Work experience is 20 years. At present he works as the head of the «Department theoretical and general electrical engineering» of Samara State Technical University (SamSTU). He is the author of 400 scientific works, of which more than 300 are in the editions of the Higher attestation commission, 20 monographs, 40 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

Подгорный Александр Сергеевич

Родился в 1992 году. В 2015 году окончил ФГБОУ ВО «ПВГУС» по специальности «Автосервис». Кандидат технических наук. В 2019 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы контроля бортового электротехнического комплекса автомобилей на помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает научным сотрудником кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Автор 17 работ, из них 10 в изданиях ВАК, 2 патента на изобретение.

Podgorny Aleksandr

Was born in 1992. In 2014 he graduated from PVGUS Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education with a degree in «Autoservice». Candidate of Technical Science. In 2019 he defended his thesis on «Improving the control system of the on-board electrical complex of cars for noise immunity to electromagnetic influences». Work experience is 5 years. At present he works as a researcher at the Department of «Theoretical and General Electrical Engineering» of the Samara State Technical University. He is the author of 17 works, 10 of which are in the editions of the Higher Attestation

Commission, 2 patents for invention.

Николаев Павел Александрович

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Радиоинженер». Доктор технических наук. В 2012 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение электромагнитной совместимости автомобильных систем зажигания». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает начальником бюро электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ». Автор более 100 научных трудов, в том числе 23 патентов.

Nikolaev Pavel

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Samara State Aerospace University majoring in «Radio engineer». He is doctor of technical sciences. In 2012 he defended the dissertation, the theme is «Provision of electromagnetic compatibility of automobile ignition systems». He has 19 years of work experience. At present he works as the head of the electromagnetic compatibility bureau of PJSC AVTOVAZ. He is author of 100 scientific works, including 23 patents.

Саксонов Александр Сергеевич

Родился в 1996 году. В 2014 году окончил бакалавриат Тольяттинского государственного университета по специальности «Электроэнергетика и электротехника». В 2018 году – магистратуру Тольяттинского государственного университета по специальности «Электроэнергетика и электротехника». Аспирант. Опыт работы – 3,5 лет. В настоящее время является младшим научным сотрудником научно-исследовательского сектора кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Автор 10 научных работ.

Saksonov Alexander Sergeevich

Born in 1996. In 2014 graduated from the Togliatti State University majoring in «Electric Power and Electrical Engineering». In 2018 master's degree from the Togliatti State University majoring in «Electric Power and Electrical Engineering». Post graduate 3.5 years work experience He is the junior researcher in the research sector of the Department of «Theoretical and General Electrical Engineering», the Samara State Technical University. He is the author of the 10 scientific papers.

Оптимизация транспортировки грузов на примере применения электроники и электрооборудования в мультимодальных перевозках

// OPTIMIZATION OF CARGO TRANSPORTATION OF THE EXAMPLE OF APPLICATION OF ELECTRONICS AND EQUIPMENT IN MULTIMODAL TRANSPORTATION //

**Рахматуллин С.С.,
Казанский государственный энергетический университет, Казань**

Мировая торговля не обходится без надлежащего функционирования международных перевозок. Возросший спрос на оптимизацию систем транспортного управления стал предпосылкой появления мультимодальных перевозок – процесса последовательной транспортировки грузов, выполненных несколькими видами транспортных средств по одному договору. Транспортные компании, осуществляющие данную деятельность, вслед за растущей тенденцией к цифровизации и автоматизации логистических процессов с целью повышения эффективности, экономичности, скорости, безопасности и качества междуна-

родной транспортировки грузов, все чаще внедряют различные решения в области электроники и электрооборудования транспорта и транспортной инфраструктуры. Обзор примеров применения таких решений на различных этапах мультимодальных перевозок предлагается в данном исследовании.

Ключевые слова: электроника, электрооборудование, мультимодальные перевозки, автоматизация, оптимизация, транспортные средства, логистические компании.

World trade is not without the proper functioning of international transport. The increased demand for optimization of transport management systems has become a prerequisite for the emergence of multimodal transportation - the

process of consecutive transportation of goods performed by several types of vehicles under a single contract. Transport companies carrying out this activity, following the growing trend towards digitalization and automation of logistics processes in order to improve the efficiency, economy, speed, safety and quality of international cargo transportation, are increasingly introducing various solutions in the field of electronics and electrical equipment of transport and transport infrastructure, a review of examples of their application at various stages of multimodal transportation is devoted to the purpose of this study.

