

Эберхард Ваффеншмит (Eberhard Waffenschmidt)

Перевод: Владимир Рентюк

Сеть электропитания постоянного тока для светодиодного освещения

➔ В статье демонстрируются решения на напряжении постоянного тока для таких зданий, как офисы, супермаркеты и жилые дома. Особое внимание уделяется вопросам подачи высокого напряжения постоянного тока (380 В).



В последнее десятилетие вопросы применения сетей электропитания, основанных на использовании напряжения постоянного тока, изучались весьма интенсивно. Это связано с тем, что многие альтернативные источники энергии, а также электроника и современные технологии управления, основаны именно на использовании напряжения постоянного тока. Такие сети электропитания постоянного тока с централизованным преобразованием напряжения переменного тока в постоянный оказались чрезвычайно выгодными, например для организации питания серверных ферм¹.

Поскольку светодиодное освещение и технология постоянного тока также тесно связаны между собой, то является полностью очевидным, что они могут использовать такие же решения в части организации электропитания от сети постоянного тока и для своих целей. В статье представлены результаты совместной работы Кельнского университета прикладных наук и компании Philips Research, полученные при установке системы питания постоянного тока для целей освещения офисного здания с поддержкой его питания от солнечной энергии.

Большинство электрических устройств внутри себя работают на напряжении постоянного тока, но их первичное питание осуществляется от сети напряжения переменного тока. Использование первичного источника питания с напряжением постоянного тока приводит к тому, что выпрямление становится уже лишним. В итоге устройства, основанные на потреблении электроэнергии, становятся проще и надежнее, а также уменьшаются общие потери мощности. Это становится особенно очевидным в тех случаях, когда используется много одинаковых устройств, таких, например, как лампы в супермаркетах или в открытых офисах.

Компоненты для решений с питанием от сети напряжения переменного и постоянного тока мало отличаются друг от друга. А вот светодиодные лампы могут иметь существенный выигрыш от перехода на питание от источника напряжения постоянного тока, потому что в этом случае драйверы таких ламп могут быть упрощены до использования всего лишь нескольких компонентов с достаточно высокой надежностью. При этом

¹ Серверная ферма — это группа серверов, объединенных общей сетью передачи данных и работающих как единое целое.



Рис. 1. Установка ламп: а) в офисных помещениях; б) в супермаркетах

будет иметь место не только уменьшение потерь, но и сведен к минимуму риск пробоа. Основное преимущество источника напряжения постоянного тока проявляется в том случае, если такая микро-сеть электропитания является децентрализованной и осуществляет не только генерацию, но и накопление энергии. Кроме того, в области высокого напряжения постоянного тока уже имеются инициативы по стандартизации. Наконец, мы имеем своеобразный испытательный полигон в виде офисной системы светодиодного освещения, основанной на питании от сети напряжения постоянного тока с использованием дополнительной поддержки от солнечных батарей.

Одной из современных тенденций в области освещения является рассредоточение источников света. Это становится возможным при использовании светодиодных ламп, которые имеют малые габариты, но при этом являются весьма эффективными источниками света. Тем не менее для своего функционирования они требуют также и высокоэффективных драйверов. И не просто высокоэффективных, а для каждой из ламп требуется свой индивидуальный драйвер, таким образом, количество драйверов увеличивается с ростом числа используемых ламп. Одним из решений, упрощающих эту задачу, может быть использование источника питания постоянного тока, что, как уже говорилось, позволяет исключить выпрямитель из управляющей электроники ламп. Это может быть полезным в системах освещения, в которых используется большое количество ламп, подключенных к общей шине питания, как это реализовано, например, на от-

крытом пространстве освещения офисов или супермаркетов (рис. 1). Каждая такая лампа содержит преобразователь напряжения переменного тока в постоянный, который может быть исключен при организации общего питания от шины постоянного тока. Это становится особенно привлекательным, если используется комбинированная система в сочетании с локальным генератором электроэнергии на основе солнечных батарей, как это показано в [1].

Системы питания на основе напряжения постоянного тока предлагаются в целом ряде публикаций, особенно это касается систем, предназначенных для жилых помещений, например [2, 3]. Но, как сказано в [4], имеется весьма большое разнообразие в части требований для различных устройств, и поэтому создание систем постоянного тока для жилых помещений связано с большими проблемами. Наоборот, в части освещения все нагрузки (то есть источники света) очень похожи по своим требованиям и, таким образом, эти системы значительно лучше подходят для общего

питания от общей сети напряжения постоянного тока.

