

Интервальные синтез и анализ систем автоматического управления **(Судник Ю.А.)**

Большинство реальных систем автоматического управления (САУ) имеют неопределённые параметры, внешние возмущения и начальные условия, которые имеют интервалы с заданными границами. Из-за невозможности достаточно точного описания, например, мобильных сельскохозяйственных агрегатов (МСА) как объектов управления (ОУ), интервальная неопределённость присуща любому их виду – непрерывным, дискретным, линейным, нелинейным, распределённым.

Для решения задач идентификации таких ОУ, анализа и синтеза их САУ широко используют методы имитационного моделирования. При этом в качестве моделей применяют в основном детерминированные или стохастические, использование которых (из-за введения различных допущений и имеющихся погрешностей измерений) не позволяет гарантировать точность результатов исследований. Так, известная система предпосылок, в основном статистического характера (детерминированность входных переменных параметров, равноточность и некоррелированность выходных, нормальный закон их распределения), на которых базируется классический регрессионный анализ, широко применяемый для идентификации ОУ, в реальных задачах нередко не соблюдается. К тому же, в известных методах их моделирования не всегда учитываются погрешности и ошибки измерений, величины которых в отдельных случаях могут быть соизмеримы с уровнями контролируемых полезных сигналов [103].

В последнее время в качестве вычислительных методов, гарантирующих точность результатов исследований, используют аппарат интервальной математики, в котором реальные числа a, b, \dots заменяют такими, как $[a], [b], \dots$.

Под интервалом $[a]=[a^-,a^+], a^- \leq a^+$ следует понимать замкнутое ограниченное подмножество R всех вещественных чисел x вида $[a]=[a^-,a^+]=\{x \in R \wedge a^- \leq x \leq a^+\}$, то есть a может принимать любое значение внутри него, левая и правая границы которого обозначаются соответственно, как a^- и a^+ . Существуют правила [104], [70] выполнения арифметические операций с интервалами, оперирования с их функциями, векторами и матрицами.

Разработан метод интервальной идентификации ОУ, позволяющий использовать нестатистический подход. Так, измеренное значение сигнала $\tilde{y}(x)$ на его выходе имеет вид: $\tilde{y}(x)=y(x)+e_y$, где $y(x)$ - истинное значение сигнала на выходе; x - значение сигнала на входе; e_y - помеха на выходе обусловленная ошибками измерений, случайными, систематическими, прогрессирующими погрешностями преобразователей, различными неопределенностями, шумами, неконтролируемыми возмущениями и др.

Примем также допущения относительно значения помехи e_y : измерение точных (истинных) значений выходного сигнала невозможно из-за помехи, искажающей его истинное значение; амплитуда помехи ограничена и может принимать любые значения в заданном интервале $[-\Delta;+\Delta]$, причем абсолютная погрешность Δ известна, то есть $e_y < |\Delta|$; закон распределения помехи не определяется, нередко он имеет неслучайный характер.

Объект управления, для которого свойственны изложенные предпосылки, называют с ограниченной по амплитуде ошибкой или с интервальной неопределенностью.

Алгоритм построения интервальных моделей ОУ предусматривает:

проведение эксперимента, принятие математической и её оценка, определение интервальных и точечных параметров, адекватности и характеристика точности, проверка значимости коэффициентов и прогноз выходных сигналов.

Классическая процедура моделирования заключается в определении значений выходного сигнала при подаче на вход различных воздействий. Рассмотрим вариант построения интервальных моделей базовых МСА как ОУ при наличии ошибок измерений только выходного сигнала (допущение – ошибки определения входных сигналов отсутствуют).

Проведение эксперимента: допустим ОУ содержит вектор \vec{x}_i . В результате с N опытами получены значения $\vec{x}_i, [y_i]$, где каждому будет соответствовать интервал $[y_i]$, т. е. $x_i \Rightarrow [y_i]$, где $i=1, \dots, N$ - число опытов, наблюдений входного вектора \vec{x}_i и выходной переменной $[y_i]$.

При сформулированных выше предпосылках истинное значение сигнала y_i на выходе в каждом из опытов гарантированно принадлежит заданному интервалу $[y_i]$: $y_i - \Delta \leq y_i \leq y_i + \Delta; e \Rightarrow \Delta$.

Математическая модель ОУ:

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}); \quad (127)$$

где a_j - неизвестные параметры (коэффициенты); $\phi_j(\vec{x})$ - известные базисные функции модели.

При этом в условиях интервальной неопределённости $[y_i]$ существует бесчисленное множество параметров a_j модели, которые принадлежат некоторому множеству Ω_a (Рисунок 64а): $a_j \in \Omega_a$

Так как область Ω_a имеет сложную форму, то обычно её заменяют

прямоугольной призмой $[\vec{a}]$, которая определяет отдельные интервалы коэффициентов $a_j: [\vec{a}] = [a_1], [a_2], \dots, [a_n]$.

На Рисунок 64а такая замена в виде прямоугольника показана пунктирными линиями.

