

Продолжение. Начало № 4'2013

В преддверии возрождения постоянного тока

Часть 2

Только на конкретных примерах зарождения, развития и совершенствования каких-либо технических устройств можно познать диалектику научно-технического прогресса.
О. Н. Веселовский, Я. А. Шнейберг. Очерки по истории электротехники

Во второй части статьи продолжаем рассматривать отдельные аспекты развивающихся DC-технологий в разных областях.

Олег Зотин

o_zotin@mail.ru

Распределительные DC-сети

Появление первых проектов линий электропередачи постоянного напряжения относится к концу XIX века. Некоторые из этих проектов создавались как подземные распределительные DC-сети

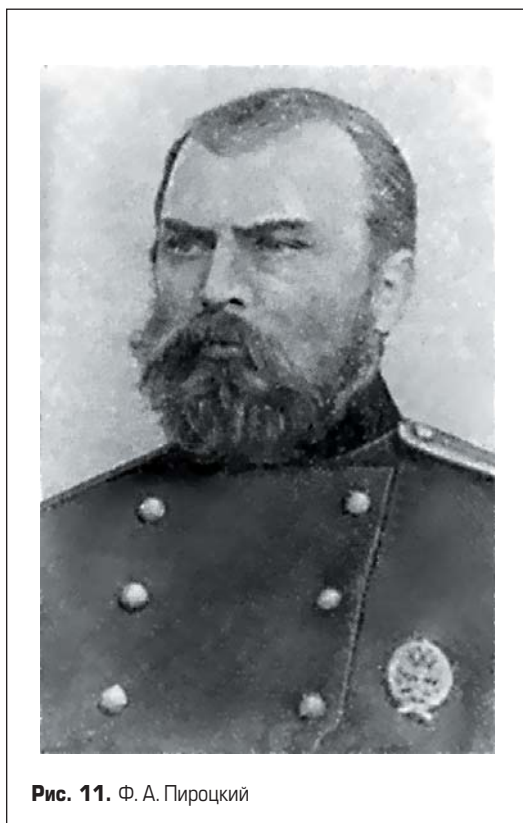


Рис. 11. Ф. А. Пироцкий

(Underground Residential Distribution, URD). Так, еще в 1881 году для питания Артиллерийской школы от электростанции пушечного литейного завода инженер Ф. А. Пироцкий (рис. 11) осуществил в Санкт-Петербурге прокладку первого подземного электрического кабеля постоянного напряжения и разработал первый проект централизованной подземной городской электросети.

Проект современной распределительной сети постоянного низкого напряжения (Low Voltage DC, LVDC) выполнен в Технологическом университете Лаппеенранты в рамках деятельности Второй рабочей группы финской национальной программы «Интеллектуальные сети и рынок энергии» (Smart Grids and Energy Markets, SGEM). Цель данного проекта — заменить дорогие и малоэффективные воздушные сети переменного напряжения 1 и 0,4 кВ, предназначенные для загородных поселков (хуторов), кабельными подземными LVDC-сетями ($\pm 0,75$ кВ). В реализованном пилотном проекте системы каждый из четырех объектов электроснабжения подключается к LVDC-линии через конвертеры, преобразующие напряжение LVDC в напряжение, необходимое потребителю. Прокладка LVDC-кабеля на глубине $>1,5$ м минимизирует зоны отчуждения, не создает дополнительной экологической нагрузки и не ограничивает ведение сельскохозяйственных работ. Это уменьшает общую стоимость сети, а также ее зависимость от различных катаклизмов. Ведь затраты на устранение повреждений воздушных сетей любого напряжения от бурь, снегопадов и других воздействий могут быть очень значительными. Например, расходы ОАО «МОЭСК» на ликвидацию поврежденных электросетей от ледяного дождя в Московской области зимой 2011–2011 гг. превысили 600 млн руб.

Использование подземных кабельных линий существенно уменьшает площадь землеотвода, что весьма актуально при высокой стоимости земли, особенно в городских условиях. В частности, укладка одного погонного метра ЛЭП среднего напряжения в подземный коллектор мелкого заложения обходится в условиях Москвы в 40 тыс. руб., а высвобождается при этом до 25 м² зоны отчуждения.

Уже существуют проекты городских сетей электроснабжения, прокладываемых не только в коллекторах мелкого заложения, но и в тоннелях на глубине до 60 м (Сингапур).

Интеллектуальные сети (Smart Grid), управление альтернативными источниками электроэнергии и нагрузкой

Как уже отмечалось, в сетях постоянного напряжения не требуется синхронизация и контроль фазовой устойчивости при генерации электроэнергии, а также поддержание высокого коэффициента мощности при потреблении. Существенно уменьшается вероятность аварийных ситуаций, аналогичных аварии, произошедшей в энергосетях северо-востока Индии в июле 2012 года, произошедшей из-за несогласованности работы различных источников.

Возможности развития интеллектуальных сетей с распределенной генерацией трудно переоценить. Только в ветроэнергетике, по оценке Всемирной ветроэнергетической ассоциации (World Wind Energy Association), потенциал России превышает 90 000 МВт при установленной мощности ветрогенераторов, едва дотягивающей до 20 МВт (данные 2011 г.).

В современных ветрогенераторах скорость вращения изменяется с силой ветра. При этом генерируемая энергия двукратно преобразовывается (AC/DC/AC) на конвертерах с промежуточным звеном постоянного тока для обеспечения согласования с переменным сетевым напряжением. Для работы же на сеть постоянного напряжения в преобразователях требуется только AC/DC-преобразование, что уменьшает их весогабаритные характеристики и повышает надежность. Управление источниками на солнечных батареях и резервными накопителями в интеллектуальных сетях тоже упрощается.

Такую сеть постоянного напряжения с большим количеством управляемых генераторов и накопителей электроэнергии можно будет уже с полным основанием называть интеллектуальной сетью (Direct Current Smart Grid, DCSG). А ведь еще недавно основной (и часто единственной) функцией интеллектуальных сетей считался дистанционный опрос счетчиков электроэнергии (Smart Metering) с целью обеспечения контроля потребления энергии и автоматизации выписки счетов.

DCSG может предоставить как поставщику электроэнергии, так и потребителю ряд услуг, которые реализуются существенно проще (а следовательно, дешевле и надежнее), чем в AC-сетях, а именно:

- управление распределенной генерацией электроэнергии с демпфированием с помо-

щью накопителей колебаний генерируемой и потребляемой мощности;

- взаимодействие с сетью высшего уровня и с потребителями электроэнергии по контролю потребления и генерации электроэнергии, в том числе управление продаж и покупкой электроэнергии с возможностью автоматической перестройки под гибкие и изменяющиеся тарифы;
- адаптивное управление при авариях и перебоях в электроснабжении с контролируемым отключением части потребителей и подключением резервного энергоснабжения от накопителей электроэнергии для важнейших потребителей;
- управление нагрузкой с оптимизацией платы за электроэнергию.