Преобразование напряжения переменного тока в постоянный

На рис. 2 показана блок-схема типичного драйвера светодиодной лампы, работающей от сети напряжения переменного тока, и его составные части, необходимые для его преобразования. Подобные компоненты требуются для всех источников питания от сети напряжения переменного тока.

Выпрямитель является важнейшим элементом. Как правило, используется мостовой выпрямитель, состоящий из четырех диодов. Электролитический накопительный конденсатор сглаживает пульсации выпрямленного синусоидального напряжения. Недавно рабочая группа № 1 технического комитета 77 (IEC SC77A WG1) согласилась на новую ревизию стандарта МЭК 61000-3-2. Это означает, что в ближайшем будущем драйверы ламп с мощностью более 5 Вт потребуют введения в них схемы коррекции коэффициента

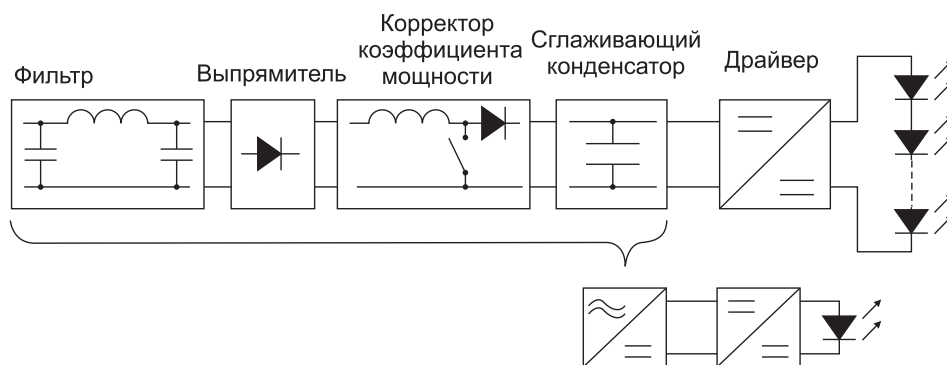


Рис. 2. Типичный драйвер светодиодной лампы для сети напряжения переменного тока

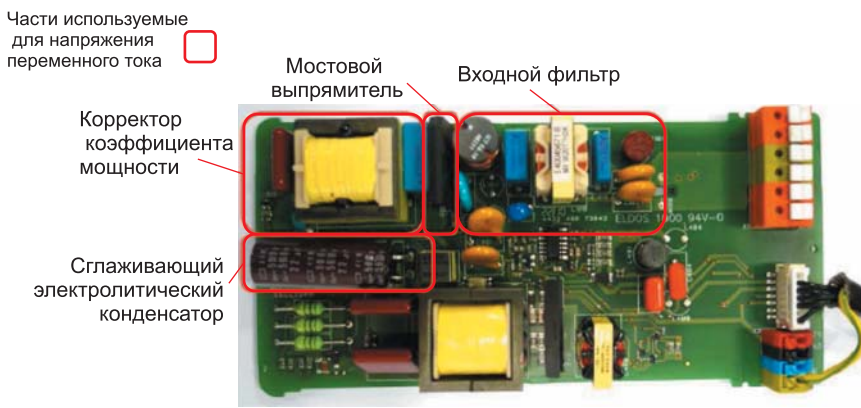


Рис. 3. Сетевой драйвер для светодиодной лампы мощностью 35 Вт

мощности (Power Factor Correction, PFC, ККМ). ККМ может состоять из катушки индуктивности, но это, как правило, является слишком громоздким решением. Иногда, а это обычно применяется для более высоких уровней мощности, в драйверах используются импульсные преобразователи, как правило, повышающие. Однако такое решение требует применения фильтра, чтобы избежать поступления высокочастотных помех от такого ККМ в общую сеть электропитания.

Экономия места и уменьшение числа элементов

На рис. 3 показан драйвер светодиодной лампы Philips Xitanium мощностью 39 Вт, которая была использована в качестве контрольной в описываемом исследовании. На рисунке обозначены все части, необходимые для преобразования напряжения переменного тока в постоянный. Как можно видеть, эти компоненты занимают примерно 40% печатной платы. Особенно это касается схемы коррекции коэффициента мощности и фильтра. Сглаживающий конденсатор также занимает достаточно большое пространство, но сам мостовой выпрямитель является сравнительно не крупногабаритным компонентом схемы драйвера.

