

## **О ПОСТРОЕНИИ ПЛЕЧ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ**

*В. Н. ЗНАЕНОК, О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО, А. О. ЛИНЬКОВ  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Российская Федерация*

Особенно востребованными на сегодня являются железнодорожные магистрали Восточного полигона ОАО «РЖД». В 2022 году провозная способность восточного направления достигла 158 млн тонн. Рост достигается путем непрерывного повышения весовых норм, пропуска соединенных и длиннооставных поездов. Пропорционально увеличивается нагрузка, возлагаемая на путь, электроснабжение и тяговый подвижной состав. В связи с чем остро стоят вопросы их совершенствования и в особенности той части, что лимитирует рост качественных показателей.

Одно из таких направлений – это усиление системы тягового электро-снабжения, постройка дополнительных подстанций. Связано это с тем, что введение тяжеловесных поездов на перегон значительно снижает напряжение в контактной сети, из-за чего увеличивается межпоездной интервал, уменьшается пропускная способность участка. Усиление тягового электро-снабжения является дорогостоящим решением и в долгосрочной перспективе не решит проблему ограничения пропускной способности.

Сегодня 50 % мощности в контактной сети приходится на реактивную составляющую, которая курсирует в системе электроснабжения и не затрачивается на тягу поездов. Генерируют значительную реактивную мощность потребители – электровазозы переменного тока. Даже самые современные из них оборудованы тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), и их коэффициент мощности не превышает в режиме тяги 0,78 и 0,65 в режиме рекуперативного торможения. ВИП электровазоза на базе тиристоров, схемотехническое решение которого остается неизменным уже более 50 лет, не способен реализовать энергоэффективное преобразование энергии. Длительная коммутация вызывает просадки и искажения напряжения в контактной сети, которые также приводят к увеличению минимального угла открытия тиристоров, снижению напряжения на тяговых двигателях, росту сдвига фаз между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Генерация значительной реактивной энергии не позволяет рационально использовать заложенные запасы по мощности в контактной сети и ограничивает максимальное количество пар поездов на тяговом участке. Опираясь на вышесказанное, считаем актуальным разра-

ботку энергоэффективного тягового подвижного состава переменного тока. Для этого необходимо построение преобразователей осуществлять на современных полностью управляемых полупроводниках.

Учеными Иркутского государственного университета путей сообщения ведется разработка ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом. Коэффициент мощности такого преобразователя составляет 0,95 в режимах тяги и рекуперации. Увеличение возврата электроэнергии в сеть, а также снижение просадок напряжения в три раза за счет практически мгновенной коммутации IGBT-транзисторов позволит увеличить пропускную способность сети, снизить межпоездной интервал и эффективно использовать современные способы пропуска поездов, таких как виртуальная сцепка.

Силовой блок ВИП на базе IGBT-транзисторов состоит из 9 плеч. Один из важных вопросов при построении преобразователя – обеспечение надежной работы каждого плеча. Исходя из необходимого запаса по току, в плечах преобразователя применяется параллельное соединение нескольких ветвей, содержащих последовательно соединенные силовые диод и IGBT-транзистор, снабженные и выравнивающие цепи. Подавляющее количество эксплуатируемых электровозов на Восточном полигоне реализуют потележечное регулирование, когда к каждому ВИП подключают параллельно два тяговых электродвигателя. При такой схеме в плече преобразователя, с учетом существующих на рынке предложений силовых полупроводников, необходимо параллельное соединение 4-х IGBT-транзисторов. Габариты преобразователя при воздушном охлаждении и ограниченном пространстве внутри электровоза вызывают сложности симметричного подключения параллельных ветвей. Это приводит к проблеме неравномерного распределения токов, что в ходе эксплуатации является причиной перегрузок и прожогов сперва отдельных ветвей, а после и плеча в целом. Целью исследования является разработка конструкции плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с оптимальным распределением токов по ветвям.

Из известного уровня техники рассмотрены способы симметрирования токов по ветвям. На распределение влияет подключение силовых шин к плечу. Так для тиристорного ВИП с целью выравнивания токов применяется диагональный подвод тока. Однако достаточным это решение не является. Для обеспечения надежной работы плеч последовательно в каждую ветвь включены индуктивные делители. Введение последовательно в цепь элементов снижает надежность, приводит к увеличению габаритов и росту затрат на медь. Дополнительная индуктивность в цепи с учетом быстрой коммутации IGBT-транзисторов вызывает значительные перенапряжения.

