

На рис. 17 изображена дисперсия капитала при равных ставках доходностей рискового a , безрискового r активов и эталонного портфеля μ .

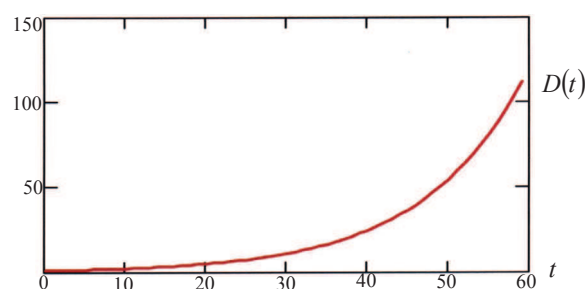


Рис. 17. Зависимость $D(t)$ $a=r=\mu=0,5$ и $\sigma=1$

Заключение

Совместно с [1, 2] проведено полное исследование одной задачи формирования портфеля капитала как задачи оптимального управления стохастической системой с интегральным критерием качества.

Графические иллюстрации показывают, что структура управления (перераспределение капитала между рисковыми и безрисковыми активами) и значение капитала (качество отслеживания капиталом портфеля капитала эталонного портфеля) зависят от соотношений между параметрами постановки задачи [1].

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013, проект № 14.B37.21.0861.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Н.С., Рожкова С.В., Цитко А.В. Применение математического метода динамического программирования к решению одной задачи управления портфелем ценных бумаг // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 10–14.
2. Демин Н.С., Рожкова С.В., Цитко А.В. Исследование среднего значения и дисперсии капитала в одной задаче управления портфелем ценных бумаг // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 9–13.

Поступила 6.05.2013 г.

УДК 620.97

РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ф.В. Саврасов, Б.В. Лукутин

Томский политехнический университет
E-mail: savrasov@tpu.ru

Проведен анализ имеющихся автономных систем электроснабжения в отдельном регионе Западной Сибири (Томская область). Предложено использование комбинированных комплексов электроснабжения на основе дизельных электростанций и фотоэлектрических систем. Построена математическая модель определения оптимального баланса электроэнергии, выдаваемой генерирующими мощностями. Проанализированы полученные результаты моделирования с точки зрения экономической и энергоэффективности.

Ключевые слова:

Фотоэлектрические преобразователи, автономные системы электроснабжения, энергоэффективность, энергетический баланс в гибридных системах электроснабжения.

Key words:

Photovoltaic cells, autonomous power supply systems, energy efficiency, energy balance in hybrid power systems.

Введение

В настоящее время проблема электрификации России на территории, не охваченной единой энергосистемой, решается в основном за счёт использования дизельных электростанций (ДЭС). При этом примерно половина дизельных и бензиновых установок не работает, что связано с перебоями в поставках топлива и высокими ценами на его доставку. Неоптимальные режимы работы ДЭС и дорогое топливо определяют высокие тарифы на производимую электроэнергию, оплачивать которую местное население может только при условии

значительных дотаций из бюджета. Типичным регионом с развитым автономным электроснабжением является Томская область (ТО).

Более 50 % территории Томской области, на которой проживает 30 тыс. человек, не охвачены сетями централизованного электроснабжения. Соответственно, населённые пункты в этих районах испытывают острый дефицит электроэнергии.

На территории области таких населённых пунктов насчитывается около 80. Низкая плотность населения и слабая производственная освоенность этих районов делает подключение поселений к

централизованной системе энергообеспечения нецелесообразным с технической и экономической точек зрения.

Электроснабжение изолированных районов осуществляется от ДЭС и дизель-генераторов, общее количество которых оценивается в 125 штук, а суммарная установленная мощность – 35...45 тыс. кВт.

Низкие технико-экономические показатели большинства ДЭС, высокие цены на дизельное топливо и высокие транспортные тарифы приводят к высокой себестоимости производства электроэнергии на ДЭС, которая, в свою очередь, обуславливает более низкое удельное электропотребление. Если в районах, охваченных электрическими сетями централизованного электроснабжения, исключая г. Томск и г. Северск, этот показатель составляет 4200 кВт·ч на одного человека в год, то в изолированных районах – 1800 кВт·ч.

Годовая потребность в дизельном топливе для ДЭС Томской области составляет порядка 25 тыс. т (на сумму до 550 млн р.) [1].