С конца 1970-х в Германии получила развитие концепция «демократизации» энергосистем. За последние годы под эгидой Германской конфедерации кооперативов (German Cooperative and Raiffeisen Confederation) в рамках этой концепции было создано более 500 энергетических кооперативов, которые свободно распоряжаются генерируемыми энергоресурсами, в том числе обеспечивают поставку электроэнергии в сеть. В руках индивидуальных производителей и фермеров Германии сосредоточено свыше 50% источников возобновляемой энергии (в основном солнечные электростанции и ветрогенераторы вдоль побережья Северного моря). В настоящее время эти источники поддерживают электроснабжение более 160 тыс. домохозяйств. Аналогичные кооперативы существуют в Дании, Голландии и других странах Евросоюза. Очевидно, что при демократизации рынка электроэнергии дальнейшее продвижение данной концепции в сетях переменного трехфазного напряжения может вызывать определенные сложности, отсутствующие в сетях DCSG.

При этом необходимо учитывать, что реализация DCSG требует решения двух важных вопросов: создание технологий DC-преобразования электроэнергии повышенной надежности и обеспечение информационной безопасности.

Сети освещения

Важнейшей сферой применения электричества со времен Д. А. Лачинова, А. Н. Лодыгина (рис. 12) — изобретателя газонаполненных ламп накаливания с вольфрамовой нитью, П. Н. Яблочкова (рис. 13) — автора проекта «Русский свет», и Т. Эдисона являлось городское освещение.

Характерно, что на первом этапе своего развития сети городского освещения представляли собой сети постоянного напряжения. Только необходимость питания дуговых ламп «Русского света» переменным напряжением (для обеспечения равномерного обгорания угольных электродов) привела в свое время П. Н. Яблочкова к изобретению генератора переменного тока и прототипа трансформатора (1876 г.). Тогда же он создал концепцию «дробления» света, а совместно с Д. А. Лачиновым — первые проекты городского электрического освещения, в том

числе реализовал систему освещения Литейного моста в Санкт-Петербурге. Характерно, что принятая Яблочковым величина напряжения 110 В для питания типовой схемы с последовательным включением двух дуговых ламп номинального напряжения 45 В и балластного резистора с падением напряжения 20 В стала в конце концов стандартом де-факто как для сетей освещения, так и для сетей электроснабжения. В дальнейшем произошел временный возврат к освещению на постоянном токе ввиду того, что Т. Эдисон применил биполярные сети для питания ламп накаливания, производство которых ему удалось поставить на конвейер, сделать их долговечнее и существенно удешевить. После же победы трехфазной системы Доливо-Добровольского сети освещения постоянного напряжения начали использовать в основном для обеспечения аварийного освещения при работе от аккумуляторов. От переменного напряжения более эффективно запатентовались и люминесцентные лампы (Edmund Germer, 1926 г.), а также и еще более энергоэффективные лампы высокого давления (ЛВД), сначала ртутные (1906 г.) и металлогалогенные (Чарльз Штейнмец, 1911 г.), а затем и натрие-



Рис. 12. А. Н. Лодыгин



Рис. 13. П. Н. Яблочков

вые (1961 г.). При этом в схемах запитки устанавливались балластные дроссели и стартеры тлеющего разряда, впоследствии замененные тиристорными импульсными зажигающими устройствами (ИЗУ). Сегодня с широким внедрением электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА), пришедшей на смену схемам с ИЗУ и дросселями, существует возможность перехода на DC-питание. Появление высокоэффективных источников белого света — сверхъярких синих светодиодов с эффективным желтым люминофором (Shuji Nakamura, 1993 г.), и их быстрое развитие предоставило дополнительные аргументы для такого перехода.

Технико-экономическое обоснование современной интеллектуальной системы городского освещения на постоянном токе (Direct Current Lighting Smart Grid, DC LSG) было представлено автором в журнале «Современные технологии автоматизации» № 4, 2012 г. В рамках DC LSG предложено создание технологической DC-платформы интеллектуальной сети освещения с использованием как существующих, так и перспективных энергоэффективных источников света, включая ЛВД (в том числе бесконтактные металлогалогенные и серные) и светодиоды. Проведенные расчеты и исследования показывают, что реализация проекта DC LSG улучшит ряд важных характеристик сетей освещения традиционного исполнения, в том числе:

- до двух раз и более может быть уменьшено потребление электроэнергии при управлении яркостью светильников современными ЭПРА и светодиодными драйверами (так называемое диммирование);
- обеспечена высокая стабильность управляемого светового потока, в том числе при изменениях напряжения в сети;
- снижена стоимость и повышена надежность управляемых светильников;
- увеличены более чем в два раза сроки службы ламп;
- могут быть полностью устранены пусковые токи сети освещения, превышающие значение номинального тока в ~2 раза (это типовое значение для обычных светильников с ЛВД);
- уменьшены сечения проводов и затраты на прокладку сетей;
- обеспечена оперативная диагностика светильников, включая предостказный контроль;
- повышена эффективность управления и увеличена надежность и живучесть DC LSG за счет использования современных сетевых технологий, в том числе технологий связи по силовой сети (Power Line Communication, PLC) и специализированной городской mesh-сети;
- увеличен важнейший отчетный показатель организаций, эксплуатирующих городское освещение, — так называемый процент горения, который может быть максимально приближен к 100% (при типовом современном значении 95%).

Следует отметить, что получение диспетчерской службой эксплуатирующего предприятия оперативной диагностики, включая фиксацию объективного значения «процента

горения» и предостказную диагностику, является важнейшим инструментом по управлению ремонтно-восстановительными работами.

В технико-экономическом обосновании DC LSG показано ее превосходство по интегральному экономическому критерию в сравнении с некоторыми другими энергосберегающими технологиями городского освещения. В то же время создание DC LSG ставит перед силовой электроникой новые задачи, например, по расширению номенклатуры и улучшению характеристик MOSFET-транзисторов в диапазоне средних напряжений 300–400 В для разработки более совершенных ЭПРА и драйверов светодиодов.

Вполне логичным будет и пересмотр концепции аварийного освещения, функцию которого во многих случаях может взять на себя модифицированная DC LSG, для чего в ее состав необходимо включить накопитель (аккумулятор).

Таким образом, нужно констатировать, что развитие управляющей и силовой электроники привело к довольно парадоксальной ситуации, заключающейся в том, что электропитание сетей наружного освещения от четырехпроводных сетей трехфазного переменного напряжения, которое считалось «естественным» и единственно возможным в течение 100 лет, признается нерациональным и неэффективным. В рамках концепции DC LSG предполагается возврат к более энергоэффективным и удобным биполярным сетям постоянного напряжения, изобретенным в конце XIX века.

