

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ ГИБРИДНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

*Айнуллоева И.Н., Андреева К.А., Васильева А.А., Васьков А.Г., Сигель А.С., Харитонов Д.А., Шуркалов П.С.*

## Введение

Одной из основных целей устойчивого развития человечества является доступ к недорогостоящей и чистой энергии. Уже сегодня достичь этой цели возможно путём увеличения доли энергии из возобновляемых источников в региональном энергетическом балансе.

По разным причинам почти две трети территории России (Крайний Север, Дальний Восток, Сибирь, Бурятия, Якутия, Алтай, Курильские острова, Камчатка, часть Центральной России) так и не были подключены к сетям централизованного электроснабжения, а это означает, что обеспечить электроэнергией и теплом потребителей можно только с помощью распределённой энергетики. На сегодняшний день распределённая энергетика России — это около 49 тысяч различных электростанций (более 98% из них дизельные) суммарной мощностью 17 ГВт — примерно 8% от установленной мощности всех электростанций страны. Если учесть приведенные данные, то средняя мощность электростанций распределённой энергетики составляет порядка 350 кВт, на них вырабатывается порядка 50 млрд. кВт/ч в год, что составляет примерно 5% от всего объема производимой в стране электроэнергии.

Для эффективного функционирования локальных энергетических систем в изолированных и труднодоступных территориях необходимо проведение модернизации и реконструкции существующих генерирующих мощностей. Вариант модернизации объектов генерации в ИТТ зависит от нескольких местных особенностей (структура потребителей и режим потребления энергии, природно-климатические условия, состояние действующих систем электроснабжения), и зачастую может быть реализован путём использования возобновляемых источников энергии. В этом случае местная энергосистема приобретает принципиально новые свойства — она становится автономным гибридным энергетическим комплексом (АГЭК), включающим в свой состав энергоустановки, работающие на разной физической природе, а также систему накопления энергии.

Несмотря на то, что на территории Российской Федерации реализовано достаточно много АГЭК, до сих пор продолжают исследования, связанные с разработкой теоретических основ обоснования структуры и параметров проектируемых энергокомплексов, систем принятия решений по управлению работой существующих систем,

а также решается ряд вспомогательных задач. Возможность проведения подобных исследований ограничена на действующих объектах в связи с безусловным требованием обеспечения надёжного и бесперебойного энергоснабжения. В связи с этим на территории ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» создаётся учебно-экспериментальный полигон «Возобновляемые источники энергии», включающий в свой состав:

1) Макет солнечно-дизельного комплекса (две дизельных генерирующих установки (ДГУ) АД-12 и АД-30; система накопления энергии (СНЭ), состоящая из трёх однофазных батарейных инверторов Victron Energy Quattro и двенадцати аккумуляторных батарей Yellow GB 12-200, объединённых в кластер на 48 В; солнечная электростанция (СЭС) имитируется двумя имитаторами Delta Elektronika BV SM 660-AR-11, подключёнными к сетевому инвертору SMA Sunny Tripower; в качестве нагрузки используется нагрузочный модуль НМ-50-Т400-К2). С точки зрения моделирования режимов работы СДК каждая из составляющих комплекса выполняет определённые задачи:

- ДГУ служат для имитации работы дизельной электростанции, обеспечивающей электроэнергией выделенного или слабосвязанного потребителя;

- СНЭ обеспечивает возможность буферного режима работы СЭС, сглаживая пики нагрузки;

- имитатор СЭС необходим для моделирования режимов работы солнечной станции в условиях различной освещённости и температуры окружающего воздуха.

Макет СДК представляет собой комплекс программно-технических средств, имитирующих работу солнечно-дизельного комплекса, не связанного или слабосвязанного с регулярной электрической сетью.

2) Макет ветро-дизельного комплекса (две ДГУ АД-30; два электромеханических имитатора ветроэлектрических установок мощностью 30 кВт каждый; активная и двигательная электрическая нагрузка совокупной мощностью порядка 50 кВт ).

3) Солнечная электростанция (5 батарей фотоэлектрических модулей совокупной мощностью 7 кВт; гибридный инвертор SMA Sunny Island5048; сетевые инвертора Samil SolarRiver 3400TL-D и Sofar 2200TL).

