

# *В преддверии возрождения постоянного тока.*

**Часть 3**

**О.Т. Зотин,**

[o\\_zotin@mail.ru](mailto:o_zotin@mail.ru)

*Материал для эволюции поставляют не победители в борьбе за существование, а побежденные.  
Э.С.Бауэр*

В последней части статьи продолжаем рассматривать отдельные аспекты эволюции электроэнергетических DC-технологий и возможные сферы их распространения, сформулируем выводы и попытаемся дать прогноз на ближайшее будущее.

## ***Транспорт (продолжение)***

**Пассажирский автотранспорт.** Для запуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в качестве стартеров изначально применяли коллекторные двигатели постоянного тока, питающиеся от батарей напряжением 6, 12 и 24В, набираемых из двухвольтовых свинцово-кислотных аккумуляторов (Г.Планте,1860г). Эти напряжения и стали стандартами де-факто для питания основного и вспомогательного электрооборудования автотранспорта в мировом масштабе. Первоначально для подзарядки аккумуляторов применялись DC-генераторы. Переход к синхронным генераторам с выпрямителем начался с разработки в 1954г первых в СССР и в Европе трехфазных генераторов для энергосистемы автомобилей УАЗ (Ю. А. Купеев и В. И. Василевский).

В последнее время возрождается применение электромобилей (Electric Vehicle, EV), которые на заре развития автомобилестроения составляли конкуренцию автомобилям с ДВС; все шире применяются и гибридные автомобили (HEV). Преимущества EV и HEV хорошо известны, и на них подробно останавливаться не будем, укажем только на два аспекта их применения, связанных со взаимодействием с электросетями.

Первое – это, казавшееся еще недавно экзотическим, использование EV и HEV в качестве источников электропитания в индивидуальных домохозяйствах при перебоях в поставке электроэнергии. Для этого вместо обычных зарядных устройств потребуется применять обратимые преобразователи (пример приведен на рис.16 второй части статьи). Это обеспечивает повышение живучести как автономных, так и локальных DC энергосистем без использования специализированных резервных источников, что актуально в случае возможных системных аварий и аномальных природных воздействий.

Второе – прогресс в разработке мощных, компактных и быстро заряжаемых литий-ионных аккумуляторов привел к созданию городского автобуса с полностью электрическим приводом (электробус, eBus), в котором для прохождения любого маршрута достаточно зарядки аккумуляторов, производимой во время остановки на конечном (начальном) пункте маршрута, либо более длительной зарядки во время ночной стоянки. Отечественные примеры электробусов: НефАЗ-52992, ТРОЛЗА-52501 и ЛИАЗ 6274 с аккумуляторами ООО «Лиотех». В Китае электробусы eBus-12 (K9) серийно выпускаются компанией BYD с 2010г. В мае 2013г группа компаний с участием АВВ продемонстрировала в Женеве инновационный проект электробусной системы (Trolleybus Optimisation Système Alimentation, TOSA). В этом проекте аккумуляторы электробусов оперативно подзаряжаются на остановках за 15-20 секунд при автоматическом подключении токоприемника к зарядному устройству. На конечных остановках предусмотрена полная зарядка за 4-5 мин. Это позволяет оптимизировать емкость накопителя и повысить вместимость электробуса. Комплект оборудования для электробусной системы аналогичной TOSA был также анонсирован французской фирмой PVI (система WATT). Прототип системы TOSA с использованием на электробусах накопителей на супермаховиках (гиробус, gyobus) с подзарядкой на остановках от трехфазной сети эксплуатировался еще в 1950-х годах в Швейцарии и Бельгии. Отсутствие в то время эффективной силовой электроники привело к низкому коэффициенту полезного действия супермаховичного привода и гиробусной системы в целом, в результате она не смогла конкурировать с классическими троллейбусными и трамвайными системами.

Не менее важным становится применение гибридных автобусов, использующих накопители на электрохимических суперконденсаторах (экобус, ecobus). За счет стабильного режима работы ДВС на

пониженной мощности и применения рекуперации достигается экономия топлива до 50% и радикальное снижение вредных выбросов, особенно при городском цикле движения. ООО «Русэлпром-Электропривод» в рамках этой концепции разработало комплект тягового электрооборудования (С.Н. Флоренцев) с инверторным приводом на асинхронных двигателях (АД), который легко адаптируется для применения в современных и перспективных проектах экобусов различных производителей (ЛиАЗ, «Богдан», «Белкоммунмаш» и др.). В сравнении с обычными автобусами существенно снижаются вибрация и шум, повышается надежность и ресурс работы, уменьшаются затраты на обслуживание и ремонт, предусматривается возможность отключения ДВС (например при стоянии в пробках). Срок окупаемости экобуса при работе в городском цикле не превышает двух лет эксплуатации.

В ближайшее время следует ожидать серьезной конкуренции электробусов и экобусов со всеми традиционными видами наземного городского пассажирского транспорта.

Аналогичные гибридные привода начинают применяться в тех видах транспорта, где часто используется повторно-кратковременный режим работы, в частности в коммунальной, дорожно-строительной и лесозаготовительной технике.

**Грузовой транспорт.** Одновременно с появлением первых пассажирских трамваев и троллейбусов начали применяться и их грузовые модификации, как для собственных нужд троллейбусных и трамвайных парков, так и для осуществления внутригородских перевозок между предприятиями. В СССР разрабатывались также грузовые гибридные троллейбусы с приводом от электромотора и двигателя внутреннего сгорания; самые удачные модели выпускались Сокольническим вагоноремонтным заводом.

Наибольшее же распространение из всех видов грузового электротранспорта получили аккумуляторные электропогрузчики и электрокары, способные перемещать грузы в стесненных цеховых и складских условиях, в трюмах судов и в железнодорожных вагонах без выбросов вредных выхлопных газов.