Keywords: electronics, electrical equipment, multimodal transport, automation, optimization, vehicles, logistics companies.

Введение

Сегодня надлежащее функционирование транспортных компаний невозможно представить без оптимизации систем управления, которые привели к росту спроса на применение различной электроники и электрооборудования в транспорте и транспортной логистике, которые, помимо всего прочего, позволяют повысить скорость, эффективность и безопасность международной торговли, а также связанных с ней международных перевозок. Данные обстоятельства повлияли на совершенствование самих ТС и их инфраструктуры в целом [1]. Особенно наглядно это прослеживается в процессах последовательной транспортировки грузов, выполненных несколькими видами транспорта по одному договору, – мультимодаль-

ных перевозках, активно развивающихся благодаря глобализации современного общества [2]. Одной из распространенных разновидностей эффективной мультимодальной транспортировки груза является интермодальная перевозка, когда груз не подвергается переформированию в случае смены вида перевозимого ТС [3].

Корректная реализация перевозок требует непрерывной согласованной работы мультимодального транспортного оператора или единой цепочки всех организаций-партнеров, решающих задачу доставки груза по всему маршруту: от начального пункта загрузки до конечного пункта его выгрузки. В зависимости от этапа транспортировки могут быть задействованы логистические центры, всевозможные виды тер-

миналов, таможенных пунктов, автомобильные, железнодорожные, морские, авиационные и трубопроводные пути в целом [4].

Мультимодальные перевозки предполагают унификацию груза, в рамках которой последний принимается за некую единицу, что облегчает его перегрузку и саму доставку, а также обеспечивает лучшую сохранность на пути следования. Примером унификации груза может служить стандартная контейнеризация [5]. В настоящее время при длительных перевозках используются контейнеры, оборудованные регулирующими холодильными установками со встроенным термостатом для поддержания нужной температуры [6].

Сама процедура комбинации нескольких видов транспорта при



Рис. 1. Дорожная опора с датчиками для связи с устройством viaToll [12]

международных перевозках таких контейнеров в большинстве случаев не только позволяет повысить экономическую эффективность, способствуя общему развитию транспортной логистики, но и положительно влияет на окружающую среду, снижает нагрузку на инфраструктуру и уменьшает перегруженность различных транспортных путей [7].

В этом контексте большую роль играет оптимизация перевозок, которая осуществляется не без помощи применения цифровых и силовых электронных решений и электрооборудования в различных звеньях мультимодальных перевозок, обзору которых посвящена данная работа.

Применение электроники и электрооборудования в автомобильных перевозках

Международная перевозка груза автомобильными путями не обходится без взаимодействия ТС с интеллектуальными транспортными системами (ИТС) [8], которые, в первую очередь, включают в себя группы структур оплаты дорожных сборов за проезд по различным национальным автомагистралям. К таким группам относятся электронные системы взимания платы. В каждой стране они индивидуальны и преимущественно



Рис. 2. Пример смарт-тахографа в грузовом автомобиле [14]

уникальны: в Германии используется система Toll Collect, в Польше – viaTOLL, в Беларуси – BelToll, в России – «Платон» [9, 10].

К примеру, система viaToll обязательна для автобусов и грузовых автомобилей в стране-производителе и работает по принципу установки специального устройства на неметаллизированной поверхности лобового стекла ТС, которое посылает радиоволновой сигнал 5,8 ГГц на дорожные П-образные опоры с датчиками (рис. 1). Водителям остается проверять баланс счета на заправочных станциях, чтобы обладать информацией о необходимости проведения оплаты [11].

При автомобильной транспортировке груза часто применяются смарт-тахографы (рис. 2), позволяющие следить за режимами труда и отдыха водителя, за нарушение которых может грозить денежный штраф. Также в смарт-тахографы встроена спутниковая антенна, работающая с навигационной системой GPS, которая помогает обеспечивать фиксацию места нарушения правил дорожного движения, а оснащенность технологией DSRC многократно расширяет их функционал и взаимодействие с крупной долей ИТС [13].

