

**Б.В. Лукутин**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ по  
дисциплине «Интеллектуальные системы электроснабжения с  
возобновляемыми энергоисточниками»**

Для магистрантов Инженерной школы энергетики,  
Отделения электроэнергетики и электротехники,  
направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

УДК 621.311.21(076.5)

ББК 31.57я73

Л64

**Лукутин Б.В.**

Л64: Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Интеллектуальные системы электроснабжения с возобновляемыми энергоисточниками» / Б.В. Лукутин; Томский политехнический университет. – Томск, 2020. – 45 с.

В методических указаниях даны рекомендации по выполнению лабораторных работ по оптимизации состава и интеллектуальных режимов работы гибридных систем электроснабжения с установками возобновляемой энергетики. Лабораторные работы выполняются путём компьютерного моделирования гибридных систем электроснабжения с участием фото- и ветро-электростанций.

Методические указания предназначено для студентов дневного обучения по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям магистерской подготовки «Возобновляемые источники энергии» и «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения».

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

© Лукутин Б.В., 2020

## Методические указания к выполнению лабораторной работы №1

### «ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО КРИТЕРИЮ СЕБЕСТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ»

**Цель работы:** оптимизировать выбор фотоэлектрической части автономной фото-дизельной системы электроснабжения (ФДСЭС) посёлка по критерию минимума себестоимости генерируемой электроэнергии.

**Методика выполнения работы:** компьютерное моделирование энергетических балансов системы электроснабжения с фото-электростанцией (ФЭС), аналитическое исследование результатов моделирования, оптимизация установленной мощности фото-дизельной электростанции по методу направленного перебора вариантов.

**Пояснения к работе.** Исследования проводятся для автономной системы электроснабжения с раздельной работой фотоэлектрической и дизельной частей ФДСЭС [1]. Структурная схема ФДСЭС приведена на рисунке 1.

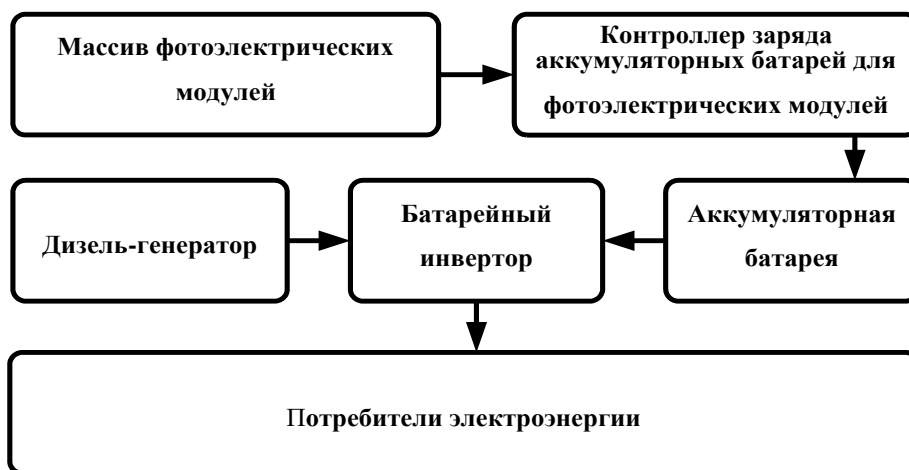


Рис.1. Структурная схема ФДСЭС с раздельной работой фотоэлектрической и дизельной частей

#### Исходные данные.

Моделирование энергетических балансов в автономной системе электроснабжения осуществляется в компьютерной программе **helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html**. Указанное программное обеспечение позволяет определять среднесуточную выработку электрической и тепловой

энергии от солнца и ветра в выбранном месте расположения энергоустановки для каждого месяца года. В качестве исходных данных выбираем координаты места предполагаемой установки станции, например посёлок Ташанта в республике Алтай (рис. 2).

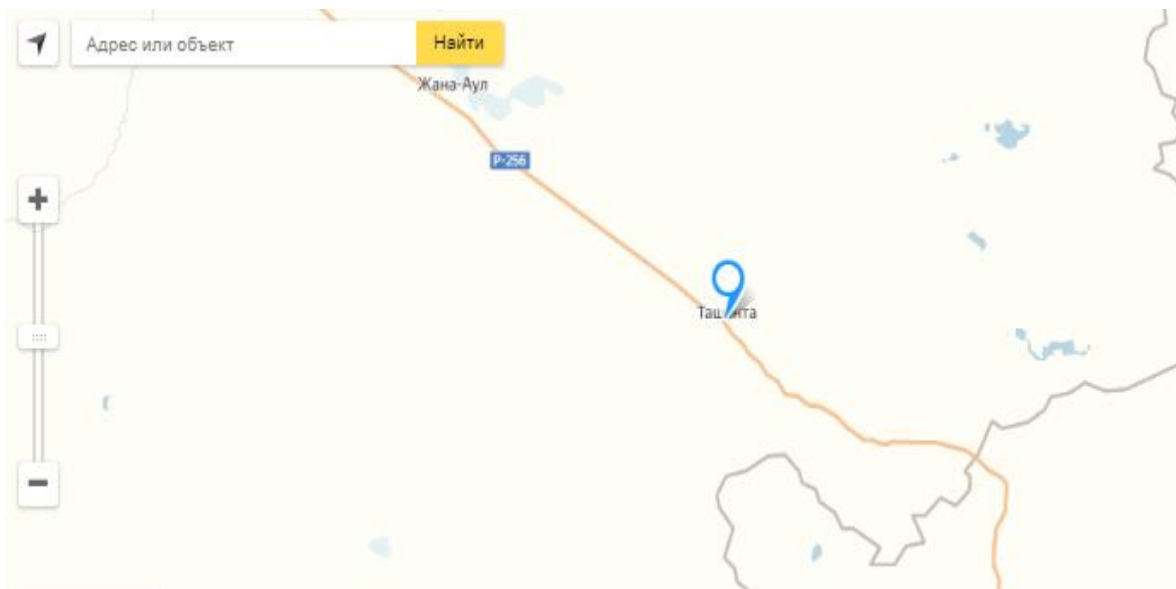


Рис.2. Пример выбора объекта электрификации – посёлка в горном Алтае

Среднемесячная выработка электрической энергии по месяцам года за характерные сутки фотоэлектрическим модулем НН- MONO- 200W, площадью  $1,3 \text{ м}^2$ , ориентированном в пространстве оптимальным образом: зенитный угол  $50^\circ$ , азимутальный –  $180^\circ$  приведена в таблице 1.

Таблица 1.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0.56	0.80	1.04	1.09	1.07	1.04	1.02	1.05	0.95	0.80	0.61	0.46
Среднегодовая выработка электроэнергии: 0.88 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 319.40 кВт·ч.											

Полагая бытовой характер электропотребления, используем типовые суточные графики электрических нагрузок сельских потребителей, приведённые в электронном ресурсе <https://online-lectric.ru/dbase/graph24>.

Выбирая значения коэффициента сезонности электропотребления из таблицы 2, получим суточные графики электрических нагрузок. Типовые графики для зимы и лета приведены на рис.3.

Таблица 2. Коэффициенты сезонности для суточных графиков нагрузки децентрализованных потребителей

№, пп	Месяц	Коэффициент сезонности, $k_c$
1	Январь	1,0
2	Февраль	1,0
3	Март	0,8
4	Апрель	0,8
5	Май	0,8
6	Июнь	0,7
7	Июль	0,7
8	Август	0,7
9	Сентябрь	0,9
10	Октябрь	0,9
11	Ноябрь	0,9
12	Декабрь	1,0

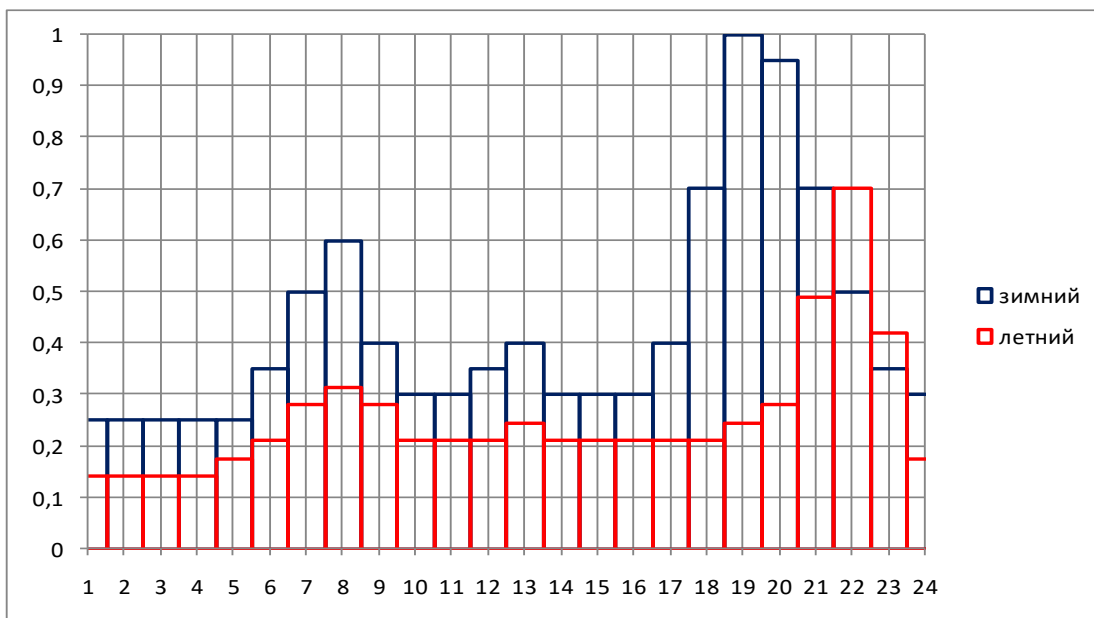


Рис.3. Типовой суточный график электропотребления сельских домов

Графики на рис.3 представлены в относительных единицах и позволяют по известному значению максимальной нагрузки объекта электроснабжения  $P_{max}$  (кВт) получить суточный график расчетной нагрузки объекта для любого дня года:

$$P_{pi} = \bar{P}_i \cdot P_{\max} (1 \pm C_{pi} \cdot \xi) \cdot k_c, \text{ кВт}$$

где  $P_{pi}$  – расчетная активная нагрузка на  $i$ -ом часе суточного графика;  $\bar{P}_i$  – математическое ожидание нагрузки на  $i$ -ом часе суточного графика;  $C_{pi}$  – коэффициент вариации нагрузки для  $i$ -ой ступени суточного графика;  $k_c$  – коэффициент сезонности, значения которого представлены в табл.2;  $\xi$  – равновероятная случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Значения  $P_{\max}$  при выполнении данной работы рекомендуется выбирать из диапазона 15 – 30 кВт, характерного для большинства мелких изолированных потребителей.

**Пример оптимизации ФДСЭС.** В качестве примера, для значения вечернего максимума 20 кВт, с учётом средней суточной нагрузки зимнего графика – 0,412 о.е., имеем среднесуточную нагрузку 8,24 кВт. Среднесуточная энергия, соответственно, равна 198 кВтч. Для покрытия такой нагрузки в зимнее время необходимо не менее 450 фотоэлектрических модулей указанного типа. Графики среднесуточной месячной потенциальной выработки электроэнергии 450 фотоэлектрическими модулями указанного типа и среднесуточного электропотребления посёлка приведены на рис.4. На этом же рисунке графически показано летнее электропотребление.

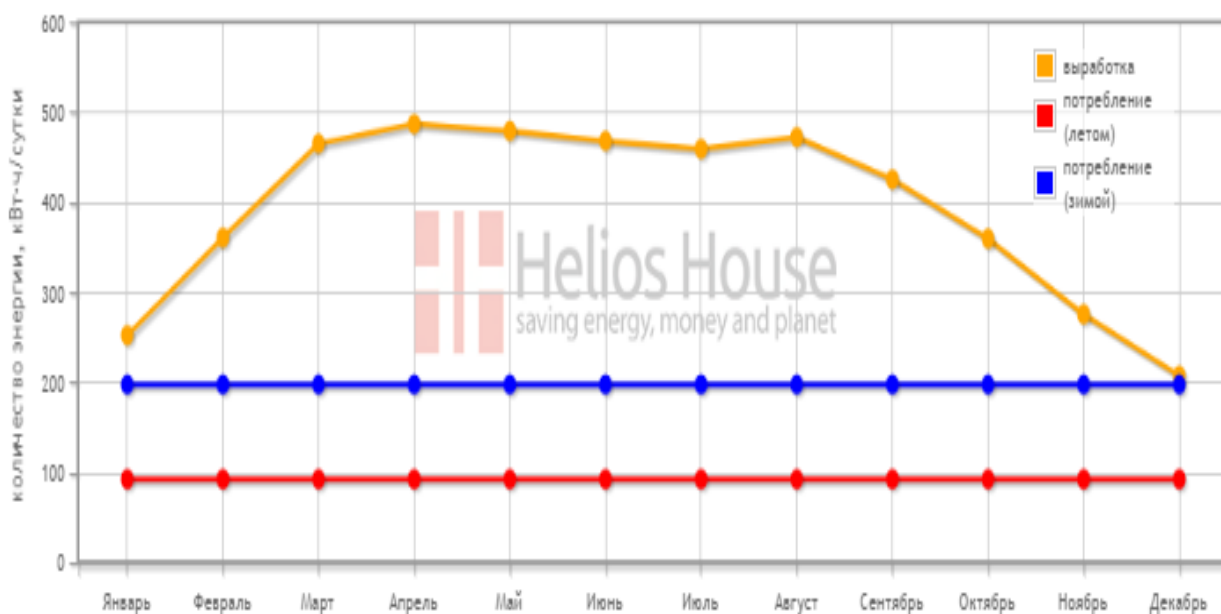


Рис.4. Графические зависимости среднесуточной месячной выработки ФЭС и зимнего и летнего среднесуточного электропотребления.

