



ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY

УДК 629.73

МРНТИ 50.43.19

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_2

Б. Муратхан¹, К.Т. Кошеков¹, Т.Б. Керибаева^{1*}

¹АО «Академия Гражданской Авиации», Алматы, Казахстан

*E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

КИБЕР-МОДЕЛЬ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ АЭРОМОБИЛЬНОСТИ

Аннотация. В статье предлагается концептуальная модель интегрированной системы энергообеспечения системы городской воздушной мобильности. Цель статьи состоит в повышении робастности системы городской воздушной мобильности. Агенты энергетической инфраструктуры UAM включают: летательные аппараты eVTOL; вертипорты, оснащенные мощными зарядными станциями; высокоскоростные зарядные системы; системы накопления энергии; возобновляемые источники энергии. Ключевыми аспектами цифровой трансформации региональной возобновляемой энергетики для UAM являются: умные сети (Smart Grids): искусственный интеллект; интернет вещей; инфраструктура зарядки. Энергетические системы вертипортов интегрируются с городскими электросетями и экономикой малых высот. Развитие городской инфраструктуры интегрирует систему воздушной мобильности в общую концепцию электроэнергетики, включая мониторинг инфраструктуры, как указано в планах развития гражданской беспилотной авиации Казахстана на 2025–2031 гг. В качестве методологии предметных исследований ресурсов региональной возобновляемой энергетики в городской воздушной мобильности использован геосистемный подход. В окончательном концептуальном варианте решение поставленных задач рассматривается как территориально - интегрированная векторная 2-D система: вертикальный вектор – геосистема, и горизонтальный вектор – электроэнергетика. Решаемые задачи относятся к кибер-системному моделированию, где оперируют вероятностными, имитационными, агентными, экспертными формальными форсайт инструментами. Инструментарий форсайт моделирования в статье был использован с целью оценки ранговых приоритетов в интегрированной системе развития электроэнергетики. Ранги значимости были найдены для следующих направлений развития энергетики: исследованы: оценки были исследованы: угольная электроэнергетика; большая атомная электроэнергетика; большая гидро – электроэнергетика; малая гидро – электроэнергетика; ветро – электроэнергетика; солнечная – электроэнергетика; теплонасосы; малая атомная электро-энергетика; интегрированная ВИЭ; водородная электро – энергетика. Наибольшее предпочтение было отдано малой атомной энергетике, а второй приоритет отдан малой гидроэнергетике. Эти результаты тесно связаны с природно-климатическими, социально-экономическими и территориально-географическими особенностями региона.

Ключевые слова: система, энергетика, кибертехнология, риск, математическое обеспечение, техническое обеспечение, имитационные модели.

Введение.

Наступающая урбанизация в условиях цифровой трансформации экономики представляется кибер-средой, в которой важнейшее место отводится системе воздушной мобильности, агрегирующую гражданскую авиацию и беспилотные летательные системы [1,2]. В социально-технологическом конгломерате происходит качественная революция с внедрением летательных аппаратов класса eVTOL. Беспилотные аппараты eVTOL (Electric Vertical Takeoff and Landing) - «это электрические летательные аппараты с вертикальным взлетом и посадкой, предназначенные для городской аэромобильности (UAM), пассажирских перевозок и доставки грузов» [3]. Цель работы состоит в повышении робастности системы энергообеспечения в среде городской воздушной мобильности.

Обзорный анализ проблемы городской аэромобильности приведен в работе А.Сюй [4], в которой указывается, что в условиях ускоренной урбанизации, роста населения и серьезных пробок на дорогах традиционные виды транспорта уже не обеспечивают эффективного передвижения по городу. В этом контексте UAM стала наиболее перспективной транспортной социально-экономической системой, которая стала одним из вариантов выхода из создавшейся ситуации. В отчете НАСА отмечается, что городская воздушная мобильность является наиболее безопасным и эффективным видом логистического решения, использующего как пилотируемые, так и беспилотные летательные системы в городских районах [5]. UAM охватывает различные области применения, включая услуги воздушного такси, экстренную медицинскую транспортировку, доставку грузов и персонала в критически важные места, и городскую экспресс-доставку, обеспечивающую эффективное распределение товаров.

