



УДК 621.3.031.8 : 621.314

А. В. Александров

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА СОВРЕМЕННОМ МОТОРВАГОННОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

Проанализирована структура энергопотребления собственных нужд современного моторвагонного подвижного состава. Приведены данные по энергопотреблению собственных нужд для выпускаемых в РФ электропоездов. Показаны особенности питания от статических преобразователей главных воздушных компрессоров и компрессоров систем кондиционирования. Рассмотрена целесообразность питания ТЭНов систем поддержания микроклимата от бортовой сети или от высокого напряжения. Рассмотрены различные варианты построения преобразователя собственных нужд. Описана структура бортовой сети постоянного тока. Определены критерии, по которым выбирается система энергоснабжения для вновь проектируемого подвижного состава.

Бортовая сеть, преобразователь собственных нужд, питание вспомогательных машин.

Развитие пассажирского моторвагонного подвижного состава (МВПС) характеризуется постоянным ростом мощности тяговых двигателей. При этом повышаются требования к комфортности проезда пассажиров и условиям труда локомотивной бригады. Мощность нетяговых потребителей на современном МВПС может составлять до 8–10% мощности, потребляемой из контактной сети мощности. Для питания этих потребителей используются статические преобразователи собственных нужд (ПСН). Совокупность ПСН и подключенных к ним нагрузок представляет собой бортовую сеть МВПС. Важным вопросом при разработке новых типов МВПС и модернизации подвижного состава является определение наилучшей в данном случае структуры бортовой сети, т. е. количества ПСН, их выходного напряжения и способов питания конечных

потребителей. Наиболее распространен вариант использования трехфазной сети переменного тока с линейным напряжением 220 или 380 В и с частотой 50 Гц. Такой вариант исторически наследуется с тех времен, когда роль ПСН играли электромеханические преобразователи с синхронными генераторами. К такой бортовой сети могут напрямую подключаться приводные асинхронные двигатели, также в нее может подаваться напряжение от внешнего источника депо без дополнительных преобразователей.

Однако из-за особенностей питания от статических преобразователей и изменившейся структуры энергопотребления бортовая сеть переменного трехфазного тока имеет недостатки (о которых мы скажем ниже), поэтому в качестве альтернативы ей может рассматриваться бортовая сеть постоянного тока.

Анализ структуры энергопотребления собственных нужд

Нетяговые потребители электрической энергии на МВПС можно разделить на следующие основные категории:

- элементы системы управления;
- система поддержания микроклимата, в том числе обогревательные элементы;
- главные воздушные компрессоры;
- вентиляторы охлаждения тяговых двигателей и преобразователей;
- системы освещения;
- зарядные устройства аккумуляторной батареи.

Доли указанных потребителей в общем энергопотреблении неравны. Так, современным системам управления, построенным на базе микроконтроллеров, требуется весьма незначительная мощность по сравнению с релейными и аналоговыми системами управления. Также малым энергопотреблением отличаются все шире распространяющиеся системы светодиодного освещения с высоким КПД. Совокупно все данные устройства обычно питаются от сети постоянного тока 110 В, т.е. получают энергию через зарядное устройство аккумуляторной батареи, которое питается либо от бортовой сети, либо напрямую от высокого напряжения. Обычно его мощность не превышает 10–15% мощности ПСН.

В то же время увеличивается мощность, потребляемая системами поддержания ми-

кроклимата. Согласно техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» и ГОСТ Р 55434-2013, весь вновь выпущенный подвижной состав должен быть оснащен установками кондиционирования воздуха пассажирских салонов с высокой производительностью. В состав данных установок входят вентиляторы испарителей и конденсаторов, а также компрессора, мощность которых весьма высока.

В таблице приведены данные по мощности бортовой сети трех выпускаемых в России электропоездов.

В таблице указаны суммарные мощности нагрузок, питающихся от одного ПСН. Так как на пятивагонных составах ЭГ2 Тв и ЭС2 установлены по 2 ПСН, а на ЭТ4 А – по 3, то мощность ПСН ЭТ4 А дана с повышающим коэффициентом 1,5.

Из таблицы хорошо видно, что основными нетяговыми потребителями энергии на борту эксплуатируемого в России МВПС являются компрессоры и ТЭНы систем микроклимата, на втором месте находятся устройства питания сети 110 В, и только на третьем – вентиляторы охлаждения преобразователей.