Таким образом, в методе интервальной идентификации задача построения модели ОУ заключается в нахождении множества Ω_a , которое не противоречит экспериментальным данным. При этом интервальная модель (136) не противоречит экспериментальным данным только тогда, когда она проходит через все N- интервалы (Рисунок 64б).

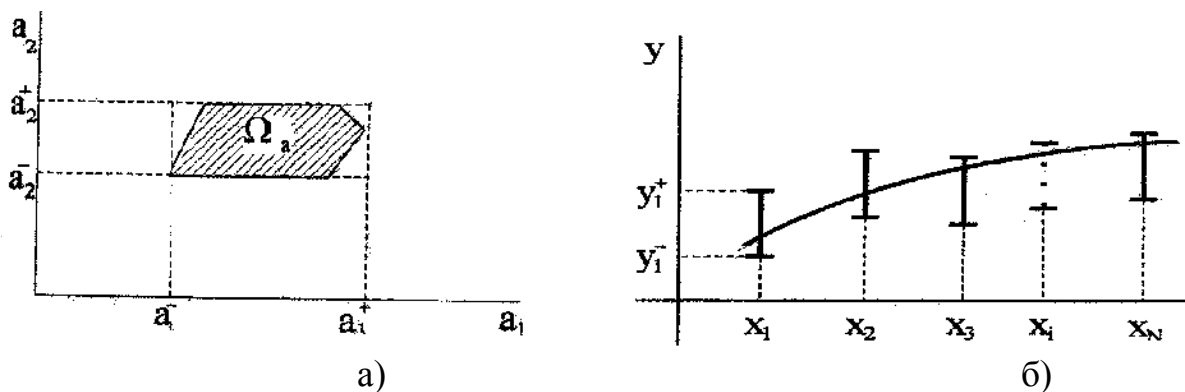


Рисунок 64. – Область множества значений параметров модели МСА как ОУ (для случая $n=2$) и модель ОУ, адекватная интервальным измерениям

Таким образом, в методе интервальной идентификации задача построения модели ОУ заключается в нахождении множества Ω_a , которое не противоречит экспериментальным данным.

При этом интервальная модель (136) не противоречит экспериментальным данным только тогда, когда она проходит через все N- интервалы (Рисунок 64б).

$$\sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(\vec{x}) \in [y_i^-, y_i^+]; \text{ или } y_i^- \leq \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(\vec{x}) \leq y_i^+, i = \overline{1, N}; \quad (128)$$

Для фиксированных значений \vec{x}_i (для каждого i -го опыта) соотношения (137) являются системой линейных неравенств (в пространстве

параметров a_j), решив которые можно найти множество Ω_a допустимых моделей исследуемого ОУ.

Область Ω_a является выпуклой фигурой в виде многогранника (Рисунок 64а), а вектор неизвестных параметров \vec{a}_j принадлежит области Ω_a , то есть $\vec{a}_j \in \Omega_a$ если число опытов $N \rightarrow \infty$, то $\lim \Omega_a \rightarrow a_o$ (a_o -точечная оценка параметра).

Интервальная оценка параметров (коэффициентов) модели определяется из условия:

$$a_j^- = \min a_j \text{ и } a_j^+ = \max a_j, \text{ причем } \vec{a} \in \Omega_a, a; a_j \in [a_j^-, a_j^+], j = \overline{1, n}$$

Точечная оценка a_j - любой вектор \vec{a} , в области Ω_a . Так, средняя:

$$a_j = \frac{a_j^- + a_j^+}{2} \text{ при } j = \overline{1, n}.$$

Выбранная модель (137) не должна противоречить экспериментальным данным и требует включения всех необходимых базисных функций $\varphi_j(\vec{x})$. При этом, если множество $\Omega_a \neq 0$, то она считается адекватной объекту. Точность δ модели ;

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+ + y_i^-};$$

При $\delta \leq \varepsilon$ она считается работоспособной и удовлетворяющей допустимому значению ошибки ε .

Если интервал параметра $[a_j] = [a_j^-, a_j^+] \neq 0$, то коэффициент a_j является значимым и должен быть включенным в модель (137).

В противном случае a_j исключается из нее, так как он может иметь нулевое значение.

Точечный прогноз выходного сигнала ОУ описывается выражением:

$$\hat{y}_o(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}), \quad \text{где } a_j - \text{точечная оценка параметров ОУ.}$$

Интервальный прогноз выходного сигнала ОУ описывается выражением: $[y(\vec{x})] = [y^-(\vec{x}), y^+(\vec{x})]$;

Определяется он по зависимостям:

$$y^-(\vec{x}) = \min_{j=1}^n \sum a_j \phi_j(\vec{x}) \quad \text{при } a_j \in \Omega_a;$$

$$y^+(\vec{x}) = \max_{j=1}^n \sum a_j \phi_j(\vec{x}) \quad \text{при } a_j \in \Omega_a;$$

Таким образом, представленный алгоритм построения моделей МСА как ОУ позволяет комплексно оценить их основные параметры и характеристики.