Имеющийся набор оборудования позволяет осуществлять множество научных исследований, а также проводить учебные лабораторные работы.

В данном докладе авторы предлагают сконцентрироваться на рассмотрении одной из составляющих полигона — макете солнечно-дизельного комплекса и сопутствующих исследованиях.

### **Управление режимом работы солнечно-дизельного комплекса**

Усложнение генерирующей части изолированной энергосистемы, состоящей из дизельной электростанции путём внедрения солнечной электростанции с одной стороны позволяет снизить абсолютные значения расхода топлива, с другой — приводит к необходимости изменения парадигмы управления энергетическим комплексом.

С целью улучшения технико-экономических показателей работы АГЭК с сохранением уровня надёжности энергоснабжения потребителей энергии целесообразным видится использование в алгоритмах управления двух подходов:

1. Учёт прогноза изменения поступления первичного энергетического ресурса, например — солнечного излучения), что необходимо для возможности принятия оптимальных решений по выбору состава включённого генерирующего оборудования на краткосрочный период (до одних суток).

2. Проведение внутростанционной оптимизации дизельной электростанции, обеспечивающей её работу при минимальном удельном расходе топлива с учётом индивидуальных энергетических характеристик дизель-генераторных установок (ДГУ).

Указанные подходы реализуются в рамках научно-исследовательской работы, реализуемой по проекту “Системы управления солнечно-дизельными комплексами” при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2022-0006.

### **Структура аппаратно-программного комплекса по управлению режимом работы солнечно-дизельного комплекса**

Разрабатываемая система управления носит модульный характер и реализована с использованием свободно распространяемого инструментария. Модульность системы управления обеспечивается разделением аппаратно-программной части на две составляющих: платформозависимые микросервисы обмена информацией с оборудованием (получение данных мониторинга текущего состояния и отправка команд управления) и платформонезависимые микросервисы оптимизации состава включённого генерирующего оборудования. Шлюзом обмена информацией между составляющими АСУ ТП является протокол MQTT. В основе аппаратной части АСУ ТП используются микрокомпьютеры Raspberry Pi с открытой архитектурой.

В составе АСУ ТП СДК реализованы следующие микросервисы обмена информацией с оборудованием:

- микросервис мониторинга состояния и отправки команд в контроллер ДГУ;
- микросервис мониторинга состояния батарейного инвертора;
- микросервис мониторинга состояния сетевого инвертора.

В составе микросервисов оптимизации состава включённого генерирующего оборудования реализованы два микросервиса:

- микросервис прогнозирования режима работы СДК на сутки вперёд ( в его состав также входит система прогнозирования солнечного излучения на основе данных метеопрогноза);

- микросервис выбора состава включённого генерирующего оборудования, работающий в режиме реального времени.

На рисунках 1 и 2 представлен алгоритм работы микросервиса прогнозирования режима работы СДК на сутки вперёд. Микросервис осуществляет прогнозирование режима работы СДК на период 24 часа с часовыми расчётными интервалами времени; при работе системы управления СДК он автоматически запускается в конце каждого часа — таким образом обеспечивается «скользящий» прогноз на ближайшие сутки.