Сегодня в области автомобильного транспорта все большую попу-

лярность получают исследования по внедрению в дорожные сети электрогрузовиков, одну модель из которых в середине 2019 года представила швейцарская корпорация энергетического машиностроения ABB (рис. 3). Двадцатипятитонное ТС позволяет перевозить груз до 12 тонн и оснащено батареей 310 кВт·ч, заряжающейся около 6 часов, и двигателем 489 л. с. с крутящим моментом 2700 Н·м. Его скорость ограничена 85 км/ч, а запас хода составляет 300 км, что находится в пределах максимального расстояния доставки груза в границах страны-производителя, откуда в рамках мультимодальных перевозок груз может быть перегружен на другой вид ТС [15].

Применение электроники и электрооборудования в железнодорожных перевозках

Железнодорожный транспорт занимает особую роль в мультимодальных перевозках, поскольку позволяет эффективно транспортировать огромное количество массивного и крупногабаритного груза на дальние расстояния, вне зависимости от времени суток, года и атмосферных условий, поэтому возрос спрос на применение электроники и современного электрооборудования в логистической сфере этого вида транспорта.

В железнодорожной и локомотивостроительной отрасли электронные схемы и решения, прежде всего, применяются в контексте соединения поездов друг с другом, а также их сцепления с воздушными контактными сетями. Такие поезда называются электровозами и электропоездами, пример системы тягового электроснабжения которых представлен на рис. 4.



Рис. 3. Электрогрузовик компании ABB [16]

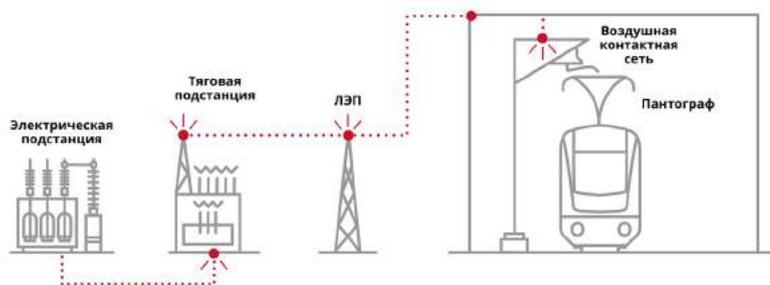


Рис. 4. Система тягового электроснабжения



Рис. 5. Автоматический электрический козловой кран [24]



Рис. 6. Гибридный паром Color Hybrid [27]

Тяговое электроснабжение подключается к внешней сети электроэнергии. Высокомощные электродвигатели разгоняют поезда быстрее их дизельных аналогов, не нанося вреда окружающей среде, что является весомой причиной распространения функционирования электрических поездов в городском, пригородном транспорте и метрополитене. Зачастую тяговая электрификация обеспечивается постоянным или переменным током 50 Гц благодаря выпрямителям тяговых подстанций, а напряжение на железных дорогах России составляет 3000 В [17, 18].

Электродвигатели примечательны тем, что способны во время торможения ТС перевести свою работу в режим генератора, вырабатываемая которым энергия зачастую передается другому ТС через контактную сеть, что повышает энергетическую эффективность железнодорожных перевозок. Еще одним преимуществом таких двигателей является выработка номинального крутящего момента при нулевой угловой скорости [19].

Электрические решения применимы в железнодорожной сфере также в контексте соединения поез-

дов друг с другом с помощью электрических муфт. При приближении поездов друг к другу такие соединители открывают свои крышки и сцепляются специальными контактами обоих устройств, соединяя составные части поездов [20]. Электрические муфты высокоэффективны, но чаще подвержены прохождению технического осмотра.

Надлежащее функционирование железнодорожного движения обеспечивается также применением цифровой релейной защиты, в том числе на перевалочных пунктах, откуда груз перегружается на следующий вид транспорта, где обеспечение корректной поставки потока информации, в том числе о сбоях и неисправностях сети с последующим устранением повреждений и неполадок, особенно важно [21, 22].