Представим модель МСА (как сложный динамический объект) в виде соединения статического и динамического звеньев, взаимосвязанных между собой. Статическое звено, согласно (136), описывается уравнением

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j(\vec{x}), \quad t = \overline{1, N}; \quad (129)$$

а динамическое – разностными линейными уравнениями:

$$y(t) = \sum_{j=1}^m b_j \cdot y(t-j) + \sum_{j=0}^m c_j x(t-j), \quad t = \overline{1, N}; \quad (130)$$

где b_j, c_j - неизвестные параметры.

Рассмотрим случай, когда

$$\tilde{y}(t) = y(t) + e_y;$$

$$\tilde{x}(t) = x(t) + e_x; \quad (131)$$

где e_x - помеха на входе ОУ.

Примем известными структуру модели, параметры системы a_j, b_j, c_j с точностью до интервалов, а также величины n, m и функции φ_j . Выражения (138), (139), (140) являются достаточно универсальными и позволяют моделировать широкий класс МСА как сложных динамических ОУ.

Для данного случая задача моделирования заключается в расчете интервального прогноза значения сигнала на его выходе:

$$[y(t)] = [y^-(t), y^+(t)], \quad t = \overline{1, N} \quad \text{при заданных на входе } [\vec{x}(t)] = [x^-(t), x^+(t)] \quad \text{и}$$

интервалах параметров $[a_j], [b_j], [c_j]$. При этом должны выполняться

$$\text{условия: } \hat{y}(t) \in [y(t)], \delta[y(t)] \Rightarrow \min, t = \overline{1, N};$$

где $\delta[y(t)]$ - ширина интервала прогноза значений выходного сигнала.

Интервальный прогноз значений выходных сигналов для моделей статики (138) и динамики (139) соответственно:

$$[y] = \sum_{j=1}^n [a_j] \cdot \phi_j \{ [\vec{x}] \}; \quad (132)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{j=1}^m [b_j][y(t-j)] + \sum_{j=0}^m [c_j][x(t-j)]. \quad (133)$$

Если $\delta[y(t)] \leq \varepsilon$, условие требуемой точности модели выполняется, если же больше, то необходимо снизить уровень неопределенности за счёт усложнения структуры модели или увеличения числа опытов и интервалов входных сигналов. Аналогичный алгоритм оценки точности моделирования

целесообразно использовать и для моделей динамики.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет моделировать МСА, как сложные динамические ОУ и контролировать точность их построения, что предопределяет создание эффективных по качеству и устойчивости САУ.

На мобильный агрегат действует многообразие различных контролируемых и неконтролируемых возмущений, функцию минимизации суммарного эффекта которых должна качественно выполнять САУ. Для интервального анализа проведена оптимизация качества управления (технологическими и энергетическими режимами работы) МСА согласно критерию минимизации значений дисперсии $[D_y]$ или среднеквадратического отклонения $[\sigma_y]$ управляемой величины:

$$[D_y] = [\sigma_y]^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [|\Phi_{YF}(j\omega)|]^2 S_{ff}(\omega) d\omega \Rightarrow \min,$$

$$\forall |\Phi_{yf}(j\omega)| \in [|\Phi_{yf}^-(j\omega)|, |\Phi_{yf}^+(j\omega)|], \quad (134)$$

где $[|\Phi_{YF}(j\omega)|]$ - интервал модуля комплексной частотной характеристики системы, $S_{ff}(\omega)$ - спектральная плотность эквивалентного, приведенного непосредственно к выходу объекта, возмущения $F(t)$.

Особенностью $F(t)$ является то, что оно доступно для непосредственного измерения и позволяет его корреляционную функцию и спектральную плотность оценивать экспериментально. Для реализации этого возмущения необходимо прекратить управление объектом как ручное, так и автоматическое.

Для нахождения точных границ интервала (143) необходимо вычислить наибольшее и наименьшее значения D_y при изменении $|\Phi_{YF}(j\omega)|$ в известных пределах. По аналогии с точечными оценками в теории автоматического управления пределы в виде интервала ее частотной

характеристики можно записать:

$$[\Phi_{\text{yf}}(j\omega)] = \frac{1}{\{1 + [W_{\text{oy}}(j\omega)][W_{\text{yy}}(j\omega)]\}}; \quad (135)$$

где $[W_{\text{oy}}(j\omega)], [W_{\text{yy}}(j\omega)]$ - интервалы частотных характеристик объекта и узла управления.

Непосредственное же использование точечной оценки частотных характеристик для (143) и (144) в рассматриваемом случае будет недостаточно эффективным, так как такие оценки на практике являются, как правило, неточными и носят неопределённый характер. В связи с этим для МСА как ОУ необходимо использование интервальных моделей амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-фазовых (АФХ) характеристик с интервалом множества.