Для летнего периода вечерний максимум равен 14 кВт, средняя суточная нагрузка – 0,275 о.е. или 3,86 кВт. Среднесуточное летнее энергопотребление составит 92,54 кВтч. Численные значения среднесуточной выработки фотоэлектростанции по месяцам приведены в таблице 3.

По графическим зависимостям видна возможность электроснабжения посёлка только от фотоэлектростанции. При этом, при условии покрытия нагрузок в зимнее время, летом потенциальная выработка фотоэлектростанции превышает потребности посёлка почти в 5 раз, что экономически не целесообразно.

Таблица 3

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
253.02	361.69	466.45	488.26	480.51	469.46	460.63	473.65	426.67	360.64	276.36	208.04
Среднегодовая выработка электроэнергии: 393.78 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 143729.67 кВт·ч.											

Технико-экономические параметры выбранного фотоэлектрического модуля приведены ниже:

Артикул NH-MONO-200W  
 Номинальная мощность 200 Вт  
 Номинальное напряжение 24 В  
 Напряжение холостого хода 44.8 В  
 Ток при номинальной мощности 5.71 А  
 КПД солнечного модуля 15%  
 КПД солнечного элемента 17.4%  
 Размеры 1580x808x40 мм  
 Вес 15.5 кг  
 Стоимость 13200 руб.

Стоимость 450 указанных модулей составит 5 940 000 рублей.

Кроме собственно фотоэлектрических модулей в состав фотоэлектростанции входит инвертор и аккумуляторная батарея. Например, в качестве инвертора может быть выбран гибридный солнечный трехфазный инвертор SILA PRO 10000MH 10 кВт стоимостью 241 000 рублей. Для рассматриваемой системы электроснабжения требуется 2 инвертора стоимость которых составит 482 000 рублей.

Оценка стоимости аккумуляторных батарей (АБ) может быть проведена из следующих соображений: зимнее суточное электропотребление округлённо равно 200 кВтч (при выработке ФЭС 253 кВтч в январе), причём в течение светового дня происходит суммарная генерация электроэнергии от ФЭС, дневное электропотребление и зарядка аккумуляторов. Ночное электропотребление осуществляется от аккумуляторных батарей. Таким образом, ёмкость аккумуляторов должна обеспечивать их режим разряда – заряда в объёме ночного электропотребления посёлка с учётом рекомендуемой глубины разряда.

Для построения суточного энергетического баланса автономной системы электроснабжения на базе ФЭС удобно воспользоваться суточным графиком электрических нагрузок, приведённым на электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24> и в графическом виде на рис.2, и программой <http://www.SunCalc>.

Длительность зимнего светового дня (январь) в районе п. Ташанта составляет около 8 часов с 9 до 17 часов. Тогда, в соответствии с графиком рис.2, дневное энергопотребление равно 3,05 о.е., ночное – 6,65 о.е. из суточной энергии СЭС 9,7 о.е. или в процентах, соответственно, 30% и 70%. В именованных единицах дневное электропотребление составляет 60 кВтч, ночное – 140 кВтч.

Следовательно, обменная энергия батареи аккумуляторов составляет 140 кВтч. Учитывая зависимость срока службы аккумуляторов от глубины их разряда, примем, что 140 кВтч соответствует 40% ёмкости АБ. Тогда, необходимая ёмкость батареи аккумуляторов равна 350 кВтч. Принимая рабочее напряжение в цепи постоянного тока ФЭС 48 В, получим ёмкость АБ в ампер – часах 7 300 Ач.

Выберем гелевые аккумуляторы Delta GEL 12 - 200 ([https://mt-energo.ru/akb/delta\\_gel\\_12-200.html](https://mt-energo.ru/akb/delta_gel_12-200.html)) ёмкостью 200 Ач, стоимостью 35589 рублей. Количество аккумуляторов составит округлённо 38 штук, что потребует сумму в 1 352 382 рубля.

Таким образом, общие затраты на основное оборудование ФЭС составят 7 774 382 рубля.

Себестоимость 1 кВтч электроэнергии с учётом только затрат на оборудование:

$$C_{эл} = (P_n \cdot K) / W_{руб/кВтч};$$



$W$  – общее количество электрической энергии;

$P_n=1/T$  – нормативный коэффициент рентабельности, где  $T$  – экономический срок службы оборудования (лет);

$K$  – затраты на оборудование.

Учитывая потенциальную годовую выработку электроэнергии ФЭС 143 730 кВтч ( табл.3 ) подсчитываем себестоимость электроэнергии при сделанных допущениях и при условии потребления всей генерируемой энергии – 5,4 руб/кВтч при расчётном сроке службы оборудования 10 лет.

Фактическое годовое потребление посёлка в два раза меньше – около 70 000 кВтч, что определяет себестоимость 11,1 руб/кВтч (таблица 2).

## Оптимизация ФДЭС

Электроэнергия в рассмотренном выше варианте электрификации посёлка производится только ФЭС. Поставим задачу снижения себестоимости электроэнергии путём оптимизации установленной мощности и стоимости ФЭС с учётом соответствующего перераспределения выработки электроэнергии на дизельной электростанции.

В качестве метода оптимизации целесообразно использовать метод направленного перебора вариантов количества фотоэлектрических модулей с учётом соответствующего изменения количества аккумуляторов.

Заметим, что установленную мощность дизельной электростанции по условиям надёжности и возможности широкого варьирования установленной мощностью ФЭС следует выбирать по максимуму зимнего суточного графика нагрузки – 20 кВт, то есть ближайший из промышленного ряда дизель-генератор с запасом по мощности 20%. Например, подходит дизель-генератор типа ТСС АД-25С-Т400-1РМ7 с АВР стоимостью 417335 рублей. Основные технические характеристики этой модели приведены ниже.

### Основные характеристики

Мощность 25 кВт (31 кВА)

Исполнение открытое

Двигатель Weichai

Топливо: дизель

Мощность максимальная: 26 кВт

Напряжение: 230/400 В

Число фаз: 3

Пуск: электростартер

Наличие автомата ввода резерва (АВР): есть

Функция сварки: нет

Серия: Проф

#### Дополнительные характеристики

Частота: 50 Гц

Инверторная модель: нет

Тип генератора: синхронный

Расход топлива при 75% нагрузке: 5 л/ч

Модель: ТСС АД-25С-Т400-1РМ7 с АВР

Гарантийный срок: 36 месяцев

Установленную мощность оборудования ФЭС будем уменьшать с учётом его дискретности и критерия минимизации себестоимости электроэнергии ФДСЭС. В частности, таблица 4 содержит данные о выработке электроэнергии 350 фотоэлектрическими модулями.

Таблица 4.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
196.76	281.29	362.79	379.78	373.78	365.21	358.32	368.43	331.86	280.48	214.92	161.79
Среднегодовая выработка электроэнергии: 306.28 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 111794.02 кВт·ч.											

Данные таблицы 4 свидетельствуют о нехватке электроэнергии ФЭС в зимний период: выработка в декабре –162 кВтч в сутки, что меньше потребности в 198 кВтч. Очевидно, на декабрь и январь необходимо включать ДЭС на время необходимое для компенсации энергетического баланса СЭС. Суточный дефицит электроэнергии за два месяца составит около 36 кВтч, что может быть компенсировано включением ДЭС на 2 часа в сутки. За два зимних месяца ДЭС проработает 124 моточаса и израсходует 620 литров топлива.

Сокращение количества фотоэлектрических модулей до 300 штук обеспечивает генерацию электроэнергии в объёмах, приведённых в таблице 5. Суточный дефицит электроэнергии с ноября по февраль достигает 60 кВтч, что может быть компенсировано включением ДЭС на 3 часа в сутки. За три месяца ДЭС проработает 276 моточасов и израсходует 1380 литров топлива.

Таблица 5.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
168.66	241.11	310.96	325.53	320.39	313.03	307.14	315.80	284.45	240.41	184.22	138.67
Среднегодовая выработка электроэнергии: 262.53 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 95823.45 кВт·ч.											

Следующим вариантом рассмотрим ФЭС с 250 фотоэлектрическими модулями, данные о выработке, которой приведены в таблице 6.

Таблица 6.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
140.55	200.92	259.13	271.27	266.99	260.86	255.95	263.17	237.04	200.34	153.51	115.56
Среднегодовая выработка электроэнергии: 218.77 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 79852.87 кВт·ч.											

Суточный дефицит электроэнергии с ноября по февраль достигает 85 кВтч, что может быть компенсировано включением ДЭС на 4 часа в сутки. За три месяца ДЭС проработает 368 моточасов и израсходует 1840 литров топлива.

Энергетические характеристики варианта ФЭС с 200 модулями приведены в таблице 7 и проиллюстрированы на рисунке 5.

Таблица 7.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
112.44	160.74	207.31	217.02	213.59	208.69	204.76	210.53	189.63	160.28	122.81	92.45
Среднегодовая выработка электроэнергии: 175.02 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 63882.30 кВт·ч.											

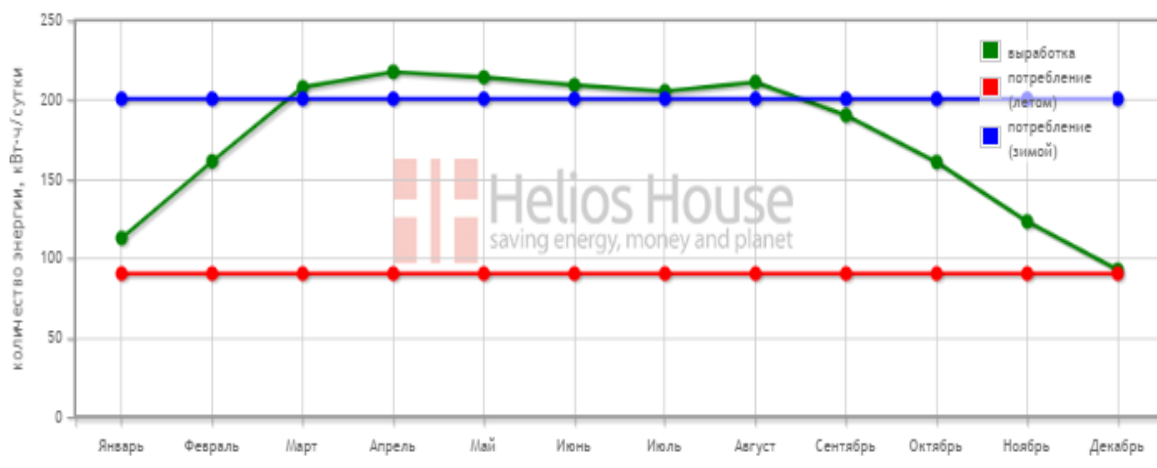


Рис. 5. Графические зависимости среднесуточной месячной выработки ФЭС с 200 фотомодулями и зимнего и летнего среднесуточного электропотребления

Суточный дефицит электроэнергии с сентября по март достигает 108 кВтч, что может быть компенсировано включением ДЭС на 5 часов в сутки. За шесть месяцев ДЭС проработает 755 моточасов и израсходует 3775 литров топлива.

Учитывая, что в данном варианте в осенне-зимнем периоде ночное электропотребление не обеспечивается ФЭС и, соответственно, накопленной энергией в аккумуляторах, целесообразно уменьшить количество аккумуляторных батарей на половину, то есть до 20 штук. Это обеспечит весенне-летнее электроснабжение посёлка только от ФЭС.

Вариант со 150 фотоэлектрическими модулями обеспечивает потенциальную годовую выработку электроэнергии в объёме 47911,72 кВтч, что существенно меньше годовой потребности посёлка 70 000кВтч. Данные по выработке приведены в таблице 8 и на рисунке 6.

Таблица 8.

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
84.33	120.55	155.48	162.76	160.19	156.52	153.57	157.90	142.23	120.21	92.11	69.34
Среднегодовая выработка электроэнергии: 131.26 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 47911.72 кВт·ч.											