Литературный анализ показал, что современные известные инженерные чисто конструктивно – технологические решения в большинстве своем обеспечивают запас полета от 50 до 100 км, что существенно ограничивает социально-экономические потребности урбанизированных территорий. Особенно значимо в указанных технологиях проявил себя энергетический риск. Для дронов eVTOL в основном используется пропеллерный электропривод, поэтому управление энергией является «неизбежными техническими вызовами» [6]. Исходя из указанных предпосылок, в работах [7,8] предлагается модель оптимизации энергосистемы с учетом скорости разряда литий-ионного аккумулятора и снижения напряжения во время полета. Было установлено, что, оптимизируя распределение энергии, можно продлить время полёта, что имеет крайне важные последствия. Несмотря на то, что энергетическая безопасность является одним из ключевых процессов в системе управления полетами, в документе «4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации 2010» этому фактору отводится крайне незначительное место. Практика показывает, что к основным проблемам литиевых аккумуляторов относятся: быстрая разрядка после зарядки, вздутие батареи, внезапное отключение во время полета, значительное сокращение времени полета и несовместимость зарядных устройств. Оценка аккумуляторов БПЛА базируется на трех ключевых факторах: емкости, токоотдаче, весе. Энергоемкость - способность отдавать высокие токи (20C–75C+ для FPV) и сохранение работоспособности при заданном температурном режиме. Основными критериями оценивания аккумуляторов беспилотных авиационных систем (БАС) являются: емкость (мАч/mAh), которую определяют по тому, как долго дрон может находиться в воздухе; вес аккумулятора; токоотдача, показывающая скорость отдачи энергии без перегрева; удельная энергоемкость (Вт·ч/кг; сбалансированность напряжения на всех банках (4.2V на ячейку при полном заряде). Техническая диагностика аккумуляторов состоит в измерении внутреннего сопротивления, которое измеряется интеллектуальными зарядными устройствами. Высокое сопротивление свидетельствует о старении и потере мощности. Оценка ресурса. Так, литий-полимерные аккумуляторы выдерживают 300–500 циклов заряда/разряда до деградации мощности. В работах [9 - 12] отмечалось, что необходимость компромиссов между

производительностью и безопасностью архитектуры энергосистемы в электрических летательных аппаратах приобретает исключительно важное значение. По этой причине время полёта eVTOL сильно зависит от конструктивных компромиссов между полезной ёмкостью аккумулятора, резервной энергией для безопасности и массой батареи, и должна проводиться количественная оценка рисков, с целью обеспечения дальности полёта. Она является ключевым технологическим и логистическим агентом экономики малых горизонтов городского воздушного транспорта, который развивается в Казахстане, где тестирование первых аэротакси запланировано на 2026 - 2027 годы. В Казахстане развитие UAM и сопутствующей энерго-инфраструктуры рассматривается как часть модернизации электроснабжения и повышения транспортной доступности в мегаполисах. Из этого вытекает, что организационно-технологическое обеспечение UAM имеет следующее системное содержание: зарядная инфраструктура энергосистемы включающая в себя сеть быстрых зарядных станций, размещенных на вертикапортах (вертодромах для eVTOL), обеспечивающих быструю заправку летательных аппаратов между рейсами; из-за высокой потребности в энергии ограниченной емкостью источников требуется высокая мощность для зарядки в сжатые сроки, что создает нагрузку на городские электросети; интеграция энергосистемы UAM с городскими сетями предусматривается высокий уровень использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ); мониторинг надежности работы энергосистемы опирается на предиктивность робастности системы.

На основании изложенного следует вывод об актуальности, представленной проблематики как в целом, так и в локальных научно-практических приложениях. Для достижения цели исследования в декларируемой предметной области необходимо решить следующие задачи: форсайт моделирование системной интеграции энергообеспечения региональной системы аэромобильности; формализация процессов интегрирования региональной электрогенерации на возобновляемых технологиях.

Материалы и методы исследования.

Методология и методы исследования в предлагаемой статье базируется на следующих подходах и стандартах: системно-интегрированном подходе; платформе Индустрия 4.0; стандарте ISO 31000. Предметом исследования является процесс повышения энергетической надежности беспилотной системой городской воздушной мобильности на примере летательных аппаратов класса eVTOL, в среде угроз природного, антропогенного и субъективного происхождения. Беспилотная система в среде современной урбанизированной территории представляют собой по классификации Стаффорда Бира С. «сверхсложную» систему [13,14]. В работе выдвинуты ряд гипотез: исследуемая система относится к недетерминированным; в контуре управления присутствует человек; система относится к открытым, так как существуют связи с внешней средой, которая оказывают на систему воздействие, и система на них реагирует.

