

УДК 620.97

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СОСТАВЕ ДИЗЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕВЕРНЫХ ПОСЕЛКОВ

Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: vnd2@tpu.ru, lukutin48@mail.ru*

Рассмотрена методика оптимизации установленных мощностей гибридного энергетического комплекса, состоящего из фотоэлектрической и дизельной частей. Представленная оптимизация основана на базе сопряжения программного комплекса MS Excel и специализированного программного продукта для проектирования фотоэлектрических систем PVsyst. При этом основными целевыми функциями определяющими технико-экономическую целесообразность применения той или иной мощности обозначены – коэффициент использования установленной мощности станции (КИУМ) и себестоимость производства кВт*ч электрической энергии гибридным энергетическим комплексом. Представлены выражения, на основании которых осуществляется расчет целевых функций, а также алгоритм оптимизации установленной мощности фотоэлектрической станции, функционирующей параллельно с сетью образованной ДЭС. Приведен конкретный пример оптимизации на основании реально существующего гибридного энергетического комплекса с непрерывной дизельной генерацией в п. Батагай, республика Саха (Якутия). Отражены графики изменения вырабатываемой мощности составными частями гибридного энергетического комплекса. Представлены графические зависимости изменения КИУМ и себестоимости производимой электрической энергии от установленной мощности фотоэлектрической части гибридного комплекса. На основе полученных данных составлены основополагающие выводы о предпочтительном схемном строении подобных комплексов в северных поселках Якутии и особенностях ее применения.

Ключевые слова: электроснабжение, дизельная электростанция (ДЭС), фотоэлектрическая станция (ФЭС), оптимизация, КИУМ, себестоимость

THE PV POWER STATIONS INSTALLED CAPACITY OPTIMIZATION IN THE COMPOSITION OF THE NORTHERN VILLAGES DIESEL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

Dmitrienko V.N., Lukutin B.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: vnd2@tpu.ru, lukutin48@mail.ru

The capacities installed optimization technique of a hybrid power station consisting of a photovoltaic and diesel part is considered. The presented optimization is based on the MS Excel software package and a specialized software product for designing PVsyst PV systems coupling. At the same time, the main objective functions defining the technical and economic feasibility of using a particular power are designated, such as installation power coefficient and electric energy cost price produced by a hybrid power complex. Represented expressions on the basis of which the calculation is carried out objective functions, and also algorithm for optimizing photovoltaic power plant installed capacity functioning in parallel with the network formed by diesel station. Shown a concrete optimization example based on a existing hybrid power complex with continuous diesel generation in the village Batagay, Republic of Sakha (Yakutia). The generated power change graphs by the components of the hybrid power complex are reflected. Represent change graphic dependence CUIP and electric energy cost of hybrid complex photovoltaic part installed capacity. On the basis of the obtained data, the basic conclusions about the preferred such complexes circuit structure in the Yakutia northern settlements and the features of its application have been compiled.

Keywords: electrical supply, diesel power station, photovoltaic power station (PV plant), optimization, cost price

В связи с постоянным ростом цен на углеводородные энергоносители встает вопрос сокращения потребления дизельного топлива удаленными от централизованной энергосистемы энергоисточниками, электроснабжающими автономные поселки, путем замещения части установленных мощностей фотоэлектрической генерацией [1].

Цель исследования: разработка инструмента оптимизации установленных мощностей фотоэлектрической и дизельной частей гибридной электрической станции с непрерывной дизельной генерацией (параллельная работа ФЭС и ДЭС). Оптимизация с его помощью, в режиме человеко-машинного

взаимодействия оптимального соотношения составных частей гибридной электрической станции, на основании значений целевых функций, определяющих наилучшие технико-экономические показатели станции: коэффициент использования установленной мощности и себестоимости производимой энергии. Данные критерии являются наиболее значимыми при построении объектов генерации автономных локаций.

Методы исследования. Оптимизационные расчеты установленных мощностей основаны на сопряжении программного пакета для расчета фотоэлектрических систем PVsyst и программной среды Excel. Значе-

ния энергии солнечного излучения при расчетах принимаются на основании компьютерных баз метеоданных Meteopgm.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенной работы предлагается алгоритм действий для оптимизации установленных мощностей составных частей гибридной электрической станции с непрерывной дизельной генерацией. Результаты оптимизации на примере реально существующего объекта в п. Батагай.

Одной из важнейших задач проектирования фотодизельных систем электроснабжения является определение оптимальных соотношений установленных мощностей составных частей (дизельной и фотоэлектрической) гибридной электростанции с учётом схемного решения их построения [2].