Как уже обсуждалось, эти компоненты также могут быть необходимы и для варианта питания от сети напряжения постоянного тока. Соображения на этот счет представлены в таблице 1. Так, мостовой выпрямитель может быть необходим для того, чтобы обеспечить произвольное (без соблюдения требований по полярности) подключение проводов питания. Эта проблема может быть решена и с помощью соответствующего механического «кодирования» вилки, позволяющего исключить неправильное соединение. Сглаживающие конденсаторы также могут быть необходимы для компенсации кратковременных провалов напряжения на шине питания постоянного тока. Тем не менее, можно допустить некоторое приемлемое так называемое «подмигивание» лампы, если допустимо ее короткое мерцание. В этом случае сглаживающий электролитический конденсатор можно будет исключить.

Если напряжение питания постоянного тока имеет широкий диапазон изменения, то может возникнуть необходимость его преобразования в некоторое постоянное напряжение на заданном промежуточном уровне. Для этого потребуются DC/DC-преобразователь, похожий на активный ККМ. Тем не менее если рабочий диапазон напряжения постоянного тока достаточно

узок, то такой преобразователь может быть опущен.

Фильтр необходим для подавления высокочастотных составляющих, которые являются побочным продуктом, возникающим при использовании импульсных преобразователей напряжения. Фильтр становится также необходимым при использовании активного ККМ. Фильтр также необходим в случае, если сам драйвер лампы использует для своего функционирования импульсный преобразователь. Тем не менее при использовании системы с линейным драйвером такой фильтр может быть исключен.

Следует отметить, что есть еще ряд компонентов, которые необходимы в случае использования напряжения переменного тока, но могут быть исключены для версий с использованием сети напряжения постоянного тока. Это касается решений, использующих вилку с механическим ключом для подключения, если допустимы «подмигивания» свечения, а также если входное питающее напряжение задано в узком диапазоне. Есть ряд компонентов, которые могут использоваться при необходимости, если применен линейный драйвер управления лампой.

Драйверы светодиодных ламп

Как отмечалось, преимущества освещения с использованием напряжения постоянного тока питания становятся наиболее очевидными со светодиодными лампами. Самый простой драйвер для светодиода — это обычный резистор. Если напряжение питания достаточно точно и стабильно, то такой драйвер будет самым простым, надежным и долговечным решением. Однако, если напряжение не стабильно, яркость светодиода будет меняться, потому что даже небольшое изменение напряжения будет приводить к большим изменениям яркости светодиода.

Почти такое же по простоте решение, как и резистор, дает использование линейного формирователя тока. Линейный

Таблица 1. Обзор необходимых компонентов для преобразования напряжения переменного тока в постоянный

Компонент	Питание от сети напряжения переменного тока	Напряжение постоянного тока в широком диапазоне с защитой от переполусовки	Напряжение постоянного тока в узком диапазоне, механическая защита от переполусовки
Фильтр	Требуется, так как используется ККМ	Требуется, так как используется преобразователь постоянного напряжения	Может быть исключен, если используется линейный (не импульсный) драйвер
Выпрямитель	Выпрямитель	Требуется для установки требуемой полярности питания	Исключается
ККМ, преобразователь постоянного напряжения	Требуется при мощности >25 Вт	Требуется для согласования величин напряжений	Не требуется
Сглаживающий конденсатор	Требуется для сглаживания пульсаций и устранения мерцаний	Требуется, так как иначе будут «подмигивания» лампы	Может быть исключен, если «подмигивания» лампы допустимы

источник тока может быть легко построен на одном полевом транзисторе J-FET типа и резисторе. Эффективность такой схемы является весьма хорошей и рассчитывается на основе суммирования прямого падения напряжения U_d на светодиодах (полагается, что они постоянны), пренебрегая остаточным падением напряжения на полевом транзисторе. Результаты представлены на рис. 4. До тех пор, пока подводимое напряжение питания постоянного тока U_s больше, чем прямое напряжение U_{ϕ} напряжение питания светодиодов (показано синим) удерживается на номинальном уровне. Если напряжение питания увеличивается выше U_{ϕ} напряжение на полевом транзисторе растет линейно. Потери мощности на полевом транзисторе (показано красным) возрастают пропорционально увеличению напряжения питания. Эффективность (КПД) (показано желтым) рассчитывается исходя из напряжения питания светодиодов и потерь.