Следует отметить, что многие зарубежные производители моторвагонного подвижного состава применяют ТЭНы обогрева салона, питающиеся не от высокого напряжения, а от бортовой сети. Это позволяет наиболее полно использовать мощность ПСН и удешевить конструкцию ТЭНов. Однако такое решение возможно только в том случае, если мощность,

Мощность источников и основные нагрузки в бортовой сети электропоездов, выпускаемых в России, кВт

Мощность	Электропоезд		
	ЭГ2 Тв	ЭТ4 А	ЭС2
ПСН	170	120	190
Устройств питания сети 110 В	15	15	20
Главных компрессоров	11	7	9
ТЭНов системы микроклимата	137	120	125
Компрессоров системы микроклимата	50	75	90
Вентиляторов охлаждения преобразователей	9	10	8
Вентиляторов системы микроклимата	13	10	10

требуемая на обогрев салона, меньше или равна мощности на его охлаждение. Для российских условий это требование не выполняется, так как большая часть территории нашей страны лежит в зоне умеренного климата.

Согласно известной из теплотехники формуле [2], требуемая для изменения температуры помещения мощность определяется как

$$Q = K \cdot \Delta t,$$

где K – коэффициент, зависящий от параметров помещения; Δt – разница температур внутри помещения и снаружи.

При требуемой средней температуре внутри вагона 20 °С, минимальной наружной температуре –40 °С и максимальной +40 °С мощность, необходимая для нагрева внутривагонного воздуха, в 3 раза превосходит мощность, требуемую для его охлаждения.

Отсюда следует целесообразность питания ТЭНов напрямую от контактной сети, что также увеличивает надежность системы отопления. Это немаловажно при движении электропоезда в редконаселенной местности при низких температурах.

Рассмотрим более подробно вопрос электропитания двигателей компрессоров.

Наиболее эффективным способом приведения в действие различных механизмов является применение асинхронных короткозамкнутых двигателей [1]. Для их питания необходима бортовая сеть с трехфазным напряжением 220 В или 380 В (для использования унифицированных с промышленными двигателями) с частотой 50 Гц.

Однако питание компрессоров от бортовой сети переменного тока связано с рядом трудностей. При подключении электродвигателя компрессора напрямую к трехфазной бортовой сети он включается в режиме прямого пуска, т. е. с пусковыми токами, в 5–10 раз превышающими номинальные. При этом для транзисторов ПСН длительность кратной перегрузки по току лежит в пределах нескольких микросекунд [3], т. е. прямой пуск компрессора приведет к немедленному срабатыванию защиты транзисторов и отключению ПСН. Из-

бежать такого развития событий помогают существенный запас по мощности ПСН, позволяющий ему выдерживать пусковые токи мощных электродвигателей, а также мягкая выходная характеристика ПСН.

Для компрессоров систем кондиционирования существует также другая особенность, связанная с условиями их работы. Отвод тепла из кондиционируемого помещения прямо пропорционально зависит от производительности компрессора, перекачивающего рабочее тепло, а также от расхода воздуха через испаритель [2]. При подключении двигателя компрессора напрямую к трехфазной сети его частота вращения, а следовательно, и производительность постоянны. Так как работа компрессора в релейном режиме приведет к его быстрому износу, регулирование температуры воздуха возможно лишь за счет изменения расхода воздуха через испаритель. При этом компрессор постоянно работает с максимальной мощностью, что также ведет к повышенному энергопотреблению.

Решением указанных проблем может стать применение индивидуальных преобразователей частоты, питающих один или два (в случае систем кондиционирования) компрессора. Это позволяет отказаться от запаса по мощности ПСН, а также наиболее оптимально регулировать производительность компрессора, а следовательно, и температуру воздуха в салоне.

Помимо этого следует отметить, что часть вентиляторов также может быть выполнена с питанием от индивидуальных преобразователей частоты из соображений необходимости регулирования расхода воздуха. К таким вентиляторам относятся, например, приточные вентиляторы систем микроклимата.

Анализ структурных вариантов ПСН при различных первичных источниках энергии

На современном МВПС ПСН наиболее часто подключают к звену постоянного тока силовых преобразователей частоты, питающих

тяговые двигатели. Для подвижного состава постоянного тока звено постоянного тока отсутствует, так как преобразователи напрямую подключаются к контактной сети. Для подвижного состава переменного тока звено постоянного тока питается от четырехквadrантного преобразователя, а для подвижного состава автономной тяги – от тягового выпрямителя. Питание ПСН от звена постоянного тока позволяет уменьшить количество входных преобразователей энергии и увеличить надежность системы. В то же время напряжение звена постоянного тока обычно составляет несколько киловольт и в составе ПСН обязательно должен присутствовать трансформатор для обеспечения гальванической развязки входных и выходных цепей.

