

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Алиферов А. И.,

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Кошеков К. Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е. В.,

к.т.н., профессор

Кислов А. П.,

к.т.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Шерязов С. К.

т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)

Искакова З. С.

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***С. В. Ибрагимова¹, А. Н. Старчеус²,
П. В. Кирий³, М. Т. Айтуарова⁴**

^{1,3,4}Костанайский региональный

университет имени А. Байтұрсынұлы,
Республика Казахстан, г. Костанай;

²Рудненский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Рудный.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2798-9149>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1073-3822>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9462-9139>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3729-0596>

*e-mail: ibragimovasvetlana75@gmail.com

РЕАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ПРИНЦИПОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ СО СМЕШАННЫМ ТИПОМ ГЕНЕРАЦИИ

Статья посвящена анализу архитектурных принципов построения виртуальных электростанций и исследованию возможностей их реализации в рамках имитационного моделирования в условиях цифровизации энергетического сектора. На основе системного анализа и международных подходов предложена унифицированная архитектура виртуальных электростанций, включающая пять функциональных уровней – «Бизнес», «Функция», «Информация», «Коммуникация», «Компоненты», – которая позволяет интегрировать систему распределения энергоресурсов, средства телеметрии, аналитические модули, оптимизационные алгоритмы и интерфейсы взаимодействия рынка электрической энергии и мощности с системным оператором. Показана применимость модели виртуальной электростанции для повышения гибкости, надёжности и адаптивности энергосистемы со смешанным типом генерации. Предложенные подходы реализованы в программе-симуляторе, позволяющей моделировать энергосистему с учетом географического месторасположения, климатических и погодных условий и типов источников генерируемой мощности.

Важной характеристикой модели является возможность оценки стохастического характера энергосистемы по критерию надёжности электроснабжения, что повышает точность прогнозирования и расчёта режимов работы. Программа поддерживает сохранение и повторную загрузку экспериментов, реализует автоматическое и ручное управление с возможностью настройки функций станций и параметров оборудования, а также снабжена функцией интеллектуального советника.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, распределённые энергоресурсы, архитектура виртуальной электростанции, возобновляемые источники энергии, цифровой двойник, оптимизация управления, моделирование.

Введение

Виртуальная электростанция – это программно-аппаратный комплекс, объединяющий разнородные источники генерации (традиционные и альтернативные), системы накопления энергии, управляемые нагрузки и электромобили в единый управляемый пул, способный участвовать в общей государственной системе рынка электроэнергии и мощности и предоставлять услуги. Развитие виртуальных электростанций (Virtual Power Plants, VPP) в последние годы стало одним из ключевых направлений трансформации электроэнергетических систем, обусловленным ростом доли распределённой генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). [1]

Одним из наиболее значимых примеров успешной реализации данной концепции является деятельность компании Next Kraftwerke, Кёльн, Германия, которая представляет собой одного из крупнейших операторов виртуальных электростанций в Европе и одновременно выступает сертифицированной электроснабжающей организацией на ряде европейских энергетических бирж. Основу её бизнес-модели составляет агрегация распределённых энергетических ресурсов, включая объекты возобновляемой генерации, системы накопления энергии и гибкие потребители. Компания объединяет более 14 000 децентрализованных установок, а также промышленные и коммерческие нагрузки с возможностью регулирования потребления. Совокупная установленная мощность виртуальной электростанции компании оценивается приблизительно в 12,7 ГВт, а годовой объём выработки составляет около 15 ТВт·ч, что эквивалентно приблизительно 3 % общей генерации электроэнергии Германии [2].

Наряду с промышленно-ориентированной моделью, характерной для Германии, в ряде стран формируются альтернативные подходы к развитию

VPP. Так, в южной части Австралии реализуется проект Tesla Virtual Power Plant, ориентированный преимущественно на домохозяйства [3]. Данная модель базируется на широком внедрении солнечных панелей и систем накопления энергии при активной поддержке государственных программ субсидирования. В отличие от немецкой практики, акцент здесь сделан на вовлечение частных потребителей в процессы генерации и управления электроэнергией.

К странам, демонстрирующим сопоставимый уровень развития виртуальных электростанций, постепенно приближаются Великобритания и Китай, где активно формируются рынки гибкости и развиваются механизмы интеграции распределённых ресурсов. В Японии импульс к развитию VPP был во многом обусловлен последствиями аварии на атомной электростанции «Фукусима-1», после которой приоритет был смещён в сторону повышения устойчивости энергосистемы, автономности и её способности противостоять аварийным ситуациям [4].