Сегодня ряд предприятий (включая ОАО «НИИ точной механики», Санкт-Петербург, и ЗАО «Связьинжиниринг», Москва) проводит инициативную разработку пилотного проекта DC LSG «АВРОРА+», предназначенного для наружного (уличного) освещения Санкт-Петербурга.

Энергоснабжение локальных объектов, микро- и мини-сети постоянного напряжения

Одним из первых прототипов локальной DC-сети был проект энергосистемы телефонной станции, реализованный в 1885 году русским электротехником Павлом Михайловичем Голубицким (рис. 14). В этой сети центральная аккумуляторная батарея станции обеспечивала питание абонентских телефонных аппаратов, точнее говоря, их угольных порошковых микрофонов, изобретенных Генрихом Махальским (рис. 15) за два года до Т. Эдисона. Проект Голубицкого существенно увеличил дальность телефонной связи. Впоследствии на телефонных станциях стали использовать в качестве основного источника питания выпрямители сетевого переменного напряжения, оставив за аккумулятором функцию резервного источника тока.

В наше время для повышения энергоэффективности и энергоснабжения все чаще предлагаются проекты DC-микросетей внутри здания (или для группы зданий) и DC-мини-сетей на локальной территории. Один из подобных проектов — концепция микросети постоян-

ного напряжения (DC-microgrid), разработанная в Йельском университете (Yale University). Напряжение распределительной линии на входе такой DC-microgrid превращается с помощью высокоэффективного преобразователя в постоянное напряжение (предполагается использование биполярного напряжения ± 190 В), которое через локальную сеть подается на источники питания электрооборудования. Предусмотрены также преобразователи на пониженное напряжение (например, ± 12 или ± 24 В) для внутрикомнатных (этажных) сетей, обеспечивающих электропитание маломощного бытового и офисного оборудования.

Среди преимуществ локальных DC-сетей стоит выделить следующие:

- общее преобразование переменного напряжения в постоянное существенно уменьшает потери, выделение тепла и сокращает затраты на вентиляцию;



Рис. 14. П. М. Голубицкий



Рис. 15. Генрих Махальский

- эффективное интегрирование возобновляемых и резервных источников электроэнергии, являющихся чаще всего DC-источниками;
- эффективное управление нагрузками и накопителями (включая накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной генерации и выдачу в периоды дефицита);
- обеспечение оперативной и адекватной реакции при возникновении сетевых аварий с переходом на режим аварийного электропитания и отключением части нагрузок.

Нельзя забывать и о повышенной электробезопасности постоянного напряжения, которая уже в битвах «войны токов» была важнейшим аргументом в пользу DC-технологий. Малоизвестно, что одной из первых жертв переменного напряжения стал дежурный электрик электростанции в Лауфене, грубо нарушивший правила электробезопасности.

Особо необходимо отметить, что электрический дуговой разряд, возникающий при коммутации, в AC-цепях гасится существенно легче и быстрее ввиду перехода напряжения через ноль дважды за период. В DC-выключателях и розетках для гашения дуги приходится принимать специальные меры. Уже достаточно широко используются специальные автоматические выключатели для DC-сетей, также разработаны DC-розетки с комплексной защитой от возникновения электрического разряда и от токов короткого замыкания.

В настоящее время несколько консорциумов продвигают идеологию локальных сетей энергоснабжения постоянного тока для серверных центров обработки данных (ЦОД) и для коммерческих зданий, в их числе европейский консорциум DCC+G и североамериканский Emerge Alliance. В проектах систем

энергоснабжения ЦОД, реализованных этими консорциумами, применение сети биполярного напряжения ± 190 В фактически становится мировым стандартом для данных энергосистем и позволяет увеличить эффективность до 10% при уменьшении стоимости на ~15% и улучшении ряда других характеристик.

Существует и ряд проектов энергосистем современных зданий, в которых основной акцент делается на разработку интеллектуальной энергосети. Наиболее известной и всеохватывающей является концепция «умного дома» («Smart Building»). Большой интерес представляет и международный проект, предусматривающий строительство сооружений с нулевым (усредненным) потреблением электроэнергии (zero energy building). Особое внимание в этих проектах уделяется взаимодействию с сетью энергоснабжения в части покупки и продажи электроэнергии. Выполнение таких проектов с помощью DC-технологий должно дополнительно повысить их эффективность.

Автономные микроэнергосистемы

Omnia mea mecum porto.

(Все мое ношу с собой.)

Марк Туллий Цицерон. Парадоксы

В XX веке автономные DC-микроэнергосистемы чаще всего находили применение в военной и аэрокосмической сферах (танки, самолеты, пусковые комплексы ракет, корабли, подводные лодки, спутники, луноходы, орбитальные станции и пр.). Кроме этого, DC-микроэнергосистемы использовались в некоторых обособленных поселениях и различных производствах.

В наше время в различных странах создаются разнообразные проекты автономных

DC-микро- и мини-энергосистем гражданского назначения. Как правило, в их составе есть несколько источников электроэнергии, включая возобновляемые. Знаковым примером для нас служит проект «дома постоянного тока» (DC-House), разрабатываемый в институте электроэнергетики Калифорнийского политехнического университета (Cal Poly State University) под руководством Dr. Taufik. Цель столь грандиозного проекта — приобщение к благам электрической цивилизации более миллиарда людей, живущих без централизованного электроснабжения. К этим благам (amenities) авторы проекта в первую очередь относят возможности комфортного существования человека, приобретенные за последние десятилетия. Независимая DC-микроэнергосистема такого проекта должна обеспечивать работу светильников, кондиционеров, вентиляторов, холодильников, микроволновых печей, телевизоров, компьютеров, стиральных машин, пылесосов и прочих электроприборов и систем, вплоть до возможности зарядки аккумуляторов электромобилей.

В DC-микроэнергосистеме возможно использование самых различных генераторов электроэнергии: мини-гидрогенераторов, ветрогенераторов, солнечных батарей и даже генераторов, приводимых в движение людьми (велогенераторы-тренажеры). Каждый из этих источников электроэнергии подключается к DC-сети через индивидуальные преобразователи. Сеть должна иметь и накопитель — аккумуляторную батарею, позволяющую демпфировать неравномерность генерации и потребления электроэнергии.