Моделирование сверхсложных системных процессов региональной интегрированной электроэнергетике приводит к необходимости оперировать большой совокупностью таких ключевых атрибутов и понятий как: система, системная открытость, системная динамика, горизонтальная и вертикальная интегрированность, синергетика, многокритериальность, процессность, недетерминированность, нестационарность, нелинейность, адаптивность, качество, проектность, инновационность, риски, индивидуализация. Бизнес-среда и бизнес-процессы в предметном контексте исследования опираются на Государственную и региональную программы Цифровой трансформации.

Результат и их обсуждение.

Текущий этап исследований состоит в формализации предметной области. Учитывая геосистемные особенности предметной социально-экономической территории, промышленный и социальный потенциалы на первом этапе формализации задачи

исследования использовано форсайт-структурное моделирование [15]. В качестве территориального примера была выбрана Восточно-Казахстанская область, которая со всех точек зрения, обладает в среде Республики Казахстан самым большим разнообразием и адекватно отвечает условиям задачи моделирования. Научно-практическая методология геосистемности задачи опирается на парадигму объективности существования единой связи «природа-общество», интегрирующей совокупность взаимосвязанных и объединенных единой целью функционально самостоятельных макро-агентов. В качестве экспертов были привлечены специалисты областной администрации, а также ученые Алматинской Академии гражданской авиации. Оптимальное количество экспертов с учетом условий исследуемого региона составило шесть специалистов. Экспертам было предложено ранжировать по 10-ти балльной шкале 6 вариантов развития региональной энергосистемы. На экспертизу были вынесены следующие энерго-варианты:

1. Угольная электроэнергетика – В1.
2. Большая атомная электроэнергетика – В2.
3. Большая гидро – электроэнергетика – В3.
4. Малая гидро - электроэнергетика – В4.
5. Ветро - электроэнергетика – В5.
6. Солнечная - электроэнергетика. – В6.
7. Теплонасосы - В7;
8. Малая атомная электро-энергетика – В8;
9. Интегрированная ВИЭ – В9;
10. Водородная электро – энергетика – В10.

В последнее время большую популярность и практическое развитие, особенно в частном домостроении, приобретают «Тепловые насосы». Данная технология в настоящее время используется в основном в обогреве частных домостроений. Экспертный опрос может проводиться путем: открытой дискуссии, мозгового штурма и анонимного анкетирования. В данном случае было использовано анонимное анкетирование. Каждому эксперту предлагались две анкеты. В первой анкете ставилась задача и форма оценивания вариантов экспертизы. Вторая анкета содержала предложение, по взаимной оценке, компетентности экспертов по десяти - балльной системе. После сбора результатов анкетирования была проведена их обработка по известной методике. Итоговые результаты экспертизы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Итоговые балльные взвешенные оценки экспертного исследования весомости инвестиционных проектов развития региональной энергосистемы

№ Эксперта	Варианты экспертизы									
	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9	В10
Э1	0,105	0,132	0,112	0,099	0,125	0,118	0,092	0,086	0,072	0,059
Э2	0,105	0,133	0,070	0,077	0,126	0,119	0,056	0,140	0,091	0,084
Э3	0,091	0,110	0,104	0,123	0,084	0,097	0,130	0,117	0,078	0,065
Э4	0,069	0,103	0,097	0,124	0,131	0,062	0,076	0,138	0,110	0,076
Э5	0,028	0,095	0,074	0,081	0,135	0,108	0,188	0,122	0,115	0,059

На основании данных таблицы 1 формируется таблица рангов по максимальному баллу, которому присваивается единица и т.д. (табл. 2)

Таблица 2 – Ранговые оценки экспертизы проектов развития региональной энергосистемы

№ эксперта	Ранговые оценки результатов экспертизы										Сумма рангов
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	
Э1	5	1	4	6	2	3	7	8	9	10	55
Э2	5	2	9	8	3	4	10	1	6	7	55
Э3	7	4	5	2	8	6	1	3	9	10	55
Э4	9	5	6	7	3	2	10	8	1	4	55
Э5	9	6	7	2	8	2	5	1	3	4	55

Качество экспертизы оценивается степенью совпадения мнений экспертов, для этой цели используются ранговые коэффициенты корреляции Спирмена. Результат экспертизы оказался следующим: наибольшее предпочтение эксперты отдают малой атомной энергетике – В8, а второй ранг присваивается малой гидроэнергетике – В4. Так как климатические условия РК очень разнообразны, то для южных географических регионов, где сохраняются большие проблемы с водными ресурсами, результаты экспертизы должны быть совершенно другие.