В то же время в ряде стран, таких как США, Чехия и Польша, развитие виртуальных электростанций находится на более ранней стадии и представлено преимущественно отдельными пилотными проектами и локальными инициативами [5, 6].

Таким образом, международный опыт показывает, что виртуальные электростанции становятся важным инструментом повышения гибкости и устойчивости современных энергосистем, однако темпы и модели их внедрения существенно различаются в зависимости от институциональной среды, уровня развития энергетических рынков и государственной политики в области энергетики. Однако, несмотря на растущий международный опыт применения VPP, в Казахстане отсутствуют унифицированные архитектурные модели и методологический аппарат для их проектирования и внедрения [7]. В современных условиях, когда энергетический сектор Казахстана находится на этапе трансформации и характеризуется ростом доли возобновляемых источников энергии, а также увеличением территориальной неравномерности спроса и предложения на фоне изношенной инфраструктуры концепция виртуальных электростанций представляет собой перспективное решение для агрегации распределённых энергоресурсов (Distributed Energy Resources, DER) и их эффективного управления [8].

Цель исследования, поставленная в работе, относится к анализу методологии создания унифицированной архитектуры VPP и её применения в ситуационном моделировании с целью создания модели цифрового двойника электрической системы со смешанной генерацией.

Материалы и методы

На разных этапах и уровнях создания виртуальных электростанций используется единая система проектирования, которая включает в себя системный анализ, в основе которого лежит методика Smart Grid Architecture Model (SGAM); методы функциональной декомпозиции и стохастической оптимизации, а также концепцию цифровых двойников (рисунок 1). В основе создания модели лежит подход системного анализа, рассматривающий VPP как сложную кибер-физическую систему [9]. Для формализации взаимодействия компонентов применяется система Smart Grid Architecture Model (SGAM), которая была разработана европейскими организациями CEN-CENELEC-ETSI в рамках мандата Европейской комиссии M/490 [10]. SGAM определяет пять взаимосвязанных уровней – это:

- 1) «Бизнес», который учитывает цели и модели участия в рынке электрической энергии и мощности;
- 2) «Функция» – охватывает процессы управления и балансировки;
- 3) «Информация» – отвечает за сбор данных и обмен информацией;
- 4) «Коммуникация» – формирует протоколы передачи данных;
- 5) «Компоненты» – включает физическое оборудование субъектов электроэнергетической системы.

На основе системного анализа и SGAM предлагается пятиуровневая архитектура VPP [10], которая состоит из пяти уровней, объединяющих распределённые энергоресурсы, коммуникационно-телеметрическую инфраструктуру, агрегацию и аналитику, оптимизацию и диспетчеризацию и внешний интерфейс (рисунок 1).

