



Гелиоустановки для автономных объектов



Татьяна АББАСОВА

Tatiana S.ABBASOVA

Применение гелиоустановок в качестве автономных и резервных источников энергии в регионах Сибири и Дальнего Востока. Схемы преобразования энергии солнечного излучения в электрический сигнал и ее аккумулярование для нужд управления тяговых подстанций, устройств СЦБ железных дорог.

Ключевые слова: гелиоустановки, преобразование энергии, автономные объекты, электроснабжение тяговых подстанций, железная дорога.

Аббасова Татьяна Сергеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы» Института управления, экономики и социологии (г. Королев).

С целью снижения затрат на энергообеспечение и повышение качества электроэнергии на железнодорожном транспорте предусматривается развитие собственной генерации энергии на нетяговые нужды — для электроснабжения нетранспортных потребителей, контроля технического состояния электрооборудования тяговых подстанций (ТП), устройств сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ) — путем использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Ведь износ основных фондов электрических сетей составляет сегодня не менее 40%, подстанционного оборудования — свыше 63%, и на их ремонт требуется почти 5 млрд долл. США [1].

Для выхода каждой ТП в сети напряжением 220 или 110 кВ необходимо сооружать протяженные линии передач за счет железных дорог, а на самих ТП устанавливать по 2-3 дорогих высоковольтных трансформатора мощностью 25-40 МВА. В настоящее время ставится задача существенно сократить количество выходов тяги на сети общего назначения с таким расчетом, чтобы интервалы между тяговыми подстанциями не превышали 200-350 км [2].

Одно из направлений технологического усиления хозяйства СЦБ на период 2007–2030 годов – внедрение мобильной диагностической аппаратуры, позволяющей контролировать техническое состояние устройств и систем железнодорожной автоматики.

Для функционирования электрооборудования ТП и вычислительного оборудования требуется дополнительная энергия не только для электроснабжения, но и для кондиционирования. Снизить установленную мощность головных ТП можно и путем перераспределения энергии между промежуточными подстанциями, и за счет использования собственной генерации. По этим причинам внедрение независимых от электрических сетей возобновляемых автономных источников энергии становится все более актуальным.

Для регионов Сибири и Дальнего Востока с высоким уровнем солнечной инсоляции целесообразно использование альтернативных солнечных источников энергии – гелиоустановок. Внедрение гелиоустановок в этих районах ставит еще и дополнительную цель – снизить стоимость эксплуатации систем преобразования световой энергии в электрическую, построенных на основе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Причем важно не только повысить КПД (сейчас он не более 20% [3]), но и разработать режимы эксплуатации гелиоустановки, позволяющие снизить стоимость создаваемой солнечной энергии и осуществить ее эффективное накопление.

АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ РАЗРАБОТОК

Гелиоустановка может состоять из нескольких последовательно и параллельно коммутированных ФЭП. Аккумулирующим узлом могут служить накопители энергии (НЭ), аккумуляторные батареи (АКБ) или электрическая сеть. Для различных условий эксплуатации нужны дополнительные резервные источники, например блок бесперебойного питания (ББП), содержащий АКБ. Работа ББП призвана обеспечивать резервное время энергопитания до двух недель. Стоимость НЭ или АКБ вносит весомую часть в стоимость эксплуатации солнечной энергосистемы.

Рабочая точка ФЭП солнечной батареи (СБ), подключенной к нагрузке, не всегда совпадает с точкой максимальной мощности, которая зависит от условий эксплуатации, освещенности и температуры окружающей среды. Подключение мощной нагрузки может сдвинуть рабочую точку системы в область минимальной или даже нулевой мощности, и запуск в действие оборудования будет невозможен [4].

Наиболее общий алгоритм определения точки максимальной мощности выполняется микроконтроллером через изменение рабочего напряжения панели и оценку полученного при этом результата. Алгоритм должен предусматривать поиск точки максимальной мощности в широком диапазоне напряжений для того, чтобы избежать попадания на локальные максимумы, возникшие в момент кратковременных изменений внешней среды, например, при попадании панели в тень небольшого облака [5]. Недостаток этого алгоритма в том, что устройство не работает постоянно с максимальной производительностью, а находится в поиске такого состояния.

Альтернативой является инкрементный индукционный алгоритм, при котором вычисляется производная кривой зависимости мощности от напряжения и находятся нули полученной зависимости, которые по определению представляют собой пики кривой мощности. Затем производится настройка напряжения на определенный уровень [6]. В этом алгоритме нет недостатков предыдущего, но есть риск настроиться по ошибке на локальный максимум вместо точки максимальной мощности.