Применение электроники и электрооборудования в морских перевозках

На припортовых железнодорожных перевалочных пунктах с целью перемещения контейнеров со специальных подвижных платформ на речное, морское судно или хранилище применяется система козловых кранов. Их автоматизированные типы (рис. 5) питаются от кабельной катушки и оснащены системой бокового автоуправления контейнеродержателем, которое сокращает время погрузки и финансовые расходы [23].

Обычно в порту за такими кранами хранятся контейнеры: с холодильными установками, для быстрого доступа к ним – по бокам, а без них – в центральной части. Здесь не обходится без транспорта, облегчающего их перевозку, – автоматизированных управляемых ТС и штабелирующих кранов.

Все упомянутое в европейских морских портах внедрено в процесс оптимизационной, интеллектуальной, электронной, дистанционно управляемой и адаптивно-масштабируемой под растущие потребности морских перевозок технологией «Роботизированная система управления контейнерами». Система включает в себя:

- поднятие контейнера ручным краном и его перемещение на платформу для крепления;

- снятие твистлоков и загрузку контейнера автоматическим краном на автоматически управляемое ТС;
- размещение последним (с применением автоматических лифтов при необходимости) контейнера на соответствующее место на складе [25].

Недавно к водному транспорту примкнула доля гибридных паромов, сочетающих в себе использование нескольких видов источников энергии, к примеру, применение традиционного дизельного топлива вместе с питанием от электрических аккумуляторных батарей. Отчасти это обусловлено ужесточением правил по защите морской среды, в рамках которых к судам предъявляются требования использовать экологически чистые приводы. Однако паромы весьма удобны для мультимодальных перевозок и все чаще предпочитают для перевозки грузовых автомобилей, транспортируемых контейнерами полуприцепным способом.

Наглядным примером гибридного парома является его самый большой представитель в мире – судно норвежской компании Color Line, длиной 160 метров, вместимостью 2000 пассажиров и 500 автомобилей (рис. 6). Паром оборудован электроприводом и шестидесятипятитонной аккумуляторной установкой емкостью 4,7 МВт, подзарядка которой осуществляется всего за 1 час как через береговые станции, так и бортовым генератором [26].

Применение электроники и электрооборудования в авиационных перевозках

Важной составляющей авиационной электроники являются устройства, базирующиеся на радиосигналах. Однако большинство традиционных радарных систем не способно обеспечить надлежащую безопасность полетов и снижающуюся с годами экономическую эффективность. Сегодня им на замену приходит технология «Автоматическое зависящее наблюдение-вещание», работающая с GPS и позволяющая максимально точно транслировать диспетчерам и пилотам других воздушных судов данные о полете (координаты, скорость, расход топлива



Рис. 7. RFID-метка [29]

и пр.). Технология не ограничивается последними и помогает в наземном мониторинге трафика на взлетно-посадочных полосах и рулежных дорожках аэропорта.

Однако вытеснение радиосигналов из авиалокационной отрасли не отразилось на сокращении их применения в авиационных перевозках в целом. Так, большую роль в повышении эффективности авиаперевозок играет технология радиочастотной идентификации «RFID-маркировка грузов». Она заключается в процедуре записи информации на специальную метку с микросхемой (рис. 7), по которой можно определить историю передвижения того или иного объекта. Маркировка помогает идентифицировать не только перевозимые грузы, но и сотрудников, а также применяется в целях автоматизации систем безопасности, и имеет гораздо больший объем памяти, чем штрих-код или QR-код [28].

Нельзя не упомянуть электродистанционную систему управления (ЭДСУ) самолетом, без которой сегодня не обходится ни одно современное воздушное судно, задействованное в мультимодальных перевозках. Система представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из непосредственно самой системы управления, датчиков контроля, приводов управляющих поверхностей самолета, систем индикации, коммуникации и силовой системы. Первоочередная задача ЭДСУ – сокращение веса всей системы управления летательного аппарата путем оптимизации ее компоновки. Кроме того, ЭДСУ позволяет снизить человеческий

фактор во время авиационных перевозок, автоматически контролируя параметры полета и корректируя команды пилотов в режиме реального времени, что позволяет минимизировать возникновение сбоев и ошибок и, соответственно, повысить эффективность доставки груза по проложенному воздушному пути до пункта его назначения [30].