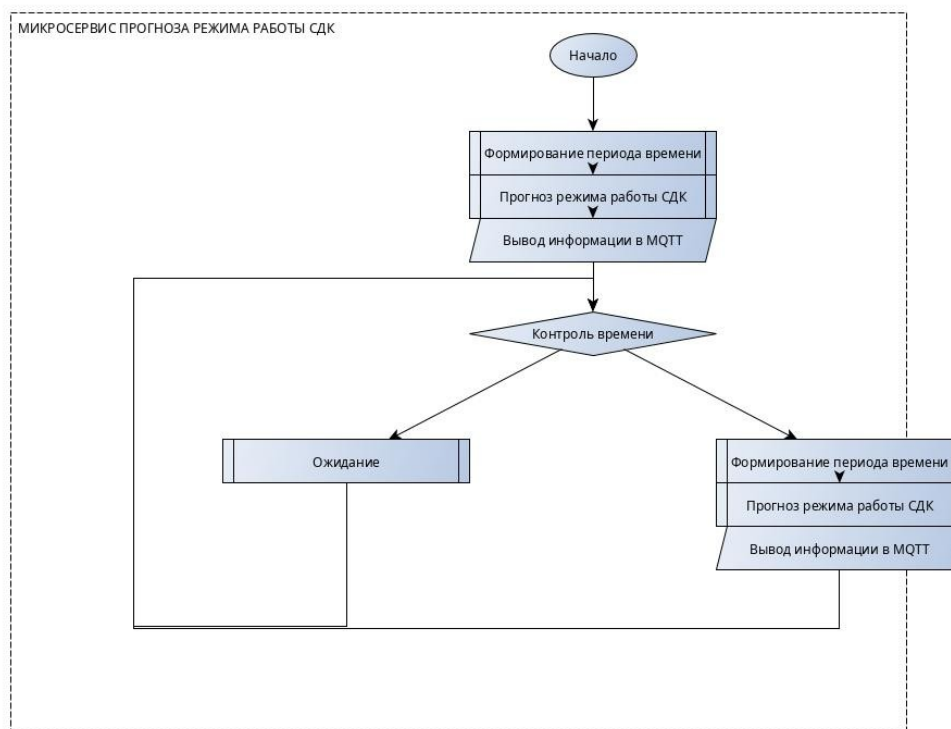


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритма работы микросервиса прогнозирования режима работы СДК

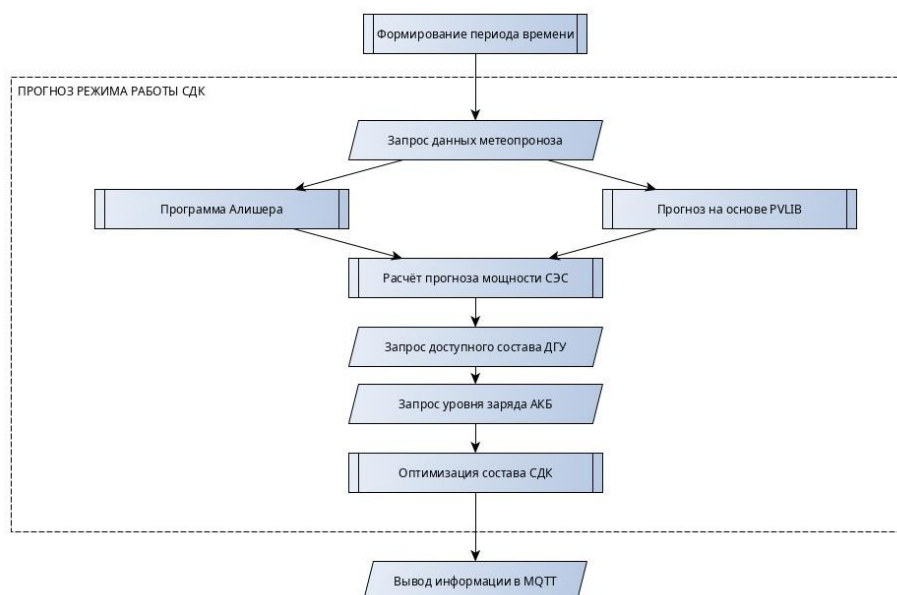


Рисунок 2 — Блок-схема алгоритма работы подпрограммы, выполняющей прогноз режима работы СДК

На основе данных прогнозирования становится возможным проведение обоснованного выбора состава включённого генерирующего оборудования. В основе этого процесса лежит уравнение баланса мощности:

$$P_{номр}(t) = N_{дэс}(t) + N_{сэс}(t) \pm N_{снэ}(t), \quad (1)$$

где  $P_{номр}(t)$ , кВт — прогнозное значение потребляемой мощности;  $N_{дэс}(t)$ , кВт — расчётная мощность дизельной электростанции;  $N_{сэс}(t)$ , кВт — прогнозное значение генерируемой СЭС мощности;  $N_{снэ}(t)$ , кВт — расчётная мощность, идущая на заряд или разряд аккумуляторов системы накопления энергии.