Наилучшие результаты получаются при комбинировании обоих алгоритмов, когда поддерживается работа устройства с уровнем напряжения, определенным по нулям производной, одновременно проверяются другие пики в широком диапазоне напряжений.

Для реализации комбинированного алгоритма требуется система регулирования отбора мощности от ФЭП. Алгоритм должен быть улучшен запоминанием часто повторяющихся направлений смещения рабочей точки (для устранения шагов смещения в ложных направлениях), что





бывает нужно в условиях быстро меняющейся освещенности. На выходе системы регулирования отбора мощности формируются импульсы постоянного тока, ширина и частота следования которых зависят от мощности, производимой солнечным модулем в данный момент.

При схемных решениях комбинированного алгоритма [6] следует учитывать, что СБ имеет большое внутреннее сопротивление, поэтому разница напряжения холостого хода и напряжения под нагрузкой составляет значительную величину. Для устранения этого параллельно с основной нагрузкой включают шунтирующие балластные резисторы, что позволяет поддерживать напряжение в интервале 13,4–17,6 В. Недостатками устройства являются: рассеивание избыточной мощности на балластных сопротивлениях нагрузки; отсутствие слежения за режимом отбора максимальной мощности СБ; дискретный характер регулирования выходной мощности.

Для улучшения согласования мощности СБ с нагрузкой можно применить накопитель энергии, который включен в буферном режиме. Чтобы предотвратить разряд аккумулятора через СБ при отсутствии освещения последовательно с СБ включается защитный диод. Электрическая энергия, выработанная СБ, поступает на сопротивление нагрузки и заряд аккумулятора. В случае отсутствия напряжения на СБ энергия аккумулятора также поступает на сопротивление нагрузки. Недостатками такого способа являются: значительное превышение напряжения холостого хода U_{xx} СБ над рабочим напряжением устройства; большое (на 1 В рабочего напряжения) количество последовательно коммутированных ФЭП; рассеивание мощности на защитном диоде (особенно при больших токах в системе).

Использование регулятора заряда НЭ, в том числе АКБ от СБ, требует включения в схему шунтирующих диодов и управляющего процессора. По мере повышения освещенности управляющий процессор подключает к АКБ дополнительные аккумуляторы, а по мере уменьшения освещенности — отключает их. К недостаткам такого схемного решения можно отнести:

рассеивание мощности на защитных и шунтирующих диодах; дискретный характер согласования СБ и АКБ; дискретный характер изменения величины выходного напряжения.

Применение различных регуляторов напряжения СБ на сопротивлении нагрузки в системах регулирования мощностью СБ позволяет контролировать величины импульса тока, поступающего с СБ в блок управления, куда идет и информация о напряжении СБ (U_{CB}), уровне освещенности СБ (U_{xx}) и напряжении на выходе регулятора ($U_{пн}$). Достигаются снятие прямой зависимости $U_{пн}$ от U_{CB} , а следовательно, возможность уменьшения числа последовательно коммутированных ФЭП и отбора энергии от СБ независимо от подключения сопротивления нагрузки к АКБ. Однако такие системы тоже имеют недостатки: при отсутствии сопротивления нагрузки отбор энергии от СБ не осуществляется; при низких уровнях освещенности СБ уменьшается КПД преобразования электрической энергии.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

При согласовании мощности СБ с нагрузкой гелиоустановка с концентрацией солнечного излучения будет иметь более высокие энергетические показатели, чем гелиоустановка без концентрации. Однако существуют условия эксплуатации, когда применение концентраторов и соответствующих электромеханических поворотных устройств для их вращения невозможно (при использовании солнечных панелей в качестве шумозащитных стен на железнодорожных вокзалах, строительных панелей для зданий и сооружений), поэтому повышение энергетической эффективности гелиоустановок без концентраторов тоже актуально.

Гелиоустановка генерирует постоянный ток, и потому целесообразно использовать преобразователь постоянного напряжения с накопительным интегрирующим конденсатором, который должен работать с учетом отбора максимальной мощности от фотоэлектрического преобразователя [4].