Обобщенная структурная схема DC-микроэнергосистемы в интерпретации автора представлена на рис. 16. Управление системой

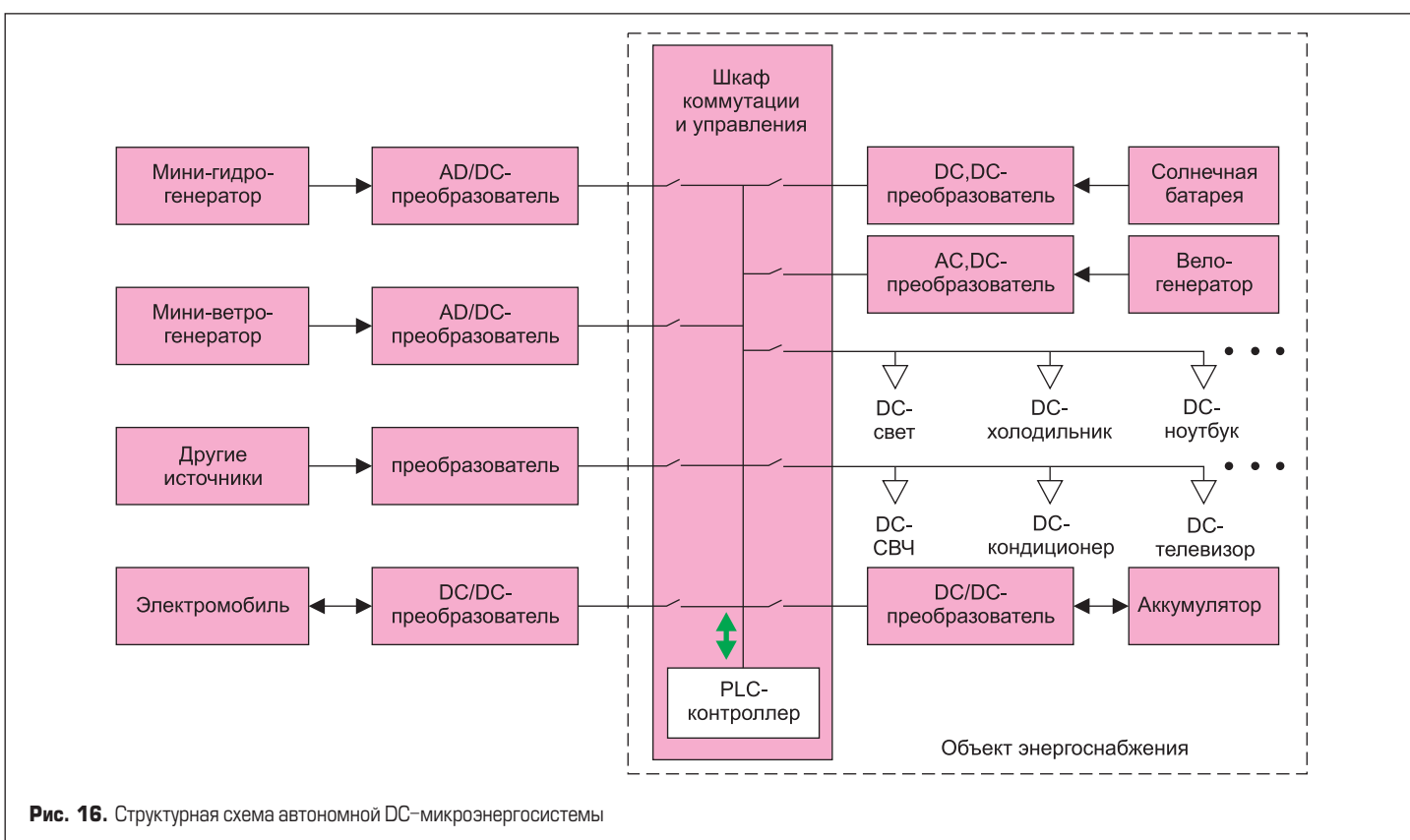


Рис. 16. Структурная схема автономной DC-микроэнергосистемы

осуществляется специализированным контроллером с PLC. DC-микроэнергосистема представляет собой малогабаритный аналог интеллектуальной энергосистемы и осуществляет генерацию, преобразование, передачу, накопление, распределение и потребление электроэнергии, а также управление всеми этими процессами. При наличии газового снабжения объекта рационально включить в его DC-микроэнергосистему и DC-газоэлектрогенератор.

Очевидно, что реализация такого рода проектов даст толчок к разработке как собственно оборудования для DC-микроэнергосистем, так и большого количества электроприборов с питанием от DC-сети. Подобные системы могут успешно использоваться в распространенных в последнее время экопоселениях. Идеи автономного энергетического жилого объекта, аналогичные проекту DC-House, закладываются в отечественный проект «Ковчег» (архитектор А. Ремизов, энергетическая часть — Л. Бритвин).

В 2013 году запланирована реализация двух пилотных проектов DC-House в кампусах университетов Padjadjaran (Бандунг) и Bangkalan (Мадуро) на острове Ява (Индонезия) при поддержке университета Джакарты.

Накопители электроэнергии

Обычными сферами применения накопителей являются резервирование электроэнергии для особо важных потребителей и поддержка их при перебоях в электроснабжении, увеличение энергоэффективности оборудования в режимах импульсного потребления и генерации электроэнергии (например, рекуперативное торможение с последующим разгоном на транспорте), запуск двигателей внутреннего сгорания и т. п. В электроэнергетике мощные накопители электроэнергии используются для выравнивания графиков нагрузки тепловых и атомных электростанций с целью обеспечения их высокой эффективности, увеличения пропускной способности сетей, а также демпфирования неравномерности генерации возобновляемых источников электроэнергии. Большую часть применяемых накопителей можно разбить на два класса.

Первый класс — так называемые электростатические накопители типа аккумуляторных батарей, электрохимических конденсаторов (суперконденсаторов); низкотемпературных сверхпроводников. Данные накопители работают на постоянном токе и их сопряжение с DC-сетями осуществляется проще, надежнее и эффективнее, чем с AC-сетями.

Второй класс накопителей — электромеханические. Это супермаховики, гидро- и пневмоаккумулирующие накопители, в которых применяются, как правило, электромашинные генераторы переменного напряжения.

Анализ режимов работы электромеханических накопителей показывает, что режим синхронной работы генераторов с сетью переменного напряжения иногда довольно сложно реализовать (как, например, для супермаховиков, функционирующих в широ-

ком диапазоне скоростей вращения), а в ряде накопителей он не является оптимальным по энергоэффективности.

Рассмотрим этот вопрос на примере наиболее распространенных из мощных сетевых накопителей — гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), которых в мире насчитывается свыше четырехсот. Их суммарная мощность в настоящее время превышает 100 000 МВт.

Обычно современные ГАЭС строятся по так называемой двухмашинной схеме (турбина-насос + мотор-генератор), при этом оптимальная скорость вращения в генераторном (турбинном) режиме превышает на ~15% оптимальную скорость в двигательном (насосном) режиме. Соответственно, при равенстве скоростей, то есть при синхронной работе с сетью в обоих режимах, обычный синхронный гидрогенератор-двигатель будет иметь пониженную эффективность, по крайней мере в одном из режимов. Важным шагом на пути модернизации и повышения энергоэффективности в этой области стала разработка специальных асинхронизированных синхронных машин (В. Зейц, А. А. Горев, М. М. Ботвинник, Ю. Г. Шакарян и др.). В них синхронизация выходного напряжения статорной обмотки с сетью переменного напряжения обеспечивается компенсирующим вращением поля возбуждения, создаваемого обмоткой ротора. Для этого она запитывается через кольцевые контакты трехфазным напряжением управляемой сверхнизкой частоты от специального преобразователя. На низконапорных станциях такое решение дает увеличение коэффициента полезного действия до 10%. Асинхронизированные агрегаты применяются на ряде зарубежных ГАЭС — Ohkawachi (Япония), Avce (Словения), Goldisthal (Германия) и других.