Основными целевыми функциями, на основании которых производится оптимизация, являются: коэффициент использования установленной мощности энергетического оборудования (КИУМ) и себестоимость 1 кВт*ч электроэнергии.

КИУМ определяется как отношение фактической выработки энергии к теоретической, по выражению

$$\text{КИУМ} = \frac{W}{P_{\text{уст}} \cdot T}, \quad (1)$$

где W – объем энергии, произведенный составной частью гибридного комплекса ($W_{\text{ФЭС}}$ либо $W_{\text{ДЭС}}$), за отчетный период времени, кВт*ч;

$P_{\text{уст}}$ – установленная мощность составной части гибридного комплекса, кВт;

T – отчетный период времени, ч.

Себестоимость электрической энергии определяется по формуле

$$C_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{НДЭС}} \cdot K_{\text{ДЭС}} + C_{\text{ДЭС}} + P_{\text{НФЭС}} \cdot K_{\text{ФЭС}}}{W}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ДЭС}}$, $K_{\text{ФЭС}}$ – капиталовложения на строительство гибридного комплекса состоящего из дизельной и фотоэлектрической станций.

Выражение для общих капиталовложений на строительство гибридной солнечно-дизельной системы имеет следующий вид:

$$K = K_{\text{УСТ}} + K_{\text{ПР}} + K_{\text{СТР}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{УСТ}}$ – стоимость комплектного оборудования (руб.);

$K_{\text{ПР}}$ – стоимость проектных работ (руб.);

$K_{\text{СТР}}$ – стоимость строительных, монтажных и наладочных работ по установке электростанции (руб.).

Цена фотоэлектрической части гибридной станции складывается из цен на

фотоэлектрические модули, силовое оборудование (инвертор, трансформатор, коммутационные коробки), кабельную продукцию и опорные конструкции. Стоимость комплектного оборудования дизельной части определяется ценой дизельных генераторов.

$C_{\text{ДЭС}}$ – эксплуатационные затраты на обслуживание дизельной станции определяются по выражению

$$C_{\text{ДЭС}} = C_{\text{ЭКС}} + C_{\text{РЕМ}} + C_{\text{ТОП}} + C_{\text{ДТОП}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{ЭКС}}$ – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения (руб.);

$C_{\text{РЕМ}}$ – годовые расходы на плановый ремонт (руб.);

$C_{\text{ТОП}}$ – годовые расходы на топливо (руб.);

$C_{\text{ДТОП}}$ – годовые расходы на доставку топлива (руб.).

$P_{\text{НДЭС}}$, $P_{\text{НФЭС}}$ – коэффициенты рентабельности дизельной и фотоэлектрической электростанций соответственно.

Эксплуатационные расходы на обслуживание фотоэлектрической части гибридного энергетического комплекса не учитываются в силу их относительно малой величины.

Продолжительность жизненного цикла дизельного генератора достигает 10000 и более моточасов (согласно инструкции производителей). В течение этого периода работы по техническому обслуживанию включают в себя: долив и замену моторного масла, замену топливных и воздушных фильтров, замену хладагента, несколько плановых капитальных ремонтов и т.д. При определении коэффициента рентабельности дизельной электростанции, с учетом капитальных ремонтов, экономический срок службы энергетического оборудования принят равным 9 годам.

В случае с фотоэлектрической системой, модули при нормальной работе не заменяются в течение всего срока службы (обозначено производителем как 25 лет, с понижением производительности до 80% от номинала). Инвертор заменяется единожды по истечению примерно 10 лет работы. В целом техническое обслуживание фотоэлектрических систем заключается в периодической чистке панелей от пыли и снега.

Для конкретизации, проведём оптимизацию фотодизельной системы электроснабжения в составе с существующей дизельной станцией на примере посёлка Батагай (Якутия) [3]. Показатели нагрузки в п. Батагай представлены в таблице.

Данные, представленные в таблице, показывают, что максимум зимней нагрузки превышает минимальную летнюю нагрузку более чем в 5 раз.

Показатели нагрузки ДЭС Батагай

Выработанная электроэнергия	кВт*ч в год	23 355 024
Минимальная зимняя нагрузка	кВт	3275
Максимальная зимняя нагрузка	кВт	5186
Минимальная летняя нагрузка	кВт	907
Максимальная летняя нагрузка	кВт	2075

Установленная мощность дизельной электростанции всегда должна быть выше возможной максимальной нагрузки, плюс мощность для обеспечения резервирования [4]. Так, установленная мощность существующей дизельной электростанции посёлка Батагай составляет 11 МВт, при этом состав ДЭС включает в себя 12 дизельных генераторов различной мощности.