ПСН, формирующий систему трехфазных напряжений, может быть выполнен в виде трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах (A1) с трехфазным трансформатором T1 для гальванической развязки и для преобразования уровня напряжения и с LC-фильтром (A2) для формирования синусоидальной формы выходного напряжения (рис. 1).

Однако трансформатор, рассчитанный на преобразование напряжения с основной гармоникой 50 Гц, будет иметь существенные массу и стоимость. Кроме того, такой вариант требует использования, как минимум, трех дорогостоящих транзисторных модулей 65 класса, имеющих относительно низкую максималь-

ную частоту коммутации, что ведет за собой увеличение процента содержания высших гармоник в выходном напряжении и как следствие – рост массогабаритных характеристик LC-фильтра, поэтому в качестве альтернативы может рассматриваться вариант с двойным преобразованием энергии (рис. 2), при котором высокое напряжение контактной сети преобразуется вначале инвертором A1 в однофазное переменное напряжение высокой частоты, которое затем понижается с помощью высокочастотного трансформатора T1 и выпрямляется выпрямителем A2. Дальнейшее формирование системы трехфазных напряжений осуществляет инвертор A3, полупроводниковые приборы которого благодаря более низкому, чем в первом варианте, напряжению коллектор – эмиттер имеют существенно более низкую стоимость и более высокую частоту коммутации.

Последнее обстоятельство позволяет применить LC-фильтр, рассчитанный на более высокие частоты и имеющий лучшие массогабаритные характеристики и меньшую стоимость. Таким образом, данная схмотехника ПСН более выигрышна с точки зрения массогабаритных и стоимостных показателей.

Сеть постоянного тока

Если, как предложено выше, приводные двигатели компрессоров будут питаться от ин-

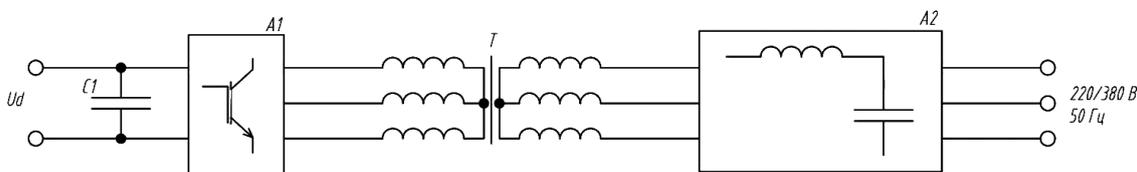


Рис. 1. Схема ПСН с преобразованием на частоте 50–60 Гц

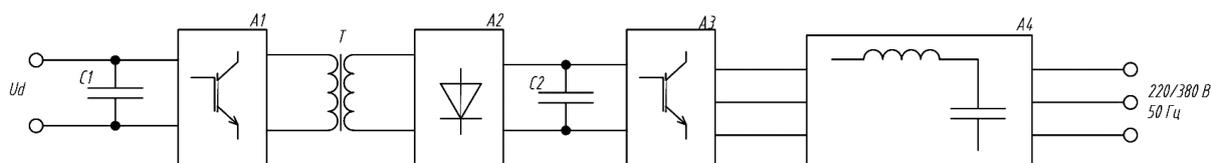


Рис. 2. Схема ПСН с преобразованием на частоте 10–15 кГц

дивидуальных преобразователей частоты, то вместе с зарядными устройствами аккумуляторных батарей 110 В эти так называемые вторичные преобразователи составят основную часть потребителей бортовой сети. При этом в случае использования бортовой сети трехфазного переменного тока будет происходить двойное избыточное преобразование энергии: от звена постоянного тока ПСН энергия передается к звену постоянного тока «вторичных» преобразователей через сеть переменного тока. Кроме того, для обеспечения синусоидальной формы тока в бортовой сети на выходе ПСН устанавливаются LC-фильтры, которые должны быть рассчитаны на полную мощность преобразователя, в то время как 80 % энергии будет потребляться входными выпрямителями «вторичных» преобразователей, для которых форма потребляемого тока практически не имеет значения.