При работе же ГАЭС на сеть HVDC более эффективным было бы применение традиционных синхронных машин в комплексе с обратимыми AC/DC-преобразователями большой мощности. При этом возможно повышение оперативности при переходе из насосного в генераторный режим и обратно с уменьшением времени набора нагрузки, а также работа в широком диапазоне мощностей и напоров.

Что касается мощных электростатических накопителей, уже существуют предложения отечественных производителей литий-ионных аккумуляторов (ООО «Лиотех») по созданию накопителей мощностью до 10 МВт (для социально значимых и критически важных объектов, частного сектора), 10–50 МВт (для промышленных объектов, распределительных сетей), до 100 МВт (для атомных и тепловых электростанций, возобновляемой электроэнергетики). Существуют также отечественные накопители на электрохимических конденсаторах, уже нашедшие применение на транспорте.

За рамками обзора мы оставляем водородную энергетику, часто относимую к накопителям, и тепловые аккумуляторы, которые в последнее время находят применение в проектах систем отопления зданий в сочетании

с возобновляемыми источниками энергии (например, в проекте «Ковчег»).

Электропривод

...технические системы развиваются закономерно, эти законы можно познать и использовать для сознательного и мощного развития техники...

Г.С. Альтшуллер. Дерзкие формулы творчества

С появлением прототипа электродвигателя (Майкл Фарадей, 1821 г.), первого рабочего образца электродвигателя (Б. С. Якоби, 1834 г.) и изобретения в конце XIX века основных типов электродвигателей развитие электроприводов в различных областях проходило с большой долей разнообразия, что связано со специфическими требованиями к приводам разных механизмов.

Типовые этапы этой эволюции удобно рассмотреть на примере массового и энергично развивающегося электропривода барабана автоматической стиральной машины. При создании первых автоматических машин для обеспечения вращения барабана на двух скоростях (стирка и отжим) были разработаны специальные асинхронные конденсаторные двухфазные двухскоростные электродвигатели, питающиеся от однофазной сети. Специальный командоаппарат переключает обмотки статора двигателя, поддерживая реверсирование направления вращения при стирке и 10-кратное увеличение скорости для отжима. Однако эти двигатели имеют невысокий КПД, большую массу и габариты, а также высокие пусковые токи, что усугубляется необходимостью частого реверсирования в режиме стирки. Управление скоростью двигателя путем переключения обмоток статора контактным командоаппаратом не позволяет говорить о высокой надежности подобного привода. Важно также отметить, что двигатели не обеспечивают плавный набор скорости при отжиме, чтобы получить равномерную раскладку белья по периметру барабана и уменьшить вибрации. Для осуществления «замедленного» разгона приходится применять специальный механический вариатор.

С развитием силовой электроники появилась возможность использования более эффективных коллекторных универсальных электродвигателей. За счет применения симисторных схем фазового управления такие приводы имеют широкий диапазон регулирования скорости. Это устраняет перечисленные недочеты асинхронного конденсаторного привода, однако появляется другой и весьма существенный недостаток — щеточно-коллекторный узел, снижающий надежность. Следующим шагом эволюции стал переход (около 2005 г.) на частотное управление асинхронным трехфазным электродвигателем (АД), инициированный разработкой мощных инверторных микросборок на IGBT- и MOSFET-транзисторах по классической схеме А. Н. Ларионова (три «полумоста»). В результате была создана схема привода (рис. 17), в которой на АД от инвертора поступает регулируемое по величине

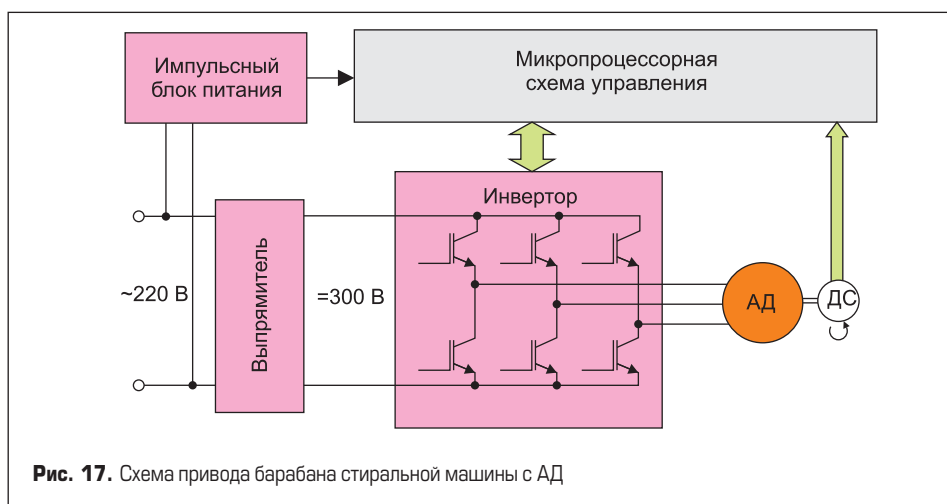


Рис. 18. Зеноб Теофил Грамм

и по частоте напряжению. Питание же инвертора осуществляется постоянным напряжением от выпрямителя, подключенного к сети переменного напряжения.

В самых последних моделях стиральных машин используется инновационный привод на вентильных двигателях с ротором на постоянных магнитах из сплава неодим-железо-бор (NdFeB). Вентильные машины часто называют бесколлекторными (или бесщеточными) двигателями постоянного тока (Brushless DC Motors), поскольку фактически они являются обращенными DC-двигателями, в которых функцию щеточно-коллекторного узла выполняет инвертор, управляемый от датчиков положения ротора.

На вентильных двигателях за счет получения большого вращающего момента в широком диапазоне скоростей удастся реализовать прямой инверторный привод барабана (Inverter Direct Drive) без традиционной ременной передачи, при этом уменьшается число подшипников и повышается надежность. Изменяющееся по величине и частоте переменное напряжение питания поступает на обмотки статора двигателя от инвертора, получающего постоянное напряжение (аналогично схеме на рис. 17).

Современные вентильные двигатели часто имеют бессенсорное микропроцессорное управление (без датчиков положения ротора). Микропроцессор обеспечивает также гибкую логику управления с возможностью варьирования скоростей барабана в широком диапазоне, включая не только плавный разгон, но и, к примеру, уменьшенную скорость отжима для деликатных тканей, спецрежим стирки детского белья и т. д.

Управляемые приводы на асинхронных и вентильных двигателях обычно объединяют в единый класс «частотно-регулируемых приводов», который для краткости будем именовать инверторными приводами. Эволюция приводов в различных бытовых приборах и в разных отраслях промышленности привела к тому, что в настоящее время уже эксплуатируются миллионы таких инверторных приводов с так называемым промежуточным звеном постоянного тока, обеспечивающих эффективное управление асинхронными и вентильными электродвигателями.

Современные инверторные приводы существенно улучшают пусковые характеристики, полностью устраняя главный недостаток неуправляемых асинхронных приводов, заключающийся в малоэффективном пуске с бросками тока.

Необходимо также отметить, что регулирование скорости приводов станков, насосов, вентиляторов и пр. дает существенную экономию электроэнергии. Так, уменьшая на 1/3 скорость вращения АД в вентиляторной установке, можно сэкономить до 2/3 электроэнергии.

По всей видимости, дальнейшее сокращение стоимости компонентов силовой электроники приведет к тому, что сочетание «инвертор + асинхронный (или вентильный) электродвигатель» будет все активнее вытеснять остальные типы приводов, а для подобного инверторного привода питание постоянным напряжением более естественно и энергоэффективно.

Таким образом, системы электропривода, долгое время являвшиеся фактически единственным типом конечного потребителя трехфазного напряжения, превращаются в потребителя исключительно постоянного напряжения.

Транспорт

Только тот, кто ничего не смыслит в машинах, попытается ехать без бензина; только тот, кто ничего не смыслит в разуме, попытается размышлять без твердой, неоспоримой основы.

Гилберт Кит Честертон

Городской пассажирский электротранспорт

Со времени изобретения инженером Ф. А. Пироцким первого трамвая, работающего в сети постоянного тока на коллекторных машинах Зеноба Грамма (рис. 18), позиции постоянного тока в традиционных видах городского электротранспорта (трамвай, троллейбус и метро) остаются достаточно прочными. Это можно объяснить необходимостью минимизации количества проводников контактной сети и хорошей управляемостью двигателей постоянного тока при регулировании

скорости, пуске и электрическом торможении. При сравнительно небольших величинах сетевого напряжения (600 В) и малых расстояниях между подстанциями традиционный электропривод на двигателях постоянного тока с реостатно-контакторным управлением полностью удовлетворял всем требованиям по созданию регулируемой тяги для наземного пассажирского электротранспорта.

В настоящее время повышение энергоэффективности и надежности городского электротранспорта достигается применением инверторного привода с асинхронными и вентильными двигателями. Пример современной силовой схемы привода четырехосного вагона трамвая с асинхронными тяговыми электродвигателями (АТД), выполненный на инверторах с транзисторами с изолированным затвором IGBT, приведен на рис. 19 (ООО «Чергос», Санкт-Петербург). Аналогичные схемы привода с АТД существуют для скоростных трамваев и для троллейбусов, причем в ряде последних моделей предусмотрен автономный ход на небольшие расстояния при питании от аккумуляторов.

В метрополитене используется DC-сеть с более высоким напряжением 750 В, подаваемым по контактному рельсу. Современным энергоэффективным решением по управлению движением поездов метро считается реализация автоведения с применением инверторных приводов с АТД при обеспечении энергосберегающего управления с учетом таких факторов, как профиль пути, ограничение по ускорениям разгона и торможения, ограничение по скорости на различных участках перегона и изменение пассажиропотока.

Впервые в отечественной практике автоведение на поездах с АТД с оптимизацией расхода электроэнергии при соблюдении времени хода реализовано в метрополитене г. Казань (система «Движение» разработки ОАО «НИИ точной механики», Санкт-Петербург), что позволяет минимизировать интервалы движения в часы пик при безусловном обеспечении безопасности.

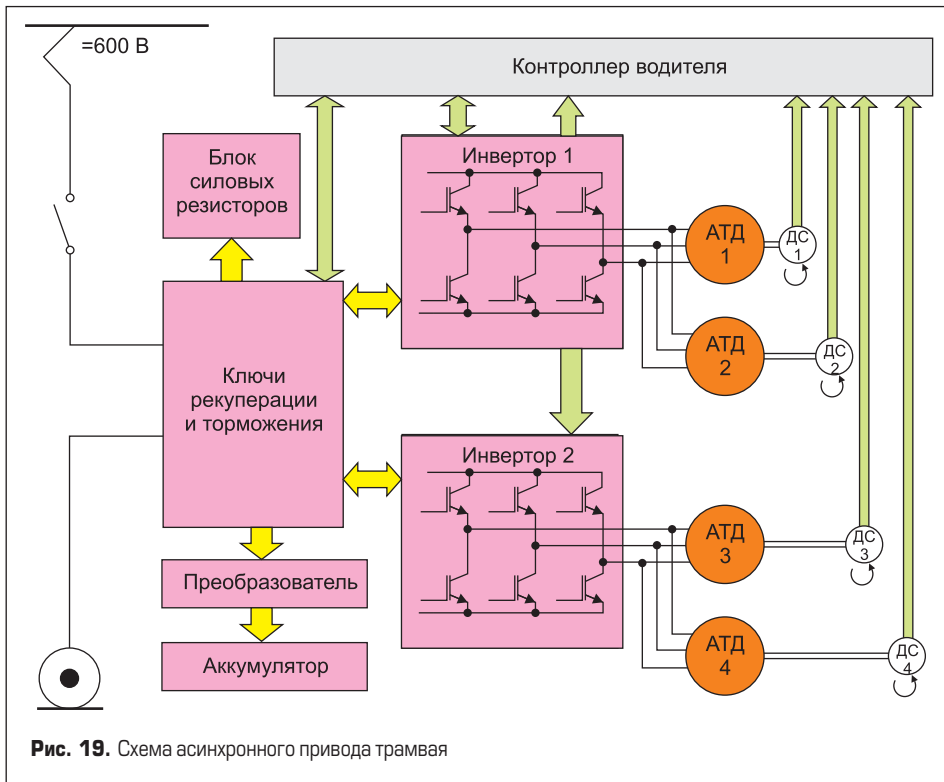


Рис. 19. Схема асинхронного привода трамвая

Уже существует ряд отечественных и зарубежных проектов повышения энергоэффективности на метрополитене и в наземном электротранспорте. В этих проектах обеспечивается рекуперативное торможение с использованием различных типов накопителей электроэнергии (аккумуляторных батарей, су-

пермаховиков, электрохимических конденсаторов), размещаемых на подвижном составе либо в наземном оборудовании. Существует также ряд инновационных концепций интеллектуальных транспортных систем (ИТС) различного назначения, включающих как аспекты энергосбережения, так и автоведе-

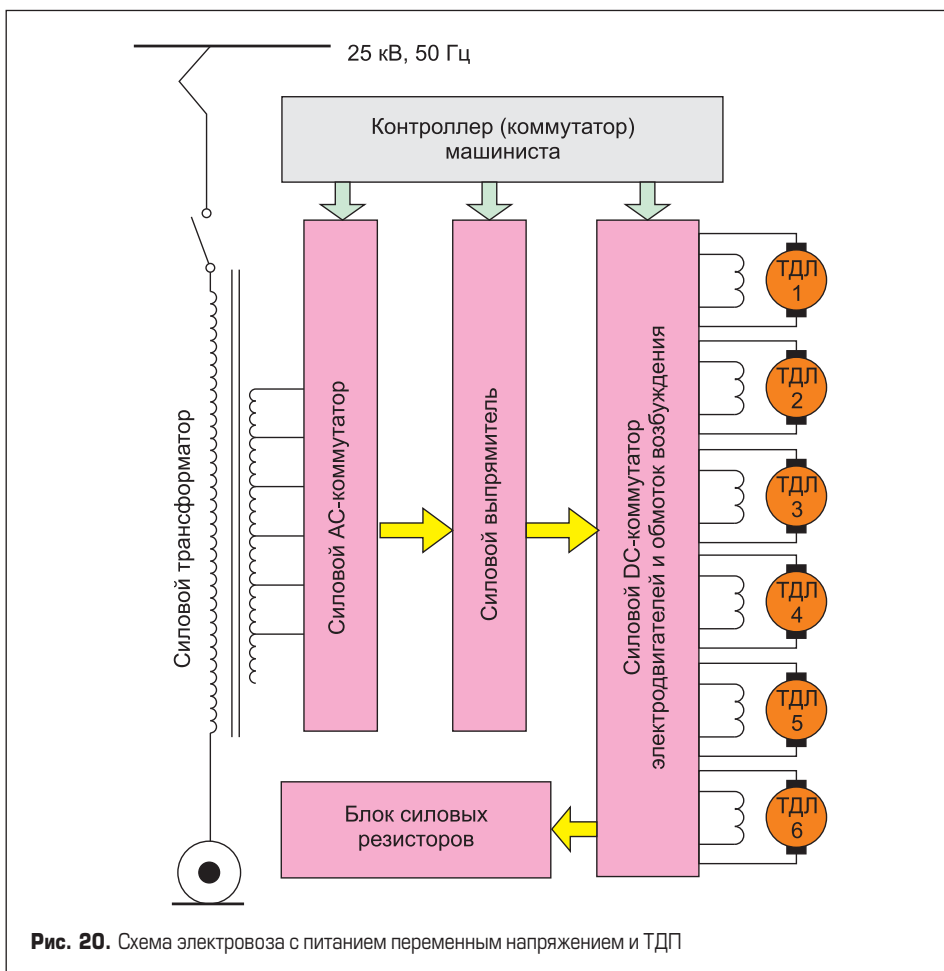


Рис. 20. Схема электровоза с питанием переменным напряжением и ТДП

ние. Одна из них — концепция глобальной ИТС (Global Intelligent Transportation System, Global ITS), в которой предложено создание системы городского, пригородного и даже междугороднего пассажирского сообщения на транспортных единицах троллейбусного типа (Вл. Постников).

Железнодорожный транспорт

На магистральных железных дорогах СССР первоначально шло развитие систем электрической тяги на постоянном токе 1,2 и 1,5 кВ, а затем и 3 кВ. В дальнейшем появилась необходимость повысить тяговые усилия электровозов и их мощность (до 6 МВт и более) без существенного увеличения сечения проводов контактной сети и без уменьшения расстояний между подстанциями. Этого можно добиться, только повышая напряжение сети. В 1960-е годы велась разработка системы тяги на напряжении постоянного тока 6 кВ (В. Е. Розенфельд). Опытная эксплуатация электровозов серии ЭР2 Рижского вагоностроительного завода (Rīgas Vagonbūves Rūpnīca), модернизированных под эту систему (ЭР2^в-556), проходила на опытном участке Гори — Цхинвали. Однако более эффективной была признана система тяги на однофазном переменном напряжении 25 кВ промышленной частоты (Б. Н. Тихменев). При этом на всех типах отечественных электровозов применялись, как правило, специализированные тяговые электродвигатели постоянного (пульсирующего) тока (ТДП). В системе тяги переменного напряжения они питались от ртутных, а затем и от полупроводниковых выпрямителей. На рис. 20 в упрощенном виде показана функциональная электрическая схема привода шестиосной секции электровоза переменного тока с возможностью амплитудного и амплитудно-фазового (при применении выпрямителя на тиристорах) управления ТДП. На ряде отечественных железных дорог применяется более сложная схема электропитания 2×25 кВ, с подпиткой контактной сети перегонов стандартного напряжения 25 кВ от автотрансформаторов, располагающихся рядом с железнодорожным полотном и подключенных к сети 50 кВ. Такая схема дает возможность увеличения расстояния между тяговыми подстанциями в два раза и более.

В Европе создавались системы тяги на постоянном и переменном токе, включая даже системы тяги на трехфазных АТД с трехфазной же схемой питания и двухпроводной контактной сетью (Ч. Браун). Несколько позже в Германии, Австрии, Швеции и Швейцарии получила распространение система тяги однофазного переменного напряжения 15 кВ пониженной частоты 16²/₃ Гц с контакторно-реостатным управлением универсальными коллекторными тяговыми двигателями.

В 1980-годах в СССР велись также разработки компромиссной системы тяги постоянного тока повышенной энергоэффективности с модернизацией контактной сети 3 кВ (Т. П. Третьяк). В этом проекте большую часть энергии предполагалось подавать в контактную сеть от параллельной ей сети электро-

снабжения повышенного постоянного напряжения (6 кВ) с помощью дополнительных преобразователей, размещаемых на перегонах рядом с железнодорожным полотном.

Разработка мощных высоковольтных тиристоров и IGBT привела к тому, что дальнейшее развитие электрической тяги многие специалисты стали связывать с возвратом к системе с постоянным напряжением, но при его повышении до 12 кВ и даже до 24 кВ. Такие проработки проводились в США, Италии, России и в других странах. В частности, итальянские специалисты считают, что система электрической тяги постоянного напряжения 12 кВ экономически более выгодна, чем любая из существующих систем тяги на переменном напряжении.

Одна из возможных силовых схем электровоза с повышенным постоянным напряжением питания и АТД в упрощенном виде представлена на рис. 21. На современных высоковольтных тиристорах такой вариант схемы может быть реализован для работы при напряжении питания до 12 кВ и более. Возможно и создание схемы с универсальным питанием от постоянного напряжения 3–12 кВ.

При внедрении систем электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения основной прирост энергоэффективности должен достигаться за счет применения инверторного привода на электровозах и эффективных многопульсных выпрямителей напряжения на тяговых подстанциях. При этом будет устранен ряд известных недостатков систем переменного тока, среди которых отметим следующие: низкий коэффициент мощности, наличие высших гармоник, асимметричность нагрузки фаз в питающей трехфазной сети, наличие нейтральных вставок (НВ) из-за питания прилегающих к подстанции перегонов от разных фаз. Последнее обстоятельство требует повышенной внимательности машиниста при необходимом отключении питания при подъезде к НВ. Позднее отключение грозит возникновением электрической дуги с возможностью пережога контактного провода; раннее отключение способно вызвать существенную потерю скорости и даже остановку поезда.

В системе тяги постоянного тока повышенного напряжения появляется возможность применения высоковольтных АТД, в которых уменьшены пусковые и номинальные токи и сокращен расход меди. Такие мощные асинхронные электродвигатели с номинальными напряжениями до 6 кВ широко распространены в горнодобывающей и других отраслях промышленности. Последовательное включение высоковольтных IGBT при использовании защитных цепей позволит запитать инверторы непосредственно напряжением контактной сети. В схеме такого привода не требуются понижающие DC/DC-преобразователи, и она во многом повторит схему привода трамвая с АТД (рис. 19).

По ряду причин в настоящее время отсутствуют отечественные разработки пилотных проектов систем тяги на повышенном напряжении постоянного тока. Поэтому в «Программе инновационного развития ООО

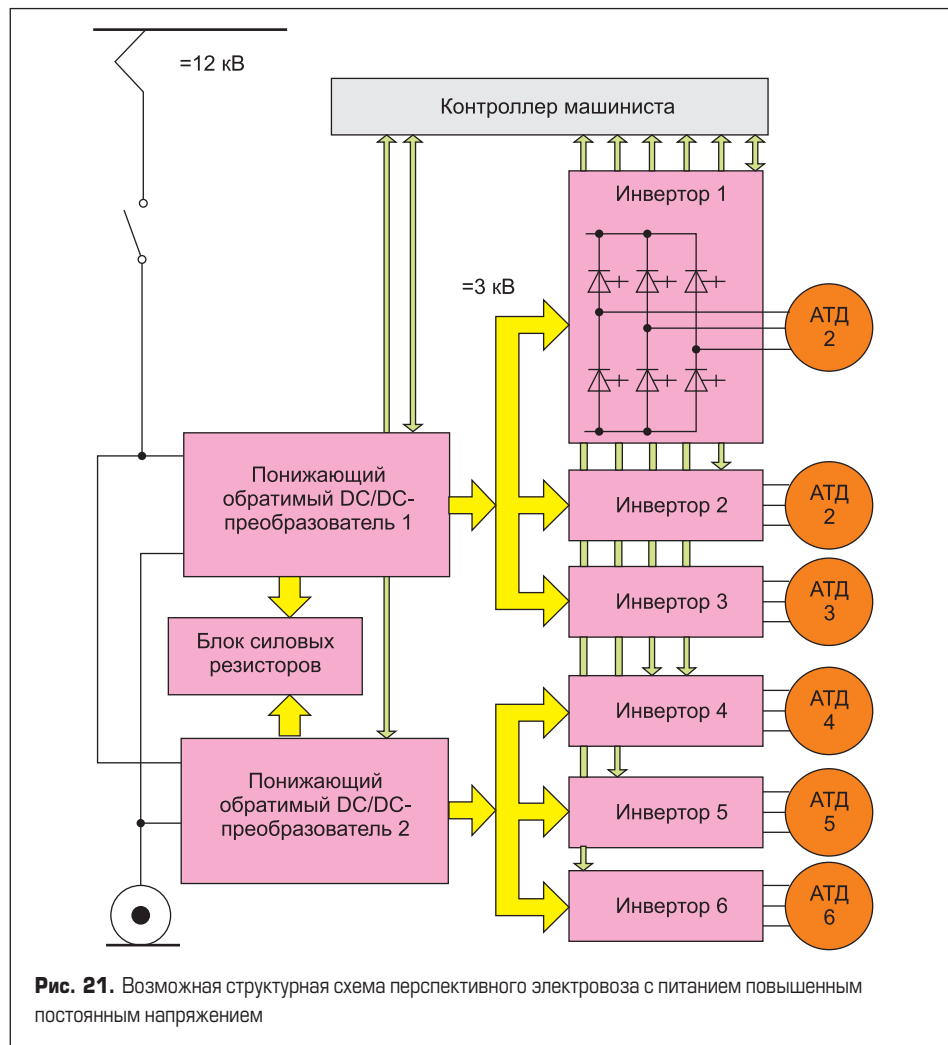


Рис. 21. Возможная структурная схема перспективного электровоза с питанием повышенным постоянным напряжением

«РЖД» до 2015 года» планируется развитие систем тяги по традиционным направлениям постоянного тока 3 кВ и переменного тока 25 кВ с переходом на приводы с АТД. Однако предусмотрена и разработка перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения.

Наличие на современных железных дорогах Евросоюза нескольких стандартов напряжения тяговой сети (1,5 и 3 кВ DC, а также 15 кВ, 16²/₃ Гц и 25 кВ, 50 Гц AC) приводит к тому, что производители электропоездов, в том числе скоростных, вынуждены выпускать двух-, трех- и даже четырехсистемные поезда на все типы применяемого напряжения. Автоматизированный перевод на ходу с одной системы тяги на другую обеспечивается перекоммутацией силового оборудования электровоза с поднятием/опусканием соответствующего пантографа (переменного или постоянного тока). В то же время осуществление высокоскоростного железнодорожного движения требует строительства специального выделенного полотна и создания высокоскоростных локомотивов. Представляется, что для таких проектов более пригодна концепция системы тяги постоянного тока повышенного напряжения.

Следует также отметить, что модернизация контактной сети с переходом от одного вида тока к другому на действующем участке железной дороги представляется весьма сложным де-

лом на первый взгляд. Тем не менее в 1995 году в России впервые в мировой практике на участке Восточно-Сибирской железной дороги протяженностью 400 км был произведен переход сети с постоянного напряжения 3 кВ на переменное напряжение 25 кВ без существенных перерывов в движении поездов. Аналогичные примеры есть и в Евросоюзе.

Важной сферой применения DC-технологий на железнодорожном транспорте являются также маневровые тепловозы. Некоторые специалисты считают, что наиболее выгодным вариантом модернизации маневровых локомотивов является их перевод на гибридную силовую установку, содержащую дизель-генераторы, мощный накопитель энергии на электрохимических конденсаторах или литий-ионных аккумуляторах и индивидуальные инверторные приводы колесных пар. По данным концерна «Русэлпром», за счет стабильного и энергоэффективного режима работы дизельгенератора уменьшенной мощности для гибридного локомотива с использованием накопителя для рекуперации и покрытия пиковых нагрузок расход топлива может быть снижен до трех раз, а количество вредных выбросов уменьшено до пяти раз.

В третьей части статьи завершим рассмотрение ряда аспектов применения DC-технологий, в том числе на транспорте, сформулируем выводы и попытаемся сделать прогноз на ближайшее будущее.