Учитывая, что уровень инсоляции в этом заполярном районе в летние и зимние месяцы отличается более чем в 100 раз, при построении солнечно-дизельных комплексов мегаваттного класса целесообразно использование параллельной работы ФЭС с сетью, образованной ДЭС [3, 5]. В этом случае отпадает необходимость в накопителях электрической энергии. Как следствие, могут быть получены приемлемые технико-экономические характеристики проекта.

На рис. 1 представлен алгоритм оптимизации, описывающий последовательность действий, производимых для поиска оптимального решения установленных мощностей генерирующего оборудования

гибридного энергетического комплекса с непрерывной дизельной генерацией. При его построении использованы программные комплексы MS Excel и PVsyst [3, 5].

Для расчета энергетических показателей инсоляции в качестве исходных метеорологических данных была принята близлежащая к п. Батагай метеостанция Верхоянск. Угол наклона фотоэлектрических панелей фиксированный и составляет 52° (оптимальный годовой), расстояние между рядами панелей 20 м, тип панелей (Yingli Solar YL255P-29b, 255 Вт) и инверторов (SMA Sunny Tripower 20000 TLEE, 20 кВт). Установленная мощность ДЭС – 11 МВт, с ограничением загрузки каждого отдельного агрегата от 40 до 80%, в связи со значительным износом существующего оборудования.

Изменяемым параметром при оптимизации является установленная мощность фотоэлектростанции. Для оптимизационных исследований использованы математические модели фото-дизельной системы, описанные в [3, 5]. Интервал дискретизации расчетов принят равным одному часу в течение характерных суток каждого месяца по уровням инсоляции и нагрузки гибридной электростанции [5].

Итерационный процесс представлен по принципу человеко-машинного взаимодействия. На основании полученных значений целевых функций: КИУМ и себестоимости производимой электрической энергии оператор принимает решение о корректировке установленной мощности фотоэлектростанции и продолжении итерационного процесса, либо его завершении.

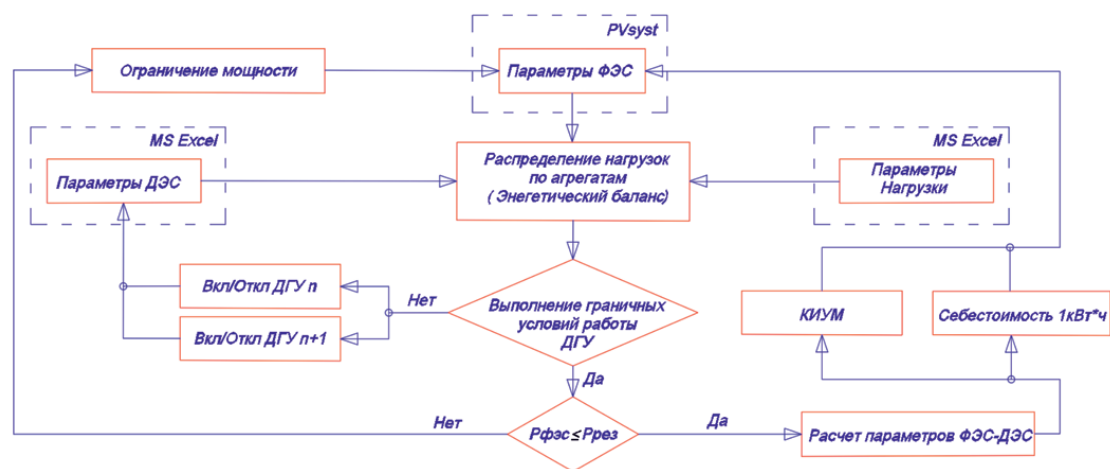


Рис. 1. Алгоритм оптимизации установленной мощности ФЭС, работающей параллельно с локальной дизельной системой электроснабжения

Формирование режимов работы фото-дизельной электростанции должно производиться с учетом загрузки отдельных дизель-генераторных установок и ДЭС в целом. Такое условие следует из необходимости обеспечения устойчивой работы сетевых инверторов ФЭС, и, следовательно, устойчивости гибридного энергетического комплекса в целом. Следует учесть, что необходимое значение текущей мощности дизельной части гибридного энергетического комплекса, требуемой для стабильной работы фото-дизельной системы, не является статичным. Оно постоянно меняется и зависит от ряда факторов, как уровень мощности автономной системы электроснабжения на рассматриваемом интервале времени; сезон года; установленная мощность ДЭС; количество дизельных генераторов и допустимые границы работы каждого отдельно взятого агрегата; установленная мощность ФЭС и значение выработки мощности фотоэлектрической частью комплекса на рассматриваемом интервале времени.