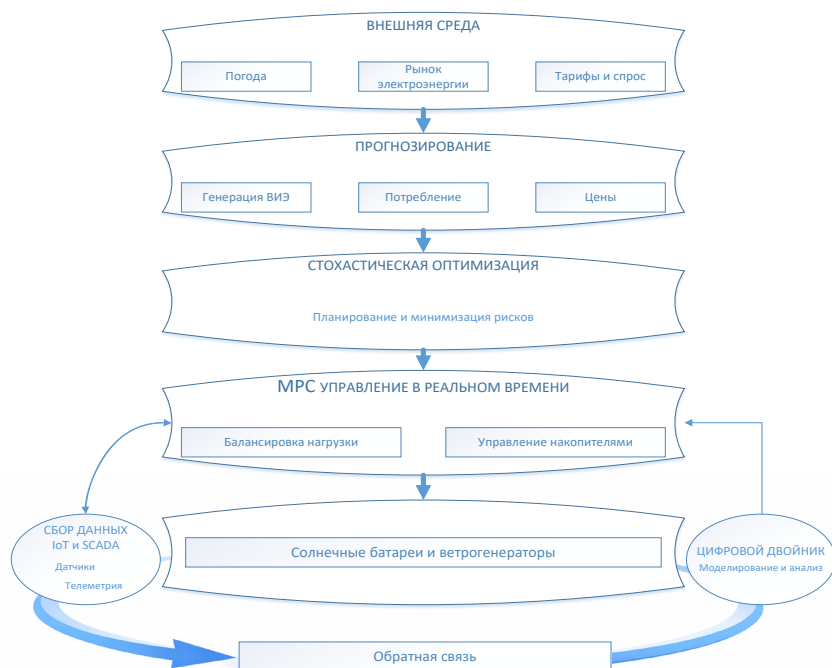


Рисунок 1 – Архитектура этапов проектирования виртуальных электростанций

Объединенная модель обеспечивает совместимость систем различных производителей и упрощает взаимодействие между участниками рынка, а масштаб ее применения (более чем 2000 проектов Smart Grid) в Европе продемонстрировало снижение времени внедрения разработок на 30–40 % за счёт унифицированного подхода к проектированию [11].

Структурирование системы осуществляется на этапе функциональной декомпозиции, которая позволяет разделить сложную систему VPP на независимые, разрабатываемые параллельно функциональные модули. Реализация такого подхода показывает снижение сложности проектирования на 25-35 % и улучшение масштабируемости системы [12].

Стохастическая оптимизация работы VPP [13] позволяет учитывать неопределённость прогнозов генерации источников альтернативной энергии и волатильность цен на рынке, а методика моделирования прогнозируемого управления [14] повышает точность прогнозирования

до 85–90 %, снижает операционные затраты на 15–20 % и уменьшает отклонение от графиков на 30–40 % [15].

Завершающим этапом создания виртуальной электростанции является создание цифрового двойника системы. Концепция цифровых двойников, предложенная американскими исследователями Майклом Гривсом и Джоном Викерсом [16] и развитая китайским ученым Фэй Тао [17], применяется для создания виртуальной модели объекта, позволяющей тестировать новые алгоритмы управления без риска для реальной системы. Цифровой двойник обеспечивает: моделирование различных сценариев работы, предиктивное обслуживание оборудования, оптимизацию параметров в режиме реального времени. Практика показывает, что использование цифровых двойников приводит к сокращению времени тестирования новых технологических решений на 60–70 % [17].

Результаты реализации единой системы проектирования с применением различных методик показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Применяемые методологии и достигнутые результаты.

Методология	Достигнутые результаты
SGAM (CEN-CENELEC-ETSI, 2012)	Снижение времени внедрения на 30-40 %, стандартизация взаимодействия
Функциональная декомпозиция (Kundur, 1994)	Снижение сложности на 25-35 %, улучшение масштабируемости
Стохастическая оптимизация (Morales, 2014)	Точность прогнозирования 85-90 %, снижение затрат на 15-20 %
Цифровые двойники (Grieves, 2017)	Сокращение времени тестирования на 60-70 %

Результаты и обсуждение

Реализуя архитектурные принципы единого проектирования на основе настоящего исследования, в среде разработки Unity разработан практический прототип виртуальной электростанции со смешанным типом генерирующих мощностей. В таблице 2 приведена структура функциональных модулей, реализующих задачи моделирования и анализа режимов работы электрической системы.

Таблица 2 – Архитектурная декомпозиция реализованных программных модулей

Модуль	Назначение	Входные данные	Выходные данные
СЭС	моделирование PV генерации	время суток, погодный множитель солнечной радиации, температура, модель фотоэлектрического модуля	потери от загрязнений и затенений, вырабатываемая мощность, P_{pv}
ВЭС	ветровая генерация	скорость ветра, модель и ориентация ветроэнергетической установки	Вырабатываемая мощность, P_{wind}
ТЭС, АЭС, ГЭС	тепловая генерация	вид топлива вид топлива, технические характеристики электростанции	P_{max} , P_{min} , КПД, расход топлива, выбросы углекислого газа
AI модуль	управление VPP	данные генерации и нагрузки	рекомендации
Итоговый системный сценарий	расчет режима	состав генерации, нагрузка, погодный сценарий	значения режимных показателей