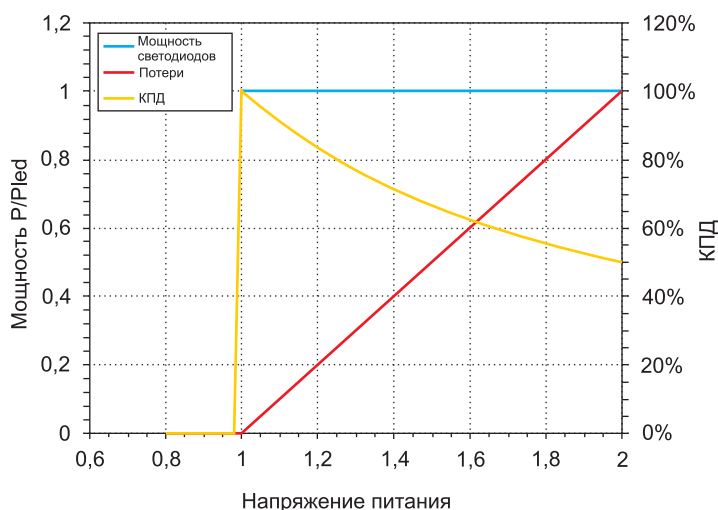


Рис. 4. График потребляемой светодиодами мощности и потерь светодиодного драйвера на основе линейного генератора тока

Экономия за счет снижения потерь

Компоненты, необходимые для преобразования напряжения переменного тока, являются источниками общих потерь. Как правило, чем менее мощное устройство, тем ниже его КПД. Наши измерения показали, что обычно такие потери составляют порядка 5% от выходной мощности драйверов ламп. Их распределение показано на рис. 5а. Этих потерь можно избежать, если устройство работает от источника напряжения постоянного тока. Но если напряжение сети переменного тока питает сеть напряжения постоянного тока, то необходим дополнительный главный выпрямитель. Тем не менее такой главный выпрямитель может быть более эффективным из-за его большей мощности.

Потери в выпрямителе оцениваются примерно в 2% от его мощности, как показано на рис. 5б. Кроме того, величина потерь в кабеле может быть уменьшена, если используется напряжение постоянного тока 380 В, как это показано на рис. 7. В целом, с помощью сети 380 В постоянного тока можно избежать около 5% потерь относительно выходной мощности системы освещения.

Еще большая экономия на потерях может быть достигнута в другом случае использования, как это показано на рис. 6. Здесь показана система, которая оптимизирована для варианта с использованием собственного

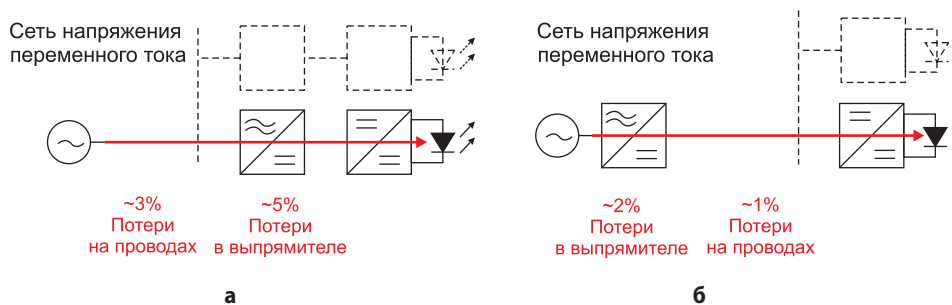


Рис. 5. Сравнение потерь для сетей напряжений: а) переменного тока; б) постоянного тока