Значение  $N_{снэ}(t)$  рассчитывается исходя из текущего уровня заряда аккумуляторных батарей  $SOC(t-1)$  и соотношения остальных слагаемых уравнения баланса мощности. Мощность дизельной электростанции  $N_{дэс}(t)$ , состоящей из нескольких дизель-генераторных установок, определяется исходя из условия оптимизации загрузки ДГУ по критерию минимизации удельного расхода топлива. Процедура оптимизации реализована в виде отдельного программного модуля.

Данный модуль состоит из нескольких блоков и отвечает за создание своеобразной «карты возможных вариантов состава работающих ДГУ ДЭС». Упомянутая «карта»

создается для каждого возможного значения нагрузки потребителя  $P_{номр}$ , которая может изменяться от минимального до максимального значения с заданным шагом.

Основа работы первого блока — метода combinations библиотеки itertools — осуществляет генерацию всех возможных комбинаций работающих ДГУ при нагрузке  $P_{номр}$  с учетом критерия  $n_{дгу}^{раб} \rightarrow min$ . Второй блок отвечает за генерацию всех возможных вариантов загрузки ДГУ для каждой из ранее сформированных комбинаций состава оборудования. При распределении нагрузки между дизель-генераторами принимается, что их мощность может изменяться с тем же шагом, что и нагрузка потребителя. В процессе генерации вариантов загрузки ДГУ также осуществляется расчет потребления топлива каждой ДГУ и ДЭС в целом, а также значения удельного расхода топлива. На основе результатов работы блоков 1 и 2 формируется «карта возможных вариантов состава работающих ДГУ ДЭС», сохраняется в соответствующий файл и в последствии может быть использована для оперативного выбора оптимального состава оборудования в зависимости от заданной нагрузки потребителя. В зависимости от нагрузки потребителя из всех возможных вариантов состава оборудования, сохраненных в вышеупомянутой «карте» третий блок осуществляет выбор именно того варианта, для которого характерен минимальных суммарный удельный расход топлива. Таким образом, результатом работы данного блока является состав ДЭС с минимальным количеством задействованных в работе дизель-генераторов (согласно критерию  $n_{дгу}^{раб} \rightarrow min$ ) и минимальным потреблением топлива.

Пример результата работы математической модели при определении оптимального распределения нагрузки в 1000 кВт по 3-м разным дизель-генераторам ДЭС представлен на рисунке 3.