Выводы

Различные грузовые транспортные средства имеют свою специфику управления, и, как показал обзор, соответствующие этому управлению электронику и электрооборудование, позволяющие повысить скорость, безопасность, экономичность мультимодальных и интермодальных перевозок, зачастую предполагающих транспортировку конкретных контейнеров стандартных размеров, в том числе с холодильными установками.

В работе описаны примеры перехода на электропривод для трех видов грузовых транспортных средств с целью представления особой значимости данного мероприятия для современных международных перевозок, где вопросы повышения энергоэффективности, соблюдения законодательства и экологической политики, а также успеха рекламных кампаний имеют интенсивный характер, определяющий вектор того, чем именно будет подкреплена и обусловлена значительная часть нововведений в областях внедрения электроники и электрооборудования в оптимизацию мировой транспортной системы грузоперевозок в будущем.

Литература

1. Kern J., Sullivan M. The Digital Transformation of Logistics: Demystifying Impacts of the Fourth Industrial Revolution. USA: Wiley-Blackwell, 2021. Pp. 1 – 480.
2. Попова Ю.В. К вопросу о теоретической основе глобализации мировой транспортной системы // Логистика – евразийский мост: материалы XI междунар. научн.-практ. конф. 28 – 30 апр. 2016 г. Красноярск, 2016. С. 208 – 212.
3. Рачковская И.А. Логистика: учебное пособие. М.: МГУ, 2017. 224 с.

4. Бутакова, Н. А. Правовой статус оператора мультимодальной перевозки // Глаголь правосудия, 2014, № 7. С. 30 – 33.
5. Панасенко Н., Яковлев П. Контейнеризация международной транспортной системы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2016, № 4. С. 103 – 116.
6. Filina-Dawidowicz L., Filin S. Innovative energy-saving technology in refrigerated containers transportation // Energy Efficiency. 2019. Vol. 12. № 5. pp. 1151 – 1165.
7. Малевич В., Пономарева М. Сущность интермодальных перевозок // Достижения науки и образования, 2018, № 29. Т. 1. С. 34 – 35.
8. Perallos A., Hernández-Jayo U., Onieva E., García Z. Intelligent transport systems: Technologies and applications. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.
9. Gardziński, T. Przedsiębiorstwo społeczne szansą rozwiązywania problemów regionów // Kwartalnik Celný. 2016
10. Коротких Ю. Внедрение системы «Платон» в России и ее влияние на грузоперевозки // Управление рисками в АПК, 2016, № 2. С. 5 – 9.
11. Gschnitzer, M. viaTOLL: Electronic Toll Collection in Poland-Experience and Outlook // In 19th ITS World Congress ERTICO-ITS Europe European Commission ITS America ITS Asia-Pacific. 2012.
12. Фотографии viaToll [Электронный ресурс]. <https://www.viatoll.pl/ru/legkovye-transportnye-sredstva/kontakty/press-centr/fotografii> (дата обращения: 26.06.2021)
13. Mateboer K., Bakker D., Sportiello L. Smart Tachograph: User manual for the sample cryptographic keys and digital certificates Generation Tool. 2017
14. Smart Tachograph (DTCO) Version 4.0 [Электронный ресурс]. <https://www.fleet.vdo.co.uk/products/smart-tachograph-dtco-version-40/> (дата обращения: 28.06.2021).
15. Çabukoglu E. et al. Battery electric propulsion: An option for heavy-duty vehicles? Results from a Swiss case-study // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018. Vol. 88. № 1. pp. 107 – 123.
16. Zero-emission electric truck for ABB showcased in Swiss capital [Электрон-

- ный ресурс]. <https://new.abb.com/news/detail/25739/zero-emission-electric-truck-for-abb-showcased-in-swiss-capital> (дата обращения: 30.06.2021).
17. Бардушко В. Д., Закарюкин В. П., Крюков А. В. Принципы построения систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Теплотехника, 2014. – 166 с.
18. Белинский С., Кузнецов К. Оценка параметров электромагнитных полей частотой 50 Гц в РУ-3,3 кВ тяговых подстанций // Безопасность жизнедеятельности, 2012, № 7. С. 12 – 17.
19. Ren Y., Zhu Z., Liu J. Direct Torque Control of Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives With a Simple Duty Ratio Regulator // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61. № 10. pp. 5249 – 5258.
20. Automatic Coupler [Электронный ресурс]. https://www.oleo.co.uk/media/media_uploads/Automatic-Coupler-2-page-data-sheet-lo-res.pdf (дата обращения: 02.07.2021)
21. Baranov L., Grechishnikov V. Synthesis of the analog-digital conversion channel in automatic railroad systems // Russ. Electr. Engin. 2012. Vol. 83. № 1. pp. 660 – 666.
22. Kuznetsov S., Arshinova S., Avetisyan K. Hardware and algorithm of digital protection of electrified railway transport // Information Technologies in Business and Industry: Intern. conf. 18–20 Feb. 2019. Novosibirsk, 2019. pp. 1 – 6.
23. Asef-Vaziri A., Khoshnevis B., Rahimi M. Design and analysis of an automated container handling system in seaports // International Journal of Agile Systems and Management. 2008. Vol. 3. № 1–2. pp. 112 – 126.
24. Overview Of Rubber Tire Gantry Crane [Электронный ресурс]. <https://www.gantrycranesales.com/rubber-tire-gantry-crane-sale/> (дата обращения: 04.07.2021).
25. My colleague is a robot [Электронный ресурс]. https://www.tideworks.com/wp-content/uploads/2015/06/201407_CM_Roundup_Automation.pdf (дата обращения: 06.07.2021).
26. Color Hybrid Ferry [Электронный ресурс]. <https://www.ship-technology.com/projects/color-hybrid-ferry/> (дата обращения: 08.07.2021).
27. Color Hybrid [Электронный ресурс]. <https://ulstein.com/references/color-hybrid> (дата обращения: 10.07.2021).
28. Новые технологии авиаперевозок [Электронный ресурс]. <https://issek.hse.ru/trendletter/news/211410732.html> (дата обращения: 12.07.2021).
29. RFID-метка [Электронный ресурс]. <https://www.pochta.ru/support/post-rules/rfid> (дата обращения: 14.07.2021).
30. Nicolin I., Nicolin B. The fly-by-wire system // INCAS BULLETIN. 2019. Vol. 11. № 4. pp. 217 – 222.

Рахматуллин Самат Султанович

Родился в 1999 году. Учится в Казанском государственном энергетическом университете. Студент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Научные интересы: моделирование режимов работы электроэнергетических систем, исследование проблем функционирования электрооборудования транспортно-технологических средств, машин и энергетических установок.

Samat Rakhmatullin

Was born in 1999. Studies at the Kazan State Energy University. Ceatener of the Department «Relay Protection and Automation of Electric Power Systems». Scientific interests: modeling the modes of operation of electric power systems, the study of the problems of functioning of electrical equipment of transport and technological means, machinery and energy installations.

Моделирование системы рекуперации энергии при торможении автомобиля с суперконденсатором

// THE MODELING OF ENERGY RECUPERATION SYSTEM WITH SUPERCAPACITOR DURING AUTOMOTIVE VEHICLE BRAKING //

**Вышков Ю.Д., д.т.н., профессор,
Московский авиационный
институт, Москва**

**Томилин М.М., к.т.н.,
Московский авиационный
институт, Москва**

Кинетическая энергия автомобиля при торможении преобразуется в электрическую энергию с использованием малоинерционной синхронной электрической машины в режиме генератора, приводимой во вращение от трансмиссии автомобиля. Сохранить эту электрическую энергию с помощью электрохимического аккумулятора за малое время торможения, иногда за секунды, не удастся. В автомобильных системах для сохранения энергии

при торможении используются суперконденсаторы. На имитационной компьютерной модели в среде Simulink SimPowerSystems проведено моделирование рекуперации энергии при торможении автомобиля с использованием суперконденсатора. Показана недоступная для электрохимических аккумуляторов возможность сохранения энергии за короткое время торможения.

Ключевые слова: рекуперация энергии, суперконденсатор, трансмиссия, электрохимический аккумулятор.

The kinetic energy of the automotive vehicle during braking is converted into electrical energy using a low-inertia synchronous electric machine in generator mode, driven by the vehicle's transmission. It is not possible to store this electrical energy with the help of an electrochemical battery for a short braking time, sometimes in seconds. Automotive systems use supercapacitors to conserve energy during braking. On a simulation computer model in the Simulink SimPowerSystems, the simulation of energy recuperation when braking a car using a supercapacitor was carried out. The possibility of energy conservation in a short braking time, which is unavailable for electrochemical batteries, is shown.

Keywords: energy recuperation, supercapacitor, transmission, electrochemical battery.

Возможность быстрого заряда суперконденсаторов позволяет эффективно использовать их в рекуперативных тормозных системах автомобилей. Малоинерционный электрический генератор способен преобразовать кинетическую энергию автомобиля, выделяемую при торможении в электрическую. Но сохранить электрическую энергию с помощью электрохимического аккумулятора, даже самого совершенного, за малое время торможения, иногда за секунды, не удастся. Сделать это можно, используя для сохранения энергии суперконденсаторы.

Подобная рекуперация энергии при торможении легковых автомобилей с использованием суперконденсаторов осуществлена в системе Старт-Стоп «i-ELoop» (Intelligent Energy Loop). Эта система устанавливается на серийные автомобили Mazda с 2012 года. Система «i-ELoop» практически мгновенно преобразу-

ет в электричество большой объем кинетической энергии при замедлении автомобиля. Утверждается, что при движении по городу расход топлива снижается на ~10% [1].

Кроме того, что суперконденсатор может очень быстро заряжаться и столь же быстро отдавать энергию, он допускает гораздо большее количество циклов заряда-разряда, чем аккумулятор, без ухудшения рабочих характеристик. Рекуперативные тормозные системы могут снижать расход топлива в традиционных автомобилях и увеличивать пробег электромобилей. Рекуперативная тормозная система на гибридных и электрических автомобилях обычно строится с использованием тяговых электрических машин переменного тока, асинхронных или синхронных, которые при торможении переводятся в режим генератора и приводятся во вращение от трансмиссии автомобиля.

Имитационная модель подобной системы рекуперации кинетической энергии в среде Simulink SimPowerSystems [2] представлена на рис. 1 [3].

Угловая скорость вращения ротора генератора уменьшается от максимальной величины в начальный момент замедления автомобиля до нуля при его полной остановке (рис. 2).

Эта угловая скорость является входной величиной модели синхронного генератора на рис. 1. Фазное напряжение синхронного генератора показано на осциллограмме рис. 3.

Отметим, что амплитуда выходного напряжения синхронного генератора заметно уменьшится при линейном уменьшении угловой частоты вращения при замедлении автомобиля, в то время как амплитуда выходного тока сохраняет приблизительно постоянную величину. По-видимому, это объясняется уменьшением индуктивного сопро-

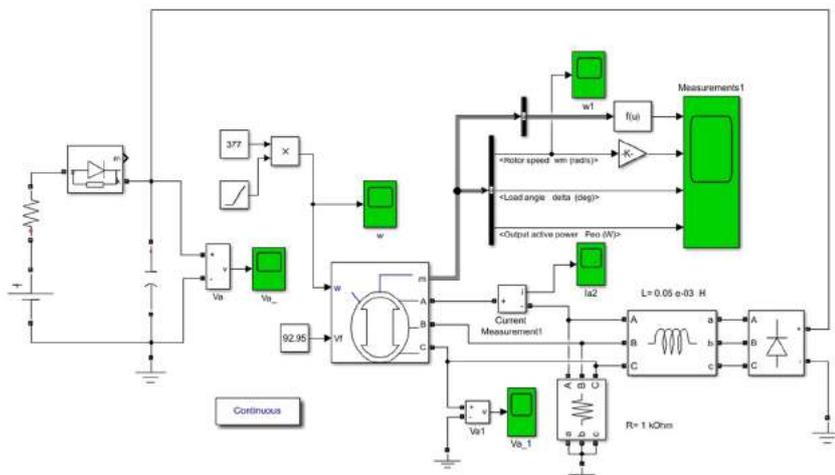


Рис. 1. Имитационная модель системы рекуперации кинетической энергии в Simulink SimPowerSystems

Vyshkov Yuri

He was born in 1935. In 1959 he graduated from the MAI majoring in Radio Engineering. He is Doctor of Technical Sciences, Professor professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering of MAI. In 1988 he defended his thesis, the subject is Theory and devices of electromagnetic suspension. He has 62 years of work experience.