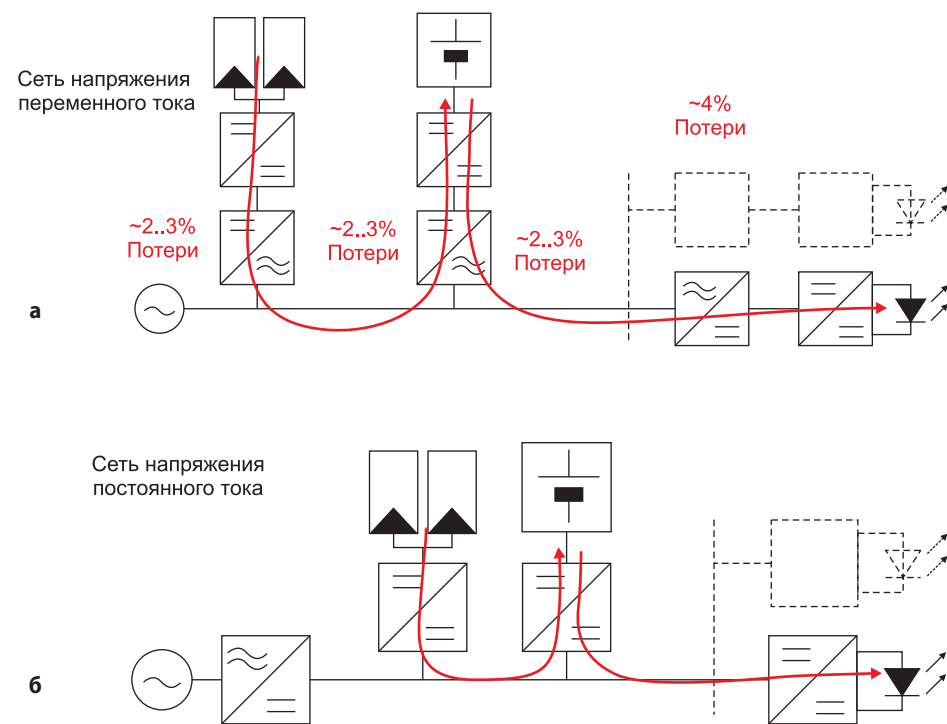


Рис. 6. Сравнение потерь для сетей напряжений при использовании солнечных батарей и буферных аккумуляторов: а) переменного тока; б) постоянного тока

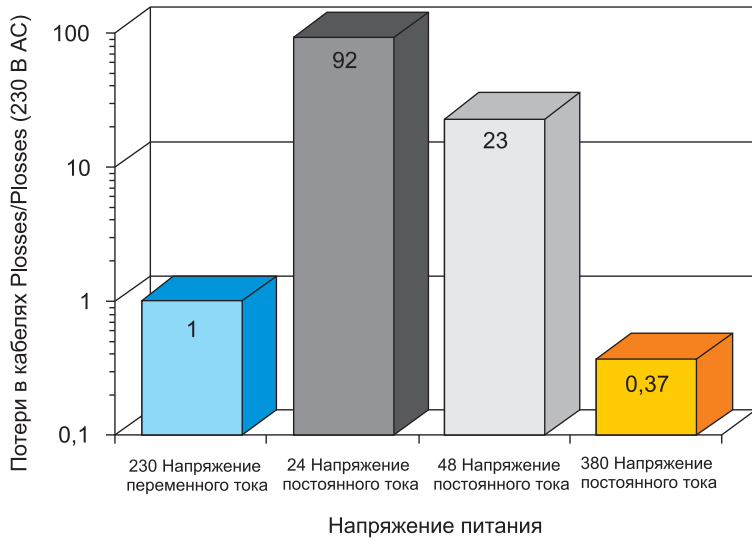


Рис. 7. Сравнение потерь в кабеле для различных систем питания

потребления энергии от солнечных батарей. Эта энергия собирается в течение дня и накапливается в аккумуляторах, а потом уже используется в вечернее время.

Если все компоненты подключены к сети напряжения переменного тока, то потери при преобразовании напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока (и наоборот), в конечном итоге, возрастают от 10 до 13% от выходной мощности (рис. 6а). В системе же с напряжением постоянного тока этих потерь можно полностью избежать (рис. 6б). В работе [5] показывается подобный результат для системы, которая работает с поддержкой от солнечной батареи с аккумулятором (рис. 7). Для однозначного восприятия все значения потерь сравнивают с потерями для варианта питания от сети 230 В напряжения переменного тока. Потери в кабелях зависят от количества используемой в них меди, которая необходима для достижения одинаковых потерь для различных напряжений.

Отметим, что 380 В постоянного тока требует такой же изоляции по устойчивости к напряжению, как для напряжения 230 В переменного тока.

Выбор уровня напряжения питания

Уровень напряжения питания сети постоянного тока также влияет на величину потери. Низкое напряжение питания 24 В имеет то преимущество, что оно безопасно при прикосновении, и для таких напряжений уже существуют коммерчески доступные устройства. Тем не менее для передачи одной и той же мощности, по сравнению с системами, рассчитанными на питание от сети напряжением 230 В переменного тока, требуется передать по проводам более высокий ток. Высокое постоянное напряжение, такое как 380 В, совместимо со многими устройствами, рассчитанными на работу от сети 230 В переменного тока, которые фактически внутри себя (после

выпрямления) работают на таком же уровне напряжения постоянного тока.

Потери мощности Ploss в кабеле пропорциональны квадрату силы тока I : $Ploss \sim I^2$. Рис. 7 демонстрирует, что потери в кабеле, приведенные к потерям на 230 В переменного тока, соответствуют различным уровням напряжения питания. Для достижения тех же потерь на больших токах площадь поперечного сечения жилы кабеля должна быть увеличена пропорционально силе тока: $A \sim I^2$. Таким образом, на этом же рисунке показано количество меди, которое необходимо для достижения тех же потерь, как и для систем с питанием от напряжения 230 В переменного тока.