Алгоритм решения оптимизационной задачи, позволяющий организовать отбор

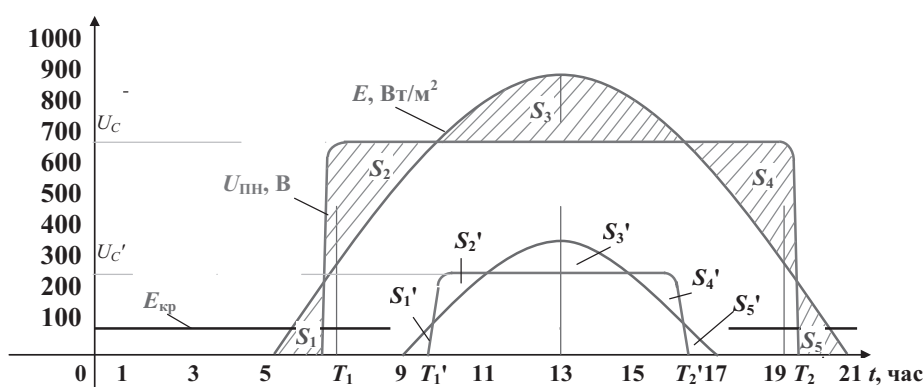


Рис. 1. Распределение солнечной энергии во времени с помощью системы регулирования отбора мощности от солнечной электроустановки.

максимальной мощности от солнечного источника энергии и обеспечить постоянную среднеэксплуатационную его мощность независимо от погодных условий, приведен на рис. 1.

Новым является то, что исследовано распределение солнечной энергии в летний и зимний периоды и обосновано применение для объектов железнодорожного транспорта автономного солнечного источника, вырабатывающего в зимнее время мощность, в 2 раза меньшую, чем в летнее. Такие условия отвечают целям кондиционирования вычислительной техники, предназначенной для диагностики и мониторинга оборудования ТП и СЦБ, а также эксплуатации силовых трансформаторов ТП, поскольку летом на кондиционирование масла в трансформаторе необходима мощность 400 кВт (чтобы не допускать перегрева масла), а в зимнее время для подогрева масла — лишь 200 кВт.

Максимальная мощность статической нагрузки определяется минимальной мощностью солнечной электроустановки, соответствующей равенству тока задания входному току преобразователя, на выходе которого находится интегрирующий конденсатор. В зависимости от схемы преобразователя вычисляется входной ток преобразователя напряжения, который превышает статический ток нагрузки. А также вычисляются пороговые значения:

— по оси абсцисс (времени) T_1, T_2 — соответственно утреннее время включения электроустановки и вечернее время ее выключения в июньский день; T_1', T_2' — утреннее время включения электроустановки и вечернее время ее выключения в декабрьский день, обусловленные критическим уровнем освещенности E , ниже которого солнечная электроустановка находится в режиме ожидания (при $E_{кр} \leq 100 \text{ Вт/м}^2$ она не работает);

— по оси ординат (значений напряжения на выходе преобразователя напряжения и солнечной освещенности) U_c, U_c' — напряжение, до которого должен зарядиться интегрирующий конденсатор на выходе преобразователя ($U_{пн}$), характерное соответственно для июня и декабря.

Эти пороговые значения вычисляются таким образом, чтобы осуществлялись равенства

$$S_2 = S_1 + S_5, \quad (2)$$

где площадь S_1 — накопленная энергия в режиме ожидания в утренние часы; площадь S_5 — накопленная энергия в режиме ожидания в вечерние часы; площадь S_2 — выдача накопленной энергии для достижения заданной величины зарядки интегрирующего конденсатора.

$$S_3 = k_{33} S_4, \quad (3)$$

где площадь S_3 — аккумулярование для накопителя энергии и функционирования в вечерние часы, когда на нагрузку необходимо подать мощность, которая меньше



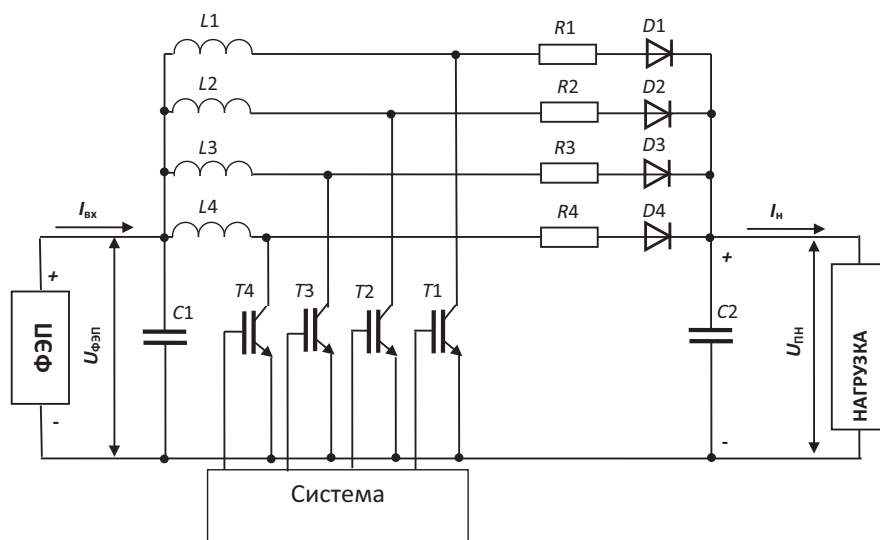


Рис. 2. Электрическая схема на IGBT-транзисторах для преобразования выходной мощности гелиоустановки.