Что касается транспорта большой грузоподъемности, то в СССР был создан ряд образцов дизельных грузовиков с электрической трансмиссией и возможностью питания от тяговой электросети троллейбусного типа, т.н. дизель-троллейвозы (ДТВ). Среди них наиболее известны белорусские карьерные самосвалы БелАЗ-524Э792 (1964г) и БелАЗ-75195 (1986г), грузоподъемностью 65 и 110т соответственно. В наше время под давлением экологических требований и увеличивающейся стоимости топлива созрела необходимость в дальнейшем развитии ДТВ, которые смогли бы взять на себя также часть городских и пригородных перевозок. Решение этой задачи требует оперативного автоматизированного подключения ДТВ к контактной сети и отключения от нее на ходу, что дает определенную автономность для проведения погрузо-разгрузочных работ, объездов, разворотов, обгонов, парковок и прочих маневров.

Наиболее интересным решением в этой области представляется проект eHighway (Siemens), создаваемый под эгидой Министерства охраны окружающей среды Германии (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit). В рамках этого проекта создан ДТВ (рис.22) с управляемым двухполозным бугельным токоприемником (Schleifbügel), который обеспечивает подключение к контактной сети с продольно-цепной подвеской на ходу и возможность парирования отклонений от оси подвески при скорости до 90 км/час. Испытания eHighway проходят на экспериментальной трассе, оборудованной на взлетно-посадочной полосе (ВПП) бывшего военного аэродрома Темплин/Гросс-Долльн (Flugplatz Templin/Groß Dölln) в 60км севернее Берлина. Эта ВПП была модернизирована в 1988г для возможности посадки орбитального корабля «Буран». Реализация первого коммерческого проекта eHighway запланирована в Лос-Анджелесе. Его цель - транспортировка грузов от крупнейшего морского порта на тихоокеанском побережье США с обеспечением требований программы «Чистый воздух» (Port of Los Angeles Clean Air Program, POLACAP).



Рис. 22 eHighway

Аналогичная ДТВ-система применяется и для самосвалов, работающих в карьерах ЮАР и Австралии. ОАО «БелАЗ» планирует создать к 2015г ДТВ грузоподъемностью 220 тонн на базе карьерного самосвала с электрической трансмиссией. Этот ДТВ позволит увеличить производительность, уменьшит загазованность в карьерах, снизит расход топлива и затраты при транспортировании горной массы в целом.

Дальнейшая эволюция ДТВ, по всей видимости, будет происходить в направлении уменьшения габаритов электрооборудования, внедрения автоведения и централизованного контроля

энергопотребления, создания разветвленной контактной сети, а также разработки полностью электрического троллейвоза с энергонакопителем. Приведет ли это в дальнейшем к созданию контактной сети общего пользования и к системе типа Global ITS с обеспечением как грузовых, так и пассажирских перевозок – об этом, наверное, судить еще рано.

**Вертикальный транспорт.** Во всех видах подъемно-транспортного оборудования (цеховые, транспортные, палубные и строительные краны, пассажирские и грузовые лифты, шахтные и строительные подъемники, эскалаторы и траволаторы, подъемные платформы для инвалидов и пр.) электропривод вытеснил все другие виды приводов (гидравлические, пневматические и пр.). В большинстве моделей вертикального транспорта используется наиболее надежный электропривод на АД. Необходимость повышения качества работы подъемников, включая улучшение плавности разгона и торможения, а также повышение точности остановки привела к тому, что в последних разработках все чаще используется регулируемый инверторный электропривод на АД. Это позволяет также уменьшить пусковые токи, сократить расход электроэнергии и избавиться от дополнительных маховиков. Как уже неоднократно отмечалось, переход таких приводов на DC-питание позволяет повысить энергоэффективность и улучшить ряд других характеристик.

**Морской транспорт.** Весьма показательной для нас является впервые созданная DC-энергосистема для крупного морского судна гражданского назначения – многоцелевого корабля для обслуживания нефтяных платформ. В системе используются инверторные приводы Azipod (ABB) с синхронными электродвигателями, потребляющие до 80% электроэнергии, вырабатываемой дизельгенераторами. Обеспечивается снижение расхода топлива не менее чем на 20% в сравнении с аналогичной системой на переменном токе. Суммарный вес и объем электрооборудования уменьшен на 30% в основном за счет отсутствия низкочастотных силовых трансформаторов. Высвобождается место для размещения груза и экипажа. Улучшается компоновочная схема корабля, в том числе за счет выноса компактных гребных вентильных электродвигателей во внешние поворотные колонки. Номинальное значение напряжения силовой сети - 1000 В. Очевидно, что при такой величине напряжения должны быть приняты соответствующие меры электробезопасности. Для вспомогательного оборудования и для жилых отсеков предусматриваются преобразователи на пониженные значения напряжения.

Подытоживая обзор эволюции DC-технологий на транспорте, констатируем, что важнейшим инновационным трендом, улучшающим как технические, так и стоимостные характеристики всех видов транспорта является расширяющееся применение управляемых инверторных тяговых электроприводов на синхронных и асинхронных двигателях. Питание инверторных приводов в зависимости от конкретной транспортной задачи может осуществляться различных DC источников:

- контактная DC-сеть различных типов (однопроводная, двухпроводная, контактный рельс);
- периодически заряжаемый бортовой DC-энергонакопитель (на суперконденсаторах, аккумуляторный или супермаховичный);
- бортовой DC-источник электроэнергии на углеводородном топливе (ДВС + генератор + преобразователь), либо изотопный источник или даже атомная электростанция.

В ряде сфер применения вполне конкурентоспособны различные сочетания источников, такие, как газовая турбина + генератор + суперконденсаторы (экобус), дизельгенератор + двухпроводная контактная сеть (ДТВ), газобензиновый генератор + суперконденсаторы (ё-мобиль), изотопный источник + аккумуляторы + солнечная батарея (луноход, марсоход).

