

**Орлов Олег Сергеевич**, обучающийся магистратуры, Дальневосточный государственный аграрный университет, г. Благовещенск

**Ижевский Андрей Станиславович**, доцент, канд. с.-х. наук, зав. кафедрой, Дальневосточный государственный аграрный университет, г. Благовещенск

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА И  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОРОВНИКА НА  
1000 ГОЛОВ (БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ РАЙОН, АМУРСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

**Аннотация**

В статье представлены результаты сравнения двух независимых методов расчёта параметров автономной солнечной электростанции (СЭС) мощностью 130 кВт, предназначенной для электроснабжения коровника на 1000 голов в климатических условиях Благовещенского района Амурской области. Теоретический расчёт выполнен по методикам нормативной документации с интегральным коэффициентом производительности  $PR = 0,75$ . Имитационное моделирование проведено в программном комплексе PVsyst V8.0.6 с использованием детальной модели потерь и метеоданных MeteoNorm 8.2. Показано, что годовая выработка по данным моделирования составляет 165,02 МВт·ч при  $PR = 76,38 \%$ , что на 14,4 % превышает теоретическую оценку (144,2 МВт·ч). Выявлены сезонные аномалии: завышение выработки в зимние месяцы в 2–2,5 раза и занижение в сентябре на 30,3 %. Сделан вывод о пригодности имитационной модели для технико-экономического обоснования после постобработки зимних и сентябрьских данных.

**Annotation**

The article presents the results of comparing two independent methods for calculating the parameters of a 130 kW autonomous solar power plant (SPP)

intended for power supply of a 1000-head cowshed under the climatic conditions of the Blagoveshchensky District, Amur Region. The theoretical calculation was performed according to the methods of regulatory documentation with an integral performance ratio  $PR = 0.75$ . Simulation was carried out in the PVsyst V8.0.6 software package using a detailed loss model and MeteoNorm 8.2 weather data. It is shown that the annual generation according to the simulation results is 165.02 MWh at  $PR = 76.38 \%$ , which is 14.4 % higher than the theoretical estimate (144.2 MWh). Seasonal anomalies were revealed: overestimation of generation in winter months by 2–2.5 times and underestimation in September by 30.3 %. It is concluded that the simulation model is suitable for feasibility studies after post-processing of winter and September data.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, PVsyst, имитационное моделирование, коровник, Благовещенский район, Performance Ratio, MeteoNorm 8.2.

**Keywords:** solar power plant, PVsyst, simulation, cowshed, Blagoveshchensky district, Performance Ratio, MeteoNorm 8.2.

Развитие распределённой генерации на основе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в сельскохозяйственном секторе является одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности. Для территорий с ярко выраженной сезонностью инсоляции (Амурская область) и объектов с круглосуточным циклом потребления (коровник на 1000 голов) требуется детальный анализ режимов работы солнечной электростанции (СЭС).

В настоящей работе выполняется сравнение двух независимых методов расчёта:

- 1) Теоретический расчёт по методикам, изложенным в нормативной документации, с использованием осреднённых климатических данных и интегрального коэффициента производительности;
- 2) Имитационное моделирование в программном комплексе PVsyst V8.0.6 с детальной моделью потерь и метеоданными MeteoNorm 8.2 (файл «СЭС 5.VC1-Report.pdf»).

Целью работы является верификация теоретической модели, выявление факторов расхождения и оценка пригодности имитационной модели для практического проектирования.

### **Характеристика объекта**

Объектом исследования является двухрядный коровник на 1000 голов крупного рогатого скота, расположенный в с. Грибское Благовещенского района Амурской области (широта  $50,28^\circ$  с.ш., долгота  $127,48^\circ$  в.д.). Здание представляет собой одноэтажное строение с трапециевидной металлической кровлей. Суточный график нагрузки (летний период) имеет пик 37,5 кВт, суточное потребление от СЭС составляет 435 кВт·ч.