той, что вырабатывает солнечный генератор; k_{33} — коэффициент запасенной энергии, который зависит от конструкции и характеристик накопителя энергии; площадь S_4 — выдача накопленной энергии в вечерние часы для достижения заданной величины зарядки интегрирующего конденсатора.

Графики соотношений (2) и (3) справедливы для летнего периода эксплуатации (середина июля). Соответственно $S_2' = S_1' + S_3'$ и $S_3' = k_{33} S_4'$ справедливы для зимнего периода (середина декабря).

К использованию в гелиоустановках рекомендованы емкостные накопители энергии (ЕНЭ). Накопители действуют в период пуска солнечных электроустановок и начала зарядки в утренние часы, при аккумулировании энергии в дневные часы, при выдаче аккумулированной энергии в вечерние часы. В данном случае конденсатор высокой удельной энергоемкости (интегрирующий конденсатор) используется в качестве импульсного емкостного накопителя энергии.

Применение концентраторов солнечного излучения для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую позволяет улавливать на 40% больше солнечных лучей. Концентрирование солнечного излучения влияет на величину тока короткого замыкания $i_{кз}$ ФЭП, который прямо пропорционален интенсив-

ности светового потока. При тех же условиях напряжение холостого хода U_{xx} ФЭП изменяется на 20–30%. Следовательно, концентрирование солнечного излучения позволяет уменьшить количество параллельно коммутированных ФЭП, но не дает снизить количество последовательно коммутированных преобразователей, отвечающих за внутреннее сопротивление СБ R_{CB} . Для уменьшения числа последовательно коммутированных ФЭП и достижения необходимого напряжения выхода предложено применить преобразователь постоянного напряжения (ППН) с широтно-импульсной стабилизацией (ШИС).

Параллельно выходу СБ включается электрический конденсатор C1, заряженный до напряжения отбора максимальной мощности солнечной батареи. Внутреннее сопротивление конденсатора значительно меньше внутреннего сопротивления СБ, а электрическая энергия с него передается на ППН, содержащий индуктивности, энергоемкость которых меньше энергоемкости электрического конденсатора, силовые диоды, интегрирующий конденсатор, электронные ключи, систему управления.

Для сопряжения СБ с нагрузкой нужен активный управляемый выпрямитель (АУВ), в котором в качестве электронных ключей предложены IGBT-транзисторы

(от англ. Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором). Цепь управления IGBT-транзистора компактна, ибо используемый ток мал. Такой тип электронных ключей сочетает характеристики транзисторов с изолированным затвором (высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности) и характеристики биполярных транзисторов (низкое значение остаточного напряжения во включенном состоянии). Это соответствует задачам управления электрическими приводами.

IGBT-транзистор используется в АУВ в ключевом режиме. Он осуществляет генерацию прямоугольных сигналов. При нахождении электронного ключа в положении «включено» энергия электрического конденсатора переходит в энергию индуктивности, а в положении «выключено» запасенная в индуктивности энергия через диод поступает на интегрирующий конденсатор и заряжает его до напряжения, равного или большего, чем напряжение заряда аккумулятора.

Автором разработана схема преобразования выходной мощности гелиоустановки, приведенная на рис. 2. Она представляет собой мост, на вход которого через повышающий широтно-импульсный ППН подается напряжение СБ. Параллельно выходу СБ подключается конденсатор незначительной емкости $C1$.

Регулятор мощности, повышающий напряжение, выполнен четырехтактным. То есть мы имеем параллельное соединение четырех одноктактных широтно-импульсных преобразователей, состоящих из четырех диодов $D1-D4$; четырех IGBT-транзисторов $T1-T4$ с изолированным затвором; четырех индуктивностей $L1-L4$, работающих со сдвигом во времени на $T/4$, где T – период ШИМ (широтно-импульсной модуляции); четырех сопротивлений $R1-R4$, являющихся активными сопротивлениями плеча преобразователя.