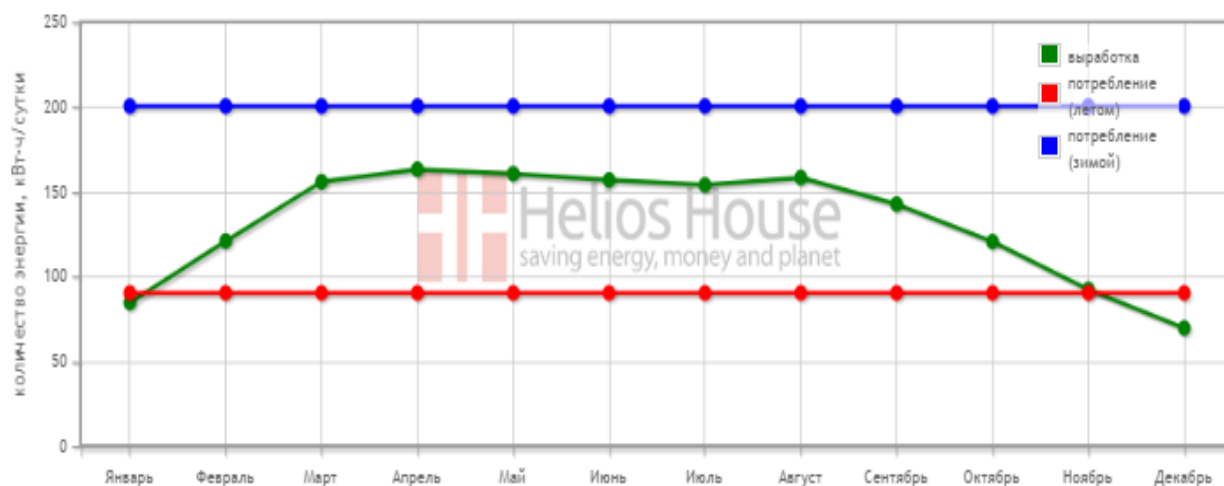


Рис. 6. Графические зависимости среднесуточной месячной выработки ФЭС с 150 фотоэлектрическими модулями и зимнего и летнего среднесуточного электропотребления.

Дефицит электроэнергии за год составляет 22 089 кВтч, что требует около 1100 моточасов работы ДЭС и расхода топлива 5500 литров.

### Оценка экономических показателей ФДЭС

Расчёт себестоимости электроэнергии с учётом стоимости оборудования и израсходованного топлива производится по формуле:

$$C_{эл} = (P_n \cdot K + C_m) / W \text{ руб/кВтч, где } C_m \text{ – стоимость топлива.}$$

Стоимость ФДСЭС с 350 фотоэлектрическими модулями составляет 7 289 950 рублей, стоимость топлива 31 000 рублей, при цене топлива 50 руб/л. Тогда себестоимость электроэнергии для этого варианта равна 10,5 руб/кВтч.

Стоимость ФДСЭС с 300 фотоэлектрическими модулями составляет 6 211 717 рублей. Стоимость топлива 69 000 рублей. Себестоимость электроэнергии для рассматриваемого варианта равна 9,86 руб/кВтч.

Стоимость ФДСЭС с 250 фотоэлектрическими модулями составляет 5 552 16 рублей. Стоимость топлива 92 000 рублей. Себестоимость электроэнергии для рассматриваемого варианта равна 9,24 руб/кВтч.

Стоимость ФДСЭС с 200 фотоэлектрическими модулями и с уменьшенным до 20 единиц количеством аккумуляторов составляет 4 251 115 рублей. Стоимость топлива 188 750 рублей. Себестоимость электроэнергии для рассматриваемого варианта равна 8,76 руб/кВтч.

Стоимость ФДСЭС со 150 фотоэлектрическими модулями и с уменьшенным до 20 единиц количеством аккумуляторов составляет

3 591 115 рублей. Стоимость топлива 275 000 рублей. Себестоимость электроэнергии для рассматриваемого варианта равна 9,06 руб/кВтч.

Для годовой выработки 70 000 кВтч электроэнергии только дизельной электростанцией с расходом топлива 5 литров в час, необходима работа ДЭС в номинальном режиме в течение 2800 часов с расходом топлива 14 000 литров. Для принятой стоимости топлива 50 рублей за литр за год необходимо истратить около 700 000 рублей.

При расчёте себестоимости электроэнергии, был принят коэффициент рентабельности соответствующий сроку службы оборудования 10 лет. Тогда, исходя из соображений надёжности электроснабжения и гарантийного срока эксплуатации выбранной ДЭС 36 месяцев, необходимо в составе ДЭС иметь 3 дизель-генератора суммарной стоимостью 1 252 000 рублей.

Себестоимость электроэнергии ДЭС, при указанных условиях, равна 11,8 руб./кВтч.

## **Выводы**

1. Себестоимость электроэнергии ФДСЭС для всех рассмотренных вариантов ниже чем на ДЭС.
2. Оптимальным вариантом установленной мощности фотоэлектрической части ФДСЭС является использование 200 фотоэлектрических модулей.

## **Информационные источники**

1. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : [Электронный ресурс] учебное пособие . Б. В. Лукутин. — 1 компьютерный файл (pdf; 4.0 МВ). — Томск: 2019. — Заглавие с титульного экрана. — Доступ из корпоративной сети ТПУ..Схема доступа: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2019/m001.pdf>.
2. Электронный ресурс <http://www.helios-house.ru> .
3. Электронный ресурс <http://www.SunCalc>.
4. Электронное учебное пособие «Возобновляемые источники энергии». Автор проф. Б.В. Лукутин. – Томск <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2010/01/>

## «ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО КРИТЕРИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ»

**Цель работы:** оптимизировать выбор фотоэлектрической части автономной фото-дизельной системы электроснабжения (ФДЭС) посёлка с совместной работой фотоэлектрической и дизельной частей по критерию максимума коэффициента использования установленной мощности.

**Методика выполнения работы:** компьютерное моделирование энергетических балансов системы электроснабжения с фото-электростанцией (ФЭС), аналитическое исследование результатов моделирования, оптимизация установленной мощности фото-дизельной электростанции по методу направленного перебора вариантов.

**Пояснения к работе.** Исследования проводятся для автономной системы электроснабжения с параллельной работой фотоэлектрической и дизельной частей ФДСЭС [1]. Структурная схема ФДЭС приведена на рисунке 1.

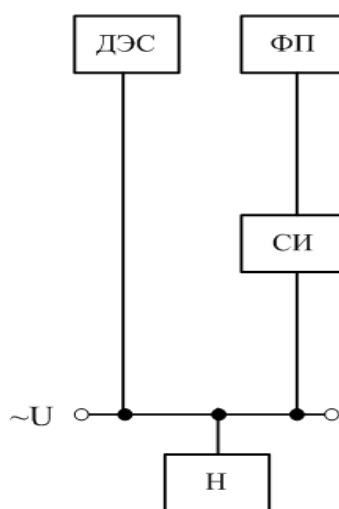


Рис. 1. Структурная схема гибридной ФДЭС

На рисунке 1 приняты обозначения: ДЭС – дизельная электростанция, ФП – фотоэлектрические панели, СИ – сетевой инвертор, Н – нагрузка.

**Исходные данные.**

Моделирование энергетических балансов в автономной системе электроснабжения осуществляется в компьютерной программе **helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html**. Указанное программное обеспечение позволяет определять среднесуточную выработку электрической и тепловой энергии от солнца и ветра в выбранном месте расположения энергоустановки для каждого месяца года. В качестве исходных данных выбираем координаты места предполагаемой установки станции, например посёлок Ташанта в республике Алтай (рис. 2).

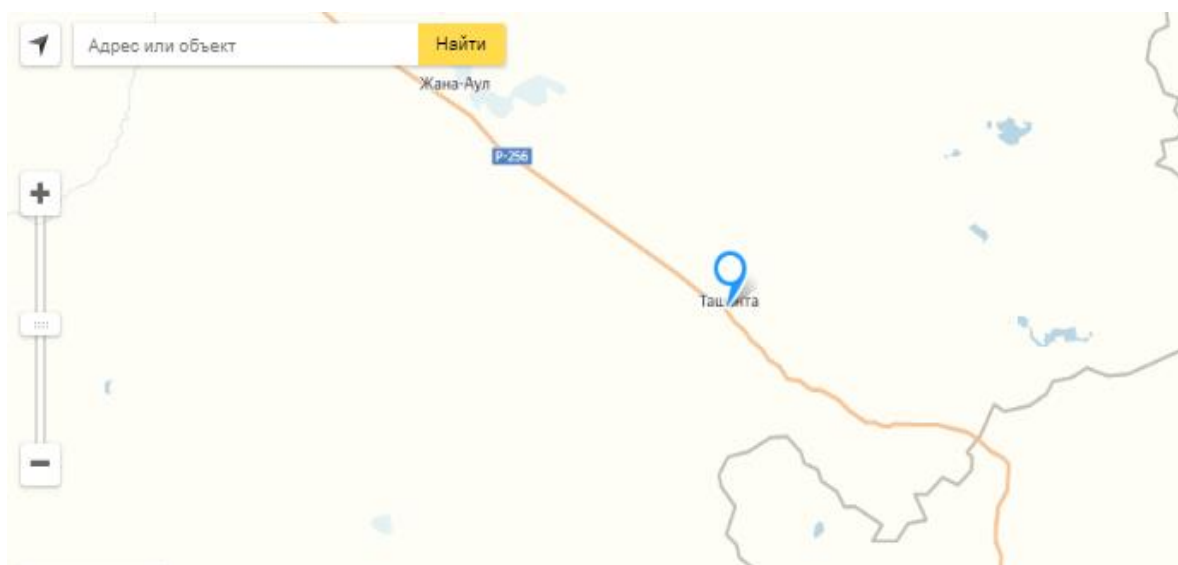


Рис.2. Пример выбора объекта электрификации – посёлка в горном Алтае

Среднемесячная выработка электрической энергии по месяцам года за характерные сутки фотоэлектрическим модулем НН- MONO- 200W, площадью  $1,3 \text{ м}^2$ , ориентированном в пространстве оптимальным образом: зенитный угол  $50^\circ$ , азимутальный –  $180^\circ$  приведена в таблице 1.

Таблица 1. Выработка электроэнергии фотоэлектрическим модулем

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0.56	0.80	1.04	1.09	1.07	1.04	1.02	1.05	0.95	0.80	0.61	0.46
Среднегодовая выработка электроэнергии: 0.88 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 319.40 кВт·ч.											



Полагая бытовой характер электропотребления, используем типовые суточные графики электрических нагрузок сельских потребителей, приведённые в электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24>.

Выбирая значения коэффициента сезонности электропотребления из таблицы 2, получим суточные графики электрических нагрузок. Типовые графики для зимы и лета приведены на рис.3.

Таблица2. Коэффициенты сезонности для суточных графиков нагрузки децентрализованных потребителей

№, пп	Месяц	Коэффициент сезонности, $k_c$
1	Январь	1,0
2	Февраль	1,0
3	Март	0,8
4	Апрель	0,8
5	Май	0,8
6	Июнь	0,7
7	Июль	0,7
8	Август	0,7
9	Сентябрь	0,9
10	Октябрь	0,9
11	Ноябрь	0,9
12	Декабрь	1,0

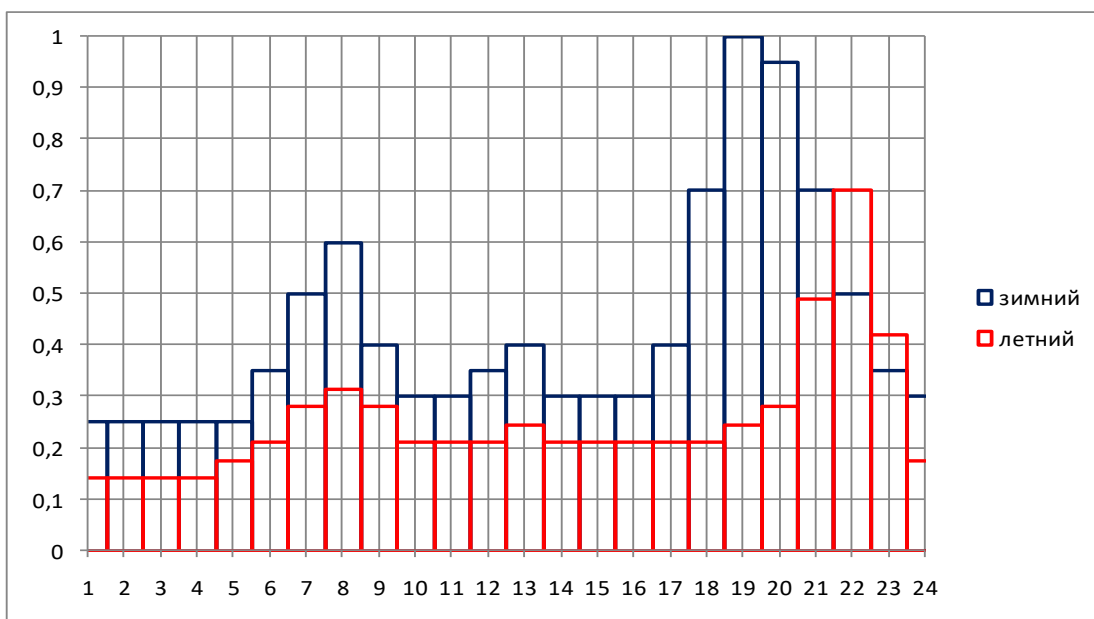


Рис.3. Типовой суточный график электропотребления сельских домов

Графики на рис.3 представлены в относительных единицах и позволяют по известному значению максимальной нагрузки объекта электроснабжения  $P_{\max}$  (кВт) получить суточный график расчетной нагрузки объекта для любого дня года:

$$P_{pi} = \bar{P}_i \cdot P_{\max} (1 \pm C_{pi} \cdot \xi) \cdot k_c, \text{ кВт}$$

где  $P_{pi}$  – расчетная активная нагрузка на  $i$ -ом часе суточного графика;  $\bar{P}_i$  – математическое ожидание нагрузки на  $i$ -ом часе суточного графика;  $C_{pi}$  – коэффициент вариации нагрузки для  $i$ -ой ступени суточного графика;  $k_c$  – коэффициент сезонности, значения которого представлены в табл.2;  $\xi$  – равновероятная случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Значения  $P_{\max}$  при выполнении данной работы рекомендуется выбирать из диапазона 15 – 30 кВт, характерного для большинства мелких изолированных потребителей.