Исследованы способы снижения неравномерности распределения токов, применяемые за рубежом. Различные компании (Siemens, Hitachi, Fuji Electric и др.) предлагают разнообразные варианты исполнения шинного монтажа для групп параллельно соединенных силовых полупроводников. Большинство предложений связаны со специальной конструкцией и особым

размещением токоведущих шин на малоудаленном расстоянии таким образом, чтобы обеспечивалось встречное протекание тока по ним и осуществлялось снижение «паразитных» параметров силовых шин. Работа оборудования электровозов осуществляется в условиях запыленности, и сближение шин повышает риск пробоя. Необходимо предусматривать дополнительные изоляционные пластины либо разносить разнопотенциальные шины в пространстве, однако при этом заложенный эффект выравнивания пропадает. Компанией Delta Electronics предложена конструкция многослойной шины, представляющая из себя прессованный набор медных пластин, залитых изоляционным компаундом, что обеспечивает защиту от пробоя между токоведущими пластинами. Производство многослойных шин требует высокого качества точности и ведет к значительному удорожанию конструкции. Растрескивание компаунда в условиях резко континентального климата, значительных отрицательных и положительных температур повышает риск короткого замыкания в силовой цепи.

Проведенные аналитические исследования распределения токов по параллельным ветвям показали, что на симметрию токов в плече значительно влияет индуктивность силовых шин, и тривиальные способы подвода тока, такие как диагональный или односторонний, являются недопустимыми для плеч ВИП на базе IGBT-транзисторов. При исследовании приняты допущения, что параметры IGBT-транзисторов во всех параллельных ветвях идентичны, для упрощения расчетов используется спрямленная ВАХ. Учитывая паразитные параметры, разработали конструкцию силовых шин, обеспечивающую равномерное распределение токов по параллельным ветвям. Для получения предварительных результатов проведено математическое моделирование с помощью компьютера. Диаграммы, полученные в ходе моделирования, подтверждают, что предложенная конструкция силовых шин обеспечивает оптимальное распределение токов.

Для оценки адекватности разработанного решения в условиях лаборатории выполнено физическое моделирование протекания токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов. В качестве шинного монтажа построение силовой цепи плеча осуществлялось из медных проводников с учетом геометрии и габаритных размеров, подобных плечу, применимых к электровозам переменного тока. При этом параллельные ветви изготовлены также в виде медного проводника в целях допущения при моделировании идентичности параметров всех параллельных ветвей. Испытание выполнялось путем кратковременного пропуска тока короткого замыкания через модель плеча. Изменение тока в ветвях отслеживается с помощью катушек Роговского с последующим интегрированием сигнала и выводом диаграмм цифровым осциллографом Tektronix TDS 2024C. Диаграммы, полученные в результате физического моделирования протекания токов в параллельных ветвях плеча с предложенной конструкцией силовых шин плеча ВИП, свидетельствуют о равномерном распределении токов.

Таким образом, по результатам исследования разработана конструкция силовых шин плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающая рав-

номерное распределение токов по параллельным ветвям. В условиях лаборатории выполнено физическое моделирование протекания токов по параллельным ветвям с предложенной конструкцией силовых шин плеча, подтверждающее адекватность разработанного решения.

Исследование процессов протекания токов по параллельным ветвям плеча с учетом влияния паразитных параметров силовых шин на цепи управления затворами IGBT-транзисторов представляет направление для дальнейшей научной проработки.

УДК 656.08:65.11

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВМЕСТИМОСТИ МОДУЛЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*С. А. АЗЕМША, И. М. КОБЯК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Городской общественный пассажирский транспорт играет огромную роль в жизни современных городов. В то же время его финансовое состояние оставляет желать лучшего.

Наполняемость общественного транспорта является очень важным показателем. Низкие значения наполняемости приводят к низкой окупаемости перевозок. Ввиду того, что в настоящее время показатели экономической эффективности городского пассажирского транспорта низки, а окупаемость работы маршрута общественного транспорта зависит от показателей вместимости пассажирских транспортных средств, актуальной является задача определения оптимальной вместимости модуля пассажирского транспортного средства [1].

Разработанная методика определения оптимальной вместимости модуля маршрутного транспортного средства для регулярных перевозок пассажиров в городском сообщении включает следующие этапы.

1 Для каждого маршрута в прямом и обратном направлениях определяются интервалы времени  $[t_1; t_2]$ , ...,  $[t_i; t_{i+1}]$ , ...,  $[t_{m-1}; t_m]$ , в течение которых количество модулей маршрутного транспортного средства (МТС) будет постоянным (например, час пик, межпиковые периоды).

Методами дисперсионного анализа для каждого маршрута в прямом и обратном направлениях определяется значимость влияния времени суток на пассажиронапряженность  $P$ .

2 Для интервалов времени  $[t_i; t_{i+1}]$  по каждому маршруту в прямом и обратном направлениях определяется величина пассажиронапряженности  $P_{\max i}$  и количество рейсов  $R_i$  на этом маршруте.

3 Маршруты в прямом и обратном направлениях для каждого интервала времени  $[t_i; t_{i+1}]$  ранжируются в порядке возрастания (неубывания) величины пассажиронапряженности  $P_{\max i}$ .