Ключевой особенностью проекта является его представление не как абстрактной надстройки над энергетическими объектами, а как управляемого цифрового двойника. В зависимости от вида используемого физического оборудования при реализации SGAM-уровня «Компоненты» в приложении возможно использование 3D-модели электрической станции солнечного, ветрового, гидро- и атомного типа генерации как индивидуально, так и в режиме общей агрегации мощности. Реализация этапа функциональной декомпозиции основывается на принципе модульности, который обеспечивает каждый тип генерации самостоятельным скриптом с собственными физическими параметрами и внутренним состоянием. Фрагмент программной реализации расчета ветровой генерации приведен ниже:

```
float v = appliedWindSpeed;
float sweptArea = Mathf.PI * bladeLength * bladeLength;

float rotorYaw = (turbineYawObjects != null && turbineYawObjects.
Length > 0 && turbineYawObjects[0] != null)
    ? turbineYawObjects[0].eulerAngles.y
    : transform.eulerAngles.y;

float angleDiffDeg = Mathf.DeltaAngle(rotorYaw,
appliedWindDirection);
float angleDiffRad = angleDiffDeg * Mathf.Deg2Rad;
float cosTheta = Mathf.Max(0f, Mathf.Cos(angleDiffRad));
float yawFactor = cosTheta * cosTheta * cosTheta;

float rawPower = 0.5f * airDensity * sweptArea * Mathf.Pow(v, 3)
* conversionCoefficient;
float effectiveRaw = rawPower * yawFactor * generatorEfficiency;
powerPerTurbine = Mathf.Min(effectiveRaw, ratedPower);
```

Приведённый фрагмент программной реализации отражает алгоритм расчёта мощности ветровой генерации в составе виртуальной электростанции. Код учитывает физические параметры ветрового потока, ориентацию ротора и коэффициент полезного действия генератора, что позволяет получить оценку вырабатываемой мощности в режиме реального времени. Данный алгоритм используется в модуле ветровой генерации (рисунок 2) и влияет на формирование суммарного энергетического баланса системы.

Калькулятор ветровой энергии

14,00 МВт

Скорость ветра, направление или роза ветров, модель турбины и её рабочий диапазон.

Одна турбина

14,00 МВт

Текущая мощность

Среднее по парку

14,00 МВт

По всем активным

Весь парк

140,00 МВт

Суммарная мощность

Мощность

Энергия

Накопление энергии идёт только при включённой симуляции времени.

Ветровой режим

Мощность одной: 14,00 МВт

Средняя мощность: 14,00 МВт

Суммарная мощность: 140,00 МВт

Накопление энергии идёт только при включённой симуляции времени.

Режим ветра

Одно направление

Роза ветров

Пусковая: 3,0 м/с, Останов: 25,0 м/с

Глобальная скорость ветра: 20,11 м/с

Скорость с учётом погоды: 20,11 м/с

Направление ветра: 0°

С

Выбор модели

Выберите модель:

Hitachi HTW 5.6-136

Senvion 6.2M152

Nordex N175/6.0 MW

Goldwind GWH 16-8.4 MW

MingYang Smart Energy MySE 11-230

General Electric Haliade-X 12 MW

Модель: General Electric Haliade-X 14 MW

Пусковая скорость: 3,0 м/с

Диапазон ветра: 3,0–25,0 м/с

Номинальная мощность: 14,0 МВт

Длина лопастей: 107,0 м

КПД: 51,2%

Рисунок 2 – Окно интерфейса VPP для модуля ветровой генерации

С целью проверки работоспособности исследовательского симулятора осуществлялась реализация сценариев, включающих модели оборудования из ресурсов проекта с фиксацией параметров нагрузки, погодных условий, временем суток и составом генерации. Подготовленные сценарии позволили оценить согласованность значений ручного счета и полученными в интерфейсе результатами. Допустимое расхождение оценивалось с учётом

округления, дискретности интерфейсных элементов, переходных процессов и внутренних поправочных коэффициентов. Результаты верификации для различного типа генерации приведены в таблицах 3, 4, 5.