В следующей задаче предметом интереса является новая парадигма электро-генерации, которая рассматривается как интегрированная кибер-система, содержащая некоторую совокупность программно-стохастических агентов, объединенных в единую региональную кибер-среду, функционально представляющую синергетическую сущность. Гипотетическая кибер-модель подобной энергосистемы может быть представлена рисунком 1, состоящей из энергопроизводителей в составе генерирующих агентов Э₁-Э₇ и порядка 35 наиболее крупных потребителей электроэнергии П₁-П₃₅.

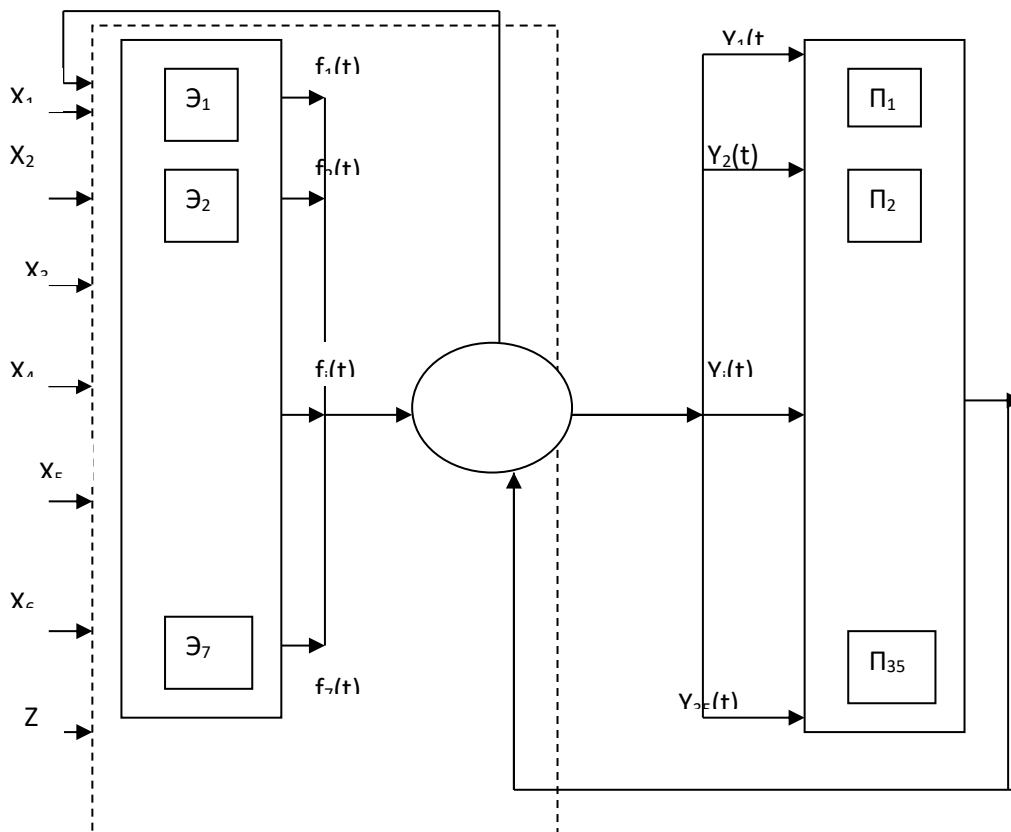


Рисунок 1 – Кибер - модель интегрированной региональной энергосистемы

В модели не рассматриваются варианты В1, В7, В10. Входами системы является множество $\{X_i\}$ в том числе X_1 - финансы, X_2 - материальные ресурсы, X_3 - людские ресурсы, X_4 - экология. Аналогичный подход для построения кибермодели предприятия использован в работах Дж. Форрестера и Д. Медоуза. Однако важными факторами, существенно влияющими на функционирование системы являются эксплуатационная надежность технического обеспечения и внешние случайные факторы Z в виде климатических, экономических и др. воздействий.

Под влиянием всего комплекса внешних и внутренних факторов, генерируемая мощность будет представлять случайный процесс $f_i(t)$. Суммарная энергия системы ОЭСР распределяется между потребителями Π_1 - Π_{35} . Для оперативного управления энерго-распределением между потребителями создан специальный информационно-диспетчерский центр (ИДЦ), который выполняет диспетчерские функции и функции оперативного нормирования в случае нехватки энергоресурсов генерируемых в системе используется электроэнергия из внерегиональных источников (X_6).