### Пример оптимизации ФДЭС

В качестве примера, для значения вечернего максимума посёлка Ташанта - 20 кВт, с учётом средней суточной нагрузки зимнего графика – 0,412 о.е., имеем среднесуточную нагрузку 8,24 кВт. Среднесуточная энергия, соответственно, равна 198 кВтч..

Для летнего периода вечерний максимум равен 14 кВт, средняя суточная нагрузка – 0,275 о.е. или 3,86 кВт. Среднесуточное летнее энергопотребление составит 92,54 кВтч.

Параллельная работа фотоэлектрической и дизельной частей гибридной электростанции предусматривает использование ДЭС в качестве основного энергоисточника. Фотоэлектростанция с сетевым инвертором позволяет экономить дизельное топливо, генерируя часть суммарной электроэнергии. Обычно полагают, что текущая мощность ФЭС относительно ДЭС, по условию устойчивости сетевого инвертора, не должна превышать 40% от суммарной генерации, то есть текущей нагрузки.

В качестве основного оборудования выбраны следующие серийные составляющие гибридной электростанции.

Установленную мощность дизельной электростанции, по условиям надёжности и возможности варьирования установленной мощностью ФЭС, следует выбирать по максимуму зимнего суточного графика нагрузки 20 кВт - ближайший из промышленного ряда дизель-генератор с запасом по мощности 20%. Например, подходит дизель-генератор типа ТСС АД-25С-

Т400-1PM7 с АВР стоимостью 417335 рублей. Основные технические характеристики этой модели приведены ниже.

Основные характеристики	
	Мощность: 25 кВт (31 кВА)
	Исполнение: открытое
	Двигатель: Weichai
Топливо:	дизель
Мощность максимальная:	26 кВт
Напряжение:	230/400 В
Число фаз:	3
Пуск:	электростартер
Наличие автомата ввода резерва (АВР):	есть
Функция сварки:	нет
Серия:	Проф
Дополнительные характеристики	
Частота:	50 Гц
Инверторная модель:	нет
Тип генератора:	синхронный
Расход топлива при 75% нагрузке:	5 л/ч
Модель:	ТСС АД-25С-Т400-1PM7 с АВР
Гарантийный срок:	36 месяцев

Технико-экономические параметры выбранного фотоэлектрического модуля приведены ниже:

Артикул НН-MONO-200W  
Номинальная мощность 200 Вт  
Номинальное напряжение 24 В  
Напряжение холостого хода 44.8 В  
Ток при номинальной мощности 5.71А  
КПД солнечного модуля 15%  
КПД солнечного элемента 17.4%  
Размеры 1580x808x40 мм  
Вес 15.5 кг  
Стоимость 13200 руб.

Технико-экономические характеристики сетевого инвертора приведены ниже.

Сетевой инвертор (преобразователь) является технологически наиболее важной частью солнечной энергосистемы. Вся вырабатываемая солнечными батареями энергия сразу же передается в сеть для питания нагрузки. Сетевой инвертор работает только совместно с сетью переменного тока без использования аккумуляторных батарей. Кроме того, инверторы отвечают за

синхронизацию напряжения с сетью и мониторинг сетевых параметров. Классификация сетевых инверторов зависит от номинальной мощности, числа фаз, встроенного MPPT контроллера заряда и диапазона допустимого напряжения постоянного тока.

Сетевой солнечный инвертор SOFAR  
10000TL 3-фазы

Wi-Fi в комплекте      Гарантия 5 лет



Бесплатная доставка EMS по всей России

Мощность	10 кВт
Кол-во фаз	Трехфазный
Выходной сигнал	Чистый синус
Тип контроллера	MPPT
Макс. мощность СБ	11000 Вт
Габариты	707 x 492 x 240 мм
Цена	<b>130 000</b> руб.

Учитывая ограничения на выработку электроэнергии фотоэлектрической части ФДЭС, инвертор выбран на половину пиковой мощности потребления посёлка.

Принцип работы сетевых электростанций заключается в подмешивании (добавлении) энергии вырабатываемой солнечными батареями в электрическую сеть для обеспечения дополнительной нагрузки или экономии. В рассматриваемом случае электрическая сеть образована автономной дизельной электростанцией.

Для построения суточного энергетического баланса автономной системы электроснабжения на базе ФДЭС удобно воспользоваться суточным графиком электрических нагрузок, приведённым на электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24> и в графическом виде на рис.2, и программой <http://www.SunCalc>.

Длительность зимнего светового дня (январь) в районе п. Ташанта составляет около 8 часов с 9 до 17 часов. Тогда, в соответствии с графиком рис.2, дневное энергопотребление равно 3,05 о.е., ночное – 6,65 о.е. из суточной энергии СЭС 9,7 о.е. или в процентах, соответственно, 30% и 70%. В именованных единицах дневное электропотребление составляет 60 кВтч, ночное – 140 кВтч.

Длительность летнего светового дня (июль) в районе п. Ташанта с инсоляцией достаточной для ФЭС составляет около 14 часов с 6 до 20 часов. Тогда, в соответствии с графиком рис.2, дневное энергопотребление равно 3,62 о.е., ночное –2,39 о.е. из суточной энергии СЭС 6,01 о.е. или в процентах, соответственно, 60% и 40%. Среднесуточное электропотребление в летний период составляет 93 кВтч.

Для выбора установленной мощности фотоэлектрической части необходимо проанализировать энергетический баланс ФДЭС в характерные летние сутки. Максимальная инсоляция, следовательно, максимальная возможная мощность электроэнергии ФЭС в течение светового дня приходится на 13 часов местного времени. Мощность электропотребления нагрузки в это время составляет в относительных единицах 0,23, в абсолютных -  $14\text{кВт} \cdot 0,23 = 3,22 \text{ кВт}$ .

Следовательно, по условиям устойчивости работы сетевого инвертора ФЭС, распределение этой мощности между ФЭС и ДЭС составит, соответственно 1,28 и 1,932 кВт.

В утренние и вечерние часы генерация от ФЭС уменьшается и устойчивость работы инвертора будет обеспечена. То же можно сказать и о зимнем периоде.

Таким образом, мощность генерации ФЭС в летний полдень не должна превышать 1,3 кВт. Выбранный фотоэлектрический модуль НН- MONO- 200W в среднем за сутки июля производит 1.02 кВтч электроэнергии.

Для определения суточного хода выработки электроэнергии воспользуемся программой SunCalc которая показывает движение солнца и фазы солнечного света в течение данного дня в заданном месте. Для расчета задаются характерные сутки - 15 число каждого месяца и отслеживается продолжительность светового дня (<http://suncalc.net>).

Для рассматриваемого примера, длительность светового дня июля с инсоляцией, позволяющей эффективную работу фотоэлектрических модулей, составит 14 часов. При этом, средняя мощность генерации фотоэлектрического модуля составит  $P_{max} = 73 \text{ Вт}$ . Максимум полуденной мощности, при синусоидальном распределении инсоляции в течение светового дня составит

$$P_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot P_{cp} = 114.6 \text{ Вт.}$$

Таким образом, максимальное количество фотоэлектрических модулей НН- MONO- 200W, обеспечивающих требуемую мощность генерации в

летний период равно  $N = 1.3 \text{ кВт} / 0,115 \text{ кВт} = 11,3$  модуля, или округлённо до целого числа - 12 модулей. Установленная мощность фотоэлектрической части ФДСЭС равна 2,4 кВт.

Зная установленные мощности генерирующего оборудования автономной системы электроснабжения: ДЭС и ФЭС его фактическую загрузку можно определить коэффициенты использования установленной мощности этого оборудования – КИУМ:

- КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, энергетического оборудования. Определяется как отношение фактической выработки энергии к теоретической, по выражению:
- $\text{КИУМ} = W / P_{\text{уст}} \cdot T, \%$
- где,  $W$  – Объем энергии, произведенный составной частью гибридного комплекса (ФЭС, либо ДЭС), за отчетный период времени, кВт\*ч;
- $P_{\text{уст}}$  – установленная мощность составной части гибридного комплекса, кВт;

$T$  – отчетный период времени.

Информация о среднесуточной выработке ФЭС и потребления электроэнергии показана на рисунке 4.

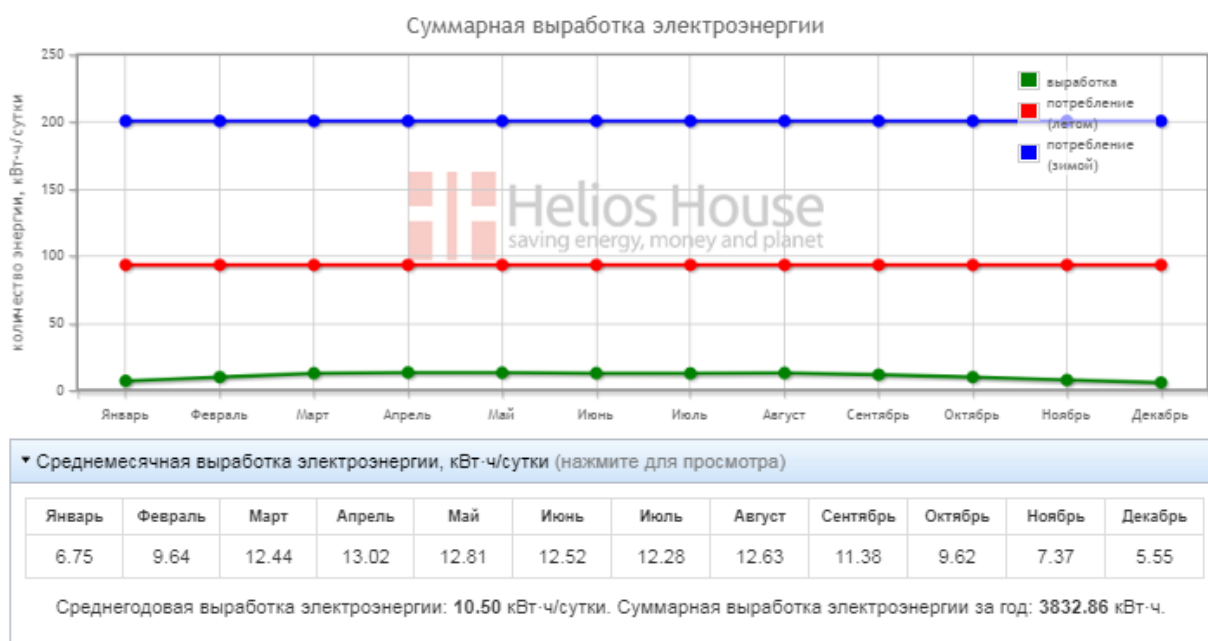


Рис.4. Энергобаланс потребления и производства электроэнергии ФЭС

По известным энергетическим характеристикам ФДСЭС определяются КИУМ фотоэлектрической и дизельной частей гибридной электростанции.

Для фотоэлектрической части установленной мощностью 2.4 кВт среднегодовой КИУМ равен 18%.

Дизельная электростанция при полном обеспечении электропотребления посёлка должна вырабатывать порядка 61300 кВтч электроэнергии. За вычетом энергии ФЭС 3833 кВтч остаётся 57667 кВтч. При номинальной загрузке ДЭС в течение года может выработать 215000 кВтч электроэнергии. Среднегодовой КИУМ равен 27%.

## **Выводы**

3. Себестоимость электроэнергии ФДЭС для всех рассмотренных вариантов ниже чем на ДЭС.
4. Оптимальным вариантом установленной мощности фотоэлектрической части ФДЭС является использование 200 фотоэлектрических модулей.

## **Информационные источники**

1. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : [Электронный ресурс] учебное пособие . Б. В. Лукутин. — 1 компьютерный файл (pdf; 4.0 МВ). — Томск: 2019. — Заглавие с титульного экрана. — Доступ из корпоративной сети ТПУ..Схема доступа: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2019/m001.pdf>.
2. Электронный ресурс <http://www.helios-house.ru> .
3. Электронный ресурс <http://www.SunCalc>.
4. Электронное учебное пособие «Возобновляемые источники энергии». Автор проф. Б.В. Лукутин. – Томск <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2010/01/>

Методические указания к выполнению лабораторной работы №3

### «ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПО КРИТЕРИЮ СЕБЕСТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ»

**Цель работы:** оптимизировать выбор фотоэлектрической и ветровой частей автономной системы электроснабжения (АСЭС) посёлка с совместной работой фотоэлектрической и ветровой частей по критерию минимума себестоимости производимой электроэнергии.