### **Источники вторичного электропитания**

*... неумолимое движение времени всё изменяет. Фрэнсис Бекон*

На первом этапе своего развития полупроводниковая электроника в основном «приспосабливалась» к существующим сетям переменного тока. Это приспособление заключалось в преобразовании сетевого переменного напряжения в каждой единице оборудования в постоянное напряжение с дальнейшей

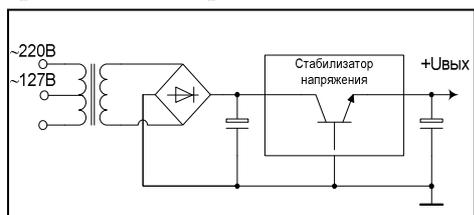


Рис.23 «Трансформаторный» ИБЭП

реализацией требуемых функций. Первоначально это сводилось к тому, что в каждом приборе имелся источник вторичного электропитания (ИБЭП) с маломощным и низкоэффективным сетевым трансформатором, выпрямителем, накопительным конденсатором и аналоговым стабилизатором (рис.23).

Развитие полупроводниковой электроники привело к появлению более эффективных импульсных ИБЭП с бестрансформаторным входом (рис.24), обеспечивающих

повышенный коэффициент мощности (КМ). В дальнейшем обозначился еще ряд факторов, способствующих пересмотру концепции электроснабжения. Среди этих факторов отметим следующие:

- применение ИВЭП с бестрансформаторным входом позволяет электрооборудованию работать как в AC-, так и в DC-сетях в широком диапазоне напряжений (например, 90...250 В) и с высокой эффективностью за счет управляемой широтно-импульсной модуляции в стабилизаторе напряжения;
- разработаны эффективные DC-технологии повышения/понижения и преобразования напряжения на MOSFET транзисторах, IGBT и на силовых тиристорах;
- управление распределенной генерацией и накоплением электроэнергии наиболее эффективно и надежно осуществляется на постоянном токе.

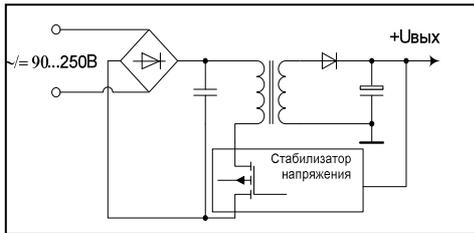


Рис.24 «Бестрансформаторный» ИВЭП с высоким КМ

Кроме того, при работе электрооборудования от сети низковольтного постоянного напряжения (например, в DC-микросети), не требуется сетевой выпрямитель с накопительными конденсаторами большой емкости, а частота преобразования может быть доведена до нескольких МГц. В результате схема ИВЭП существенно упрощается (рис.25). Уже есть примеры выполнения таких ИВЭП и зарядных устройств (ЗУ) в одном чипе (вместе с высокочастотным трансформатором), что позволяет избавиться от внешних ИВЭП и ЗУ. В качестве прототипов таких приборов можно привести портативные УКВ радиостанции, которые для зарядки подключаются непосредственно к автомобильному напряжению =12В. Для приборов с повышенными требованиями к электробезопасности (например, для медицины) могут быть также улучшены массогабаритные характеристики и надежность.

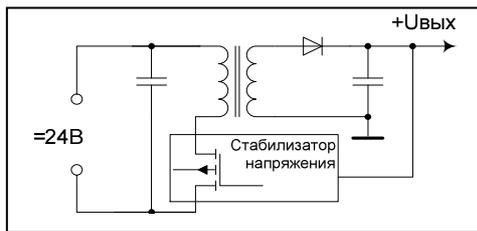


Рис.25 ИВЭП для низковольтной DC сети

Таким образом, с одной стороны, технологии AC/DC и DC/AC преобразования позволяют создать экономически выгодные DC ЛЭП, а с другой стороны все большее число оборудования может быть эффективно запитано от постоянного напряжения. Вполне логичным будет и следующий шаг – создание понижающих сетевых DC/DC преобразователей большой мощности с переходом на энергосистемы, в которых не только магистральные, но и распределительные сети будут работать полностью на постоянном токе без так необходимых в гибридных сетях DC/AC преобразований.

### Бытовая электротехника и электроника

*Cuius regio, eius religio. (Чья страна, того и религия.)  
Один из основных принципов Аугсбургского соглашения 1555г.*

Вся современная бытовая техника питается от AC-сетей. Однако в большинстве приборов для создания качеств, необходимых потребителю используется электроника, которая питается от DC, получаемого от ИВЭП. Лишь в некоторых устройствах AC используется напрямую, среди них – различные электрообогреватели, электроплиты, электроутюги, системы теплого пола и лампочки накаливания. Очевидно, что все эти нагревательные и осветительные приборы могут успешно работать при любом типе питающего напряжения.

Правда, есть немногочисленные исключения, которым необходимо именно AC-питание. Одним из них можно считать соленоидные вибродвигатели, применяемые в вибронасосах, виброэлектробритвах и тому подобных устройствах. В них используется электромеханический резонанс на частоте AC-сети (или на удвоенной частоте сети). Однако вибродвигатели, как правило, весьма чувствительны к величине и частоте питающего напряжения, а также к нагрузке. Ввиду этого необходимы схемы защиты (например, при отсутствии воды на входе насоса), а также управление, обеспечиваемое силовыми электронными схемами, питающимися от DC. Только самые простейшие вибронасосы подключаются непосредственно к AC-сети.

Вторым исключением до последнего времени можно было считать схемы бытовых холодильников, в которых, из-за необходимости работы мотор-компрессора в среде хладагента, традиционно применялся малоэффективный однофазный асинхронный электродвигатель с

дополнительной пусковой обмоткой. В аналогичных схемах компрессоров кондиционеров и сплит-систем с начала 1980-х годов используются более эффективные инверторные приводы с трехфазными АД, которые питаются от выпрямленного напряжения. Впрочем, уже появились бытовые холодильники с инверторными компрессорами, имеющие меньшее энергопотребление и уровень шума, а также повышенную надежность за счет использования непрерывного управления вместо старт-стопного.