Примеры построения по результатам эксперимента интервальных АЧХ и АФХ МСА приведены на Рисунок 65а и Рисунок 65б. При этом, $A^+(w), A^-(w), \overset{i}{A}(w), A_{\text{Э}}(w)$ - соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АЧХ и экспериментальная (Рисунок 65а), полученная на моделирующем стенде, а $A^+(w), A^-(w), \overset{i}{A}(w), A_{\text{Э}}(w)$ - соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АФХ и экспериментальная (Рисунок 65б), полученная на моделирующем стенде.

Различные расчёты и графические построения интервального анализа были осуществлены с использованием математического пакета «Matlab», позволяющего проводить анализ и синтез систем автоматического управления.

Согласно исследованиям Ротача В. Я., установлено, что существенный эффект автоматизированного управления достигается тогда, когда спектр $S_{\text{ff}}(w)$ эквивалентного возмущения находится в низкочастотном диапазоне

($0 < \omega < \omega_1$), где характеристика $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 \ll 1$.

Однако, как показал анализ наших экспериментов, диапазон возмущающих воздействий различных МСА включает не только низкочастотный спектр ($\omega \in [0, \omega_1]$) фильтрации возмущающих воздействий, где $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 < 1$, но и существенную часть резонансных частот ($\omega \in [\omega_1, \omega_2]$), где $|\Phi_{YF}(j\omega)|^2 > 1$, что не позволяет использовать известный подход минимизации дисперсии выходной величины.

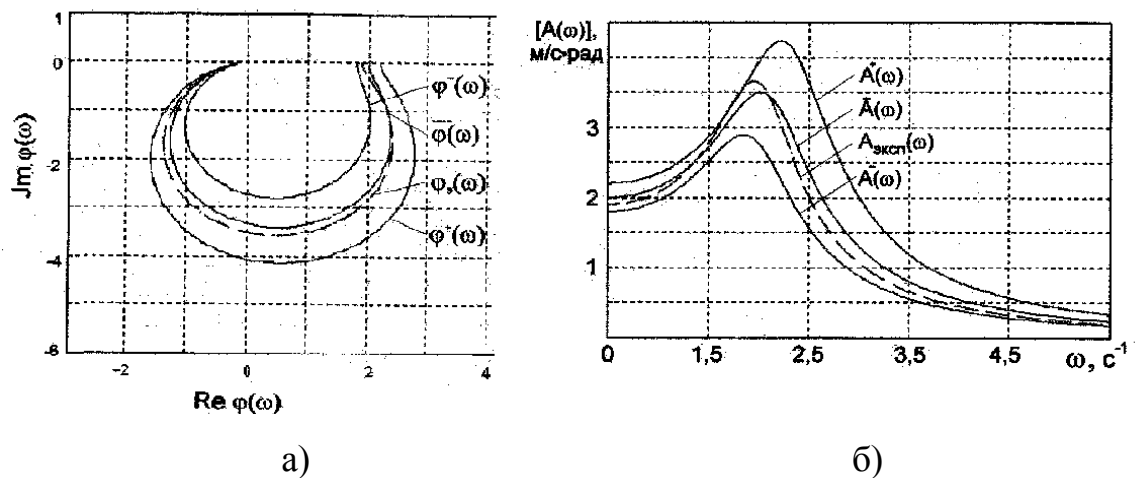


Рисунок 65. – Интервальные амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики ОУ

С помощью интервального анализа установлено, что для частотного диапазона возмущений реальных МСА справедливо правило уменьшения

интервала отношения $\left[\frac{T_u}{k_{yу}} \right]$ с целью минимизации значений дисперсии $[D_y]$.

Для определения конкретных значений параметров настройки узла управления существуют различные методы, наиболее эффективным из которых является частотный подход с критерию минимизации $[a_o]^{-1}$, используемому для оптимизации параметров технических средств управления. Намного упрощается оценка оптимальных параметров настройки с применением известного (для точечной оценки параметров) метода вспомогательной функции f (согласно исследованиям Шаврова А.В.

и Солдатов В.В.), на основе которого определены выражения для интервальной $[f]$ и параметров настройки узла управления. Рассмотренные интервальные оценки АЧХ и АФХ позволяют проводить анализ устойчивости, качества и синтез СУ с учётом неточностей описания ОУ.

Используя такие оценки, можно применять частотные критерии, например Найквиста, для анализа устойчивости и качества стохастических САУ режимами работы МСА.

Расположением интервальной АФХ разомкнутой системы $W(j\omega)$ и точки с координатой $(-1; j0)$ определяют условия критерия устойчивости Найквиста для стохастических систем: замкнутая система устойчива, если все точки интервальной оценки не охватывают точку с координатами $(-1, j0)$, и неустойчива, когда все точки (часть точек) интервальной оценки охватывают точку с координатами $(-1, j0)$.

Использование интервальной оценки для анализа устойчивости систем может предъявить более жёсткие требования к точности и структуре моделей объекта и узла управления, но при этом гарантировать результат применения частотного критерия. Предлагаемый метод интервального анализа распространяется и на многомерные системы [55].