Таблица 3 – Расчет выходной мощности солнечной панели

Проверяемое условие СЭС	Вырабатываемая мощность/Ручной расчёт	Вырабатываемая мощность/ Значение в интерфейсе
Ясный солнечный сценарий	498,8 Вт	499 Вт
Облачная погода, коэффициент ослабления 0,72	372,2 Вт	372 Вт
Ясная погода, время 16:00	496,1 Вт	496 Вт

Таблица 4 – Расчет выходной мощности ветровой электростанции

Проверяемое условие ВЭС	Вырабатываемая мощность/Ручной расчёт	Вырабатываемая мощность/ Значение в интерфейсе
$v = 6 \text{ м/с}, \theta = 0^\circ$	0,875 МВт	0,8745 МВт
$v = 8 \text{ м/с}, \theta = 0^\circ$	2,073 МВт	2,07 МВт
$v = 10 \text{ м/с}, \theta = 0^\circ$	4,049 МВт	4,05 МВт
$v = 8 \text{ м/с}, \theta = 20^\circ$	1,720 МВт	1,72 МВт

Таблица 5 – Расчёт мощностей АЭС, ГЭС, ТЭС

Источник	Тип станции	Ручной расчёт	Значение в интерфейсе
ГЭС	Kaplan River Мощность: 120 МВт Режим: ручной Открытие затвора: 30 %	41,1 МВт	41,05 МВт
ТЭС	Coal Unit Мощность: 300 МВт, Текущая уставка: 180 МВт Режим управления: ручной	174,6 МВт	174,6 МВт
АЭС	ВВЭР-1200, $P_{\text{тепл}} = 3212 \text{ МВт}$; КПД=0,373; коэффициент готовности=0,92.	1 102,2 МВт	1102,2 МВт

Визуальная сцена в программе используется не только как средство отображения, но и как цифровой полигон для инженерного расчёта режима сети, анализа временных профилей и принятия решений по управлению системой с использованием рекомендаций интеллектуального советника (рисунок 3).



Рисунок 3 – Окно аналитического модуля рекомендаций

Аналитический модуль рекомендаций способен выявить в системе дефицит мощности и предложить варианты изменения сценария, заданного оператором. Алгоритм проверки состоит в следующем: модуль источника формирует генерируемую мощность, передаёт её в сетевую модель, далее проводится расчет энергетического баланса и формирование рекомендаций по улучшению текущего сценария (таблица 6) .

Таблица 6 – Проверка баланса мощности и рекомендации аналитического модуля

Показатель	Значение до изменения сценария	Значение после изменения сценария
Суммарная генерация, МВт	26,56 МВт	53,72 МВт
Пиковая нагрузка, МВт	52,35 МВт	52,35 МВт
Минимальный баланс, МВт	-25,83 МВт	1,37 МВт
Рекомендация аналитического модуля	Поднять уставку ГЭС до $P_{уст} = 47,8$ МВт	нет

До изменения сценария суммарная генерирующая мощность системы была недостаточной для покрытия пиковой нагрузки, вследствие чего баланс мощности принимал отрицательное значение. В этих условиях аналитический модуль формировал рекомендацию по увеличению мощности гидроэлектростанции. После реализации предложенного управляющего воздействия суммарная генерация превысила величину нагрузки, что обеспечило положительный баланс мощности и привело к устранению предупреждающего сообщения о дефиците генерирующих ресурсов.

Повторяемость результатов, полученных в ходе серии вычислительных экспериментов, свидетельствует о работоспособности и устойчивости предложенного подхода. Разработанная архитектура обеспечивает возможность централизованной координации распределённых энергетических ресурсов и позволяет оперативно оценивать влияние изменений режимных параметров на состояние энергосистемы. Кроме того, реализация единой среды мониторинга и управления способствует повышению эффективности анализа сценариев функционирования системы и поддержке принятия диспетчерских решений.

Выводы

Исследуемая единая система проектирования, основанная на методиках SGAM, функциональной декомпозиции и стохастической оптимизации, а также унифицированную пятиуровневую архитектуру виртуальных