Конечно, предлагаемая будущая замена «бытового» АС-напряжения на DC может встретить самые разнообразные сложности. Из них в первую очередь отметим следующие: необходимость использования специальных вилок и розеток, обеспечивающих однозначную полярность подключения и защиту от возникновения электрической дуги (Arc Free DC Plug), использование специальных предохранителей (или автоматических DC-выключателей) и соответствующую модернизацию проводки. Однако, получаемые преимущества настолько весомы, что препятствия такого рода вряд ли смогут приостановить этот процесс. Скорее всего, в качестве основной проблемы будет восприниматься организационная сложность перехода от одного вида напряжения на другое с выпуском (в течение некоторого времени) приборов с универсальным электропитанием, а также специализированных преобразователей.

Аналогичные прецеденты в недалеком прошлом уже имели место. Переход от напряжения ~127 В к ~220 В происходил в городских электросетях СССР в 1950-х и 60-х годах, на памяти ныне живущих поколений, при этом большое число приборов выпускалось с возможностью переключения электропитания. Производились также переходные трансформаторы для питания оборудования ~220 В от сети ~127 В и наоборот. Мало кто, наверное, помнит, что сельские сети нашей страны в это же время переходили на напряжение ~220 В с постоянного напряжения =110 В, существовавшего до войны. В аналогичный переходный период в ряде стран множество приборов выпускалось с возможностью как АС, так и DC-электропитания. Известно, например, что название популярной австралийской рок-группы АС/DC было дано по табличке на тыльной стороне швейной электрической машинки с приводом на универсальных коллекторных электродвигателях.

В настоящее время в 214 странах мира существует 5 стандартных значений «бытового» сетевого напряжения для частоты 50 Гц (115, 127, 220, 230, 240 В) и 7 значений – для частоты 60 Гц (110, 115, 120, 127, 220, 230, 240 В). Кроме того, количество стандартизованных типов соединений вилка – розетка, используемых в бытовых сетях в настоящее время превышает 14 шт. На рис.26 представлен

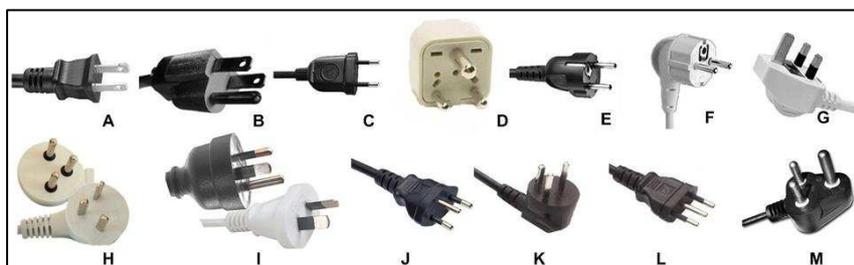


Рис.26 Стандартизованные вилки для АС-сетей потребителей

ряд применяемых вилок.

Вилки типов А и В применяются в Северной Америке и Японии; типы С, Е, F – в странах Европы и в России; тип D – в Индии и Южной Азии; тип G – в Великобритании и ряде других стран; тип H – в Израиле; тип I – в Китае, Аргентине, Австралии и Океании; тип J – в

Швейцарии и Лихтенштейне; тип К – в Дании и Гренландии; тип L – в Италии; тип М – в Южной Африке. Количество же всевозможных переходников вообще не поддается исчислению.

Для грядущего глобального мира будет немаловажным обеспечение всеобщей стандартизации в этой области. Представляется, что оптимальным решением был бы переход на единые значения DC электропитания. Как уже отмечалось, первыми такими стандартами де-факто явились автомобильные напряжения, используемые для питания бортового электрооборудования, в т.ч. через гнездо прикуривателя, запатентованного еще в 1919г.

### Экологические аспекты

*Каждая из наших побед над природой, имеет, в первую очередь те последствия, на которые мы рассчитывали, но во вторую и в третью очередь совсем другие, непредвиденные последствия, которые очень часто уничтожают значение первых. Ф. Энгельс. Диалектика природы.*

Влияние на окружающую среду каждого DC-проекта требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки настоящей работы. Нам придется ограничиться только перечислением характерных

улучшений, которые могут внести DC-технологии в сравнении с AC-технологиями. Выделим среди возможных улучшений следующие:

- первое – воздушные линии HVDC и UHVDC требуют выделения существенно меньших полос отчуждения в сравнении с HVAC и UHVAC;
- второе – кабельные линии, создающие меньшую экологическую нагрузку, находят все большее применение именно в виде DC-линий, потери в которых существенно меньше, что может использоваться не только в подводных линиях электропередачи, но и во вводах в мегаполисы и в подземных городских электросетях (Underground Residential Distribution, URD);
- третье – построение автономных энергосистем экологичных зданий и энергосистем зданий с «нулевым» энергопотреблением наиболее эффективно на базе DC-технологий;
- четвертое – уровень электромагнитных полей DC-линий во много раз меньше полей, создаваемых AC-линиями (согласно СанПиН 2971-84 электрическое поле напряженностью от 0,5кВ/м уже может оказывать вредное воздействие на человека);
- пятое – широкое и разнообразное внедрение DC-технологий на транспорте с частичным или даже полным вытеснением ДВС существенно улучшает экологическую обстановку;
- шестое - повышенная электробезопасность DC как для человека, так и для животных.

Известно, что большое количество птиц погибает на AC ЛЭП (в основном на опорах линий 6-10 кВ со штыревыми изоляторами). Согласно данным программы «Птицы и ЛЭП» Союза охраны птиц России, ежегодный совокупный ущерб от гибели редких птиц, многие из которых занесены в красную книгу, оценивается в 30...60 млрд. руб. при стоимости одной особи доходящей, по природоохранным нормативам, до 250 тыс. руб.

Необходимо отметить, что более высокая эффективность DC технологий обеспечит экономию ресурсов и уменьшение выбросов парниковых газов.

Все эти соображения, на взгляд автора, являются серьезными дополнительными аргументами в пользу дальнейшего распространения DC технологий.