Интервальные модели позволяют оценивать возможные значения показателей качества (время регулирования, статическая ошибка и др.) переходных и установившихся процессов в САУ, а также определять влияние ошибок идентификации ОУ на точность этих показателей, для оценки которых определяют реакцию интервальной модели на входное, например, скачкообразное, гармоническое, ступенчатое псевдослучайное воздействия. При этом строятся верхняя и нижняя границы интервала прогноза на выходную величину ОУ, по которым определяют интервальные оценки показателей качества функционирования САУ МСА [46], [105].

Использование детерминированных и стохастических моделей ОУ не позволяет гарантировать точность результатов исследования. Метод

интервальной идентификации ОУ, позволяет использовать нестатистический подход. Интервальные оценки АЧХ и АФХ ОУ позволяют гарантировать результат исследования и проводить анализ устойчивости, качества и синтез автоматической системы с учётом неточностей описания ОУ.

**Эксплуатация солнечных сетевых фотоэлектрических установок
потребителей системы централизованного электроснабжения
(Лештаев О.В., Стушкина Н.А., Загинайлов В.И.)**

Большинство электропотребителей нашей страны получают высококачественную электроэнергию (ЭЭ), произведенную согласно ГОСТ 32144 – 2013, от высоконадежной системы централизованного электроснабжения (СЦЭС). Однако, такое производство ЭЭ, связано с низко энергоэффективным использованием – сжиганием углеродных топлив: нефти, природного газа угля [23] и экологическим вредным воздействием на атмосферу планеты [106]. Кроме того, потребление энергии в современном мире постоянно растет, постоянно растут и цены на энергоносители. Поэтому многие компании в мире: Tesla, Солар, Хевел и др. стараются как можно скорее стать на путь альтернативной энергетики и повысить энергоэффективность производства ЭЭ и понизить её себестоимость, и соответственно улучшить экологию производства электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одним из перспективных направлений альтернативной энергетики является солнечная энергетика. В России развитием и продвижением солнечных технологий занимается компания Хевел. Установленная мощность проектов, реализованных компанией в России, Казахстане и Монголии, составляет 1300 МВт. Данные установки работают как на отдельные объекты (монастырь на острове Валаам, автозаправочные станции) так и на СЦЭС (Волгоградская СЭС, Ахтубинская СЭС).

В соответствии, с Концепцией развития и использования

нетрадиционной энергетики, в нашей стране предлагается провести модернизация СЦЭС путем внедрения распределенной генерации [107] с использованием ВИЭ и [интеллектуальных сетей Smart grid](#) [108], [109].

Одним из первых проектов внедрения ВИЭ в СЦЭС является сетевая солнечная фотоэлектрическая установка (СФУ), эксплуатируемая на базе компании GOOD-WOOD с 2013 года [110], основное производство которой находится в Московской области. Компания специализируется на производстве экологически чистых клееных домов из бруса, с евроотделкой помещений и установкой в них современного оборудования и мебели. Предприятие не только полностью обеспечено тепловой энергией, производимой из отходов производства (опилки, опилы) и используемой на собственные нужды производства, отопление и горячее водоснабжение, но и производит топливные брикеты на продажу.

Электроснабжение предприятия осуществляется от двух ТП 10/0,4кВ, мощностью каждой по 320 кВА. Предусмотрена возможность взаимного резервирования при выходе одного из трансформаторов из строя или аварии в сети. В нормальном режиме каждая ТП питает свой участок сети предприятия. Также, возможно резервирование предприятия от дизель-генераторных

Руководство предприятия существенное внимание уделяет экологии и охране окружающей среды и поэтому компанией GOOD-WOOD было принято решение об использовании энергии Солнца, и тем самым улучшении экологической ситуации в регионе. В 2013 году компания закупила и установила на предприятии СФУ, предназначенную для обеспечения электроэнергией цеха по производству клееного бруса. Основу электростанции составляют 850 солнечных панелей марки Virtus Model ПС255М-24/Vbs, расположенные на 10000 м² крыши (Рисунок 66) и южной стене цеха по производству бруса. Каждая панель способна выработать до 255 Вт энергии.



Рисунок 66. – Солнечные модули на крыше завода GOOD-WOOD

Общая установленная мощность составляет более 200 кВт, т.е. электростанция является самой крупной СФУ солнечной электростанцией (СЭС) в Центральном Федеральном округе и самой крупной частной СЭС в стране, работающей параллельно с СЦЭС.

Электроэнергия, вырабатываемая солнечными 850 панелями, передается на 12 инверторов, которые преобразуют постоянный ток солнечных батарей в переменный. Управление инверторами, работающими параллельно с централизованной сетью, осуществляется встроенными в каждый инвертор контролерами. При возникновении сбоя в работе одного из инверторов, контролер автоматически отключает его от шины нагрузки, что позволяет изолировать поврежденный инвертор, без отключения нагрузки от остальных модулей.

Информационная связь между инверторами осуществляется по стандарту RS-232. Вся информация о работе системы передается на персональный компьютер. В соответствии с алгоритмом работы инверторов, подача выработанной электроэнергии осуществляется только во внутреннюю

электрическую сеть предприятия, если она необходима для производства.