**Методика выполнения работы:** компьютерное моделирование энергетических балансов системы электроснабжения с фото-электростанцией (ФЭС) и ветро-электростанцией (ВЭС), аналитическое исследование результатов моделирования, оптимизация установленной мощности фото-электрической и ветровой частей электростанции по методу направленного перебора вариантов.

**Пояснения к работе.** Исследования проводятся для автономной системы электроснабжения с параллельной работой фотоэлектрической и ветровой частей АСЭС на шине постоянного тока[1].

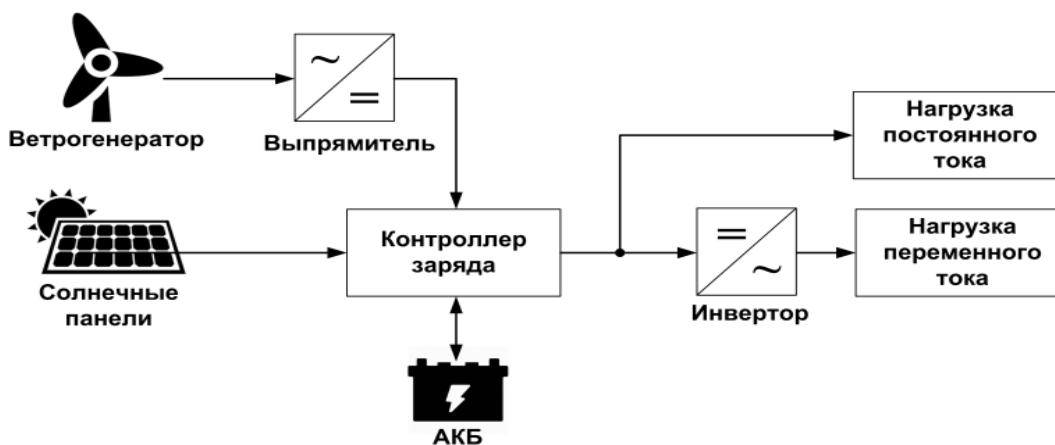


Рис. 1. Структурная схема гибридной СЭС

Типовая гибридная электростанция включает в себя следующие компоненты [1], показанные на рисунке 1:

- 1) Один или более ветрогенератор малой мощности ( $P_{ВЭУ}$ , Вт;  $N_{ВЭУ}$ , шт.);
- 2) Солнечные батареи, состоящие из нескольких последовательно-параллельно соединенных между собой солнечных модулей соединенных с зарядным устройством накопителя энергии с определенным напряжением и мощностью ( $P_{СБ.лик}$ , Вт;  $N_{СП}$ , шт.);



- 3) Накопитель энергии на основе АКБ способный обеспечить автономную работу электростанции в течение определенного времени ( $T_{авт.}$ , ч.;  $C_{АКБ}$ , А \* ч;  $N_{АКБ}$ , шт.);
- 4) Выпрямитель для преобразования переменного тока от ВЭУ в постоянный ток для заряда АКБ ( $P_{выпр}$ , Вт);
- 5) Контроллер заряда АКБ ( $P_{ЗУ}$ , Вт);
- 6) Инвертор ( $P_{инв.}$ , Вт).

Стандартный алгоритм функционирования гибридной ветро-солнечной электростанции предполагает следующие действия при изменениях режимных параметров:

- 1) Нагрузка потребителя меньше, чем генерируемая ВЭУ мощность (с учетом потерь при трансформации), т.е.  $P_{ВЭУ} > P_{нагр.}$ . В этом случае избыток мощности, генерируемой ВЭУ ( $\Delta P = P_{ВЭУ} - P_{нагр.}$ ) и солнечными батареями ( $P_{СБ}$ ) используется для зарядки накопителя энергии. Если АКБ полностью заряжены, избыточная энергия подается на балластную нагрузку.
- 2) Если нагрузка потребителя больше генерируемой ВЭУ мощности ( $P_{ВЭУ} < P_{нагр.}$ ), но не превышает суммарную мощность (с учетом потерь при трансформации), вырабатываемую солнечными батареями и ВЭУ ( $P_{ВЭУ} + P_{СБ} > P_{нагр.}$ ), то в данном случае дефицит мощности компенсируется солнечными батареями. Избыточная энергия запасается в накопителе энергии, если АКБ заряжены не полностью.
- 3) В случае возникающего дефицита мощности при недостаточной выработке энергии ВЭУ и солнечных батарей ( $P_{ВЭУ} + P_{СБ} < P_{нагр.}$ , при условии, что  $P_{ВЭУ} + P_{СБ} \neq 0$ ), то в данной ситуации возникший небаланс компенсируется энергией накопленной в АКБ.
- 4) Если выработка энергии от возобновляемых источников отсутствует ( $P_{ВЭУ} + P_{СБ} = 0$ ), то питание потребителя осуществляется от накопителя энергии до момента разряда АКБ до предельно допустимого значения ( $C_{min} \leq C_{АКБ}$ ).

Реализация алгоритма функционирования ветро-солнечной электростанции с учётом географических, климатических и нагрузочных характеристик предусматривает моделирование и оптимизацию технико – экономических показателей рассматриваемых энергоустановок.

### Исходные данные.

Моделирование энергетических балансов в автономной системе электроснабжения осуществляется в компьютерной программе **helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html**. Указанное программное обеспечение позволяет определять среднесуточную выработку электрической и тепловой энергии от солнца и ветра в выбранном месте расположения энергоустановки для каждого месяца года. В качестве исходных данных выбираем координаты места предполагаемой установки станции, например посёлок Ташанта в республике Алтай (рис. 2).

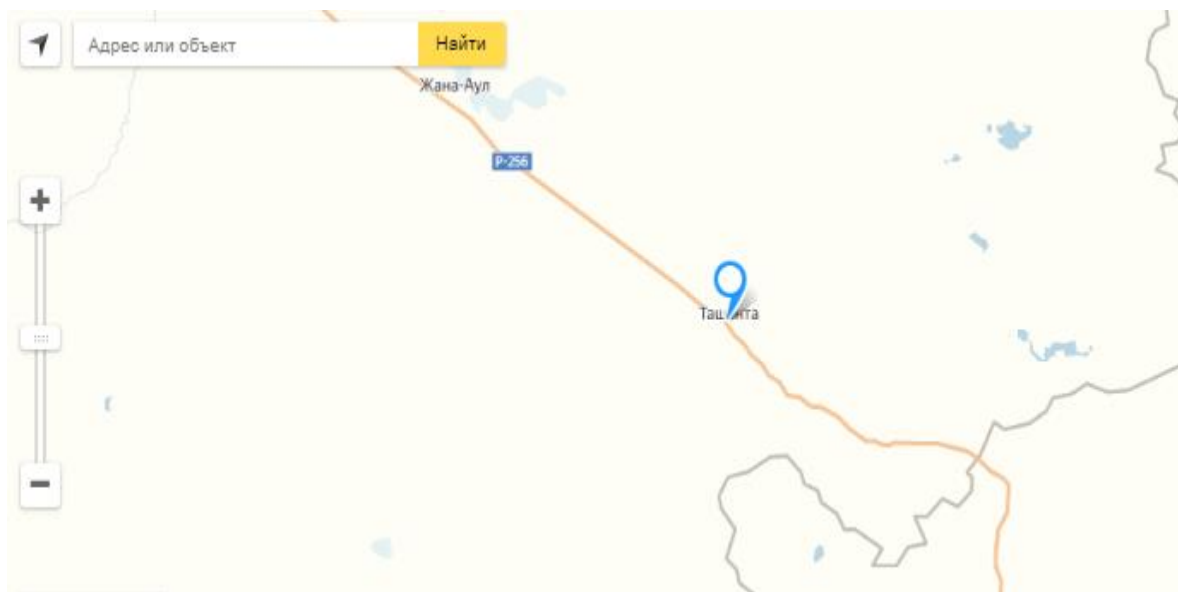


Рис.2. Пример выбора объекта электрификации – посёлка в горном Алтае

Среднемесячная выработка электрической энергии по месяцам года за характерные сутки фотоэлектрическим модулем НН- MONO- 200W, площадью  $1,3 \text{ м}^2$ , ориентированном в пространстве оптимальным образом: зенитный угол  $50^0$ , азимутальный –  $180^0$  приведена в таблице 1.

Таблица 1. Выработка электроэнергии фотоэлектрическим модулем

▼ Среднемесячная выработка электроэнергии, кВт·ч/сутки (нажмите для просмотра)											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0.56	0.80	1.04	1.09	1.07	1.04	1.02	1.05	0.95	0.80	0.61	0.46

Среднегодовая выработка электроэнергии: 0.88 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 319.40 кВт·ч.

Выработка электроэнергии ветро-солнечной электростанцией в графическом виде приведена на рисунке 3.

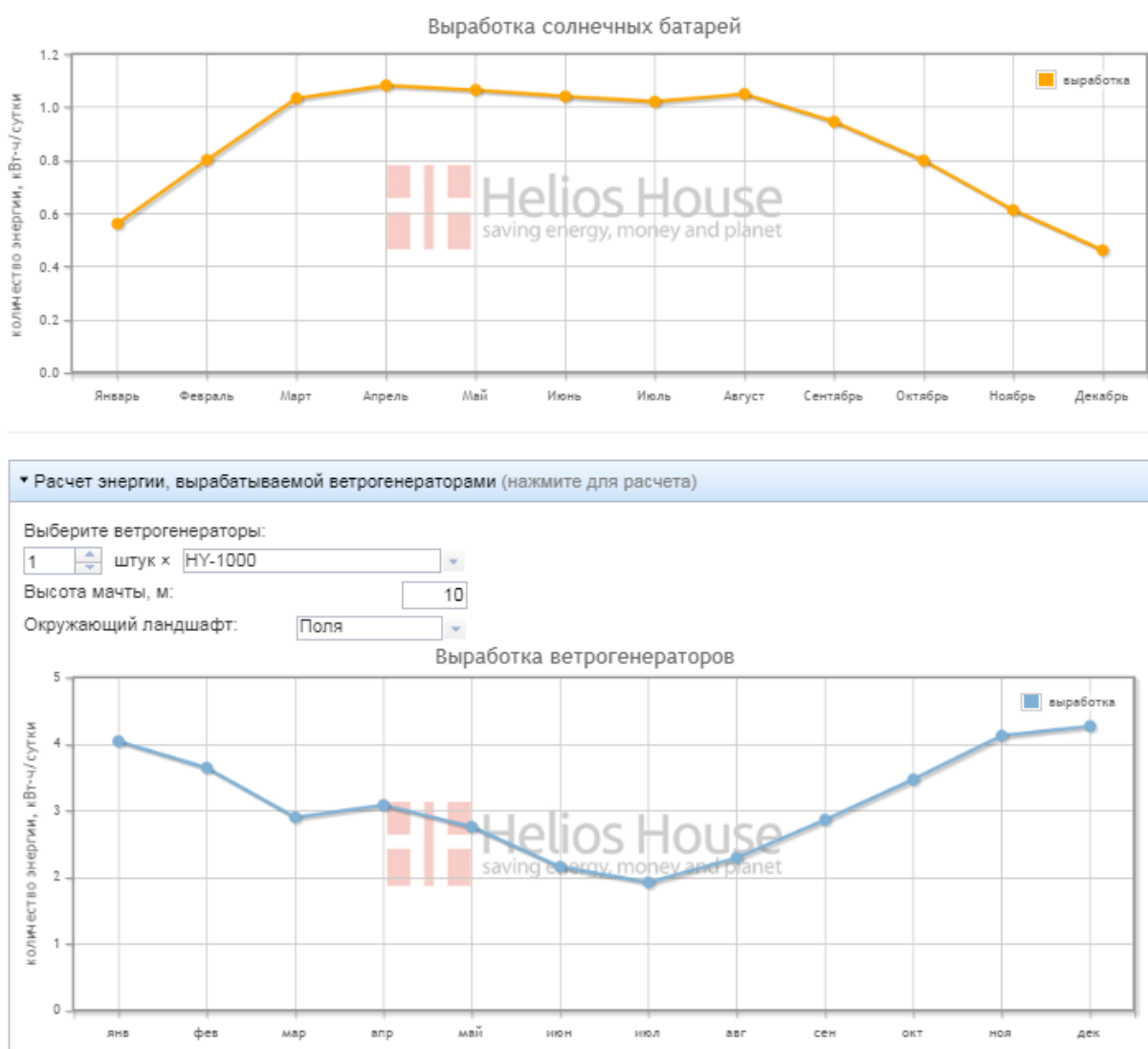


Рис. 3. Суточная выработка электроэнергии солнечной и ветровой частями гибридной электростанции.

Полагая бытовой характер электропотребления, используем типовые суточные графики электрических нагрузок сельских потребителей, приведённые в электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24>.

Выбирая значения коэффициента сезонности электропотребления из таблицы 2, получим суточные графики электрических нагрузок. Типовые графики для зимы и лета приведены на рис.4.