Решением данной проблемы может быть применение бортовой сети постоянного тока. При этом звенья постоянного тока ПСН и «вторичных» преобразователей соединяются общей поездной шиной. Инвертирующая часть ПСН, формирующая трехфазное напряжение стабильной частоты 50 Гц выполняется в виде отдельного устройства, имеющего существенно меньшую мощность, что позволяет уменьшить габариты как самого инвертора, так и LC-фильтра. Напряжение бортовой сети постоянного тока может быть выбрано исходя из того, что максимальное действующее значение выходного напряжения «вторичных» инверторов должно составлять 380 или 220 В. При этом амплитудное значение выходного напряжения составит, соответственно, 540 и 310, а входное постоянное напряжение – с учетом запаса на ШИМ (рис. 3) – примерно 600 и 350 В.

Таким образом, можно выделить следующие преимущества бортовой сети постоянного тока:

1) применение индивидуальных приводов компрессоров позволяет снизить запас по мощности ПСН, а также обеспечить возможность регулирования производительности компрессоров;

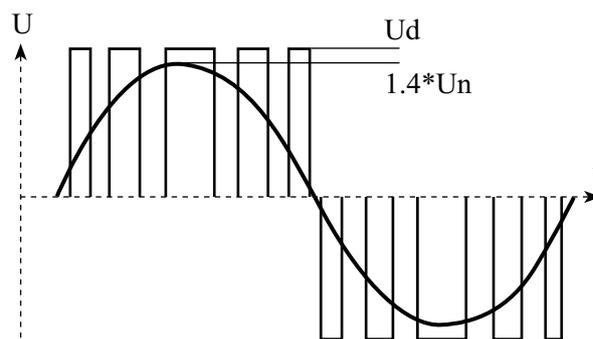


Рис. 3. Форма напряжений на выходе инвертора и после LC-фильтра

2) шина постоянного тока легко позволяет напрямую объединить выходы ПСН, обеспечив их синхронную работу и мгновенное перераспределение нагрузки при выходе одного ПСН из строя;

3) выход из строя высоковольтной части одного ПСН не приводит к отключению «вторичных» преобразователей данной секции, подключенных к общей шине.

В то же время очевидны и недостатки данного решения:

1) большая совокупная стоимость ПСН с выходным напряжением постоянного тока и нескольких «вторичных» преобразователей в сравнении с одним мощным ПСН, формирующим систему трехфазных напряжений;

2) большая стоимость коммутационных аппаратов, рассчитанных на работу с постоянным напряжением.

Однако следует учесть, что удельная стоимость преобразователей бортовой сети в общей стоимости современного МВПС снижается благодаря применению таких дорогостоящих и технически сложных элементов, как алюминиевых кузовов из экструдированного профиля, пневматической подвески и энергопоглощающих устройств пассивной безопасности. Поэтому подорожание, вызванное применением бортовой сети постоянного тока, будет относительно небольшим, особенно с учетом того, что стоимость полупроводниковых преобразователей в течение последних десятилетий неуклонно снижается.

Также при питании ТЭНов климатических установок от высокого напряжения нет необ-

ходимости в большом количестве коммутационных аппаратов в бортовой сети. Фактически в ней присутствуют только выходные контакторы ПСН и зарядные и линейные контакторы «вторичных» преобразователей.

Бортовая сеть постоянного тока применяется на электропоезде ЭТ4 А и дизель-поезде ДТ1 Торжокского вагоностроительного завода. Данная концепция показала высокую надежность в эксплуатации и хорошие перспективы дальнейшего применения, особенно при высоком инженерно-техническом уровне исполнения преобразователей собственных нужд.

Выводы

Целесообразность применения той или иной системы электроснабжения собственных нужд определяется, в первую очередь, тем, какую долю в общем энергопотреблении занимают «вторичные» преобразователи, а какую – активно-индуктивные нагрузки (приводные двигатели, непосредственно подключенные к бортовой сети, и ТЭНы).

При большой доле электроэнергии, потребляемой «вторичными» преобразователями

мощности, применение трехфазной системы нецелесообразно. Это обусловлено тем, что от звена постоянного тока ПСН ко входному звену постоянного тока «вторичных» преобразователей электрическая энергия передается по трехфазной бортовой сети – происходит двойное избыточное преобразование энергии.

Если доля энергии, потребляемой активно-индуктивными нагрузками, сравнима или превосходит долю, потребляемую «вторичными» преобразователями, предпочтительнее оказывается трехфазная бортовая сеть переменного тока.

Библиографический список

1. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. Д. Ротанов. – М. : Транспорт, 1991. – 343 с.
2. Кокорин О. Я. Современные системы кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин. – М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2003. – 272 с.
3. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – М. : Техносфера, 2005. – 632 с. (Мир электроники).