Управляющий сигнал СУ (системы управления) поступает на базу транзистора и задает сдвиг во времени $T/4$ в режиме ключа. В отличие от одноктактного преобразователя четырехтактный обладает более гибкими энергетическими характеристиками. С помощью него можно поддер-

живать неизменным напряжение на выходном конденсаторе $C2$, изменяя величину тока нагрузки соответственно режиму отбора максимальной мощности, а также достичь уменьшения амплитуды высокочастотной составляющей выходного напряжения.

Выходные зажимы АУВ подсоединяются к автомату включения резерва (АВР), который осуществляет подключение к нагрузке или промышленной сети переменного тока (для генерации солнечной энергии в сеть, если гелиоустановка не является автономной).

Емкость $C1$ электрического конденсатора, включенного параллельно выходу СБ, должна удовлетворять условию

$$C \geq \frac{I_{кз\max} \tau_{B\max}}{0,03U_{xx}}, \quad (1)$$

где $C1$ – емкость электрического конденсатора, [Ф]; $I_{кз\max}$ – ток короткого замыкания СБ при максимальном уровне освещенности, [А]; $\tau_{B\max}$ – максимальная длительность положения «выключено» электронного ключа; U_{xx} – напряжение холостого хода солнечной батареи.

При размыкании электронного ключа (импульс «выключено») энергия, запасенная индуктивностью, передается через диод на заряд емкости $C2$, поддерживающей напряжение $U_{пн}$ на выходе регулятора в период импульса «включено». Напряжение на емкости связано с напряжением на СБ соотношением

$$U_{пн} = \frac{t}{1-t} U_{СБ}, \quad (2)$$

где t – длительность импульса «включено»; $(1-t)$ – длительность импульса «выключено».

Соотношение длительности обоих импульсов формируется блоками управления на основе сравнения $U_{пн}$, U_{xx} , $U_{СБ}$ и i с целью поддержания постоянного значения $U_{пн}$.

Напряжение $U_{пн}$ на конденсаторе $C2$ должно быть выше амплитуды линейного напряжения питающей сети

$$U_{пн} = k \cdot E_a, \quad (3)$$

где $k = 1,25 \div 1,5$; E_a – амплитуда линейного напряжения питающей сети.



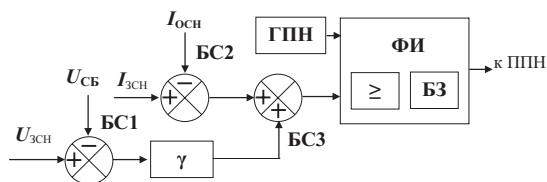


Рис. 3. Блок-схема системы управления схемой отбора мощности.

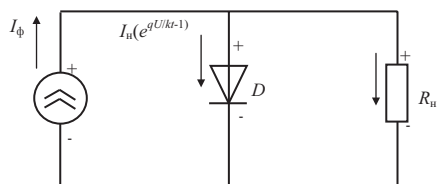


Рис. 4. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразования.

Стабильная работа схемы преобразования соответствует условию $C2 \gg C1$. Выходная мощность гелиоустановки зависит от уровня естественной освещенности и может изменяться в широких пределах, а выполнение соотношения (2) обязательно, поэтому в качестве согласующего звена между СБ и АУВ используется преобразователь постоянного напряжения. Система управления ППН должна обеспечить его экономичный режим работы: снизить количество солнечных элементов, соединенных последовательно.

Система управления повышающим широтно-импульсным ППН, приведенная на рис. 3, включает подчиненный регулятор тока нагрузки, при котором от гелиоустановки отбирается максимальная мощность, а напряжение на конденсаторе $C2$ остается неизменным. В блоке сравнения 1 (БС1) сравниваются сигнал задания по напряжению на выходном конденсаторе $C2$ и сигнал обратной связи по напряжению на солнечном элементе $U_{СБ}$, после чего вычисляется параметр регулирования напряжения. В блоке сравнения 2 (БС2) сравниваются сигнал задания по току статической нагрузки $I_{ЗСН}$ с сигналом обратной связи по току статической нагрузки $I_{ОСН}$. Результаты суммируются в блоке сравнения 3 (БС3) и подаются в качестве входного задающего сигнала в формирователь импульсов (ФИ) вместе с сигналом генератора пилообразного напряжения (ГПН). Этот генератор работает с постоянной частотой, меньшей, чем рабочая частота транзисторов.

Напряжение срабатывания равно электрическому напряжению точки макси-

мального отбора мощности СБ $U_{ЗСН}$, определяемой из вольтамперной характеристики при ее размещении и максимальном и минимальном уровнях освещенности в условиях светового дня.