В зимний период времени изменение производимой мощности ДЭС соответствует изменению инсоляции, что, в свою очередь, говорит о полном потреблении произведенной ФЭС энергии, нагрузкой. С увеличением установленной мощности ФЭС, выработка ДЭС уменьшается за счет увеличения генерации ФЭС.

Влияние выработки мощности ФЭС на изменение нагрузки на ДЭС в весенний и летний периоды времени имеют тенденцию к расширению от месяца к месяцу, что объясняется астрономическим изменением положения солнца на небосводе и увеличением продолжительности светового дня. В это же время, от зимы к лету, происходит понижение уровня нагрузки автономной системы электроснабжения.

Одновременный рост количества приходящей на земную поверхность солнечной радиации и снижение уровня нагрузки приводят к необходимости стабилизации системы. Для ДЭС это осуществляется путём поддержания мощности производимой ДЭС электроэнергии в заданных пределах при рациональном уровне загрузки каждого отдельного дизельного генератора. Генерация электроэнергии ФЭС регулируется выбором её установленной мощности и ограничением на разрешенную доступную мощность сетевого инвертора в соответствии с графиком нагрузки и мощностью ДЭС. Это наглядно видно на рис. 2 (справа) в виде ограничения допустимой мощности ФЭС, необходимого для соблюдения устойчивости системы.

Превышение выработки ФЭС относительно требований устойчивости фото-дизельной системы, при текущем уровне нагрузки, ведет к необходимости ограничения генерации ФЭС. Это приводит к недоиспользованию установленной мощности фотоэлектрической части гибридного комплекса в часы наибольшей активности солнца.

В идеальном случае вся вырабатываемая энергия должна потребляться нагрузкой, при этом суммарная энергия генерирующих источников будет повторять форму графика нагрузки (рис. 2, слева).

На основании данных, полученных для характерных суток каждого месяца, построены годовые графики зависимости КИУМ от установленной мощности фотоэлектрической станции п. Батагай (рис. 3, слева). Кривая, иллюстрирующая изменение себестоимости электроэнергии фото-дизельной электростанции п. Батагай с накоплением по месяцам года при различных установленных мощностях ФЭС, приведена на рис. 3, справа.

При установленной мощности фотоэлектрической станции 1МВт, КИУМ ФЭС находится в максимальных значениях в течение года, при увеличении мощности появляются избытки энергии в летнее время в часы наибольшей активности солнца, и одновременного снижения нагрузки. При увеличении установленной мощности ФЭС наблюдается снижение КИУМ ФЭС, в разрезе дня, месяца и года. Снижение установленной мощности ФЭС ниже 1 МВт также нецелесообразно.

Кривые себестоимости производства кВт·ч электрической энергии фактически накладываются друг на друга для разных мощностей ФЭС, то есть увеличение установленной мощности фотоэлектрической станции более 1 МВт практически не дает экономической выгоды. Это происходит за счет некоторой компенсации затрат на экономию топлива и увеличение капиталовложений в оборудование ФЭС большей мощности.

Выводы

1. При построении гибридного комплекса с параллельной работой ФЭС и ДЭС требуется поддержание стабильности системы за счет поддержания необходимого уровня непрерывной дизельной генерации.

2. Увеличение установленной мощности фотоэлектрической части гибридного комплекса, при превышении определенных значений, приводит к необходимости ограничения мощности генерации ФЭС, что приводит к снижению показателей комплекса в целом.