В табл. 1. приведён прогноз изменения стоимости электроэнергии для конечного потребителя и топлива, необходимого для производства электроэнергии в районах децентрализованного электроснабжения (данные для прогнозирования взяты из [1]).

Таблица 1. Прогноз изменения стоимости дизельного топлива и электроэнергии по ТО за 25 лет

	2007	2012	2017	2022	2027	2032	2037
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	0,89	1,51	2,13	2,71	3,31	3,89	4,47
Стоимость топлива, руб/литр	20,09	24,84	30,57	36,32	42,03	47,76	53,52

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что даже по самым оптимистичным прогнозам через 25 лет цены на электричество вырастут в 3–3,5 раза по сравнению с сегодняшним днём (на топливо – минимум в 2 раза). По данным информационного агентства «Финмаркет» [2], к 2030 г. электричество для населения России подорожает в 5 раз.

Исходя из информации, представленной выше, предполагается целесообразной задача рассмотрения экономической и энергетической эффективности при проектировании, разработке и внедрении электрических станций, использующих для генерации мощностей альтернативные (не углеводородные) источники энергии, для применения в районах децентрализованного электроснабжения. В данной статье в качестве такого источника рассматривается энергия Солнца, как одна из наиболее перспективных видов возобновляемой энергии в настоящее время. Электричество, получаемое на её основе, вырабатывается за счёт использования фотоэлектрических преобразователей.

Основные составляющие автономной системы электроснабжения

При проектировании и использовании автономной системы электроснабжения (АСЭ) на основе фотоэлектрических преобразователей следует учитывать, что уровень энергии, поступающий от Солнца, не всегда является стабильным. Это связано в первую очередь с тем, что такая электротехническая система способна вырабатывать электроэнергию лишь в дневное время. В зимний период, когда световой день короче, общее количество выработанной энергии будет меньше, чем в летний. Дополнительными факторами, снижающими производительность солнечной батареи, являются пасмурная погода, осадки и т. п.

Исходя из этого, предполагается определить оптимальный баланс электроэнергии в комбинированной АСЭ, в состав которой входят фотоэлектрические преобразователи и имеющийся источник электроснабжения (дизельные электростанции). Предполагается, что в этом случае гибридный электротехнический комплекс будет в значительной мере экономичным и энергоэффективным.

Структурная схема АСЭ, использующей фотоэлектрические преобразователи, приведена на рис. 1. В ней используется Φ – совокупность фотоэлектрических модулей, преобразующих солнечную энергию в электричество для покрытия нагрузки H , и D – дизель-генератор, предназначенный для периодов, когда суммарное значение солнечной инсоляции недостаточно для генерации необходимого количества энергии для текущего электропотребления. В состав данной АСЭ входит автоматически регулируемая балластная нагрузка (B), предназначенная для утилизации избыточной энергии от Φ (фактически данный профицит может быть использован для дополнительного энергоснабжения тепловых нагрузок: электроотопления и горячего водоснабжения).

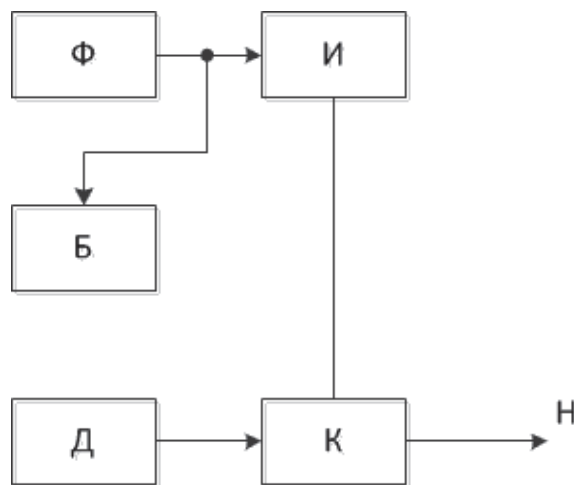


Рис. 1. Структурная схема исследуемого автономного источника электроснабжения

Преобразование напряжения, поступающего от модулей, из постоянного в переменное осуществляется с помощью инвертора И. В системе предусмотрен коммутирующий элемент К, осуществляющий как отключение источника Д в периоды избыточной инсоляции, так и подключение к нему в случае, если мощность, вырабатываемая за счёт фотоэлектрического преобразования, является недостаточной для покрытия потребительской нагрузки.