Оценим возможности отбора максимальной мощности от ФЭП с помощью построения математической модели солнечного элемента. На рис. 4 показана эквивалентная схема солнечного элемента (СЭ), работающего на активную нагрузку.

В схему на рис. 4 параллельно нагрузке включен шунтирующий диод D для устранения «эффекта горячего пятна», который проявляется тогда, когда затененный модуль (или элемент) начинает рассеивать всю производимую освещенными модулями (или элементами) мощность, стремительно нагревается и выходит из строя. Шунтирующий диод нужен при последовательном соединении более двух модулей. К каждой линейке (последовательно соединенных модулей) также подключается блокирующий диод для выравнивания напряжений линеек.

Возможность отбора максимума мощности от ФЭП можно оценить, рассмотрев токи, возникающие в результате внутреннего фотоэффекта. В результате воздействия на солнечный элемент излучением с длиной волны $\lambda = 0,3-2$ нм через его р–п переход протекает ток, характеристика которого приведена на рис. 3, а. Этот ток можно вычислить по формуле

$$I = I_n \left(e^{\frac{qU}{kt}} - 1 \right) - I_\phi, \quad (4)$$

где I_n – ток неосновных носителей (ток насыщения); $I_n \exp(qU/kt)$ – ток основных

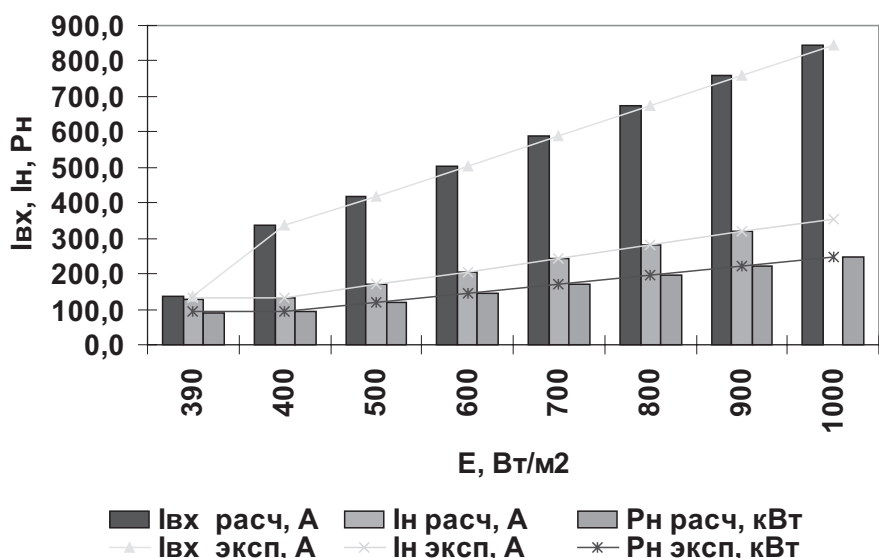


Рис. 5. Анализ расчетных и экспериментальных значений параметров системы отбора максимальной мощности.

носителей; q – элементарный электрический заряд ($1,602 \times 10^{-19}$ Кл); U – прямое смещение перехода; t – температура; I_ϕ – первичный фототок.

Соотношение (4) описывает вольтамперную характеристику (ВАХ) идеального солнечного элемента. При освещении p – n перехода контактная разность потенциалов в нем уменьшилась на величину U , а другие разности потенциалов не изменились. В результате на клеммах солнечного элемента появилось напряжение U , называемое фото ЭДС, в сопротивлении R – ток I . Следовательно, p – n переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую энергию. Если алгоритм системы управления построен так, что рабочей точкой всегда остается точка «а» ВАХ, то выходное напряжение преобразователя напряжения будет зависеть от двух параметров – первичного фототока и сопротивления нагрузки. Точка пересечения кривой с осью напряжений называется напряжением холостого хода – U_{xx} , точка пересечения с осью токов – током короткого замыкания $I_{кз}$. Максимальная мощность модуля определяется как наибольшая мощность при стандартных условиях.

Изменение величины фототока I_ϕ , в свою очередь, пропорционально изменению освещенности солнечного элемента E

$$I_\phi = \frac{E}{\alpha}, \quad (5)$$

где α – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа солнечного элемента.

При уменьшении уровня освещенности солнечной батареи ток и напряжение на ней снижаются. Если ГУ работает в режиме генерации максимальной мощности для обслуживаемого оборудования или в промышленную сеть, то рассчитывается ток, обеспечивающий положение рабочей точки на кривой максимальной мощности.