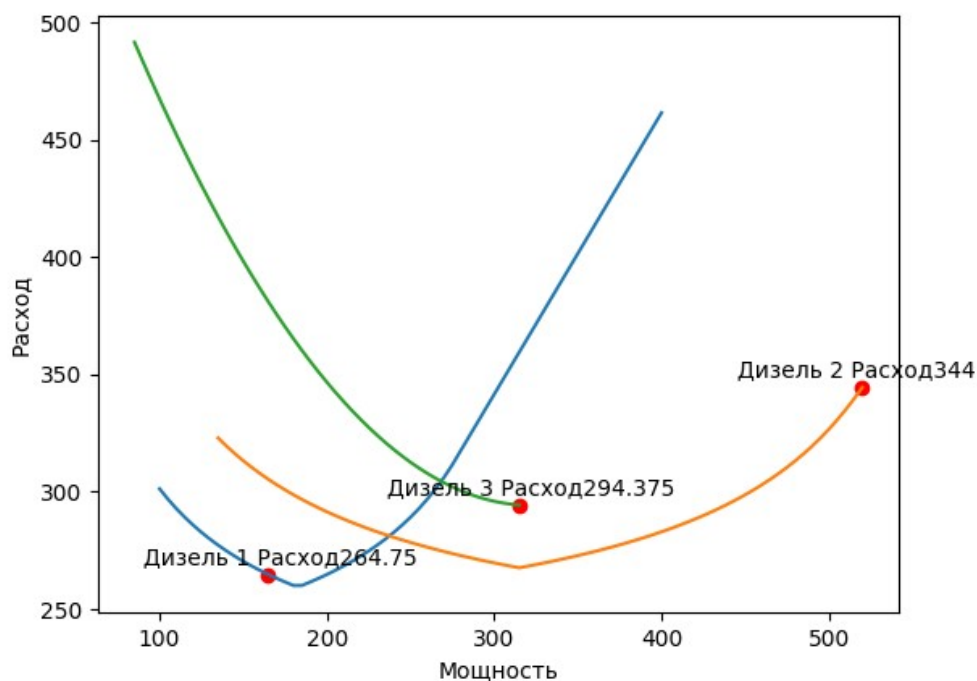


Рисунок 3 — Удельные характеристики расхода ДГУ

### Анализ эффективности разработанного подхода

Для анализа эффективности разработанной математической модели проводилось сравнение полученных результатов с результатами работы СДК при равномерном распределении нагрузки между ДГУ; в качестве объекта исследования был выбран существующий СДК, расположенный в городе Верхоянск в Якутии (координаты: 67°33' с.ш., 133°23' в.д.), по которому у авторского коллектива имеются данные.

Основная исходная информация, которая была использована:

- Характеристики дизельных генераторов СДК;
- Суточные графики нагрузки для характерных дней каждого месяца года
- Суточные графики выработки электроэнергии солнечными модулями СДЭК. Данные графики были получены с использованием функционала интернет-ресурса PVGIS. Для проведения дальнейших расчетов были выбраны осреднённые значения для каждого месяца 2020 года.

Основные результаты, полученные в ходе расчетов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Основные результаты апробации разработанной математической модели

Распределение нагрузки между ДГУ	Выработка [кВт·ч]	КИУМ [%]	УРУТ [гр.у.т./((кВт ◀ ч)]
Равномерное	107465	15.11	371.36
Оптимальное	107665	15.14	361.39

Из таблицы 1 видно, что между 2-я рассмотренными вариантами имеется небольшое различие в выработке электроэнергии – порядка 0.19 %. Это обусловлено особенностью работы разработанного алгоритма, а именно – заданной дискретностью оптимизации. В данном случае значения нагрузки изменялись с шагом в 5 кВт, и погрешность в результатах расчетов менее чем в 1 % можно считать несущественной.

Основные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 — основные результаты по работе ДГУ при разных вариантах распределения нагрузки

Равномерное распределение нагрузки						Оптимальное распределение нагрузки					
ДГУ	Время работы [ч]	Количество включений [шт.]	Выработка [кВт·ч]	КИУ М [%]	Абсолютный расход, л/ч	ДГУ	Время работы [ч]	Количество включений [шт.]	Выработка [кВт·ч]	КИУ М [%]	Абсолютный расход, л/ч
0	68	-	-	-	-	0	68	-	-	-	-
1	68	18	25404	22.05	7385.35	1	165	21	39440	34.24	11343.75
2	23	5	8520	7.40	2314.1	2	109	10	43600	37.85	11749.11
3	51	13	24265	16.20	10373.46	3	51	13	24305	16.23	7165.94
4	0	0	0	0.00	0	4	0	0	0	0	0
5	135	27	34098	37.59	11579.2	5	1	1	80	0.09	30.74
6	52	21	15179	16.73	4543.45	6	3	3	240	0.26	92.22
Итого	397	84	107465	15.11	36195.56	Итого	397	48	107665	15.14	30381.76

На основе анализа результатов из таблиц 1 и 2 были сделаны следующие основные выводы касательно эффективности оптимального распределения нагрузки между ДГУ по сравнению с равномерным распределением:

- Удельный расход топлива снизился на 2,68 %;
- Абсолютный расход топлива снизился на 16,06 %;
- Количество включений ДГУ снизилось на 42,86 %;

Таким образом, предлагаемый вариант распределения нагрузки между ДГУ позволяет добиться более оптимального использования ископаемого топлива, т.к. за счет снижения количества включений снижается расход топлива на холостой ход ДГУ. Кроме этого, уменьшается и вероятность аварий.

Несмотря на положительные результаты проведенного исследования следует отметить, что все еще имеется большой простор для доработки разработанной математической модели. Так на данный момент она не учитывает неоптимальную работу ДГУ при загрузке менее 50 % от номинальной мощности агрегата, не способна осуществлять прогнозирование



нагрузки и подсчет расхода дизельного топлива на холостой ход, а износ ДГУ задается вручную на этапе ввода исходных данных. В дальнейших исследованиях предполагается добавить в модель и эти возможности для более точного моделирования режимов работы не только ДЭС, но и СДК в целом.