Данный вариант исполнения АСЭ целесообразен в системах, где в качестве основного источника электроснабжения используется локальная ДЭС. В этом случае основное предназначение Ф – экономия расходов на топливо при достаточном уровне приходящей солнечной радиации.

Начальные условия расчёта

В данной работе оценка эффективности фотоэлектрического комплекса при использовании его в системах децентрализованного электроснабжения рассматривается на примере эксплуатации АСЭ для удовлетворения потребностей в электроэнергии сельского дома, оснащённого всеми необходимыми бытовыми приборами. В [3] приводятся сводные суточные показатели электрических нагрузок по сезонам для этого типа потребителя. Примерное количество требуемой энергии составляет 44 кВт·ч в сутки.

При моделировании общие методики расчёта стоимости фотоэлектрической системы (ФЭС) были взяты из [4, 5]. В них подчёркивается, что итоговая мощность (а следовательно, и цена проектируемой системы) напрямую зависит от уровня инсоляции в том месте, где будет эксплуатироваться АСЭ. Исходя из этого, в случае применения фотоэлектрических преобразователей в районах децентрализованного электроснабжения Томской области необходимо знать величины суммарной солнечной радиации, приходящей на поверхность в каждом конкретном регионе. Также необходимо учесть то обстоятельство, что срок службы фотоэлектрических панелей составляет в среднем 25–30 лет, в то время как срок службы инвертора примерно в два раза меньше. Моторесурс дизель-генератора малой мощности не превышает нескольких тысяч моточасов.

В табл. 2 приводятся тарифы на электроэнергию в некоторых населённых пунктах ТО по состоянию на 2012 г. На основании приведённых показателей, в качестве объектов исследования при моделировании было отобрано несколько поселений: с. Нарым, с. Суйга, с. Сосновка, п. Первопашинск. Цены на электроэнергию в этих населённых пунктах являются близкими по значению к статистическим модам для всей выборки цен на электроэнергию в удалённых пунктах. Среднемесячные данные по уровням солнечной инсоляции с учётом углов наклона фотоэлектрических преобразователей по отношению к Солнцу для этих поселений за период с 1985 по 2010 гг. приводятся в [6].

Таблица 2. Рыночная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии в сельской местности на территории Томской области

Район ТО, название поселения	Утвержденный тариф, руб/кВт·ч
Александровский	
с. Лукашкин Яр	12,71
с. Назино	14,74
с. Новоникольское	14,52
Асиновский	
п. Первопашинск	26,56
Верхнекетский	
п. Центральный	20,23
п. Дружный	27,9
п. Катайга	16,37
п. Лисица	23,89
п. Макзыр	49,32
п. Степановка	13,21
Каргасокский	
п. Молодежный	19,64
с. Напас	19,64
п. Киевский	18,32
с. Усть-Тым	18,18
с. Тымск	24,21
с. Наунак	101,10
с. Сосновка	20,87
с. Ст. Березовка	23,81
с. Новый Тевриз	18,18
Колпашевский	
п. Дальнее	19,98
с. Иванкино	26,4
с. Копыловка	15,19
п. Куржино	20,94
Молчановский	
с. Суйга	14,9
д. Лысая Гора	14,9
Парабельский	
с. Нарым	10,54
д. Чановка	10,54

Задачей моделирования баланса электроэнергии для выбранных населённых пунктов является параметрическая оптимизация энергоэффективности гибридной системы электроснабжения. Критерии для описания и решения этой задачи приводятся ниже. Расчёты выполнены с помощью пакета прикладных программ Matlab [7].

Построение математической модели

Для удобства описания исследуемого баланса вводятся следующие обозначения:

- Q – тариф на электроэнергию от ДЭС (табл. 2), руб/кВт·ч;
- T_{ϕ} – срок службы солнечной батареи, лет;
- $T_{и}$ – срок службы инвертора, лет;
- A – количество фотоэлектрических модулей в системе, шт;
- C – стоимость электроэнергии, которую потребитель будет вынужден оплатить за весь предполагаемый срок службы АСЭ при электроснабжении только от ДЭС, руб;
- C_{ϕ} – стоимость фотоэлектрического модуля, руб;

- $C_{\text{и}}$ – стоимость инвертора, руб;
- $K_{\text{ф}}$ – КПД фотоэлектрического модуля, %;
- $K_{\text{и}}$ – КПД инвертора, %;
- $L=\{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\}$ – вектор, содержащий величины мощностей, необходимых для покрытия потребительской нагрузки в те часы, когда возможно применение ФЭС, за весь срок службы фотоэлектрических модулей, выраженный в часах;
- $I=\{I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n\}$ – вектор, содержащий величины инсоляции в те часы, когда возможно применение ФЭС, за весь срок службы фотоэлектрических модулей, выраженный в часах.

Целевая функция для определения баланса имеет вид

$$f(A) = Q \sum_{i=1}^n D_i(A) + C_{\text{ф}} A + \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{и}}} C_{\text{и}},$$

где

$$D_i(A) = \begin{cases} L_i - I_i A K_{\text{ф}} K_{\text{и}}, & L_i - I_i A K_{\text{ф}} K_{\text{и}} \geq 0; \\ 0, & L_i - I_i A K_{\text{ф}} K_{\text{и}} < 0. \end{cases}$$

Выражение $D_i(A)$ обозначает величину, необходимую для компенсации нехватки мощности, генерируемой ФЭС, мощностью ДЭС за каждый рассматриваемый час. Приводимое аналитическое определение $D_i(A)$ предполагает, что мощность, выработанная за счёт избыточной инсоляции, в данной работе не учитывается.

Фактически задачей оптимизации в данном случае является нахождение такого количества фотоэлектрических модулей, при котором их включение в состав АСЭ позволит обеспечивать генерацию энергии, достаточной для покрытия потребительской нагрузки, либо обеспечивать экономию электроэнергии, вырабатываемой другим источником. При этом совокупная стоимость фотоэлектрической системы не должна превышать стоимость электроэнергии, выработанной от имеющегося на данный момент источника, за весь рассматриваемый период ($f(A) \rightarrow \min$). В противном случае, внедрение АСЭ на основе фотоэлектрических преобразователей может оказаться экономически нецелесообразным.

Соответственно, величина параметра A в процессе моделирования варьируется в следующем диапазоне:

$$1 \leq A \leq \frac{Q \sum_{i=1}^n L_i - \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{и}}} C_{\text{и}}}{C_{\text{ф}}}$$

(правая часть неравенства должна быть округлена до целого).

Достижимая экономическая эффективность от использования АСЭ с количеством модулей A по сравнению с АСЭ, в которых действует только ДЭС, для рассмотренных выше моделей описывается как

$$E_{\text{д}} = \frac{C - f(A)}{C} \cdot 100 \, \%,$$

При этом величина тарифа Q берётся из показателя на сегодняшний день; в дальнейшем, исходя из текущей и прогнозируемой ситуации в сфере электроснабжения ТО, предполагается увеличение данного показателя, что приведёт к снижению срока окупаемости электротехнического комплекса с фотоэлектрической системой и увеличению значения $E_{\text{д}}$.

Таким образом, применение гелиоэнергетики следует считать экономически оправданным в тех случаях, когда $E_{\text{д}}$ имеет положительное значение.

Также при исследовании гибридных АСЭ представляют интерес такие характеристики системы как:

- объём избыточной энергии, выработанной фотоэлектрическими модулями в периоды интенсивной инсоляции, за весь период эксплуатации АСЭ (обозначается как $W_{\text{фи}}$);
- экономия моторесурса ДЭС $E_{\text{м}}$ – выражается как отношение нерабочего количества часов ДЭС к количеству часов, в течение которых ДЭС должна функционировать в случае полного обеспечения потребителя электроснабжением. Расчёт производится для всего периода эксплуатации фотоэлектрической системы.

Результаты расчёта

Ввиду однотипности графического представления результатов в данной статье приводятся графики только для одного населенного пункта. Обобщённые результаты определения эффективности использования исследуемых АСЭ приведены в табл. 3. Значения $P_{\text{фи}}$ и $E_{\text{м}}$ приводятся для случая, когда $E_{\text{д}}$ имеет максимальную величину. К ним добавлены значения стоимости электроэнергии $Q_{\text{с}}$, обозначающие нижний предел, при котором применение АСЭ на основе фотоэлектрических систем в данных районах будет экономически целесообразным.

График на рис. 2, а показывает зависимость экономического эффекта от внедрения фотоэлектрических преобразователей в состав АСЭ. С увеличением числа модулей общая стоимость комплекса возрастает, в результате чего при определённом их количестве применение гелиоэнергетических систем будет невыгодным по сравнению с эксплуатацией имеющихся электроснабжающих комплексов (ДЭС). С другой стороны, при этом образуется значительный профицит выработанной энергии (рис. 2, б). Также за счёт того, что в периоды покрытия потребительской нагрузки от фотоэлектрической системы отсутствует необходимость в подключении к ДЭС, достигается значительный уровень экономии ресурсов дизельного генератора (рис. 2, в).

Таблица 3. Результаты моделирования потенциальной эффективности АСЭ

Населённый пункт	$E_{\text{д}}$, %	$W_{\text{фи}}$, МВт	$E_{\text{м}}$, %	$Q_{\text{с}}$, руб/кВт·ч
Нарым	10,15	8,49	9,38	7,47
Суйга	20,68	21,86	15,64	7,31
Сосновка	26,76	36,44	19,09	7,67
Первопашинск	34,73	59,94	23,39	7,29

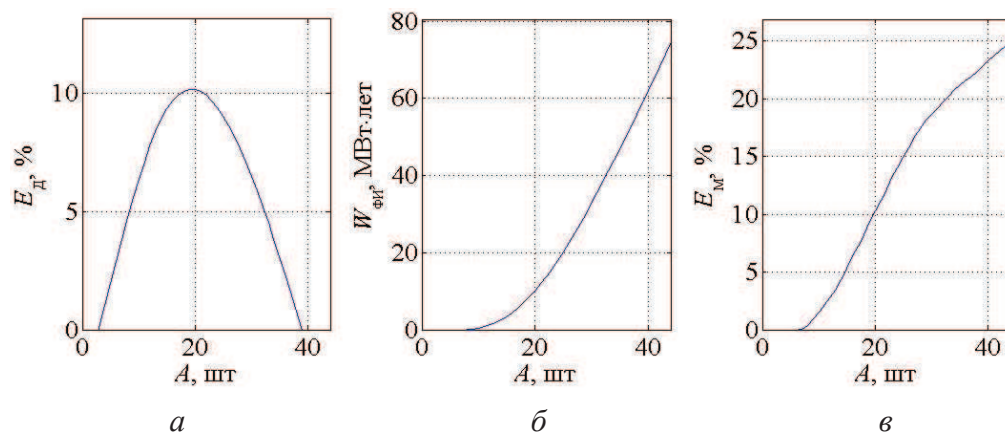


Рис. 2. Определение эффективности использования АСЭ для с. Нарым

Выводы

- Для всех рассматриваемых населённых пунктов Томской области внедрение фотоэлектрических комплексов в автономные системы электроснабжения будет экономически оправдано. В целом, чем выше стоимость текущего тарифа на электроэнергию, тем большей экономии можно добиться при внедрении комплекса.
- Если в качестве дополнительного источника электроснабжения выступает дизельная электростанция, то экономия моторесурса её двига-

теля может оказаться весьма значительной. Соответственно, одновременно с этим достигается экономия топлива.

- Начальная величина стоимости электроэнергии, при которой использование фотоэлектрических преобразователей начинает становиться экономически целесообразным, при некоторой разнице в значениях по отдельным районам, примерно одинакова в целом по Томской области. Различие обуславливается, по всей видимости, уровнями инсоляции в рассматриваемых регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томская область в цифрах // Стат.сб. – Томск: Томскстат-Т, 2012. – 260 с.
2. Электричество для населения к 2030 году подорожает в пять раз // Главные новости. Финмаркет. 2013. URL: <http://www.finmarket.ru/z/nws/hotnews.asp?id=3137163> (дата обращения: 03.01.2013).
3. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.И. Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
4. Четошникова Л.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 69 с.
5. Тагайматова А.А., Обозов А.Дж. Разработка фотоэлектрической станции для электроснабжения индивидуального жилого дома. – Бишкек: ИЦ «Текник», 2011. – 23 с.
6. Метеоданные для Томской области. 2012. URL: <http://tomsk-meteo.ru> (дата обращения: 27.07.2012).
7. Дьяконов В.П. Matlab 7. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

Поступила 01.04.2013 г.