В соответствии с алгоритмом работы, вся выработанная ЭЭ СФУ цеха по производству клееного бруса компании GOOD-WOOD используется на производство клееного бруса. При недостатке энергии, недостающая ЭЭ потребляется из СЦЭС, а при её избытке часть инверторов СФУ отключается, переводя подключенные к ним солнечные панели на холостой ход.

Проведенный анализ графиков нагрузки, за годы эксплуатации показывает, что СЭС компании GOOD-WOOD в летние солнечные дни обеспечивала до 50% нагрузки цеха по производству клееного бруса, в осенние и весенние дни до 10%. В зимние дни, при выпадении снега, солнечные панели, установленные на крыше, отключались от сети и производство энергии снижалось до одного процента.

В соответствии, с проведенными расчетами по выбору мощности СЭС, установлено что затраченные средства на сооружение СЭС компании GOOD-WOOD практически полностью окуплены. Срок окупаемости сетевой СЭС компании GOOD-WOOD составляет 10,4 года, и на настоящее время СФУ не утратила свою работоспособность. Это позволяет сделать вывод о возможности использования таких сетевых СФУ для электроснабжения жилых, социальных и производственных объектов и улучшения экологии не только в Московской области, но и в других регионах страны.

Наряду с вышеуказанными проектами: СЭС компании Хевел, сетевой СФУ компании GOOD-WOOD в нашей стране эксплуатируются много частных и производственных СФУ малой мощности. Как, правило, это автономные СФУ, но есть гибридные и сетевые установки. В автономных СФУ надежность электроснабжения достигается с помощью аккумулялирования ЭЭ; в гибридных – с использованием источника ЭЭ другого вида, например, дизельной или бензиновой электростанции, дополнительно может быть использовано аккумулялирование ЭЭ; в сетевых – с использованием СЦЭС, которая используется как аккумулятор ЭЭ: при

недостатке энергии на объекте электроснабжения (ОЭС), недостающая ЭЭ потребляется из СЦЭС; при её избытке она передается в СЦЭС и используется другими ОЭС СЦЭС.

Кроме того, СФУ могут работать как самостоятельно, так и быть объединены под эгидой производителя инверторов или солнечных панелей.

Компания Sofar Solar (основана в 2012 году), специализируется на исследованиях, разработках и выпуске инверторов для СФУ. Фиксаций и обработкой данных, поступающих от инверторов, занимается компания Solarman, с которой у SofarSolar заключены партнерские соглашения. Компания Solarman объединила на своём сайте СФУ малой мощности от 1 до 25 кВт. В настоящее время с сайтом поддерживает связь 253 СФУ, расположенных на территории Российской Федерации: 61,3% из них работают автономно; 17,8% являются гибридными, а 20,9% – сетевыми СФУ. Следует отметить, что с 2020 намечилось увеличение количества подключаемых сетевых СФУ.

С инверторов СФУ с помощью Wi-Fi на сайт solarmanpv.com передаются данные: о выработанной энергии, ее качестве, ошибках в работе СФУ, а также о рабочих параметрах солнечных панелей. На сайт формируется ежедневный отчет о работе СФУ, а также приводятся графики выработки ЭЭ СФУ: суточные, месячные, годовые.

В качестве примера, в Таблица 25 представлены сводные данные с сайта solarmanpv.com, о генерации энергии СФУ малой мощности, расположенные на территории РФ. Данные о генерации СФУ представлены за 6 месяцев: с апреля по сентябрь 2021 года.

Величина выработанной ЭЭ СФУ определяется: установленной мощностью СФУ; солнечной инсоляцией в месте установки СФУ; углом наклона солнечных панелей СФУ относительно поверхности земли; коэффициентами полезного действия (КПД) оборудования СФУ и условиями в месте установки СФУ, например, затенения.

СФУ, действующие на территории Российской Федерации

Вид СФУ	Установленная мощность, кВт	Генерация за 6 месяцев, кВт*ч	Территория расположения	Вид нагрузки
гибридная	1,1	1134,0	Московская область	Бытовая
сетевая	1,1	1528,0	р.п. Романовка, Саратовская область	Бытовая
автономная	1,136	1289,0	Иркутская область, д. Непа, (Алроса)	Производственная
автономная	1,0	727,0	Тверь, (Тверьэнерго)	Производственная
сетевая	1,0	1950,6	Ростовская область, Сальск	Бытовая

В данной работе основное внимание уделено проектированию, внедрению и эксплуатации сетевой СФУ ОЭС – частный сельский дом в рабочем поселке (р.п.) Романовка, Саратовской области, подключенного к СЦЭС села. Площадь дома составляет 120 м^2 , а максимально потребляемая мощность $P_{\text{макс}} = 2,2$ кВт.