Хорошо видно, что напряжения 24 и 48 В либо приводят к чрезмерно высоким потерям, либо требуют значительно большего расхода меди. Это также показывает, что при питании от 380 В напряжения постоянного тока имеет место только 1/3 потерь по сравнению с системами, имеющими питание от 230 В переменного тока. Следует отметить, что по изоляционным свойствам кабеля, рассчитанные на 230 В напряжения переменного тока, также вполне подходят для систем с питанием от 380 В постоянного тока, потому что они должны выдерживать амплитудное значение переменного напряжения.

Этот вопрос, в сочетании с другими вопросами в части безопасности, более подробно обсуждается в [6]. Здесь делается вывод, что работу при напряжении постоянного тока, не превышающем 380 В, можно рассматривать аналогично работе на напряжении в 230 В переменного тока. Еще один аспект безопасности сетей питания постоянного тока — опасность пробоя и образования дуги, которая, главным образом, появляется, когда нагрузка сети

Таблица 2. Обзор организаций, работающих по стандартизации низковольтных сетей напряжения постоянного тока

Организация	Область деятельности
Международная электротехническая комиссия МЭК (International Electrotechnical Commission, IEC)	Многочисленные стандарты, охватывающие низковольтные системы электропитания постоянного тока, уже разработаны
	Рабочая группа SMB SG4 "Распределительные системы низковольтного электропитания до напряжения 1500 В постоянного тока": работа над разработкой новых проектов по стандартизации в технических комитетах (ТК) МЭК
	Рабочая группа по национальной стандартизации. Германия: рабочая группа Think-LVDC по DKE/VDE
Европейский институт телекоммуникационных стандартов (European Telecommunication Standardisation Institute, ETSI)	Европейский стандарт EN 300 132-3-1 V2.1.1 (2012-02)
	Определение такого понятия, как ограничение пускового тока для устройств с питанием от напряжения постоянного тока и его измерение
EMerge Alliance	Рабочая группа по стандартизации электрических сетей напряжением 380 В постоянного тока для центров обработки данных
	Рабочая группа по стандартизации электрических сетей напряжением 380 В постоянного тока для кампусов и локальных сетей электропитания

отключается во время работы. Поэтому надо позаботиться о том, чтобы во время работы системы постоянного тока лампы без ее отключения не заменялись.

Вопросы стандартизации для сети напряжением 380 В постоянного тока

Сеть с уровнем напряжения 380 В постоянного тока привлекательна не только для освещения, но и для ряда других приложений, например для питания в центрах обработки данных. Такая стандартизированная система питания постоянного тока будет давать большие преимущества. В таблице 2 приведено описание организаций, которые работают по стандартизации в этом направлении, и состояние их текущей деятельности.

Установка для демонстрации работы системы освещения на напряжении постоянного тока

Чтобы продемонстрировать функциональность и изучить проблемы, описанные в настоящей статье, использовалась демонстрационная система, работающая от сети напряжения постоянного тока, которая расположена в офисном здании, принадлежащем компании Philips Research (г. Эйндховен, Нидерланды). На рис. 8 показана схема этой системы.

Часть системы (с электропитанием от напряжения постоянного тока) функционирует от напряжения 380 В постоянного тока и состоит из выпрямителя, фотоэлектрического генератора (солнечных батарей) мощностью 2 кВт и 54 светодиодных лампы по 37 Вт каждая. Лампы снабжены драйверами, которые приспособлены к системе питания от напряжения постоянного тока. На рис. 9 показаны фотоэлектрические панели и часть ламп системы освещения. Лампы освещают пол и включаются на необходимое время в течение рабочего дня. В лучшем случае питание всех ламп от напряжения постоянного тока осуществляется только от фотоэлектрического генератора. Возврат мощности от фотоэлектрического генератора в общую сеть переменного тока не предусмотрен. Лампы Philips Xitanium, а также их драйверы были модифицированы для работы с питанием от напряжения постоянного тока.