электростанций успешно реализована в проекте по созданию прототипа цифрового двойника электрической системы, включающей в себя традиционную и альтернативную форму генерации электрической энергии. Среда разработки Unity в связке с возможностями программирования LLM-моделей искусственного интеллекта может служить удобной оболочкой для интеграции энергетических расчётов, визуального интерфейса и интеллектуального управления, что делает её подходящей платформой для ранних этапов проектирования VPP. С инженерной точки зрения основным результатом можно считать возможность функционирования VPP на нескольких уровнях одновременно – агрегацию распределённой генерации, расчёт режима работы электрической сети с учётом ограничений по напряжению, потокам мощности и потерям, поддержка анализа сценариев и действия по предупреждению чрезвычайных ситуаций. Таким образом, созданный прототип цифрового двойника позволяет проводить тестирование и валидацию алгоритмов управления, моделировать различные сценарии работы системы, оптимизировать параметры без риска для существующей энергетической инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Kazhina M., Kalysh I., Ukaegbu I. A., Nunna H. S. V. S. K.** Virtual Power Plant in Industry 4.0: The Strategic Planning of Emerging Virtual Power Plant in Kazakhstan [Text] // 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2019. – P. 600-605 – <https://doi.org/10.23919/ICACT.2019.8701989>
- 2 Next Kraftwerke GmbH. Virtual Power Plant Technology. [Text] Cologne: Next Kraftwerke. – 2023. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.next-kraftwerke.com/vpp/virtual-power-plant>
- 3 Tesla. Autobidder: Real-Time Trading and Control Platform. Technical Documentation. Palo Alto : Tesla Inc. – 2023. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.tesla.com/support/energy/tesla-software/autobidder> (Accessed date: 16.01.2026).
- 4 International Renewable Energy Agency (2024). Renewable Energy Statistics. Abu Dhabi: IRENA. – 2024. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.irena.org/publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024> (Accessed date: 16.01.2026).
- 5 ENTSO-E. Demand Connection Code. – Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity. [Electronic resource]. – Available at: https://www.entsoe.eu/network_codes/dcc (Accessed date: 26.02.2026)

6 **Mehrhoft, J., Asmus, P.** Market Data: Mixed Asset Virtual Power Plant Models: Mixed-Asset Virtual Power Plant Capacity, Implementation Spending, and Revenue: Global Market Forecasts and Analysis // Guidehouse Insights. – 2020. [Electronic resource]. – Available at: <https://guidehouseinsights.com/> (Accessed date: 26.02.2026).

7 Asian Development Bank. Kazakhstan: Country Partnership Strategy (2023–2027) [Text]. – Manila : Asian Development Bank, 2023. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.adb.org/documents/kazakhstan-country-partnership-strategy-2023-2027> (Accessed date: 28.02.2026).

8 KEGOC. KEGOC. Annual Report 2024 «Energy of Development». [Text] Nur-Sultan : AO «KEGOC». – 2024. [Electronic resource]. – Available at: <https://ar2024.kegoc.kz>

9 **Kundur, P.** Power System Stability and Control. EPRI Power System Engineering Series. [Text] New York : McGraw-Hill, 1994. – 1176 p. – ISBN 978-0-07-035958-1

10 CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. Smart Grid Reference Architecture [Text] Brussels: European Commission. – 2012. [Electronic resource]. – Available at: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart%20Grids%20and%20Meters/Smart%20Grids/reference_architecture_smartgrids.pdf

11 **Pudjianto, D., Ramsay, C., Strbac, G.** Virtual Power Plant and System Integration of Distributed Energy Resources [Text] // IET Renewable Power Generation. – 1(1). – 2007. – P. 10–16 – <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20060023>

12 **Ramchurn, S. D., Vytelingum, P., Rogers, A., Jennings, N. R.** Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid [Text] // Proceedings of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011). – Taipei, Taiwan, 2011. – P. 5–12. [Electronic resource]. – URL: https://www.ifaamas.org/Proceedings/aamas2011/papers/BP1_B39.pdf

13 **Morales, J. M., Conejo, A. J., Madsen, H., Pinson, P., Zugno, M.** Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems [Text] // International Series in Operations Research & Management Science. – Vol. 205. – Springer, New York. XVI, 2014. – 429 p. – <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9411-9>

14 **Camacho, E. F., Bordons, C.** Model Predictive Control. 2nd ed. [Text] // Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. – Springer, London. XXII, 2007. – 405 p. – <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>

15 **Loßner, M., Böttger, D., Bruckner, T.** Economic Assessment of VPPs in German Energy Market [Text] // Energy Economics. – 62. – 2017. – 155–164 p. – <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.12.008>

16 **Grieves, M., Vickers, J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[Text] // Kahlen, F.J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, Cham., 2017. – 85–113 p. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

17 **Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C.** Digital Twin in Industry: State-of-the-Art [Text] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. –15(4). – 2018. – P. 2405–2415 – <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

Поступило в редакцию 11.04.26.

Поступило с исправлениями 23.04.26.

Принято в печать 02.09.26.

*С. В. Ибрагимова¹, А. Н. Старчеус², П. В. Кирий³, М. Т. Айтуарова⁴

^{1,3,4}Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай Өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.;

²Рудный индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Рудный қ.