С учетом поправок, внесенных в Федеральный закон № 471-ФЗ от 27.12.2019 г. в части развития микрогенерации, для более эффективного использования частной солнечной электростанции экономически выгодно проектирование СФУ ОЭС, подключенного к СЦЭС, без аккумуляирования энергии, с возможностью выдачи избытков сгенерированной электроэнергии в СЦЭС, с целью снижения энергетических потерь во время заряда/разряда аккумуляторов и экономии средств на закупку оборудования по аккумуляированию энергии, его обслуживание, ремонт и замену. Алгоритм работы СФУ мощностью $P_{\text{СФУ}}$ с СЦЭС, определяется потребляемой мощностью ОЭС, при:

- $P_{\text{ОЭС}} \geq P_{\text{СФУ}}$ – недостающая ЭЭ потребляется ОЭС из сети;
- $P_{\text{ОЭС}} < P_{\text{СФУ}}$ – избыток ЭЭ отдается в сеть, при этом необходимо

установить двунаправленный счетчик ЭЭ и заключить договор с территориально сетевой организацией о купле-продаже ЭЭ.

С учетом вышеизложенного и юридически не решенных вопросов о присоединении СФУ малой мощности к СЦЭС, принято решение о строительстве СФУ частного дома в р.п. Романовка, Саратовской области с выходной пиковой мощностью 1,1 кВт.

В результате проведенных расчетов по выбору СФУ и моделирования и режимов работы СФУ [111], [112] выбраны 4 современные солнечные монокристаллические панели марки TW Solar TW310MWP-60-N мощностью 310 Вт каждая. Одна панель содержит в себе 60 солнечных элементов. Данная марка панелей выбрана за счет технологии PERC (Passivated Emitter Real Cell), которая используется в их конструкции. Основным отличием панелей с данной технологией от обычных кремниевых, является наличие диэлектрического слоя (пассивации), который располагается по всей поверхности панели между кремниевой основой и тыльным контактом. Дополнительный слой представляет из себя отражатель солнечного излучения, что приводит к повышению КПД панелей до 20%.

Монтаж солнечных панелей проводился на крыше дворовой постройки. Место монтажа выбиралось исходя из направления солнечных панелей на юг, отсутствия факторов, влияющих на затенение панелей и удобства проведения работ по установке и подключению панелей. В качестве основы для строительства несущего каркаса панелей был выбран деревянный брус. Для каждой СП был собран собственный твердый неподвижный каркас, обеспечивающий угол наклона панели в 30° . Панели закреплены на каркасах жестко, с обеспечением их естественной вентиляции (Рисунок 67а).

Панели соединены последовательно между собой для выработки достаточной для запуска и работы инвертора энергии. Соединение панелей выполнено с помощью стандартных коннекторов MC4. Данные коннекторы обеспечивают герметичность соединения панелей, а также его надежность, скорость и простоту выполнения.

Для преобразования постоянного тока в переменный выбран инвертор марки Sofar 1100TL-G3 производства компании Sofar Solar (Рисунок 67б).



а)

б)

Рисунок 67. – Установленные солнечные панели и инвертор Sofar СФУ

Инверторы серии TL уникальны, так как могут самостоятельно снижать мощность по команде делимитера (устройства, отслеживающего передачу электроэнергии в сеть). Датчики делимитера устанавливаются перед счетчиком. Делимитер дает команду инвертору снизить вырабатываемую мощность, если фиксируется превышение разрешенного значения электроэнергии, выдаваемой в сеть. Данный инвертор содержит один встроенный контроллер точки максимальной мощности (MPPT). Инвертор включен непосредственно в электрическую сеть дома через два автомата переменного тока АВВ по 16 ампер после счетчика электрической энергии. Инвертор монтируется жестко на стене. Обязательным условием его эксплуатации является отсутствие прямых солнечных лучей и влияния дождя и снега. Инвертор должен быть установлен вертикально с возможным углом положительного наклона не более 15° . Так как инвертор не снабжен системой активного охлаждения, то для его нормального функционирования необходимо свободное пространство не менее 50 см с торцевых и нижней стороны и не менее 80 см с верхней стороны.

Средняя продолжительность работы СФУ частного дома в р.п. Романовка, Саратовской области в летние месяцы составляет 14-15 часов в

сутки. Среднедневная выработка электроэнергии составляет 5,5 кВт*ч в сутки за месяц эксплуатации, максимальное значение – 6,8 кВт*ч. в сутки. Результаты выработки ЭЭ за август 2020 года представлены на Рисунок 68.