### ***Global DC-multiProject***

*... глубинная простота существует, и если ее найти, то можно открыть новые и более мощные взаимосвязи. Дж. Клир. Системология.*

Отслеживая эволюцию разнородных DC-проектов и, видя разнообразные взаимовлияния и ряд близких а, в некоторых случаях идентичных решений в разных сферах применения DC-технологий, автор приобрел уверенность в том, что эти процессы по своей сути близки к процессам коэволюции (coevolution). Этот термин впервые был введен в 1968г в биологии Н.В.Тимофеевым-Ресовским. В нашем случае DC-коэволюцию можно представить, как развитие многоуровневого глобального DC-мультипроекта (Global DC-multiProject, GDCmP), включающего в себя сообщество взаимодействующих и взаимозависимых DC-метасистем и структурированных систем. Составляющие GDCmP имеют общие ресурсы (энергетические, информационные, человеческие и пр.), особую телеологию и испытывают существенные воздействия от «родственных» метасистем, к которым можно отнести метасистемы электроприводов, электрохимии (аккумуляторов) и порожденную многоуровневую метасистему электроники (в т. ч. силовая и управляющая).

DC-коэволюции, как коэволюции конгломерата технических метасистем свойственны черты хорошо изученной биологической коэволюции. Среди них: конкуренция (внутри- и межвидовая), направленный отбор, мутуализм (сотрудничество), адаптация и изменчивость (мутации, комбинации и модификации), системогенез, а также образование и вымирание видов.

На взгляд автора, приведенных примеров DC-проектов вполне достаточно для того, чтобы убедиться в том, что плодотворный период развития смежных метасистем электроники, электрохимии и электропривода в последние десятилетия дал мощный импульс развитию DC-коэволюции, что является существенным дополнением известнейшего определения важнейших технологий автоматизированного XXI века, данного J. Bosc. Дальнейший прогресс GDCmP будет зависеть, в том числе и от того, насколько быстро придет осознание единства процессов, проходящих в DC-проектах.

**Терминологическое замечание.** В связи с вышесказанным представляется, что модное и часто употребляемое в последнее время в электроэнергетике понятие «интеллектуальная сеть» (Smart Grid, SG) не в полной мере отражает суть описываемых процессов. В рамках GDCmP более приемлемым представляется термин «интеллектуальная электроэнергетическая система» (Smart Energy System,

SES), поскольку электроэнергетическая система включает в себя еще и приемники электроэнергии, т.е. технологии использования (применения) электричества (в соответствии с п.1.2.4 ПУЭ, 7-е изд.).

### **Резюме**

*Орудия научной мысли большинством даже образованных людей берутся или, скорее, получают готовыми из-за границы и потому поработают мысль, которая не способна работать без них и весьма неясно представляет себе, как именно они выработаны и какова их настоящая прочность.*

*Павел Флоренский, член комиссии ГОЭЛРО. Из соловецких писем.*

Возвращаясь к основной теме нашего исследования, необходимо констатировать, что прогресс силовой электроники привел к тому, что основные факторы, обеспечившие победу трехфазной системы Доливо-Добровольского на первом этапе электроэнергетической [р]эволюции (ее [r]evolution) в т.н. «войне токов», в наше время стали действовать уже в прямо противоположном направлении. Действительно, как передача электроэнергии на дальние расстояния, так и питание современных электроприводов более эффективно осуществляется на DC. В течение второго этапа электроэнергетической эволюции в XX веке появлялись разнообразные технологии применения электричества, для которых вид питающего напряжения был либо безразличен, либо AC-питание считалось единственно возможным (как, например, для традиционного уличного освещения лампами высокого давления). С началом же широкого применения силовой электроники практически во всех этих технологиях более предпочтительным становится DC, что можно расценивать, как переход к следующему (третьему) этапу эволюции – созданию интеллектуальных систем DC SES.

Тем не менее, есть область, в которой пока еще не ставится вопрос о возможности реализации описанных преимуществ DC-технологий в коммерчески успешном проекте. Речь идет о воздушных линиях средней дальности (до 500 км), в которых AC-технологии считаются экономически более выгодными ввиду меньшей стоимости традиционных трансформаторных подстанций в сравнении с преобразовательными подстанциями. Однако существует ряд соображений, указывающих на то, что и этот «последний бастион» не останется непоколебимым. Наиболее важными представляются следующие аргументы:

- продолжающийся прогресс силовой электроники активно способствует усовершенствованию преобразовательных подстанций, что демонстрируют, к примеру, инновационные технологии HVDC Light и HVDC Plus;
- сети средней дальности распространены в населенных районах, где велика стоимость землеотвода под зоны отчуждения; ввиду этого все более широко будут применяться «невидимые» подземные кабельные сети URD, а в них DC-технологии имеют превосходство на дальностях уже в несколько десятков километров;
- DC-сети создают существенно меньшую экологическую нагрузку ввиду минимального электромагнитного излучения и малых зон отчуждения, особенно в кабельном исполнении.

Необходимо также учитывать, что при разработке любого проекта в его технико-экономическое обоснование следует включать всестороннее сравнение возможных вариантов исполнения по экономическому критерию. В последнее время в качестве такового принято использовать совокупную стоимость владения (Total Cost of Ownership, TCO). Однако сравнение AC- и DC-сетей делается, как правило, только по их проектной стоимости (что проиллюстрировано на рис. 8 в первой части статьи). Очевидно, что в таких расчетах невозможно в полной мере учесть эксплуатационные расходы и экологические аспекты, существенно влияющие на затраты и экономию в течение всего жизненного цикла системы. К примеру, оценка по TCO в проекте DC LSG кардинально повлияла на облик предлагаемой системы городского освещения. Представляется, что корректное и полное сравнение по TCO должно дать дополнительные преимущества DC-системам. При этом важно будет учесть не только малые потери в линиях и меньшее воздействие на природу, но также и интересы конечных пользователей, которые со временем будут все больше склоняться к применению DC-оборудования в DC-сетях.

И заключительный аргумент. Во всех предыдущих рассуждениях метод автономных сравнений AC- и DC-технологий в каждой сфере применения по умолчанию предполагался вполне достоверным. По всей видимости, для последнего примера такой подход не является корректным. Действительно, в случае соединения электропередач переменного тока средней дальности с магистральными DC-сетями (HVDC и UHVDC) с одной стороны и с распределительными DC-сетями (LVDC) с другой, придется дополнительно вводить инверторы и выпрямители на подстанциях на входе и выходе таких линий. Наиболее правильной в этом случае была бы сравнительная технико-экономическая оценка энергосистем, выполненная полностью по AC- и DC-технологиям во всех

компонентах от генерации до потребления. Скептически оценивая возможность проведения в обозримом будущем такого всеобъемлющего и достоверного анализа, придется пока остановиться на том, что в рамках настоящего исследования нам не удалось найти ни одного более-менее устойчивого «анклава», в котором АС-технологии смогли бы бесспорно удерживать в будущем свои позиции.

Некоторые аналитики поторопились назвать происходящие события началом второй «войны токов». Автор же склонен считать, что мы являемся свидетелями начала возрождения (ренессанса) DC-технологий. Действительно, настоящий период развития электротехники все же больше напоминает время, когда Томас Эдисон продвигал концепцию биполярных DC-сетей освещения с лампами накаливания. В это время (1882г) ему удалось выиграть тендер на концессию по освещению Нью-Йорка в борьбе с компаниями, предлагавшими технологию газового освещения, изобретенную шотландцем Уильямом Мердоком еще в 1792г и усовершенствованную в первой половине XIX века выдающимся французским инженером Филиппом Лебоном. Есть определенная уверенность в том, что, несмотря на наличие серьезных противодействий, не стоит ожидать появления в этом процессе враждующих сторон, использующих методы «войны токов». Более того, каждый серьезный производитель электроэнергетического оборудования в наше время борется за рынок посредством внедрения лучших, экономичных и экологических решений, которые должны повышать качество жизни.

Оставим, впрочем, этот вопрос для будущих историков электротехники и электроники. Для нас же наиболее важным является то, что события постепенно приобретают характер, который на современном сленге принято называть мейнстримом. И если это действительно так, то, вполне возможно, что описанные процессы вскоре приведут к неизбежному тотальному переходу на DC энергосистемы в рамках общей концепции GDCmP.

## Возможные будущие DC-проекты

*The best way to predict the future is to invent it. (Лучший способ предвидеть будущее - это создать его.)*  
Алан Кертис Кей.

Поскольку существуют уже не только предпосылки, но и технические возможности по постепенному замещению многих АС-систем на DC-системы, то попробуем спрогнозировать появление грядущих проектов DC-ренессанса. При этом следует признать, что основным трендом с наибольшей вероятностью станет развитие интеллектуальных DC-энергосистем (DC SES) в первую очередь в тех областях, где их экономическое превосходство наиболее очевидно. Представляется, что в ряд гипотетических отечественных и международных проектов (не упоминая некоторые повторно) можно зачислить следующие возможные проекты:

- проект DC SES для электроснабжения и освещения объектов на федеральной скоростной автодороге (например, Москва - Санкт-Петербург, Санкт-Петербург-Петрозаводск);



Рис.27 Windfarm Noordoostpolder

- проект Кронштадтской ветроэлектростанции (Kronestadt Windfarm) мощностью до ~300 МВт с размещением ветрогенераторов вдоль комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнения и соединенных линией HVDC, аналог - проект береговой ветроэлектростанции Windfarm Noordoostpolder в Нидерландах (см. рис. 27);

- проект линии освещения с использованием существующей DC-сети постоянного напряжения для электротранспорта (например, освещение трассы метрограма Волгограда; освещение шоссе, по которому проходит самая длинная в мире троллейбусная линия Симферополь – Ялта; освещение трассы eHighway);

- проект DC SES для электроснабжения и освещения тепличного хозяйства (с требуемой мощностью осветительных установок до 1 МВт на гектар);

- проект DC SES для электроснабжения и освещения крупного спортивного сооружения, например, футбольного стадиона, горнолыжного комплекса, биатлонной трассы, олимпийской деревни и т.п.;

- проект сети заправочных станций электромобилей для крупного города (возможно совмещение с проектом DC LSG);

- проекты систем DC SES для электроснабжения и освещения повышенной безопасности и живучести крупных объектов различного назначения, таких, как морской порт, таможенный терминал, военный городок, горная выработка (карьер, шахта), вахтовый поселок нефтяников,

станция газо- и нефтеперекачки, производство разделения изотопов, железнодорожный узел, аэродром, космодром, крупное офисное здание типа Лахта-центра, Московский Кремль, объект Росрезерва, полярная станция, лунная база, марсианская колония и т.п.;

- проект энергообеспечения на повышенном DC-напряжении трансевразийской скоростной железнодорожной магистрали Сиань – Урумчи – Астана – Казань – Москва – Берлин с ветроэлектростанцией и ГАЭС в районе Джангарских ворот;

- проект DC-энергообеспечения трансконтинентальной полимагистрали Евразия – Америка (Якутск – Магадан – Уэлен – Ном – Фэрбенкс – Британская Колумбия) с тоннелем под Беринговым проливом (110км), объединяющей в едином коридоре скоростную электрифицированную железную дорогу, автодорогу, UHVDC ЛЭП и линии связи.

- проект глубоководной системы DC-энергообеспечения комплекса газонефтедобычи на глубинах океана до 3000м.

В качестве интегрального проекта «второй» очереди можно рассматривать пилотный проект перевода на DC-электроснабжение небольшого города. В случае реализации проекта Kronestadt Wind Farm в качестве кандидата можно рассматривать собственно Кронштадт (Kronestadt DC-Park). При этом для демпфирования неравномерности в генерировании электроэнергии и повышения живучести энергосистемы, потребуется использование мощного энергоаккумулятора, на роль которого могла бы претендовать ГАЭС «морского» типа с использованием в качестве нижнего резервуара Финского залива. Соленость воды залива в 4 раза меньше средней солености вод мирового океана, что может удешевить такой проект по сравнению с обычными морскими ГАЭС.

## **Возможные препятствия для внедрения**

*Три основных ошибки — неведение, привязанность и отвращение — препятствуют осознанию состояния Будды. Одно из положений Махаямы.*

До недавнего времени заявления, касающиеся повышения энергоэффективности в интеллектуальных сетях, применения возобновляемых источников энергии и инвестирования в них, а также развития сетей постоянного напряжения, воспринимались как декларации, далекие от реальной действительности. Однако исследования и внедрение ряда проектов в последние годы показывают все возрастающую актуальность инновационного развития в этой области. В то же время отечественная большая энергетика в целом не имеет отчетливых стимулов, как для продвижения распределенного производства электроэнергии, так и для увеличения эффективности энергопотребления, тем более с использованием DC-технологий. Эта проблема известна и выходит за рамки настоящей статьи. Здесь ограничимся только перечислением некоторых мер, с помощью которых возможно преодоление ряда препятствий, ускорение внедрения и распространения инновационных DC SES:

- разработка нормативных документов и стандартов интеллектуальных DC SES;
- разработка стандартов возобновляемой электроэнергетики;
- создание информационных и образовательных программ для специалистов, устанавливающих промышленные и строительные нормы;
- разработка федеральных и иных программ финансовой поддержки DC-проектов;
- разработка и регулирование тарифов поставки электроэнергии в сеть.

В настоящее время производители электроэнергетического оборудования создают международные ассоциации и консорциумы для реализации некоторых из этих целей.

Безусловно, в качестве серьезнейшего препятствия для дальнейшего продвижения GDCmP следует рассматривать огромное количество ранее произведенного и производимого AC-оборудования. Именно в этой области сложнее всего согласовать интересы производителей оборудования и потребителей, хотя и тут отмечается важная тенденция по все более широкому использованию оборудования с «бестрансформаторными» универсальными AC/DC ИВЭП.

Одним из важнейших вопросов, не разрешенных со времен «войны токов», является также вопрос стандартизации и унификации характеристик электроэнергетических систем в мировом масштабе.

Как это ни странно, достаточно реально появление противников продвижения GDCmP и внутри метасистемы силовой электроники. Действительно, при переходе к DC SES должны утратить актуальность целый ряд направлений, связанных с преобразованием переменного сетевого напряжения, компенсацией коэффициента мощности, синхронизацией источников и пр.

## Что же дальше?

*Средством, благодаря которому просвещенные правители покоряли других, а их достижения превосходили многих, было упреждающее знание. Сунь Цзы. Искусство войны.*

В прогнозе развития электроэнергетических систем, данном Институтом энергетической стратегии (ЗАО «ГУ ИЭС», Москва) в работе «Исследование трендов и сценариев развития мировой энергетики в первой половине XXI века» отмечается, что основной технологической тенденцией будет являться переход к энергетическим системам нового поколения.

Прогноз ГУ ИЭС выделяет следующие четыре направления этого перехода:

- создание систем управления энергосистемой («умная» энергосистема);
- развитие технологий дальнего транспорта электроэнергии;
- развитие технологий накопления электроэнергии в энергосистеме;
- развитие распределенной генерации.

Такой, уже общепринятой, парадигме в наибольшей степени отвечают именно DC SES, обеспечивающие и более эффективную передачу на большие расстояния, и более эффективное подключение накопителей и альтернативных источников электроэнергии. Реализация «умного» управления такой энергосистемой, ввиду отсутствия необходимости синхронизации различных источников также существенно упрощается.

Не менее важно то, что DC SES одновременно обеспечивают повышение энергоэффективности и надежности энергоснабжения и позволяют проще реализовать интеллектуальную систему с возможностью управления нагрузками. Такие сети будут одновременно и более эффективными, и лучше совмещаемыми с быстро растущим и всепоглощающим сегментом современной нагрузки - управляемым электронным оборудованием.

В одобренных Правительством Российской Федерации «Сценарных условиях развития электроэнергетики на период до 2030 года» в главе «Инновационное развитие и техническая политика в электроэнергетике» намечено освоение в период 2016-2020 годов демонстрационных проектов технологий и оборудования во всех секторах электроэнергетики. Целью является подготовка к широкому внедрению этих проектов на следующих этапах до 2030 года. При этом в ряду важнейших инновационных технологий отмечается необходимость создания системообразующих DC сетей, а также ряда элементов, которые в дальнейшем могли бы стать базисом для реализации концепции DC SES и GDCmP в целом, а именно:

- DC-преобразователи;
- силовые полупроводниковые приборы на токи 6—7 кА и напряжения 10—12 кВ;
- интеллектуальные распределительные сети с использованием цифровых систем противоаварийного управления;
- сверхпроводниковые индукционные накопители энергии;
- мощные мегаваттного класса батареи топливных элементов на природном и синтез-газе;
- мощные (до 5 МВт) ветроэлектрические установки.

Если рассмотреть возможность реализации всех элементов GDCmP в идеологии этих сценарных условий, то было бы целесообразно дополнить их созданием следующих составляющих:

- обратимые DC/DC и AC/DC преобразователи;
- распределительные DC сети;
- крупные ветроэлектростанции с линией HVDC;
- пилотные проекты DC SES.

Обработку пилотных проектов DC SES в первую очередь следует производить там, где их преимущества наиболее очевидны, т.е. на обособленных объектах: в ветроэнергетике, в системах электроснабжения серверных центров, в электросетях кораблей, в интеллектуальных системах освещения DC LSG, в тепличных хозяйствах, на объектах с автономным электроснабжением различного назначения. При этом чрезвычайно важно на всех этапах обеспечивать работоспособные решения для всего спектра условий эксплуатации с подтверждением характеристик надежности.

В июне 2007г Европарламент принял декларацию в поддержку концепции третьей промышленной революции (Third Industrial Revolution - TIR). В основе концепции TIR, которую разработал Джереми Рифкин (Jeremy Rifkin), экономист и консультант президента Еврокомиссии, лежит синергия телекоммуникационных и энергетических технологий и систем. Концепция TIR базируется на пяти столпах (five pillars):

- возобновляемые источники энергии: солнечной, ветровой, гидро, геотермальной, океанических волн, биомассы и др.;

- здания, которые сами генерируют электроэнергию;
- технологии хранения энергии, включая водородные и другие технологии;
- технология Smart Grid (а точнее – SES, авт.) или энергетический интернет, т. е. умная система координации производителей и потребителей электроэнергии;
- электрические, гибридные и другие транспортные средства.

В настоящей работе приведено достаточное количество аргументов, для того, чтобы с полным основанием утверждать, что запуск синергетического энергокоммуникационного процесса TIR при использовании технологий GDCmP был бы наиболее продуктивным. Настает пора переосмысления ведущей роли трехфазных технологий не только в UHV, HV и LV электросетях, но и везде, где применяется электричество. Ряд факторов, а прежде всего успехи силовой электроники, распространение возобновляемых источников и распределенной генерации неизбежно приведут к тому, что электроэнергия станет полноценным товаром на «свободном» рынке. При этом становится все более очевидным, что DC-электроэнергия должна получить на нем неоспоримые преимущества.

Таким образом, за последние 60 лет (если считать от запуска Готландской системы) происходил ряд изменений в энергосистемах под давлением все возрастающих потребностей в более эффективном электроснабжении при активной экспансии силовой и управляющей электроники. По всей видимости, DC-технологии обречены стать надежным базисом для построения энергосистем грядущего постиндустриального мира. Можно предположить, что не за горами то время, когда постоянно наращиваемая масса DC-проектов приведет к осознанию необходимости [p]эволюционного перехода к GDCmP (DC-[r]evolution).

## Возможные движущие силы Global DC-multiProject

*Мы сами должны стать теми переменами, которые хотим увидеть в мире. Махатма Ганди.  
Then the last little pig built himself a house of bricks. It took him a long time to build it, for it was a very strong house. J.O.Halliwel, Popular Tales.*

Для дальнейшего широкого распространения DC-технологий и преодоления препятствий, часть из которых описана выше, потребуются объединить разобщенные до настоящего времени силы менеджеров и разработчиков, а также выработать стратегию развития, контуры которой для многих остаются все еще довольно туманными.

По ряду соображений наиболее перспективной площадкой для продвижения DC-технологий в рамках GDCmP представляется ассоциация БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай и ЮАР).

Безусловно, важным является то, что упомянутая в первой части статьи необходимость передачи электроэнергии на дальние расстояния наиболее актуальна именно для стран БРИКС. Еще более важен колоссальный потенциал и динамика развития электроэнергетики в этих странах. Этот потенциал определяется с одной стороны тем, что страны БРИКС существенно быстрее и с меньшими потерями вышли из мирового финансового кризиса, чем, например, некоторые из стран южной Европы. С другой стороны, меньшая насыщенность и больший износ электросетей в ряде стран БРИКС в сравнении с сетями развитых западных стран и насущные потребности в реструктуризации энергетики (ЮАР) позволяют осуществить переход к новому энергетическому укладу с относительно меньшими затратами в процессе капитального ремонта, модернизации и создания новых энергосистем. Очевидно, что многим странам БРИКС не будут чужды и проекты, аналогичные проекту DC-House, ввиду наличия обширных неэлектрифицированных территорий.

Кроме этого, необходимо учитывать, что концепция GDCmP, по сути, являет собой мультитехнологическую платформу для различных DC-проектов, поэтому в качестве следующего шага представляется необходимой разработка глобальной электротехнической стратегии. Такая стратегия (или, как теперь принято говорить, «дорожная карта») вряд ли будет выработана и претворена в жизнь исключительно усилиями консорциумов крупных транснациональных корпораций. Важнейший вклад в продвижение GDCmP может оказать широкое сообщество заинтересованных государств, важнейшую роль в котором предстоит сыграть (естественным образом) ассоциации БРИКС.

По всей видимости, старт полномасштабного GDCmP возможен только в качестве одного из технологических нововведений, определяющих формирование ядра шестого технологического уклада (по С.Ю. Глазьеву) параллельно с реализацией «программы по изменению нынешнего мироустройства и всей философии международных отношений» (С.В. Кортунов «Крушение Вестфальской системы»).

**P.S.**

**Постскриптум**

*Чем фундаментальнее закономерность, тем проще ее можно сформулировать. Петр Капица  
...и познаете истину, и истина сделает вас свободными. Иоанн 8:32*

В предисловии к своей работе «Электроника больших мощностей», опубликованной в 1962г, Петр Леонидович Капица (рис.28) отметил, что «электротехника, прежде чем прийти на службу энергетике, в прошлом веке [П.Л. имел в виду, конечно, XIX век, *авт.*] занималась широко только вопросами электросвязи (телеграф, сигнализация и пр.). Вполне вероятно, что история повторится: теперь электроника используется главным образом для целей радиосвязи, но ее будущее лежит в решении крупнейших проблем энергетики».

В завершении своего труда П.Л. Капица провидчески заметил: «Дальнейшее развитие электроники больших мощностей будет происходить все ускоряющимися темпами. Эти темпы зависят не только от времени, необходимого для решения теоретических и экспериментальных задач, а главным образом от того, насколько созрела необходимость в решении соответствующих проблем».



*Рис.28  
П.Л. Капица*

Dixi.

**P.P.S.**

### **Постпостскрипtum**

*...избыток информации порождает проблемы, очень похожие на те, которые вызывает невежество.  
В.Пелевин. "Empire V"*

Хотелось бы в конце повествования объяснить отсутствие ссылок и списка литературы, что может быть воспринято внимательным читателем как признак дурного тона. Все дело в том, что данное сочинение задумывалось, как научно-популярная статья в стиле В.Н. Болховитинова. Ближе к концу работы стало ясно, что если такой список потребуется создать, то он займет еще одну (четвертую) часть и так уже сильно перегруженного опуса. Остается надеяться, что для заинтересовавшегося читателя не составит большого труда найти первоисточники в современном информационном мире. В крайнем случае, автор готов оказать посильную помощь.

Dixi et animam levavi.