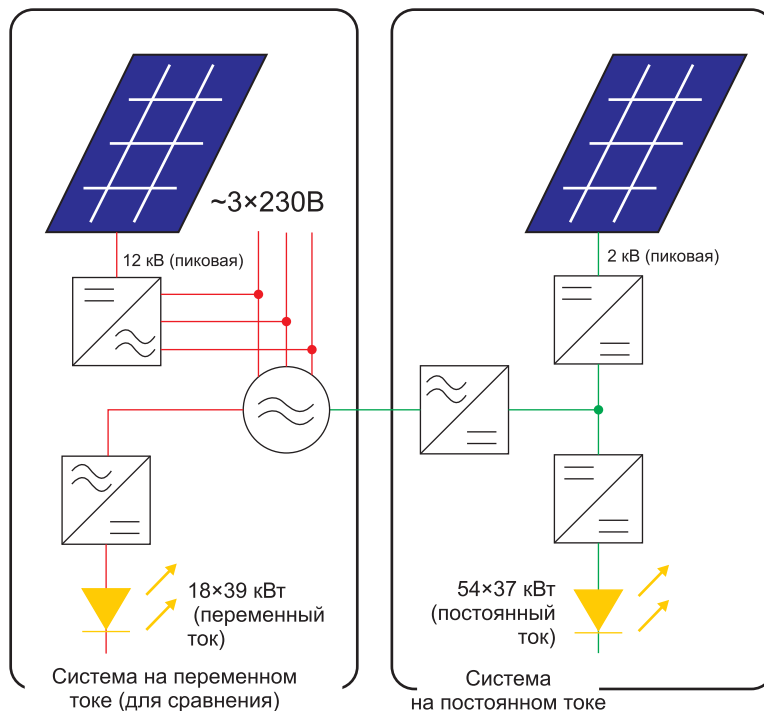


Рис. 8. Демонстрационная электросеть напряжения постоянного тока с поддержкой от солнечной батареи и сравниваемая с ней система с питанием от сети напряжения переменного тока. Номинальное напряжение 380 В (постоянного тока) АС. Солнечные модули — 2 кВт (пиковой мощности). Светодиодные лампы — 54 × 37 Вт, соответствующие драйверы. Система для сравнения — 230 В переменного тока

В системе с питанием от напряжения 230 В переменного тока мощность от солнечных батарей непосредственно подается в общую сеть питания. Кроме того, используются 18 светодиодных лампы Xitanium для напряжения переменного тока с соответствующим управлением.

В системе на базе напряжения постоянного тока осуществлялся мониторинг величины потребляемой электроэнергии, взятой из сети электропитания. В системе с напряжением переменного

тока (которая была использована для сравнения) осуществлялся мониторинг электроэнергии, необходимой для ламп (в том числе и их драйверов) и энергии, вырабатываемой фотоэлектрической системой (возврат ее в сеть). Чтобы получить такое сравнение, энергия, необходимая для питания ламп в системе переменного тока, масштабировалась в соответствии с количеством ламп в системе постоянного тока. Энергия, произведенная солнечной батареей в системе переменного тока, также масштабировалась в соответствии



Рис. 9. а) Фотоэлектрические панели; б) светодиодные лампы

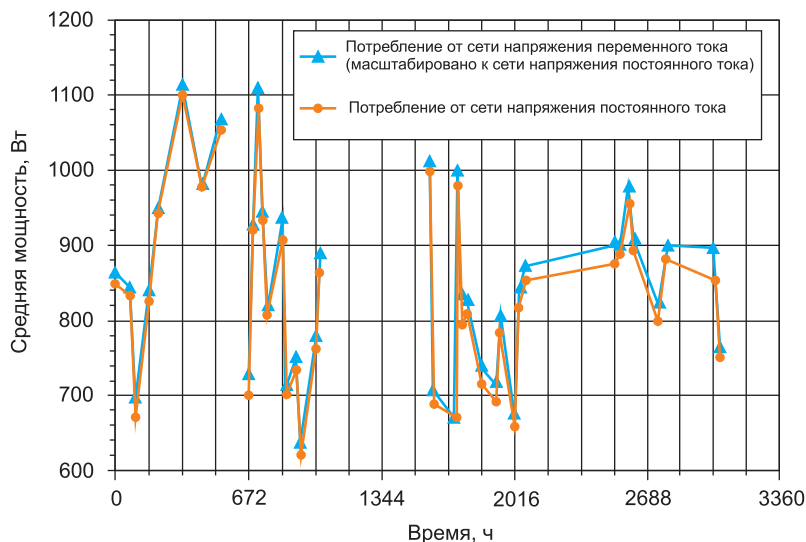


Рис. 10. Сравнение суммарного потребления электроэнергии в системе с напряжением постоянного тока и в системе с напряжением переменного тока. Потребление электроэнергии в системе с напряжением переменного тока масштабировалось к системе с напряжением постоянного тока

с мощностью солнечных батарей системы, выполненной на основе напряжения постоянного тока. И, наконец, для достижения результирующих затрат энергии (нетто-энергии), сравнимой с системой на основе напряжения постоянного тока, обе величины энергии вычитались. Данные измерения проводились с 29 апреля по 6 сентября 2013 г. В результате была рассчитана средняя мощность контролируемой посредством мониторинга энергии.