11.04.26 ж. баспаға түсті.

23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АРАЛАС ГЕНЕРАЦИЯ ТҮРІ БАР ЭНЕРГОЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ КЕЗІНДЕ ВИРТУАЛДЫ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ АРХИТЕКТУРАЛЫҚ ҚАФИДАТТАРЫН ІСКЕ АСЫРУ

Мақала энергетика секторын цифрландыру жағдайында виртуалды электр станцияларын құрудың архитектуралық қағидастарын талдауға және оларды имитациялық модельдеу шеңберінде іске асыру мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Жүйелік талдау мен халықаралық тәжірибе негізінде «Бизнес», «Функция», «Ақпарат», «Коммуникация», «Компоненттер» атты бес функционалдық деңгейден тұратын виртуалды электр станциясының бірыңғай архитектурасы ұсынылды, ол энергия ресурстарын бөлу жүйесін, телеметрия құралдарын, аналитикалық модульдерді, оңтайландыру алгоритмдерін және электр энергиясы мен қуат нарығының жүйелік оператормен өзара әрекеттесу интерфейстерін біріктіруге мүмкіндік береді. Аралас

генерация типіндегі энергожүйенің икемділігін, сенімділігін және бейімделгіштігін арттыру үшін виртуалды электр станциясы моделінің қолданылу тиімділігі көрсетілді. Ұсынылған тәсілдер географиялық орналасуды, климаттық және ауа райы жағдайларын, сондай-ақ генерация көздерінің түрлерін ескере отырып энергожүйені модельдеуге мүмкіндік беретін бағдарламалық симуляторда іске асырылды. Модельдің маңызды сипаттамасы электрмен жабдықтау сенімділігі критерийі бойынша энергожүйенің стохастикалық сипатын бағалау мүмкіндігі болып табылады, бұл жұмыс режимдерін болжау мен есептеу дәлдігін арттырады. Бағдарлама эксперименттерді сақтау және қайта жүктеу мүмкіндігін қолдайды, станциялар функциялары мен жабдық параметрлерін баптай отырып автоматты және қолмен басқаруды жүзеге асырады, сондай-ақ интеллектуалды кеңесші функциясымен жабдықталған.

Кілтті сөздер: виртуалды электр станциясы, бөлінген энергетикалық ресурстар, виртуалды электр станциясының архитектурасы, жаңартылатын энергия көздері, цифрлық егіз, басқаруды оңтайландыру, модельдеу.

**S. V. Ibragimova¹, A. N. Starchevs², P. V. Kiriy³, M. T. Aituarova⁴*

^{1,3,4}Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University,

Republic of Kazakhstan, Kostanay;

²Rudny Industrial University,

Republic of Kazakhstan, Rudny.

Received 11.04.26.

Received in revised form 23.04.26.

Accepted for publication 02.09.26.

IMPLEMENTATION OF ARCHITECTURAL PRINCIPLES FOR VIRTUAL POWER PLANTS IN MODELING OF MIXED-GENERATION POWER SYSTEMS

The article is devoted to the analysis of architectural principles for constructing virtual power plants and to the study of possibilities for their implementation within simulation modeling under the conditions of digitalization of the energy sector. Based on system analysis and international experience, a unified architecture of a virtual power plant is proposed, consisting of five functional levels – “Business”, “Function”, “Information”, “Communication”, and “Components” – which makes it

possible to integrate the energy resource distribution system, telemetry tools, analytical modules, optimization algorithms, and interfaces for interaction between the electricity and capacity market and the system operator. The applicability of the virtual power plant model for increasing the flexibility, reliability, and adaptability of a mixed-generation power system is demonstrated. The proposed approaches were implemented in a software simulator that enables modeling of a power system while considering geographical location, climatic and weather conditions, as well as the types of generation sources. An important characteristic of the model is the ability to assess the stochastic nature of the power system according to the criterion of power supply reliability, which improves the accuracy of forecasting and operating mode calculations. The program supports saving and reloading experiments, provides automatic and manual control with the ability to configure plant functions and equipment parameters, and is also equipped with an intelligent advisor function.

Keywords: virtual power plant, distributed energy resources, virtual power plant architecture, renewable energy sources, digital twin, control optimization, modeling.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

19,0 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

19,0 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz