

УДК 629.4.018

*ПРИЛЕПСКИЙ Ю.В., к. т. н., доцент,
Донецкий институт железнодорожного транспорта*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

На основании проведенных исследований показана возможность и целесообразность использования многоканальной схемы преобразователя электрической энергии в бортовых системах рекуперации транспортных средств.

Ключевые слова: система рекуперации, энергия электрическая, преобразователь, магнитопровод ферритный

Постановка проблемы

В настоящее время наблюдается стабильный рост цен на энергоносители в связи со значительным их потреблением и истощением мировых запасов топлива. Все это в полной мере можно отнести к транспортным средствам, где рост цен на топливо существенно повышает долю транспортных затрат в себестоимости и цене конечного продукта. Попытки снизить затратную часть перевозок за счет перевода транспорта с автономными энергетическими установками на альтернативные виды топлива не обеспечивают должного эффекта из-за ограниченности потенциальных возможностей производства синтетических топлив, их относительно низкого энерго содержания и побочных нежелательных явлений при их сгорании в энергетических установках. Поэтому поиск путей снижения расхода топлива транспортными средствами в настоящее время весьма актуален.

Как показывает практика, наиболее реальный путь снижения себестоимости перевозок лежит в снижении удельных затрат топлива за счет совершенствования технологии смесеобразования и процессов сгорания топлива, снижения доли потерь в энергетическом балансе работы энергетической установки.

Характерным явлением эксплуатации транспортных средств является частая смена тяговых и тормозных режимов работы. Такая смена режимов предполагает значительные потери энергии при классическом торможении, когда кинетическая энергия движения преобразуется в тепловую и рассеивается в пространстве. В настоящее время ведутся работы по оснащению транспортных средств накопителями энергии различных типов, заряжаемых на тормозных режимах с последующим использованием накопленной энергии на тяговых режимах работы. Совершенствование и внедрение системы рекуперации энергии позволяет существенно сократить расход топлива и снизить себестоимость перевозок.

Цель работы

Исследовать возможность повышения надежности транспортных систем рекуперации энергии, позволяющих существенно снизить расход горючего в процессе эксплуатации транспортного средства

Исследовательская часть

Коллективом Донецкого института железнодорожного транспорта ведутся работы по совершенствованию процесса рекуперации с использованием накопителей электрической энергии конденсаторного типа. За основу взята схема накопления энергии в режиме электрического торможения, при котором тяговые электрические двигатели переключаются на генераторный ре-

жим работы, а тормозное усилие определяется силой тока от генератора к накопителю электрической энергии [1, 2]. Использование в такой схеме накопителей конденсаторного типа продиктовано их высокой удельной энергоемкостью; длительным гарантированным сроком эксплуатации, превышающим аналогичный показатель аккумуляторов в 3–4 раза; низким внутренним сопротивлением, что позволяет работать без существенного нагрева с токами в десятки тысяч ампер; простотой обслуживания. Единственным существенным недостатком накопителей конденсаторного типа является зависимость напряжения от уровня заряженности, что предъявляет повышенные требования к преобразователям электрической энергии по поддержанию определенной величины тока при постоянном изменении напряжения на накопителях и тяговых электрических двигателях (генераторах) как в режиме торможения, так и в режиме тяги [3].

В данной работе исследовалась возможность использования многоканальной схемы преобразователя электрической энергии вместо моноканальной. Необходимость такой замены продиктована следующими причинами. Как показали ранее проведенные исследования, наиболее приемлемым для преобразователей электрической энергии подобного типа является диапазон частот 20...60 кГц. Выбор такого диапазона частот позволяет существенно снизить вес и габариты преобразователя за счет использования ферритов в качестве магнитопровода силового трансформатора, повысить коэффициент полезного действия преобразователя до 80...90 %, вывести частоту упругих колебаний, возникающих вследствие магнитострикционного эффекта, за частотный диапазон восприятия органами слуха человека (дальнейшее повышение рабочей частоты преобразователя оказалось нецелесообразным из-за возрастания влияния емкости мощных полупроводниковых приборов и, как следствие, увеличения энергетических потерь).

Однако испытания, проведенные с использованием физической модели рекуперативной системы, выявили возможность выхода из строя цельного тороидального ферритного магнитопровода из-за значительных внутренних упругих напряжений, формируемых магнитострикционным эффектом от магнитного потока. Для проверки возможности возникновения данного негативного явления были проведены дополнительные стендовые испытания. Принципиальная схема электрической части стенда представлена на рис. 1, а.

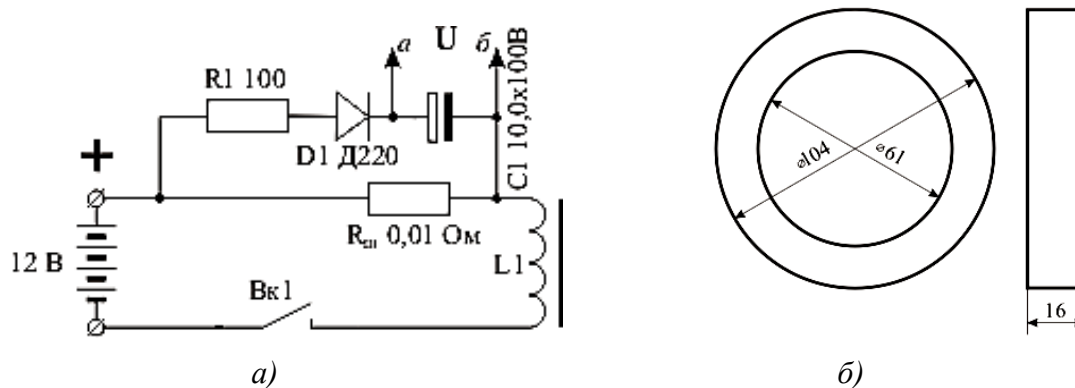


Рис.1. Схема электрической части стенда:
(а) испытания ферритного магнитопровода, (б) катушки L1

Основой испытательного стенда является источник постоянного тока – свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (АКБ) 6СТ60, способная кратковременно обеспечить токи в сотни ампер. К батарее через рубильник Вк1 примерно на 1 секунду подключается обмотка L испытуемого ферритного магнитопровода. Максимальную величину тока оценивали по падению напряжения на резисторе Rш в точках а и б. Процесс включения и выключения повторяли 10 раз с промежуточным зарядом батареи АКБ. После проведения испытаний проверяли состояние ферритного магнитопровода.

В качестве испытуемого магнитопровода использовали два склеенных параллельно феррита 2000НМ тороидальной формы (см. рисунок 1, б) с суммарной площадью сечения магнитопровода 688 мм^2 , что должно обеспечить габаритную мощность 68 кВт на частоте 50 кГц. Обмотка L формировалась многожильным изолированным медным проводом суммарным сечением 36 мм^2 . На поверхности магнитопровода была сформирована обмотка L в 21 виток. В ходе стендовых испытаний величина максимального тока через обмотку L изменялась в пределах 673 – 711 А. Осмотр, проведенный после испытаний, выявил разрушение одного из магнитопроводов (см. рисунок 2), что подтвердило возможность выхода из строя импульсного трансформатора в условиях насыщения ферритного магнитопровода.



Рис. 2. Ферритный тороидальный магнитопровод, разрушенный магнестрикционным эффектом

На основе результатов стендовых испытаний в дальнейшем решено использовать вместо цельных наборные магнитопроводы, а преобразователь электрической энергии формировать многоканальным с определенным запасом по суммарной мощности каналов. Для определения возможности преобразования электрической энергии по параллельно работающим каналам с одного источника на один потребитель энергии решено опробовать 2 параллельных канала, собранных по идентичной принципиальной схеме. Выбор общей блок-схемы преобразователя осуществляли на основе анализа возможных структурных схем данного устройства, изображенных на рисунке 3.

Схема, изображенная на рисунке 3, а, предусматривает канальное разделение только импульсных трансформаторов, выпрямителей и сглаживающих фильтров, оставляя общими на оба канала генератор и силовой блок. Такая схема разделяет энергетический поток от силовой части преобразователя к потребителю электрической энергии, позволяет уменьшить единичную массу и габариты импульсных силовых трансформаторов Тр1 и Тр2, что существенно повышает их надежность. Однако такая схема не в состоянии учесть индивидуальные характеристики импульсных трансформаторов, поскольку характеристики ферритных магнитопроводов (особенно относительная магнитная проницаемость) имеют значительные отклонения от заявленных характеристик и даже их разбросы в пределах одной партии. Вследствие этого энергетическая нагрузка на каналы будет неоднородной, что потребует проектного дополнительного запаса по мощности. Кроме того, при выходе из строя (по различным причинам) одного из каналов, автоматически вывести его из эксплуатации практически невозможно.

В схеме, изображенной на рисунке 3, б, возможно предусмотреть автоматическое отключение одного из каналов при выходе его из строя по какой-либо причине. Это реализуется блокированием сигнального потока за счет установки усилителя ошибки на входе силового блока или в блоке гальванической развязки. Вместе с тем, автоматически поддерживать резонансные частоты работы каналов силового блока преобразователя данная схема не сможет из-за наличия в схеме только одного генератора колебаний, общего для всех каналов. В результате коэффици-

ент полезного действия каналов преобразователя будет изменяться в зависимости от величины энергетических показателей работы импульсных силовых трансформаторов.

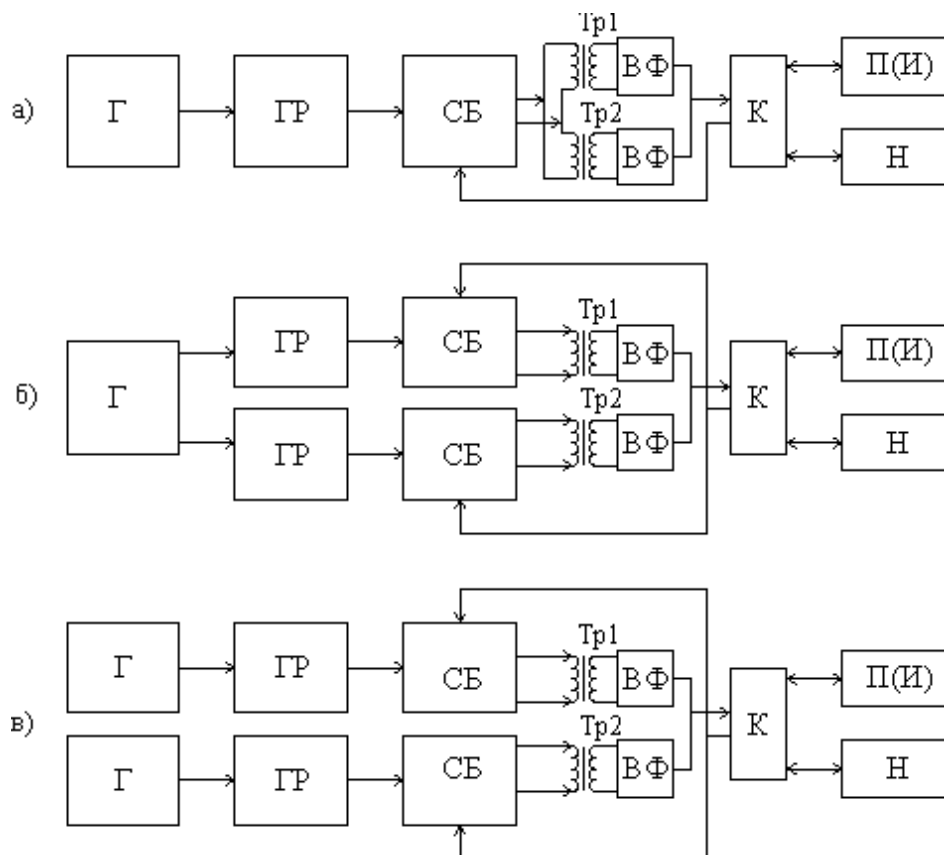


Рис. 3. Возможные структурные схемы формирования многоканального преобразователя электрической энергии рекуперативной установки

Использование схемы, изображенной на рисунке 3, в, позволяет реализовать автоматическую поканальную подстройку рабочей частоты каждого из силовых блоков и поддерживать работу каналов преобразователя в резонансном режиме. Это обеспечивает высокие значения коэффициента полезного действия каждого из каналов. При выходе из строя одного из каналов он легко может быть отключен прерыванием генерации импульсов в генераторе колебаний за счет встроенных в микросхему ШИМ-контроллера (1114EУ4, TL494) усилителей ошибки.

На основе проведенного анализа в качестве рабочей была принята схема, изображенная на рисунке 3, в. Такая схема более сложна и габаритна по сравнению с изображенными на рисунках 3, а и 3, б, но обладает существенными преимуществами: каналы преобразователя работают в резонансном режиме и обеспечивают высокие экономические показатели, в схеме силовых блоков используются коммутирующие элементы относительно малой мощности и стоимости (IGBT транзисторы) вместо дорогостоящих полупроводниковых модулей, при поломке одного из каналов он легко в автоматическом режиме может быть выведен из эксплуатации. Кроме того, при конструктивном обособлении каналов облегчается их замена на идентичный новый или ранее отремонтированный канал с последующим ремонтом и стендовой настройкой изъятых каналов в специализированном отделении локомотивного депо.

На основе принятой структурной схемы были собраны два идентичных канала преобразователя с оконечными каскадами силового блока, работающими в резонансном режиме. Упрощенная принципиальная схема оконечного каскада приведена на рисунке 4, а. Первичная обмотка силового импульсного трансформатора Tr включена в последовательную резонансную цепь, образованную конденсатором Cp , первичной обмоткой трансформатора и дополнитель-

ной частотостабилизирующей индуктивностью L_d . Обмотка L_{oc} силового импульсного трансформатора служит для реализации обратной связи и позволяет осуществлять автоматическое регулирование напряжения и автоматическую подстройку частоты генератора на резонансную частоту колебательного контура. Для испытаний в качестве магнитопровода импульсных силовых трансформаторов использовали Ш-образные ферриты марки 2000НМ, эскиз которых приведен на рисунке 4, б, габаритной мощностью 2,1 кВт на частоте 50 кГц. Силовые обмотки формировались медной лентой шириной 23 мм и толщиной 0,7 мм с межвитковой изоляцией из стеклоткани. Обмотка I содержит 6 витков, обмотка II – 9 витков. Обмотка L_{oc} содержит 5 витков провода ПЭЛ-0,3.

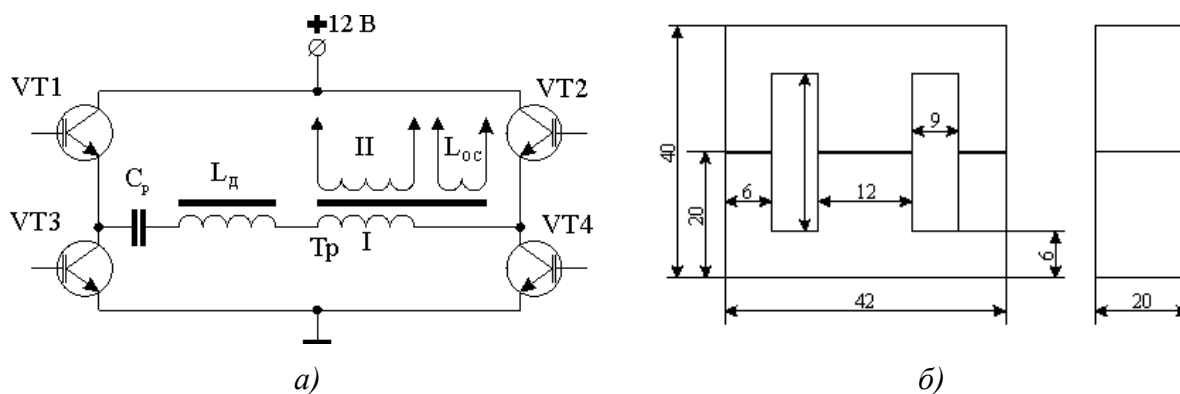


Рис.4. Упрощенная принципиальная схема оконечного каскада преобразователя электрической энергии (а) и эскиз ферритного магнитопровода силового импульсного трансформатора Tr (б)

На рисунке 5 представлена принципиальная схема соединения каналов преобразователя в единую выходную цепь с единой нагрузкой.

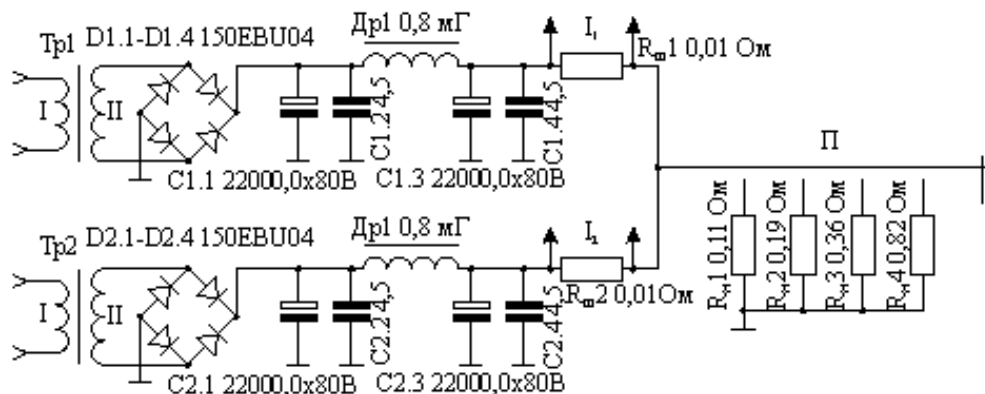


Рис. 5. Схема соединения каналов преобразователя в единую выходную цепь с единой нагрузкой

Напряжение на выходе силового блока поддерживалось постоянным на уровне 10 В за счет автоматического изменения скважности импульсов генератора. Величины токов каналов преобразователя определяли по падению напряжения на шунтах $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$. Результаты замеров приведены в таблице 1.

Как следует из приведенных результатов, рассогласование величин тока по каналам довольно незначительно и имеет тенденцию к увеличению при повышении токовой нагрузки. Полученные значения подтверждают возможность использования многоканальных схем преобразователя в системе рекуперации электрической энергии.

Таблица 1

Результаты замеров электрических параметров по каналам преобразователя рекуперативной системы

Сопротивление нагрузки, R_H , Ом	Значения замеров величин токов				
	I_1 , А	I_2 , А	ΔI , А	I_{cp}	$\Delta I / I_{cp}$
0,82	14,3	14,1	0,2	14,2	0,014
0,36	28,3	27,5	0,8	27,9	0,029
0,19	47,9	46,3	1,6	47,1	0,034
0,11	75,5	72,7	2,8	74,1	0,038

Выводы

1. Проведенные испытания цельного тороидального ферритного магнитопровода выявили возможность выхода его из строя в результате формирования поля упругих напряжений из-за магнитострикционного эффекта, что снижает надежность рекуперативной системы в процессе эксплуатации транспортного средства.

2. Анализ возможных схем формирования энергетических потоков по параллельным каналам преобразователя электрической энергии показал целесообразность полного разделения управляющей и силовой части, начиная от единого источника энергии до единого ее потребителя.

3. Испытания совместной работы параллельных каналов преобразователя на единую нагрузку показали практически полную сходимость электрических параметров при различных величинах нагрузки. Это подтвердило возможность параллельной работы автономных преобразовательных блоков системы рекуперации электрической энергии.

4. Разделение энергетических потоков по параллельным каналам преобразователя снижает единичную мощность компонентов электронных схем, позволяет автоматически выводить из строя поврежденный канал с равномерным перераспределением токовых нагрузок по оставшимся каналам, повышает технологичность ремонта рекуперативной системы за счет быстрой замены поврежденного канала на идентичный новый или ранее отремонтированный.

Список литературы

1. Черняк Ю. В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловозу / Ю. В. Черняк, Ю. В. Прилепський, І. В. Грицук. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 196 с.: [іл. 131, табл. 38]. ISBN 978-966-8707-28-5.

2. Прилепський Ю. В. Дослідження зміни параметрів фізичної моделі рекуперативної системи маневрового тепловозу з електричною передачею від напруги живлення силової частини // Збірник наукових праць ДонІЗТ № 35, 2013. – С. 73-77.

3. Варакин А. И., Варакин И. Н., Менухов В. В. Применение электрохимических конденсаторов в составе гибридных силовых установок маневровых и магистральных тепловозов // НТТ, 2007, № 2.

Прилепський Ю.В. Дослідження можливості паралельної роботи перетворювальних блоків системи рекуперації електричної енергії на транспортних засобах

Анотація. На підставі проведених досліджень показані можливість і доцільність використання багатоканальної схеми перетворювача електричної енергії в бортових системах рекуперації транспортних засобів.

Ключові слова: система рекуперації, енергія електрична, перетворювач, магнітопровід феритний



Prylepsyki Yu.V. Investigation of the possibility of parallel operation units conversion of electrical energy recovery systems in vehicles

***Abstract.** On the basis of these studies show the possibility and feasibility of using multi-electricity converter circuit board recovery systems in vehicles.*

***Keywords:** system recovery, electric power, transformer, magnetic ferrite*

Стаття надійшла до редакції 14.10.2014 р.