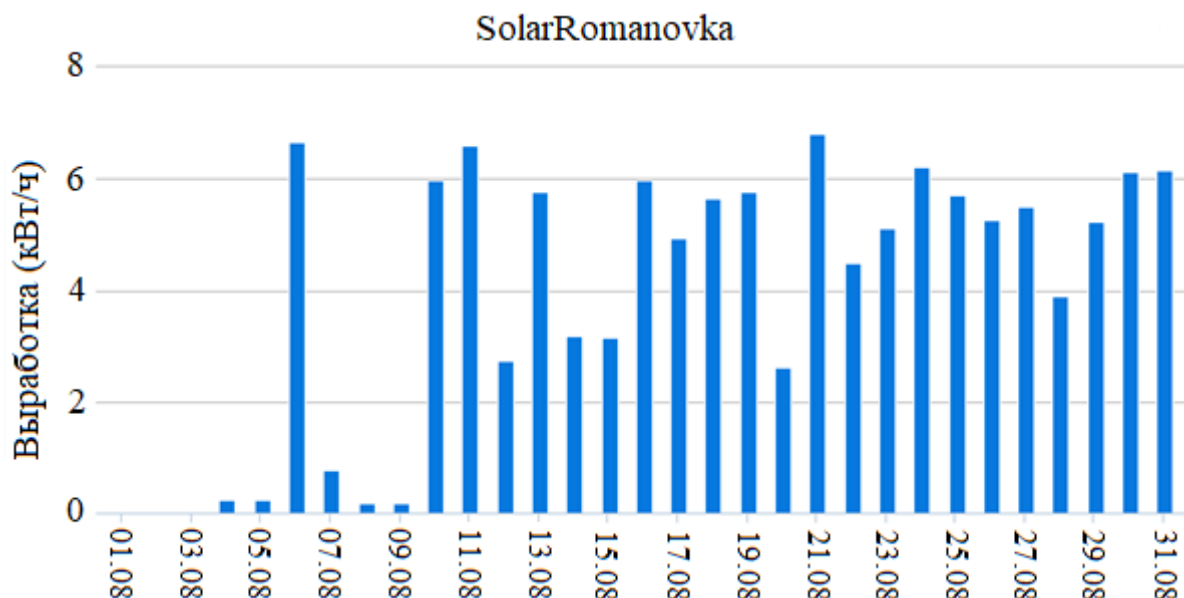


Рисунок 68. – Выработанная станцией электроэнергия в августе 2020 по дням

Результаты эксплуатации СФУ в течении одного дня представлены на графике (Рисунок 69). Как можно увидеть из графика при равномерной освещенности в течении дня установка достигает своей пиковой мощности во временном промежутке с 13.00 до 15.00.

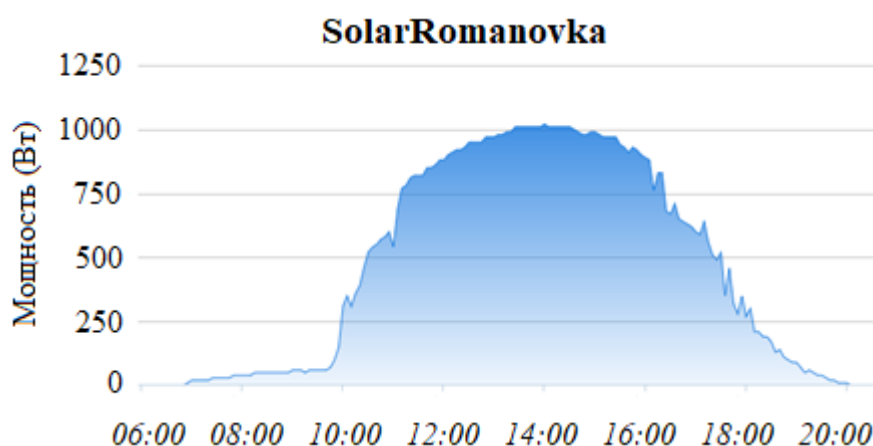


Рисунок 69. – Эксплуатация СФУ в течении одного дня (21 августа 2020 г.)

Проведенный анализ графиков нагрузки, показывает, что за годы

эксплуатации, СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка, Саратовской области в летние солнечные дни СФУ способна обеспечивать до 100% нагрузки дома и даже превышать необходимую дому электроэнергию, в осенние и весенние дни до 80%. В зимние дни, при выпадении снега, солнечные панели, установленные на крыше, отключаются.

Кроме того, алгоритм работы сайта solarmanrv.com позволяет на основе количества выработанной СФУ энергии рассчитать влияние конкретной установки на мировую экологию. По данным сайта строительство СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка позволило за время эксплуатации:

- снизить выбросы CO₂ в окружающую среду на 3,79 тонны;
- сохранить от вырубки 207 деревьев;
- снизить потребление твердого топлива на 1,52 тонны.

Поведенные расчеты по методике расчета и выбора СЭС показали, что срока окупаемости СФУ частного сельского дома в р.п. Романовка, Саратовской области составит 17,8 года.

В большой степени на величину срока окупаемости СФУ, влияет не только величина солнечной инсоляции в месте установки СФУ, но и в большой степени тариф по оплате за ЭЭ. Так, если бы в месте установки действовал бы тариф Московской области, то срок окупаемости составил бы 11,5 года.

В связи с принятием Федеральным законом № 471-ФЗ от 27 декабря 2019 г. в части развития микрогенерации, с 2020 количество подключаемых сетевых СФУ в стране постоянно увеличивается, по сравнению с автономными и гибридными СФУ.

На величину срока окупаемости СФУ, влияет не только стоимость оборудования СФУ и величина солнечная инсоляцией в месте установки СФУ, но и величина тарифа по оплате за электроэнергию.