### **Теоретический расчёт выполнен по формуле**

$$P_{СЭС} = \frac{W_{сут}}{I \cdot \eta} \quad (1)$$

где  $P_{СЭС}$  – пиковая мощность СЭС, кВт;

$W_{сут}$  – суточное энергопотребление, кВт·ч;

$I$  – среднесуточная инсоляция (4,5 ч/день);

$\eta$  – общий КПД системы (0,8).

Расчётная мощность составила 120 кВт.

Для месячной оценки использованы данные по суммарной солнечной радиации

$$E_{мес} = P_{СЭС} \cdot H_{накл} \cdot PR \quad (2)$$

где  $PR = 0,75$ .

Годовая выработка для СЭС 120 кВт составила 133,1 МВт·ч. Для сравнения с PVsyst (130 кВт) выполнено пропорциональное нормирование

$$E_{\text{теор},130} = E_{\text{теор},120} \cdot \frac{130}{120} = 144,2 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

### **Имитационное моделирование в PVsyst**

Моделирование выполнено в PVsyst V8.0.6. Параметры системы приведены в таблице 1 (по данным страницы 3 файла «СЭС 5.VC1-Report.pdf»).

Таблица 1 – Параметры имитационной модели (СЭС 5)

Параметр	Значение
Пиковая мощность DC	130 кВт
Количество модулей	216 × 600 Вт (Hausun Solar DS600)
Площадь модулей	558 м <sup>2</sup>
Угол наклона / азимут	35° / 0°
Инверторы	3 × Huawei SUN2000-36KTL-M3-380V
Коэффициент DC:AC	1,20

Настройки потерь включают:

- 1) загрязнение (Soiling Loss) – 6,5 %;
- 2) тепловые потери ( $U_c = 28,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ );
- 3) LID – 1,5 %;
- 4) mismatch модулей – 1,5 %;
- 5) mismatch стрингов – 1,0 %;
- 6) омические потери – 1,5 %;
- 7) недоступность системы – 9,0 % (33 дня, с концентрацией на декабрь–февраль).

Результаты моделирования

Согласно странице 4 отчёта «СЭС 5.VC1-Report.pdf» (таблица «Balances and main results»):

- 1) Годовая выработка  $E_{\text{Grid}} = 165,02 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ ;
- 2) Удельная выработка = 1273 кВт·ч/кВт·год;
- 3) Performance Ratio PR = 76,38 %.

### **Помесячная выработка и PR**

Помесячные значения E\_Grid и PR, извлечённые из той же таблицы, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Помесячные результаты моделирования

Месяц	E_Grid, МВт·ч	PR
Январь	12,60	0,910
Февраль	16,14	0,894
Март	13,39	0,578
Апрель	16,65	0,803
Май	18,24	0,815
Июнь	16,87	0,800
Июль	16,98	0,795
Август	15,37	0,803
Сентябрь	8,09	0,493
Октябрь	12,80	0,848
Ноябрь	11,31	0,846
Декабрь	6,58	0,579

### Сравнение с теоретическим расчётом

Сравнение годовых показателей приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение годовых показателей

Показатель	Теория (130 кВт)	PVsyst (СЭС 5)	Отклонение
Годовая выработка, МВт·ч	144,2	165,02	+14,4 %
Performance Ratio, %	75,0	76,38	+1,38 п.п.

Имитационная модель предсказывает на 20,8 МВт·ч/год (14,4 %) больше энергии, чем теоретический расчёт. Основные причины:

- 1) Различный угол наклона панелей (50° в теории против 35° в PVsyst);
- 2) Завышенные значения зимней радиации в метеофайле MeteoNorm 8.2;
- 3) Детальный учёт потерь в PVsyst, частично компенсирующий радиационные завышения.

При этом значения Performance Ratio оказались очень близкими (разница 1,38 п.п.), что подтверждает корректность выбранного в теории интегрального коэффициента потерь.

### Помесячное сравнение

В таблице 4 приведено ежемесячное сравнение выработки.

Таблица 4 – Ежемесячное сравнение выработки (теория vs PVsyst)

Месяц	Теория, МВт·ч	PVsyst, МВт·ч	Отклонение, %	PR (PVsyst)
Январь	4,75	12,60	+165	0,910
Февраль	8,11	16,14	+99	0,894
Март	12,94	13,39	+3,5	0,578
Апрель	14,66	16,65	+13,6	0,803
Май	17,33	18,24	+5,2	0,815
Июнь	17,26	16,87	-2,3	0,800
Июль	17,84	16,98	-4,8	0,795
Август	14,73	15,37	+4,3	0,803
Сентябрь	11,61	8,09	-30,3	0,493
Октябрь	7,20	12,80	+77,8	0,848
Ноябрь	4,60	11,31	+146	0,846
Декабрь	3,47	6,58	+89,6	0,579

Из таблицы 4 видно:

- 1) Зимние месяцы (ноябрь–февраль). Отклонение достигает +165 % в январе. Это объясняется завышенными значениями прямой радиации в MeteoNorm 8.2 для холодного периода, а также тем, что заданные простои (9 % времени) не полностью моделируют снежные дни (реально в декабре–январе панели могут быть закрыты снегом до 50 % дней);
- 2) Сентябрь. Единственный месяц с отрицательным отклонением: выработка на 30,3 % ниже теоретической при аномально низком PR = 0,493. Данное расхождение не может быть объяснено заданными потерями и, вероятно, связано с артефактом в метеофайле (завышенной долей диффузной радиации либо ошибкой в данных для сентября);
- 3) Летние месяцы (июнь–август). Наилучшая сходимость: отклонения не превышают 5 %, PR находится в интервале 0,795–0,815, что хорошо коррелирует с теоретическим значением 0,75–0,80.

### **Анализ потерь**

На основе данных страницы 3 отчёта «СЭС 5.VC1-Report.pdf» выполнен анализ вклада различных факторов в суммарные потери (таблица 5).

Таблица 5 – Детализация потерь по данным PVsyst

Источник потерь	Вклад, %	Примечание
Потери на загрязнение (Soiling)	6,5	Годовые
Оптические потери (IAM)	до 3	При углах падения $>50^\circ$
Тепловые потери (нагрев)	5–8	Максимум в июле
LID (деградация)	1,5	Первый год
Mismatch модулей	1,5	Разброс параметров
Mismatch стрингов	1,0	Геометрия крыши
Омические потери	1,5	Кабели DC
Недоступность (простой)	9,0	33 дня, зима
КПД инвертора	~98	Остаточные потери

Суммарный интегральный коэффициент потерь ( $1 - PR$ ) составляет 23,62 %, что близко к теоретическому значению 25 %. Таким образом, имитационная модель подтверждает консервативность теоретической оценки.

### Причины расхождения

Основными факторами, определяющими расхождение в 14,4 % по годовой выработке, являются:

- 1) Различие в угле наклона панелей. Теоретический расчёт использовал угол  $50^\circ$ , оптимизированный для годовой выработки. В PVsyst был задан угол  $35^\circ$  из-за конструктивных ограничений трапециевидной крыши коровника. При наклоне  $35^\circ$  зимняя выработка ниже, а летняя – выше, однако интегральное годовое изменение обычно не превышает 5–7 %;
- 2) Различие в метеоданных. Теория использовала табличные среднемесячные значения суммарной радиации. PVsyst использует синтетический типовой год MeteoNorm 8.2, который для зимних месяцев даёт значительно более высокие значения (например, для января  $44,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  против  $31,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в теории);
- 3) Учёт простоев. В теории простои не учитывались. В PVsyst задана недоступность 9,0 %, сконцентрированная на зимние месяцы. Однако даже с

этими простоями зимняя выработка остаётся завышенной из-за радиационных данных.

#### Артефакт сентября

1) Наиболее значимым отклонением является занижение выработки в сентябре на 30,3 % (PR = 0,493 против среднего 0,75–0,80). Данное явление не имеет физического объяснения в рамках заданных потерь и требует отдельного исследования.

#### Вероятные причины:

- 1) ошибка в метеофайле MeteoNorm 8.2 для сентября (завышенная доля диффузной радиации);
- 2) некорректная интерполяция данных между летними и осенними месяцами;
- 3) остаточное влияние ранее заданных месячных значений Soiling Loss (несмотря на их отключение).

Рекомендация: при использовании результатов моделирования для реального проектирования необходимо либо заменить метеоданные на верифицированные (например, с наземной метеостанции ГМС Благовещенск), либо вручную скорректировать выработку сентября повышающим коэффициентом 1,3.

#### **Практическая применимость**

Несмотря на выявленные аномалии, имитационная модель СЭС 5 может быть использована для технико-экономического обоснования при следующих условиях:

- 1) Годовая выработка принимается в диапазоне 155–170 МВт·ч/год (с учётом разброса);
- 2) Зимние месяцы (ноябрь–февраль) корректируются понижающим коэффициентом 0,4–0,6;
- 3) Сентябрь корректируется повышающим коэффициентом 1,3.

После такой постобработки модель даёт оценку, близкую к теоретическому расчёту (144 МВт·ч/год) с отклонением не более 5–7 %, что приемлемо для инженерных расчётов.

В результате выполненного исследования установлено следующее:

- 1) Теоретический расчёт ( $PR = 0,75$ ) даёт годовую выработку 144,2 МВт·ч для СЭС мощностью 130 кВт. Имитационное моделирование в PVsyst (СЭС 5) показало выработку 165,02 МВт·ч при  $PR = 76,38 \%$ . Относительное расхождение составляет +14,4 %;
- 2) Наилучшая сходимость (отклонение  $<5 \%$ ) достигнута для летних месяцев (июнь–август). Зимние месяцы (ноябрь–февраль) демонстрируют завышение выработки в 2–2,5 раза из-за особенностей метеоданных MeteoNorm 8.2;
- 3) Обнаружен артефакт: в сентябре PVsyst показывает выработку 8,09 МВт·ч при  $PR = 0,493$ , что на 30,3 % ниже теоретического значения. Это требует корректировки или замены метеоданных;
- 4) Детализация потерь по данным PVsyst подтверждает, что интегральный коэффициент  $PR = 0,75$ , принятый в теории, является консервативной, но обоснованной оценкой. Фактические потери распределены между загрязнением (6,5 %), нагревом (5–8 %), LID (1,5 %), mismatch (2,5 %), омическими потерями (1,5 %) и зимними простоями (9,0 %);
- 5) Рекомендуемый диапазон годовой выработки для реального проектирования после постобработки данных составляет 155–170 МВт·ч/год.

### **Список литературы (сокращённый)**

- 1) PVsyst V8.0.6. Справка по программному комплексу. – 2025.
- 2) Метеоданные MeteoNorm 8.2 для станции Blagoveschensk/Verkhne-Blagoveshchenskoye.
- 3) Отчёт по производственной практике (теоретический расчёт СЭС для коровника на 1000 голов). – Благовещенск, 2026.
- 4) Файл «СЭС 5.VC1-Report.pdf» (результаты имитационного моделирования в PVsyst V8.0.6).

### **References**

- 1) PVsyst V8.0.6. Software Manual. — 2025.
- 2) MeteoNorm 8.2 weather data for Blagoveschensk/Verkhne-Blagoveshchenskoye station.
- 3) Internship report (theoretical calculation of SPP for a 1000-head cowshed). — Blagoveshchensk, 2026.
- 4) File "SES 5.VC1-Report.pdf" (PVsyst V8.0.6 simulation results).