Согласно рис. 3 и соотношениям (4), (5), максимальную отбираемую мощность солнечного элемента можно найти, исследуя функцию $P(U_{пн})$ на максимум

$$\frac{dP}{dU_{пн}} = I_n \left(e^{\frac{qU_p}{kt}} \cdot \left(\frac{qU_p}{kt} + 1 \right) - 1 \right) - \frac{E}{\alpha} = 0, \quad (6)$$

где U_p – рабочее напряжение модуля, при котором его выходная мощность принимает максимально возможное значение.

Выразив U_p из соотношения (6) численно и подставив результат в (4), получим зависимость максимально отбираемой мощности ФЭП от уровня освещенности

$$I_n \left(e^{\frac{qU_\delta}{kt}} \cdot \left(\frac{qU_p}{kt} + 1 \right) - 1 \right) = \frac{E}{\alpha}. \quad (7)$$



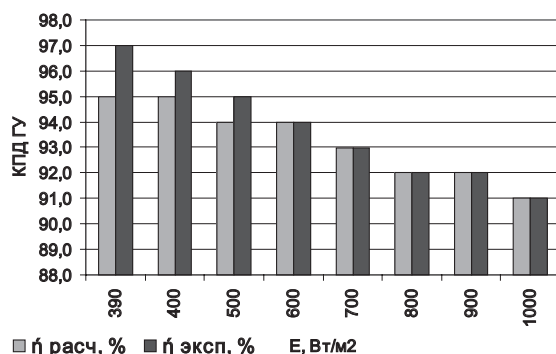


Рис. 6. Анализ экспериментальных и расчетных значений КПД преобразования при режиме отбора максимальной мощности.

Надежность работы ППН в преобразовательной системе с солнечной энергоустановкой зависит от возможных пределов изменения тока на входе повышающего преобразователя. Входной ток преобразователя всегда должен быть больше тока нагрузки, а отношение входного тока к выходному (k_I) — находиться в пределах

$$1 \leq k_I \leq \frac{I_{\text{КТ}}}{I_3}, \quad (8)$$

где $I_{\text{КТ}}$ — коллекторный ток транзистора; I_3 — ток задания, определяющий постоянство выходного напряжения $U_{\text{ПН}}$ ($I_3 = \frac{U_{\text{ПН}}}{R_{\text{Н}}}$); $R_{\text{Н}}$ — сопротивление нагрузки с учетом активных потерь в схеме.

Ток $I_{\text{КТ}}$ будет зависеть от количества параллельно включенных солнечных модулей (n пар), следовательно, соотношение (8) можно представить в виде

$$1 \leq k_I \leq \frac{n_{\text{пар}} \cdot I_{\text{р}} \cdot R_{\text{Н}}}{U_{\text{ПН}}}, \quad (9)$$

где $n_{\text{пар}}$ — число модулей, включенных параллельно; $I_{\text{р}}$ — рабочий ток модуля, при котором его выходная мощность принимает максимально возможное значение.

Отношение выходного напряжения преобразователя напряжения к входному напряжению (коэффициент усиления напряжения k_U) в соответствии с (9) находится в пределах

$$\frac{U_{\text{ПН}}}{U_{\text{р}}(I_{\text{КТ}})} \leq k_U \leq \frac{U_{\text{ПН}}}{U_{\text{р}}(I_3)}, \quad (10)$$

где $U_{\text{р}}(I_{\text{КТ}})$, $U_{\text{р}}(I_3)$ — напряжение солнечного элемента в режиме отбора максимальной мощности при входном токе,

равном соответственно коллекторному току IGBT-транзистора и току задания.

Напряжение $U_{\text{р}}(I_{\text{КТ}})$ будет зависеть от количества последовательно включенных солнечных модулей $n_{\text{пос}}$. Тогда k_U станет изменяться в пределах

$$\frac{U_{\text{ПН}}}{n_{\text{пос}} \cdot U_{\text{р}}} \leq k_U \leq \frac{U_{\text{ПН}}}{U_{\text{р}} \left(\frac{U}{R_{\text{Н}}} \right)}. \quad (11)$$

Общее количество солнечных модулей электростанции можно выразить соотношением

$$N = n_{\text{пар}} \cdot n_{\text{пос}}. \quad (12)$$

Зависимости для нахождения количества параллельно и последовательно включенных модулей солнечной энергоустановки можно выразить системой неравенств

$$\begin{cases} n_{\text{пар}} \geq k_I \frac{U_{\text{ПН}}}{I_{\text{р}} \cdot R_{\text{Н}}} \\ k_I \geq 1 \\ n_{\text{пос}} \geq \frac{U_{\text{ПН}}}{k_U \cdot U_{\text{р}}} \\ k_U \leq \frac{U_{\text{ПН}}}{U_{\text{р}} \left(\frac{U_{\text{ПН}}}{R_{\text{Н}}} \right)} \end{cases} \quad (13)$$

Проведено исследование качества регулирования напряжения при отборе максимальной мощности от гелиоустановки с помощью компьютерного моделирования в среде Matlab. На рис. 5 приведены расчетные и экспериментальные зависимости входного тока

преобразователя $I_{вх}$ системы отбора максимальной мощности, тока нагрузки I_n и мощности нагрузки P_n от различных условий освещенности.

На рис. 6 приведены расчетные $\eta_{расч}$ и экспериментальные $\eta_{эксп}$ зависимости КПД преобразования от различных условий освещенности.

Результаты, полученные из расчетных формул, совпадают с результатами эксперимента на модели. Эксперимент на модели подтвердил, что в указанном диапазоне изменения освещенности выходное напряжение поддерживается постоянным.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Снижение стоимости конструкции и эксплуатации гелиоустановки осуществляется за счет применения ППН на основе IGBT-транзисторов, работающих в режиме ключа и осуществляющих широтно-импульсную стабилизацию, что позволяет уменьшить количество последовательно-коммутированных ФЭП в солнечных батареях в 1,5-4 раза, и следовательно уменьшить потери мощности, возникающие на внутреннем сопротивлении СБ и вследствие технологического рассогласования параметров отдельных ФЭП, а также повысить надежность солнечных батарей.

Эффективное накопление преобразованной энергии осуществляется с помощью включенного в состав системы отбора максимальной мощности от СБ накопителя энергии, позволяющего стабилизировать напряжение, подающееся на нагрузку, при изменении интенсивности светового потока.

Выявлены аналитические соотношения для определения количества солнечных мо-

дулей, включенных параллельно и последовательно таким образом, чтобы обеспечивался режим отбора максимальной мощности в течение всего периода эксплуатации гелиоустановки.

Предложенные варианты позволяют уже в ближайшей перспективе обеспечить с участием гелиоустановок электроснабжение нетяговых и нетранспортных потребителей отдаленных, труднодоступных и экологически напряженных районов Сибири и Дальнего Востока; добиться оптимизации с учетом сезонных колебаний солнечной освещенности графиков электроснабжения вычислительно-го оборудования и оборудования инженерной инфраструктуры центров, осуществляющих обработку данных мониторинга и диагностики устройств ТП и СЦБ, а также оборудования тяговых подстанций железных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпилевой В. А., Налобин Н. В. Проблемы использования возобновляемых источников энергии для труднодоступных поселений и объектов Тюменского региона//Материалы 6-й всероссийской научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии». — М., МГУ, 2009.
2. Мамошин Р. Р. Новые технологии электроснабжения железных дорог на переменном токе//Евразия-Вести. — 2007. — Вып. IV.
3. Автономные энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии//<http://cert-energy.ru/news.aspx.htm>.
4. Аббасова Т. С. Повышение качества регулирования мощности в системе электроснабжения с солнечной батареей//Электротехнические и информационные комплексы и системы. Т. 6, — 2010. — № 2.
5. Пантелейчук А. Контроллеры TMS320F28XX в системах преобразования альтернативной энергии//Новости электротехники. — 2009. — № 16.
6. Чернилевский И. К., Платенко П. Ф. Патент Российской Федерации N 2195754. Приоритет 01.09.1999 г., опублик. 27.12.2002.
7. Воробьев Ю. В., Воробьев П. Ю. Системы солнечного энергоснабжения//Мир транспорта. — 2010. — № 4. ●

SOLAR POWER PLANTS FOR AUTONOMOUS OBJECTS

Abbasova, Tatiana S. — Ph.D. (Tech), associate professor of the department of information technology and control systems of Korolev institute of management, economics and sociology.

The author examines possibilities of use of solar power plants as autonomous or emergency sources of energy in Siberian and far-Eastern regions and reviews the circuitries of transformation of solar power into electric signal and its accumulation for control of railway traction power substations, signaling and block systems.

Key words: solar power plants, energy transformation, autonomous objects, electrical supplies of traction substations, railways.

Координаты автора (contact information): Аббасова Т. С. — abbasova_univer@mail.ru