Результаты потребления электроэнергии в системе на базе напряжения постоянного тока и масштабного потребления системой, использующей напряжение переменного тока, показаны на рис. 10. На графике есть два пробела в предоставлении данных. Они возникли из-за сбоев и затрат времени на ремонт системы, которые не учитывались для окончательного сравнения. График показывает, что потребление электроэнергии в системе на основе напряжения постоянного тока было всегда меньше, чем в аналогичной сети переменного тока. В общей сложности, потребление электроэнергии системой на основе напряжения постоянного тока составило 2132,6 кВт·ч, в то время как потребление, приведенное к единому масштабу системы на основе напряжения переменного тока, составило 2181,4 кВт·ч. В заключение отметим, что энергопотребление системы с напряжением постоянного тока оказалось на 2,24% ниже, чем в аналогичной системе с напряжением переменного тока.

Выводы

Функционирование ламп и других устройств от домашней сети напряжения постоянного тока имеет два основных преимущества.

Во-первых, общие потери мощности могут быть уменьшены. Тем не менее при питании домашней сети на основе напряжения постоянного тока от сети общего пользования с напряжением переменного тока этот эффект частично нивелируется потерями в главном выпрямителе. Но такая экономия энергии становится особенно заметной в случае интеграции с дополнительными локальными источниками энергии (например, солнечными батареями).

Во-вторых, сложность подключаемых устройств может быть снижена путем упрощения их внутренней структуры. Такое упрощение может сделать устройства более долговечными и надежными. А что касается массовых продуктов, таких как драйверы светодиодных ламп и бытовых устройств, которые производятся и используются в огромном количестве, то это приведет к снижению их общей стоимости.

С системной точки зрения, было бы предпочтительным, чтобы эти устройства, которые необходимы в таких массовых количествах, были как можно более простыми и дешевыми, а вот несколько центральных устройств могут быть более сложными. Это преимущество

в части выигрыша в стоимости следует рассматривать в качестве главного преимущества систем с использованием напряжения постоянного тока.

Чтобы реализовать все преимущества систем с напряжением постоянного тока, необходимо принять во внимание следующее:

- Чтобы уменьшить потери в системе распределения, ее напряжение должно быть как можно выше.
- Для ламп допустимо рабочее напряжение постоянного тока в 380 В.
- Чтобы добиться снижения сложности, требуется ограничение допуска на отклонения напряжения от номинального значения.

Литература

1. Ulrich Boeke, Matthias Wendt, Lennart Yseboodt. Combined Solar and AC Mains Powered LED Lighting System // 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'11). Birmingham, United Kingdom. 2011.
2. T.-F. Wu, Y.-K. Chen, G.-R. Yu, Y.-C. Chang. Design and Development of DC-Distributed System with Grid Connection for Residential Applications // 8th International Conference on Power Electronics (ECCE Asia). The Shilla Jeju, Korea. 2011.
3. Rakwichian Wattanapong. Community Smart Grid for ASEAN Decentralize Power // Presentation at World Alternative Energy Forum. Chiang Mai, Thailand. 2012. www.adicet.cmru.ac.th/waef2012/.
4. Bernhard Scheeren. Optionen für eine Gleichstromversorgung in einem Wohnhaus. Masterthesis at Cologne University of Applied Science, Institute for Electrical Power Engineering. Cologne, Germany and Zuyd Hogeschool, Heerlen, The Netherlands. 2014.
5. Suponthana Wuthipong. MW Scale Stand-Alone PV Hybrid Mini Grid System // Presentation at World Alternative Energy Forum. Chiang Mai, Thailand. 2012. www.adicet.cmru.ac.th/waef2012/.
6. Jung-Hoon Ahn, Dong-Hee Kim, Byoung-Kuk Lee, Hyun-Cheol Jin, Jae-Sun Shim. DC Appliance Safety Standards Guideline through Comparative Analysis of AC and DC Supplied Home Appliances. // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2012. Vol. 7, № 1. <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2012.7.1.51>.