Томилин Максим Михайлович

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Липецкий государственный технический университет по специальности «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил диссертацию на тему «Разработка методики проектирования экранов бортовых кабелей космических аппаратов для обеспечения помехозащищенности при воздействии электростатических разрядов». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ. Имеет 43 научные публикации.

Tomilin Maxim

He was born in 1986. In 2008 he graduated from the Lipetsk State Technical University majoring in «Electrical equipment and Electrical Facilities of Enterprises, Entities and Institutes». He is Candidate of Technical Sciences. In 2011 he defended his thesis on «Development of a technique for designing shields for spacecraft cables to provide interference immunity when exposed to electrostatic discharges». He has 8 years of work experience. Currently he works as an assistant professor at the «Theoretical electrical engineering» department of the MAI. He has 43 scientific publications.

тивления обмоток синхронного генератора и трехфазного фильтра на выходе генератора.

Напряжение на суперконденсаторе $C = 1 \text{ Ф}$ возрастает от начальной величины $U_n = 120 \text{ В}$ до величины $U = 375 \text{ В}$ за торможение до полной остановки в течение 1 с. Энергия, сохраняемая при этом в суперконденсаторе:

$$\Delta W = C(U^2 - U_n^2)/2 = 1 \cdot (375^2 - 120^2)/2 \approx 63 \text{ кДж}$$

Кинетическая энергия легкового автомобиля массой 500 кг при скорости перед началом торможения 20 м/с:

$$W = mV^2/2 = 500 \cdot 20^2/2 = 100 \text{ кДж}$$

Выводы

Проведенное рассмотрение показывает, что значительная часть кинетической энергии движущегося автомобиля после преобразования этой энергии в электрическую форму может быть сохранена с использованием суперконденсаторов. Суперконденсаторы позволяют выполнять это сохранение за время,

измеряемое секундами, что невозможно с помощью электрохимических аккумуляторов.

Литература

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 288 с.
2. T. Furukawa, N. Okada, I. Honda and N. Akiba. Automobile efficiency improvements using electrochemical capacitor energy storage. World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EVS.2013.6914977.
3. Вышков Ю.Д., Томилин М.М. Применение суперконденсаторов в бортовых электротехнических комплексах. – М.: Изд-во МАИ, 2020. – 160 с.

Вышков Юрий Дмитриевич

Родился в 1935 году. В 1959 году окончил МАИ по специальности «Радиотехника». Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ. В 1988 году защитил диссертацию по теме «Теория и устройства электромагнитной подвески». Опыт работы – 62 года.

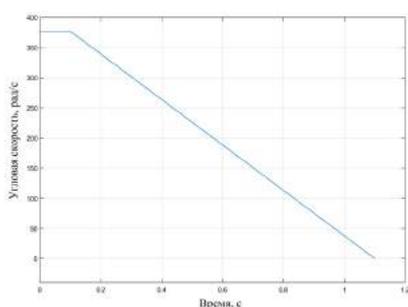


Рис.2. Уменьшение угловой скорости ротора генератора до нуля при остановке автомобиля

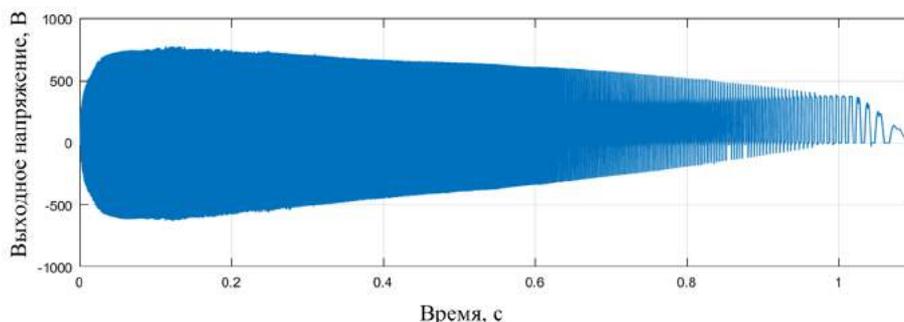


Рис. 3. Выходное напряжение синхронного генератора переменного тока