Табл.2 – Коэффициенты сезонности для суточных графиков нагрузки децентрализованных потребителей

№, пп	Месяц	Коэффициент сезонности, $k_c$
1	Январь	1,0
2	Февраль	1,0
3	Март	0,8
4	Апрель	0,8
5	Май	0,8
6	Июнь	0,7
7	Июль	0,7
8	Август	0,7
9	Сентябрь	0,9
10	Октябрь	0,9
11	Ноябрь	0,9
12	Декабрь	1,0

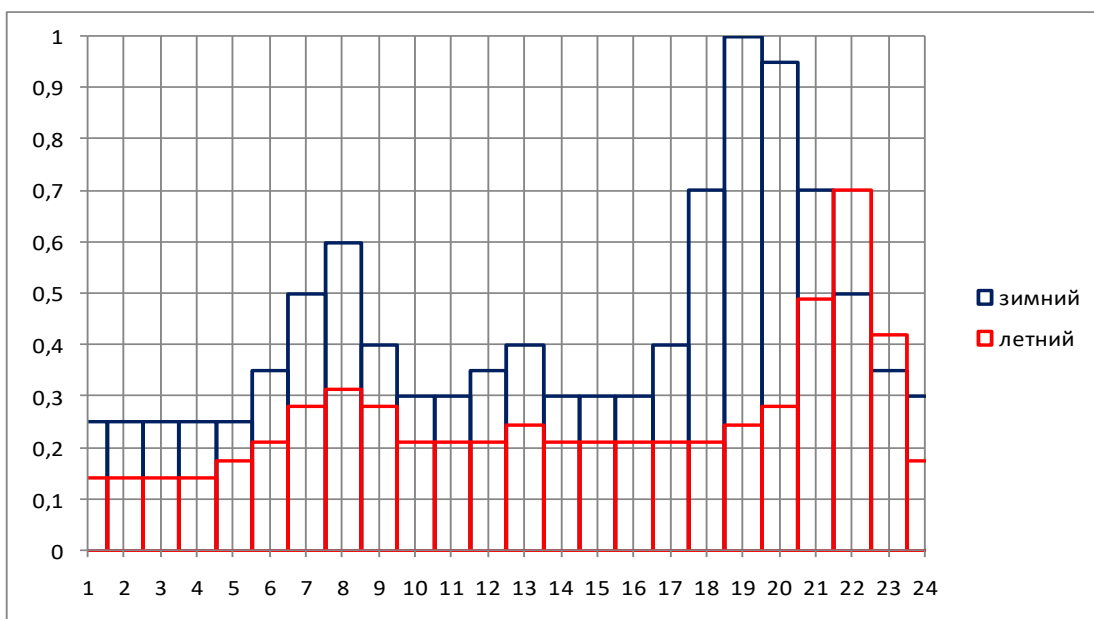


Рис.4. Типовой суточный график электропотребления сельских домов

Графики на рис.3 представлены в относительных единицах и позволяют по известному значению максимальной нагрузки объекта электроснабжения  $P_{\max}$  (кВт) получить суточный график расчетной нагрузки объекта для любого дня года:

$$P_{pi} = \bar{P}_i \cdot P_{\max} (1 \pm C_{pi} \cdot \xi) \cdot k_c, \text{ кВт}$$

где  $P_{pi}$  – расчетная активная нагрузка на  $i$ -ом часе суточного графика;  $\bar{P}_i$  – математическое ожидание нагрузки на  $i$ -ом часе суточного графика;  $C_{pi}$  – коэффициент вариации нагрузки для  $i$ -ой ступени суточного графика;  $k_c$  – коэффициент сезонности, значения которого представлены в табл.2;  $\xi$  – равновероятная случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Значения  $P_{\max}$  при выполнении данной работы рекомендуется выбирать из диапазона 15 – 30 кВт, характерного для большинства мелких изолированных потребителей.

### **Пример оптимизации ветро-солнечной СЭС.**

В качестве примера, для значения вечернего максимума посёлка Ташанта - 20 кВт, с учётом средней суточной нагрузки зимнего графика – 0,412 о.е., имеем среднесуточную нагрузку 8,24 кВт. Среднесуточная энергия, соответственно, равна 198 кВтч.

Для летнего периода вечерний максимум равен 14 кВт, средняя суточная нагрузка – 0,275 о.е. или 3,86 кВт. Среднесуточное летнее энергопотребление составит 92,54 кВтч.

Задача оптимизации построить гибридную электростанцию с минимальной себестоимостью электроэнергии.

Технико-экономические параметры выбранного фотоэлектрического модуля приведены ниже:

Артикул НН-MONO-200W  
Номинальная мощность 200 Вт  
Номинальное напряжение 24 В  
Напряжение холостого хода 44.8 В  
Ток при номинальной мощности 5.71А  
КПД солнечного модуля 15%  
КПД солнечного элемента 17.4%  
Размеры 1580x808x40 мм  
Вес 15.5 кг  
Стоимость 13200 руб.

Технико-экономические характеристики ветроэнергетической установки НУ – 1000 приведены ниже



- Теоретическая мощность ветрогенератора – 1000 ватт (12 м/с).
- Выработка при средней скорости ветра 8 м/с – 7,2 - 7,6 кВт\*ч/сутки.

Рис. 5. Общий вид оборудования ВЭС

Стоимость оборудования (<http://www.ra-energo.ru/vetrogenerator-hefey-600-vatt/1/obj/1/>):

ветрогенератор с ветроконтроллером – 128 400 руб;

Оценка стоимости аккумуляторных батарей (АБ) может быть проведена из следующих соображений: зимнее суточное электропотребление округлённо равно 200 кВтч, причём в течение светового дня происходит суммарная генерация электроэнергии от ФЭС и ВЭС, дневное электропотребление и зарядка аккумуляторов. Ночное электропотребление осуществляется от ВЭС и аккумуляторных батарей. Таким образом, ёмкость аккумуляторов должна обеспечивать их режим разряда – заряда в объёме ночного электропотребления посёлка с учётом рекомендуемой глубины разряда.

Для построения суточного энергетического баланса автономной системы электроснабжения на базе ветро-солнечной СЭС удобно воспользоваться суточным графиком электрических нагрузок, приведённым на электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24> и в графическом виде на рис.3, и программой <http://www.SunCalc>.

Длительность зимнего светового дня (январь) в районе п. Ташанта составляет около 8 часов с 9 до 17 часов. Тогда, в соответствии с графиком рис.2, дневное энергопотребление равно 3,05 о.е., ночное – 6,65 о.е. из суточной энергии СЭС 9,7 о.е. или в процентах, соответственно, 30% и 70%. В именованных единицах дневное электропотребление составляет 60 кВтч, ночное – 140 кВтч.

Следовательно, максимальная обменная энергия батареи аккумуляторов без учёта подзаряда от ВЭС составляет 140 кВтч. Учитывая наличие ВЭС и зависимость срока службы аккумуляторов от глубины их разряда, примем обменную энергию 70 кВтч, что соответствует 50% ёмкости АБ. Тогда, необходимая ёмкость батареи аккумуляторов равна 140 кВтч. Принимая рабочее напряжение в цепи постоянного тока ФЭС 48 В, получим ёмкость АБ в Ампер – часах 2900 Ач.

Выберем гелевые аккумуляторы Delta GEL 12 - 200 ([https://mt-energo.ru/akb/delta\\_gel\\_12-200.html](https://mt-energo.ru/akb/delta_gel_12-200.html)) ёмкостью 200 Ач, стоимостью 35589 рублей. Количество аккумуляторов составит 14 штук, что потребует сумму в 498246 рублей.

Состав оборудования гибридной СЭС показан на рисунке 6.

Моделирование энергетических балансов гибридной СЭС позволило установить установленные мощности солнечной – 36 кВт (180 фотоэлектрических модулей) и ветровой - 18 кВт (25 ветроустановок), позволяющие обеспечить потребности посёлка в электроэнергии в течение года. Результаты моделирования представлены на рисунке 7.



Рис.6. Состав оборудования гибридной СЭС

Стоимость энергетического оборудования:

- Фотоэлектрические модули - 2376000 рублей;
- Ветрогенераторы – 3210000 рублей;
- Аккумуляторы – 498246 рублей;
- Инвертор – 267499 рублей;
- Итого 6,4 млн рублей.

Таким образом, общие затраты на основное оборудование ветро – солнечной СЭС составят 5,6 млн рублей.

Себестоимость 1 кВтч электроэнергии с учётом только затрат на оборудование:

$$C_{эл} = (P_n \cdot K) / W \text{ руб/кВтч};$$

$W$  – общее количество электрической энергии;

$P_n = 1/T$  – нормативный коэффициент рентабельности, где  $T$  – экономический срок службы оборудования (лет);

$K$  – затраты на оборудование.

Фактическое годовое потребление посёлка неизменно – около 70 000 кВтч, что определяет себестоимость 7,9 руб/кВтч при расчётном сроке службы оборудования 10 лет. .

Стоимость аккумуляторов и инвертора при сравнительном анализе вариантов может не учитываться, так как их характеристики определяются графиком электрических нагрузок посёлка.

Вариант выбора установленной мощности гибридной электростанции: фотоэлектрическая часть – 180 фотоэлектрических модулей по 200 Вт и ветроэлектрическая часть -25 ветроустановок мощностью по 1000 Вт является оптимальным и в виде графиков представлен на рисунке 6.

Анализ вариантов состава оборудования, обеспечивающих необходимую энергию для посёлка показывает, что уменьшение количества фотоэлектрических модулей до 140, при увеличении ветроустановок до 32, увеличивает себестоимость электроэнергии до 8,5 руб/кВтч. Увеличение количества фотоэлектрических модулей до 250, при уменьшении ветроустановок до 20, так же увеличивает себестоимость электроэнергии до 8,4 руб/кВтч.



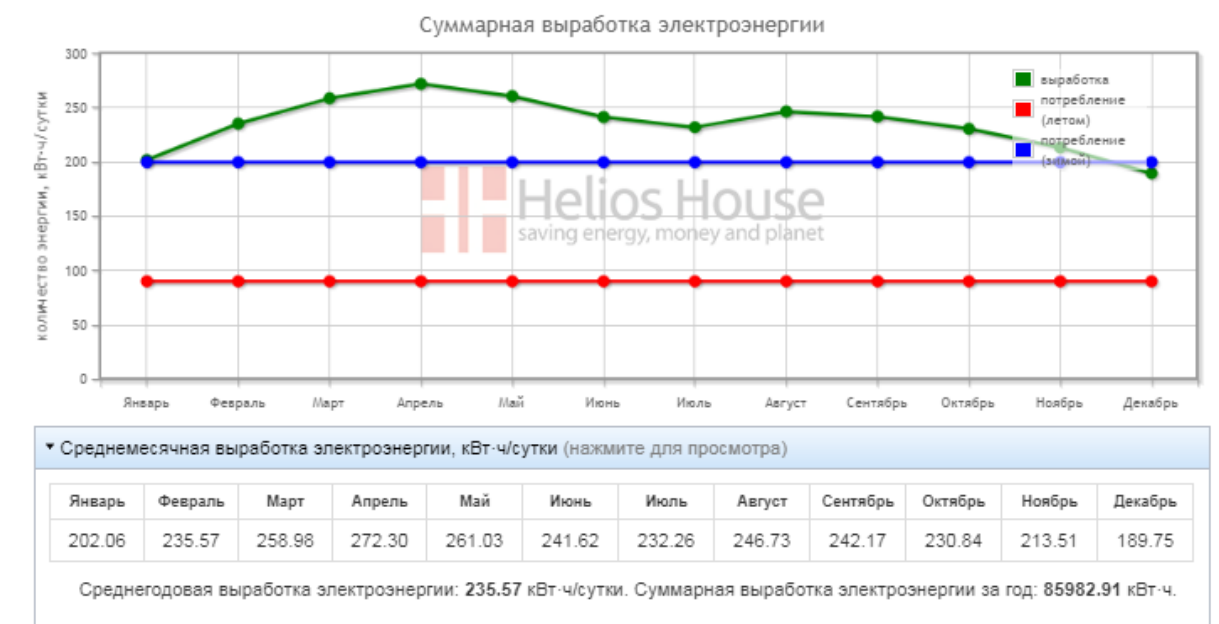
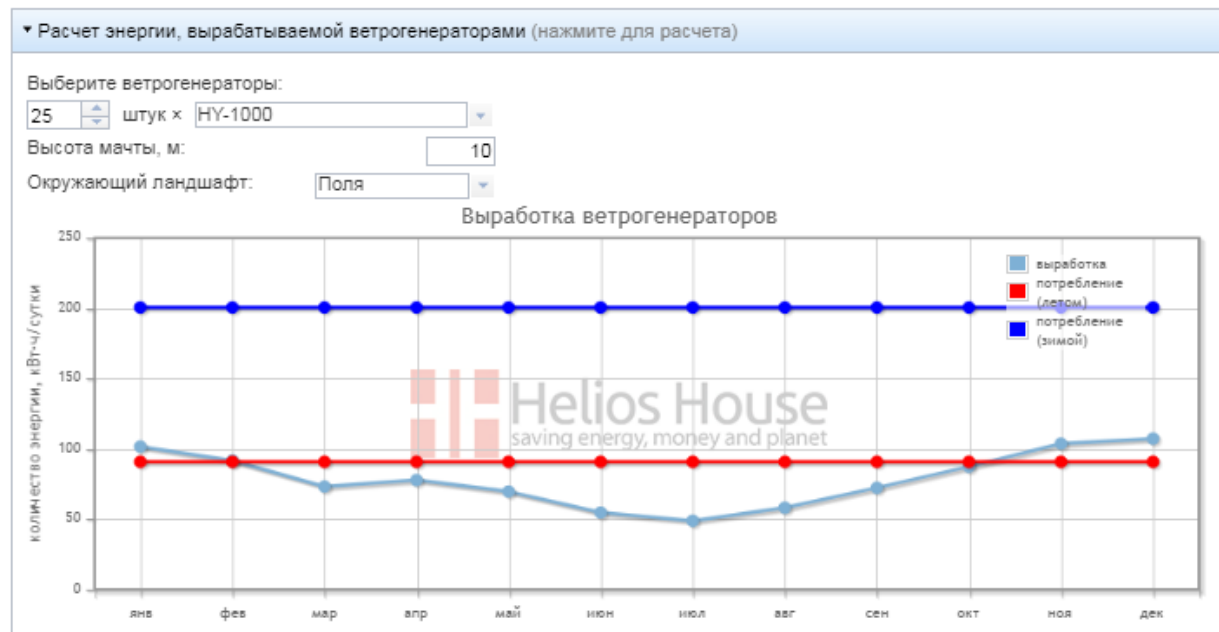
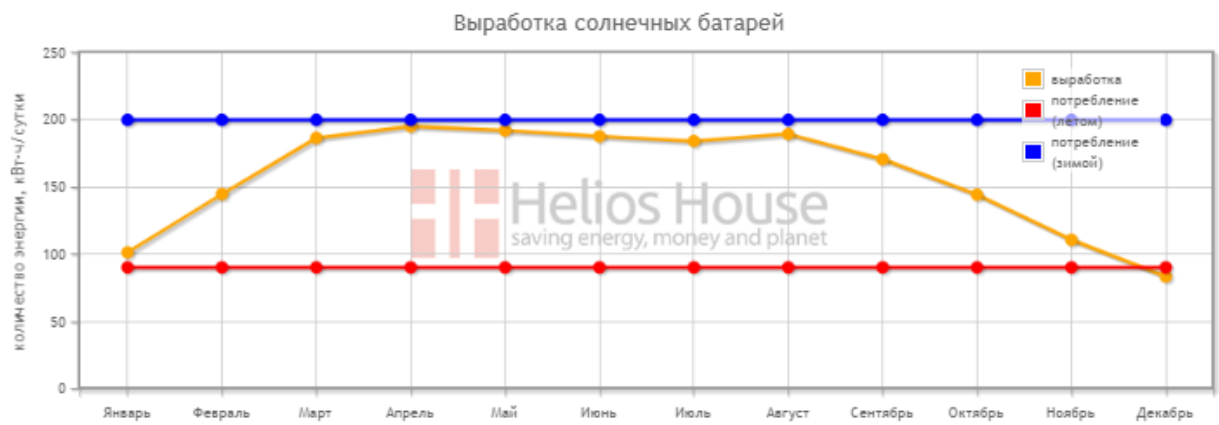


Рис.7. Энергетические балансы ветро – солнечной СЭС

## **Выводы**

5. Минимальная себестоимость электроэнергии гибридной СЭС для всех рассмотренных вариантов составляет 7,9 руб/кВтч.
6. Оптимальным вариантом установленной мощности фото-ветроэлектрической станции является использование 180 фотоэлектрических модулей – 36 кВт и 25 ветроэлектрических установок – 25 кВт.

## **Информационные источники**

1. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : [Электронный ресурс] учебное пособие . Б. В. Лукутин. — 1 компьютерный файл (pdf; 4.0 МВ). — Томск: 2019. — Заглавие с титульного экрана. — Доступ из корпоративной сети ТПУ..Схема доступа: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2019/m001.pdf>.
2. Электронный ресурс <http://www.helios-house.ru> .
3. Электронный ресурс <http://www.SunCalc>.
4. Электронное учебное пособие «Возобновляемые источники энергии». Автор проф. Б.В. Лукутин. – Томск <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2010/01/>

Методические указания к выполнению лабораторной работы №4  
**«ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ  
АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РАЗДЕЛЬНОЙ  
РАБОТОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ»**

**Цель работы:** сформировать рациональные режимы работы генерирующего оборудования автономной фото-дизельной системы электроснабжения (ФДСЭС) коттеджа с учётом оптимизации загрузки и, следовательно, топлива ДЭС.

**Методика выполнения работы:** компьютерное моделирование энергетических балансов системы электроснабжения с фото-электростанцией (ФЭС), аналитическое исследование результатов моделирования, оптимизация установленной мощности фото-дизельной электростанции и режимов её работы по методу направленного перебора вариантов.

**Пояснения к работе.** Исследования проводятся для автономной системы электроснабжения с раздельной работой фотоэлектрической и дизельной частей ФДСЭС [1]. Структурная схема ФДСЭС приведена на рисунке 1.

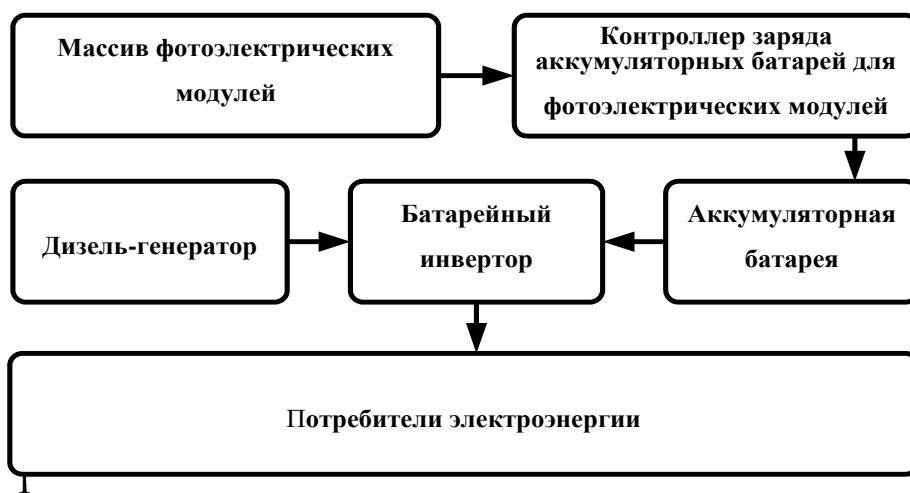


Рис.1. Структурная схема гибридной ФДСЭС  
фотоэлектрической и дизельной частей

Вариант фото-дизельной системы с возможностью раздельной работы дизельной и фотоэлектрической составляющих комбинированной электростанции позволяет максимально использовать солнечную энергию. ФЭС в рассматриваемом варианте питает потребителя через автономный инвертор. Для демпфирования изменений режимов ФЭС в состав энергоустановки включается накопительное устройство. Параметрами

оптимизации данного варианта энергосистемы являются установленная мощность ФЭС и емкость аккумуляторов

### Исходные данные.

1. Географические координаты объекта электрификации: Ростов-на-Дону, Ростовская область, Россия (Рис. 1):

- Широта: 47°13'52" с.ш;
- Долгота: 39°43'23" в.д.

Для определения суточного хода выработки электроэнергии ФЭС воспользуемся программой SunCalc которая показывает движение солнца и фазы солнечного света в течение данного дня в заданном месте. Для расчета задаются характерные сутки - 15 число каждого месяца и отслеживается продолжительность светового дня (<http://suncalc.net>).

В таблице 1 представлены: время заката, зенита и восхода Солнца для характерных суток каждого месяца в г. Ростов на Дону

Таблица 1. Параметры светового дня в зависимости от месяца

месяц	время восхода	время зенита	время заката	$\Delta t, \text{ч}$
Январь	12:05	16:31	20:57	8,52
Февраль	11:28	16:36	21:44	10,16
Март	10:36	16:31	22:26	11,50
Апрель	9:35	16:22	23:09	13,34
Май	8:47	16:18	23:50	15,03
Июнь	8:25	16:22	00:20	15,55
Июль	8:40	16:28	00:15	15,35
Август	9:18	16:27	23:35	14,47
Сентябрь	9:59	16:18	22:36	12,37
Октябрь	10:39	16:08	21:36	10,57
Ноябрь	11:25	16:07	20:48	9,23
Декабрь	12:02	16:17	20:32	8,30

2. Полагая бытовой характер электропотребления, используем типовые суточные графики электрических нагрузок бытовых потребителей, приведённые в электронном ресурсе <https://online-lectric.ru>dbase>graph24>.

Выбирая значения коэффициента сезонности электропотребления из таблицы 2, получим суточные графики электрических нагрузок. Типовые графики для зимы и лета приведены на рисунке 2. Графики приведены в относительных единицах и могут быть переведены в именованные по известной мощности пиковой нагрузки.

Таблица 2. Коэффициенты сезонности для суточных графиков нагрузки децентрализованных потребителей

№, пп	Месяц	Коэффициент сезонности, $k_c$
1	Январь	1,0
2	Февраль	1,0
3	Март	0,8
4	Апрель	0,8
5	Май	0,8
6	Июнь	0,7
7	Июль	0,7
8	Август	0,7
9	Сентябрь	0,9
10	Октябрь	0,9
11	Ноябрь	0,9
12	Декабрь	1,0

Рассматривая совместно потенциальную выработку электроэнергии ФЭС, и текущее суточное электропотребление можно определить оптимальные установленные мощности фотоэлектрической и дизельной частей ФДСЭС, ёмкость накопителей электроэнергии и алгоритм управления ДЭС, ФЭС и емкостным накопителем электроэнергии.

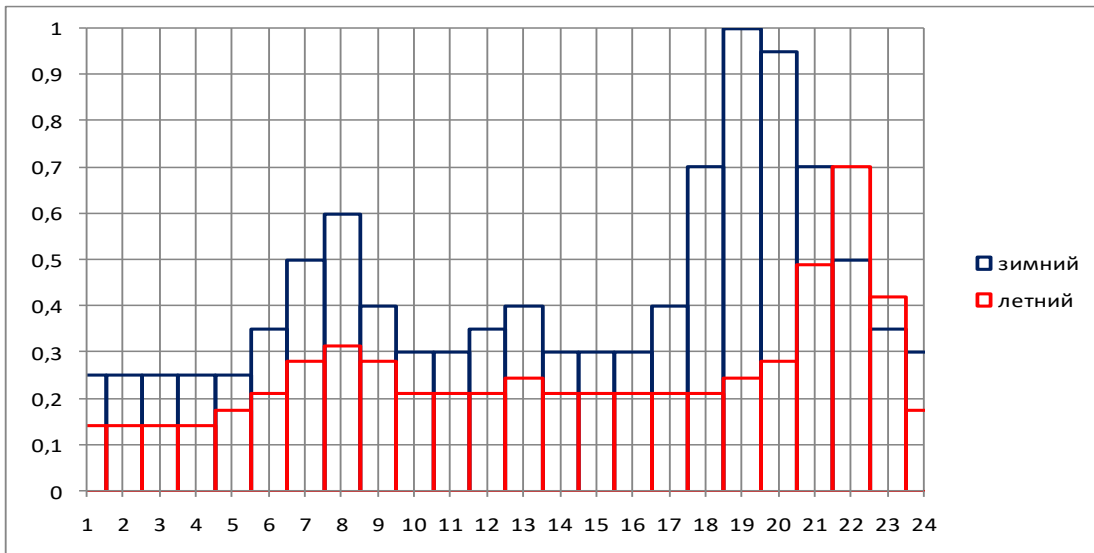


Рис.2. Типовой суточный график электропотребления сельских домов

По известному значению максимальной нагрузки объекта электроснабжения  $P_{\max}$  (кВт) получить суточный график расчетной нагрузки объекта для любого дня года:

$$P_{pi} = \bar{P}_i \cdot P_{\max} (1 \pm C_{pi} \cdot \xi) \cdot k_c, \text{ кВт}$$

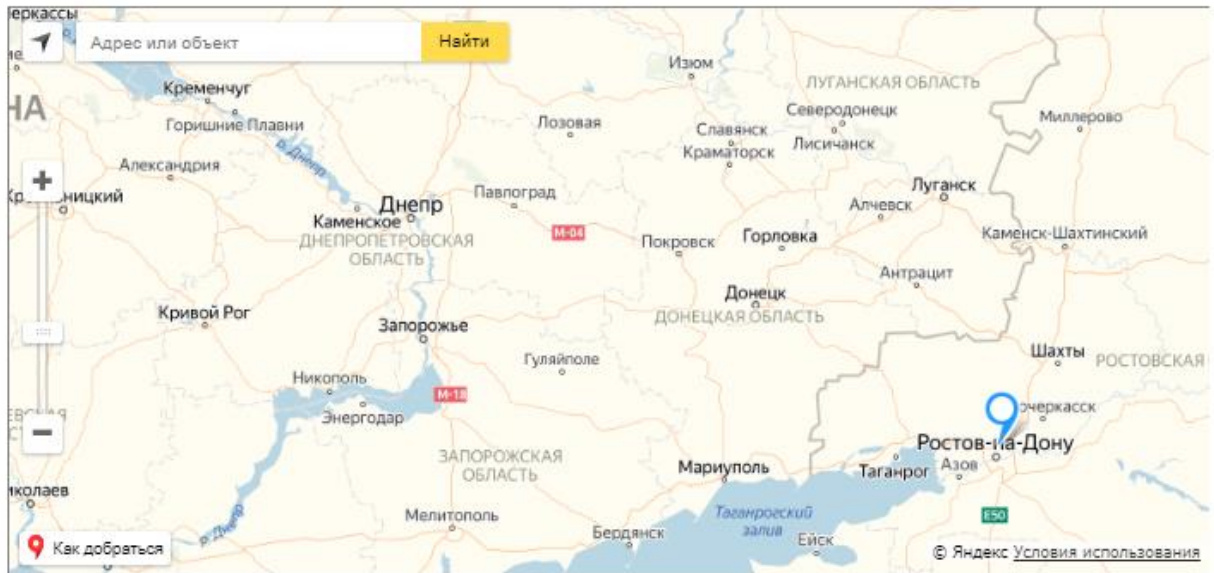
где  $P_{pi}$  – расчетная активная нагрузка на  $i$ -ом часе суточного графика;  $\bar{P}_i$  – математическое ожидание нагрузки на  $i$ -ом часе суточного графика;  $C_{pi}$  – коэффициент вариации нагрузки для  $i$ -ой ступени суточного графика;  $k_c$  – коэффициент сезонности, значения которого представлены в табл.2;  $\xi$  – равновероятная случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Значения  $P_{\max}$  при выполнении данной работы рекомендуется выбирать из диапазона 15 – 30 кВт, характерного для большинства мелких изолированных потребителей.