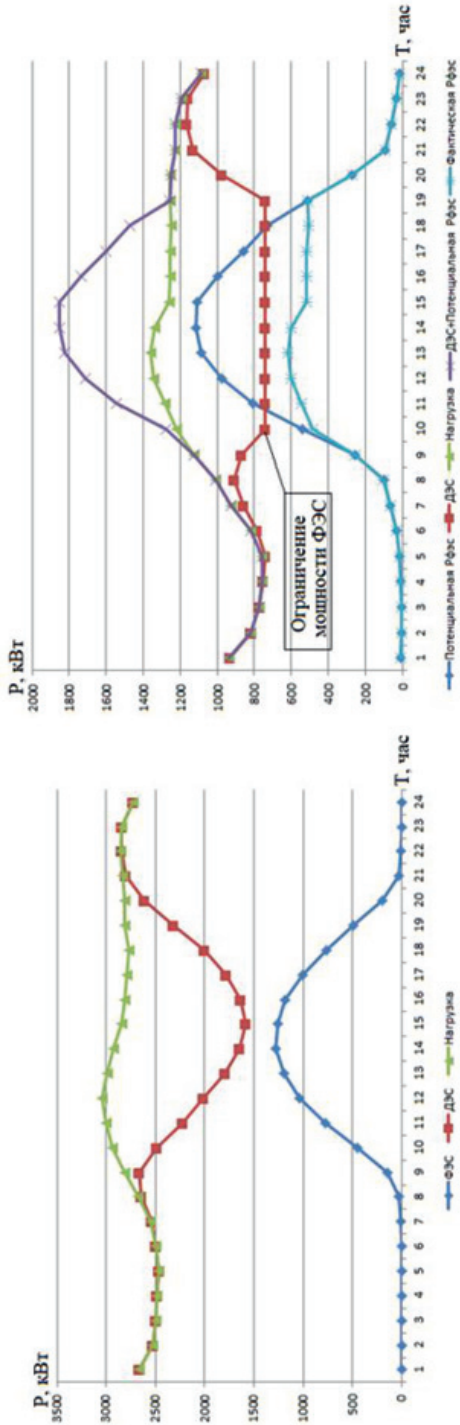


Рис. 2. Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт в апреле (слева) и 2 МВт в июле (справа)

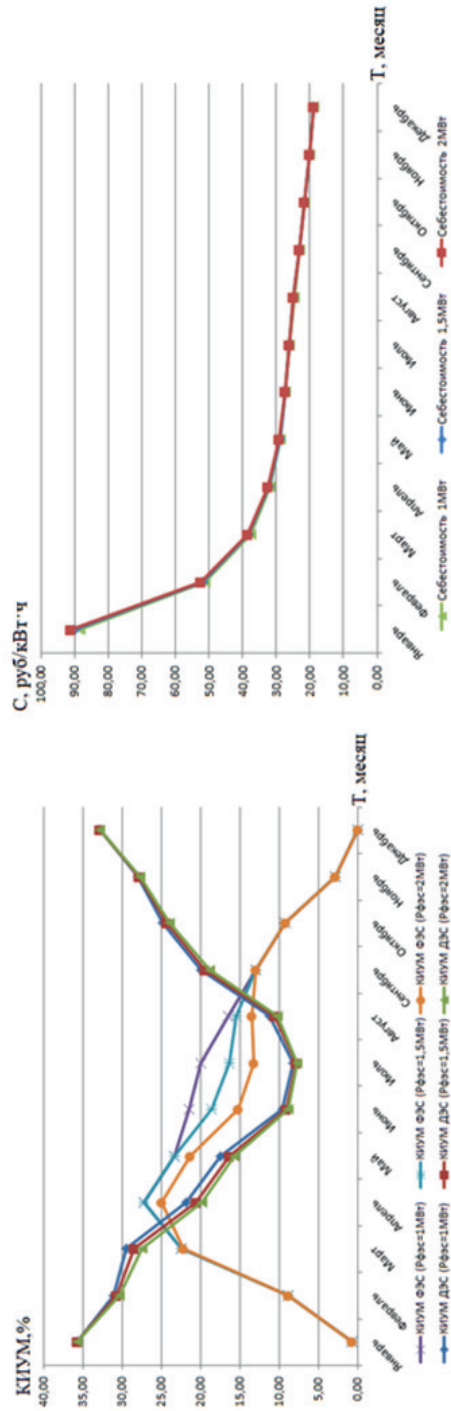


Рис. 3. Изменение KPIUM гибридной станции в течение года при разных установленных мощностях ФЭС (слева) и годовое изменение себестоимости 1 кВт·ч с накоплением при различных установленных мощностях ФЭС (справа)

3. Прирост установленной мощности фотоэлектрической станции гибридного комплекса целесообразен до значений, при которых комплекс имеет максимальные технико-экономические показатели – КИУМ и себестоимость производимой энергии. В частности, для п. Батагай при цене на дизельное топливо 38115 руб/т (на период 2012 г.) оптимум установленной мощности ФЭС равен 1 МВт.

Список литературы

1. Корякин А.К. Опыт и перспективы внедрения альтернативных источников энергии на территории Республики Саха (Якутия): материалы Международной конференции. Якутск, 2013 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/8ef/Alexander-Koryakin_Sakhaenergo.pdf (дата обращения: 10.12.2018).

2. Карамов Д.Н. Актуальность применения возобновляемых источников энергии в децентрализованных населенных пунктах России на примере Ленского района Республики Саха (Якутия) // Вестник ИрГТУ. 2013. № 11 (82). С. 279–283.

3. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. С. 61–66.

4. Карамов Д.Н. Структурная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Сборник трудов молодых ученых ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 84–89.

5. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55.