**Пример оптимизации ФДСЭС.** В качестве примера, для значения вечернего максимума 10 кВт, с учётом средней суточной нагрузки зимнего графика – 0,412 о.е., имеем среднесуточную нагрузку 4,12 кВт. Среднесуточная энергия, соответственно, равна 100 кВтч.

Для летнего периода вечерний максимум равен 7 кВт, средняя суточная нагрузка – 0,275 о.е. или 1,95 кВт. Среднесуточное летнее энергопотребление составит 47 кВтч.

Энергетический баланс фотоэлектрической СЭС для рассматриваемого примера с использованием 100 фотоэлектрических модулей НН-POLY-100 и аккумуляторов ёмкостью 2000 Ач в графическом виде приведён на рисунке 3.



Выберите солнечные батареи:

100 штук x NH-POLY-100W = 69.0 м<sup>2</sup>

Зенитный угол:

Азимут:

Средняя нагрузка, кВт·ч/сутки:

- летом (калькулятор):
- зимой (калькулятор):

Емкость аккумуляторов, Ач:

Напряжение аккумуляторов, В:

Предельная глубина разряда, %:

☉ Время автономной работы:

- летом: 9 часов
- зимой: 4 часов

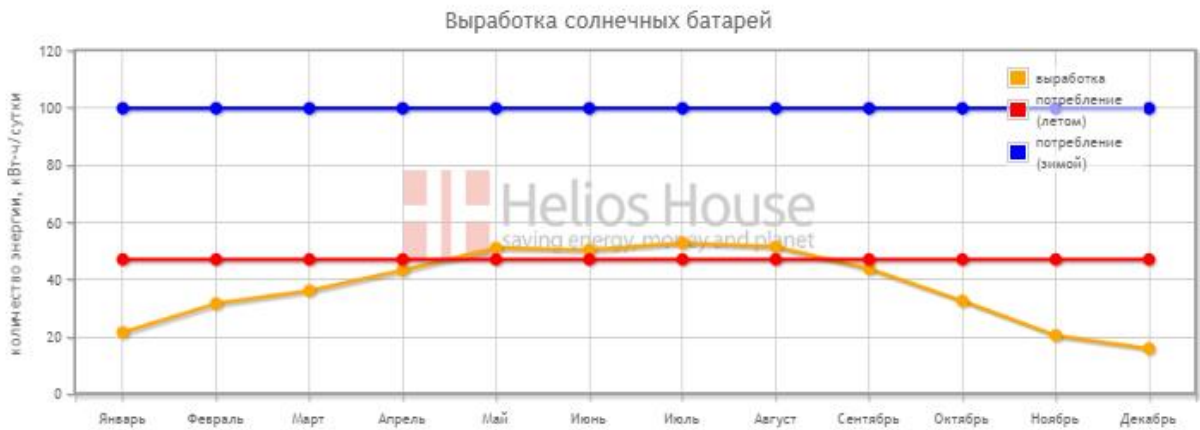


Рис. 3. Энергетический баланс ФЭС.

Солнечная батарея NH-POLY100W - это компактный модуль из поликристаллического кремния, предназначенный для небольших систем энергоснабжения. Это может быть электростанция для дачного дома, обеспечивающая освещение и работу ТВ, или система автономного питания сигнальных знаков на пешеходных переходах. Ячейки помещены под специальное, высокопрочное стекло с легкой рельефностью и герметично залиты специальным составом, гарантирующим герметичность конструкции (IP65),

<http://www.helios-house.ru/polikristallicheskie-solnechnye-batarei/417-solnechnaya-batareya-hh-poly100w/view-details.html>).

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальная мощность, макс. Ватт - 100

Максимальное рабочее напряжение, макс. Вольт - 17.5

Напряжение холостого хода, Вольт - 21.8

Максимальный рабочий ток, Ампер - 5.68

Ток короткого замыкания, А - 6.12

Максимальное напряжение системы, Вольт - 1000

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Фотоэлементы - поликристаллические

Размер поликристаллических ячеек, мм - 156x52 ± 0.5

Степень защиты корпуса, IP - 65

Габаритные размеры, мм - 1030x670x35

Общая площадь, м<sup>2</sup> - 0.69

Вес модуля, кг - 8.28

#### ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Температура хранения, °С - -40 ~+85

Температура эксплуатации, °С - -40 ~+85

Стоимость фотоэлектрического модуля 4950 рублей, стоимость 100 модулей 495000 рублей.

Выберем гелевые аккумуляторы Delta GEL 12 - 200 ([https://mt-energo.ru/akb/delta\\_gel\\_12-200.html](https://mt-energo.ru/akb/delta_gel_12-200.html)) ёмкостью 200 Ач, стоимостью 35589 рублей. Количество аккумуляторов составит 10 штук, что потребует сумму в 711780 рублей.

Как следует из проведённого численного эксперимента, фото-электростанция с указанными параметрами (см. рис.3) может летом работать в автономном режиме, за счёт запасов в аккумуляторах, 9 часов. Длительность светового дня, при этом составляет около 15 часов (см. табл.1) .

Возникает вопрос о рациональном времени работы ФЭС и ДЭС. Очевидно, что ФЭС работает весь световой день (начиная и заканчивая с уровня инсоляции 15-20% от тестовой 1000 Вт/м<sup>2</sup> ). Её энергия должна быть полностью использована потребителем с учётом потерь на энергопреобразование в ФДСЭС.

ДЭС должна обеспечивать потребителя когда энергии ФЭС недостаточно.



Значительные отличия в уровне инсоляции и, соответственно, в выработке электроэнергии ФЭС по сезонам года определяют выбор её установленной мощности достаточной для покрытия летнего электропотребления объекта электрификации. Зимой электроснабжение осуществляется преимущественно от ДЭС с некоторым участием в энергобалансе ФЭС. Установленная мощность ДЭС выбирается по пиковой мощности зимнего графика нагрузки.

**Вариант покрытия летнего вечернего максимума энергией аккумуляторной батареи.** Для лета вечерний максимум продолжается около 3 часов с 21 до 24 часов. За это время потребляется около 16,1 кВтч электроэнергии. Полностью заряженная батарея аккумуляторов ёмкостью 2000 Ач содержит запас электроэнергии 24 кВтч (при напряжении шины постоянного тока 12 В). Разряд аккумуляторов при питании потребителя в продолжение вечернего максимума на 16,1 кВтч доводит их разряд до 33%. Циклический режим работы аккумуляторов снижает срок их службы, причём снижение тем заметнее, чем глубже разряд. Полученное значение глубины разряда можно принять за допустимое.

Ночное потребление электроэнергии целесообразно осуществлять от ДЭС. Время работы ДЭС: с 24 часов до окончания утреннего максимума – 10 часов. С 10 до 21 часа энергообеспечение коттеджа осуществляется от ФЭС. За это время ФЭС должна обеспечить потребителя не менее 25 кВтч электроэнергии.

В соответствии с рис.3, ФЭС летом (июль) вырабатывает около 50 кВтч электроэнергии, что обеспечивает питание нагрузок в дневное время и запас электроэнергии в аккумуляторах для покрытия вечернего максимума: всего 41,1 кВтч. Полагая суммарный КПД энергопреобразования в системе электроснабжения 0,8, делаем вывод о достаточном объёме выработки электроэнергии ФЭС для анализируемого режима работы ФДСЭС в летнее время.

Установленная мощность ДЭС в соответствии с пиковой мощностью зимнего графика нагрузки должна выбираться равной 12 кВт. В этом случае летом, в рассматриваемом режиме работы, она будет загружена только на 15-30%, тогда как энергоэффективной нагрузкой является 70-80% относительно номинальной.

Добиться приемлемых уровней загрузки дизель-генераторов ДЭС возможно используя несколько агрегатов в составе ДЭС.

Следует отметить, что исключение из режима ДЭС летнего вечернего

максимума позволяет уменьшить её установленную мощность, ориентируясь на утренний пик нагрузки -3,2 кВт. Следовательно, в составе ДЭС для летней эксплуатации целесообразно иметь дизель-генератор установленной мощности 4 кВт. Тогда для работы в зимнее время необходимо иметь в составе ДЭС 3 дизельных генератора указанной мощности. Выбор однотипных генераторов удобен с эксплуатационной точки зрения и позволяет вводить их в работу по мере необходимости в соответствии с сезонами года.

В качестве дизельного генератора можно выбрать портативный дизельный электрогенератор Huter LDG3600LE - 4 кВт (<http://generator-shop.ru/katalog/dizelnye-generatory/ot-3-do-9/ldg5000cle>), предназначенный для резервного подключения оборудования, бытовой техники в доме, а также проведения ремонтно-строительных работ, уличных мероприятий и т.д. Дизельные генераторы Huter (Германия) отличаются высоким качеством, простотой в применении и низкой ценой – 75990 рублей.

#### **Технические характеристики**

Номинальная мощность	4,2 кВт	
Пиковая мощность	5,7 кВт	
Частота	50 Гц	
Уровень шума	71 Дб	
Генератор переменного тока	щеточный, синхронный	
Тип двигателя	четырёхтактный, одноцилиндровый	
Топливо	дизель	
Тип запуска	электростартер, ручной стартер	
Система смазки	принудительная	
Тип охлаждения	воздушное, принудительное	
Объем топливного бака	12,5 л	
Расход топлива	290 г/кВтч	
Расход масла	4 г/кВтч	
Габариты	740x480x590 мм	
Вес	98 кг	

**Вариант ночного питания потребителя от аккумуляторов.** В зимнее время ФЭС вырабатывает от 20 до 30 кВтч электроэнергии в сутки. Ночное потребление с 24 до 7 часов составляет 13,5 кВтч, что позволяет выключать ДЭС на это время. Превышение выработки ФЭС над электропотреблением от неё позволяет компенсировать потери на преобразование электроэнергии и поддерживать аккумуляторы в заряженном состоянии. В светлое время суток ФЭС работает только на зарядку аккумуляторов.

Из графика работы ДЭС исключается наиболее неблагоприятный, с точки зрения загрузки, режим.

### **Выводы.**

В ходе выполнения работы изучены способы формирования режимов работы ФЭС и ДЭС фото-дизельной автономной электростанции в зависимости от сезонов года.

Освоены прикладные программы для расчётов солнечных энергоустановок.

Выполнено индивидуальное задание: выбрано энергетическое оборудование и сформированы рациональные режимы для ФДСЭС выбранного населённого пункта.

### **Информационные источники**

1. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : [Электронный ресурс] учебное пособие . Б. В. Лукутин. — 1 компьютерный файл (pdf; 4.0 МВ). — Томск: 2019. — Заглавие с титульного экрана. — Доступ из корпоративной сети ТПУ..Схема доступа: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2019/m001.pdf>.
2. Электронный ресурс <http://www.helios-house.ru> .
3. Электронный ресурс <http://www.SunCalc>.
4. Электронное учебное пособие «Возобновляемые источники энергии». Автор проф. Б.В. Лукутин. – Томск <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2010/01/>

## Приложение

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики ИШЭ

Отделение электроэнергетики и электротехники ОЭЭ

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

### **«ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ»**

Методические указания к выполнению лабораторной работы №4  
по курсу «Интеллектуальные системы электроснабжения с возобновляемыми  
энергоисточниками»

Выполнил:

студент группы 5АМ94

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(дата)

Проверил:

профессор отделения ЭЭ

Лукутин Б.В.

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(дата)