Особенность работы ИДЦУ в современных рыночных условиях, когда энергогенерирующие предприятия принадлежат разным владельцам, коренным образом изменяет ее функции. Раньше за диспетчерской службой были закреплены только функции договорной коммутации. В настоящее время в условиях вариаций себестоимости производства электроэнергии у разных производителей и закрепления взаимоотношений поставщика и потребителя электроэнергии договорными условиями (ДУ), в которых присутствуют штрафные санкции при недопоставках в договорное время электроэнергии потребителю. Данная служба создана для того, чтобы в первую очередь отслеживать коллективные интересы производителей электроэнергии.

Основная функция ДУ может быть выражена целевой функцией

$$L(x) = \sum C_i X_i \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_i - стоимость штрафа i -му производителю за квт/час недопоставляемого топлива;

X_i - объем недопоставленного топлива i -м производителем.

В данной модели представляется крайне важным исследовать вероятности критических ситуаций в системе генерирования электроэнергии и вероятностная реакция потребителя. Не менее важным обстоятельством для потребителя является прогнозирование возможности стать не потребителем, а производителем электроэнергии при внедрении «зеленой» энергетики. Алгоритм имитационной модели следующий.

Общий принцип работы кибер - системы.

Управления энергосистемой может управляться в двух режимах: ручном и программно- автоматическом. В связи с высоким уровнем развития ИИ, на некоторых этапах управления можно применять данную технологию, но под контролем оператора.

В каждый временной промежуток управления (допустим ежечасно), диспетчер - система "опрашивает" потребность по каждому потребителю и ранжирует их по степени определенной приоритетности. Вторым этапом "опрашиваются" производители и тоже ранжируются по стоимости и их энергетическим возможностям. Удовлетворение потребителей начинается с верхнего приоритета долевой энергией и т.д.

1.Ценовые заявки производителей электрической энергии:

1.1 Каждый день не позднее 8-30 час. установленного времени, каждый производитель электрической энергии должен подавать набор заявленных цен (на 1 этапе она одна) и декларацию, касающуюся рабочей мощности каждого блока на следующие сутки.

1.2. Каждый день, не позднее 8-30 час. установленного времени, поставщик электрической энергии и потребители должны подавать в систему прогноз потребления мощности Мвт., а также прогноз суточного потребления электроэнергии Мвтч.

2. Повторные заявки на рабочую мощность:

2.1 В любое время производитель электрической энергии может подать пересмотренную заявку рабочей мощности относительно электростанций, рабочая мощность которых изменилась с момента подачи последней заявки;

2.2 Повторная заявка рабочей мощности должна включать блок, которого касается заявка, расчетные периоды к которым относится повторная заявка, пересмотренную рабочую мощность;

2.3 производитель электрической энергии должен обеспечить, чтобы все поданные заявки отвечали фактическому состоянию оборудования и запасам топлива на его электростанции.

3. Прогноз электропотребления:

3.1 Поданные заявки по мощности и энергии всеми поставщиками и потребителями электрической энергии;

3.2 Все другие факторы, которые распорядитель системы финансовых расчетов обоснованно считает влияющими на потребление.

4. Прогноз высших перетоков.

На основании межрегиональных контактов распорядитель финансовых расчетов должен согласовать с диспетчерским центром прогноз данных перетоков для каждого расчетного периода следующих суток. Должен иметь форму сальдо внешних перетоков (экспорт минус импорт).

5. Сбор и проверка данных:

5.1 Распорядитель системы финансовых расчетов должен собрать данные измерений, проверить их достоверность, установить постоянные поправки.

5.2 Для каждого расчетного периода расчетных суток распорядитель системы финансовых расчетов должен вычислить с целью использования в расчетном графике следующие параметры.

5.3 Фактическую выработку электростанции.

5.4 Фактический отпуск электростанции.

-фактическое потребление поставщика (потребителя) электроэнергии;

5.5 Полное почасовое расчетное покрытие.

5.6 Фактический внешний переток.

Все данные должны быть распределены по расчетным периодам для включения их в систему финансовых расчетов.

6. Потери в магистральных и межгосударственных электросетях.

Для каждого расчетного периода расчетных суток распорядитель системы финансовых расчетов должен вычислить потери в электросетях.

7. Диспетчерское управление:

7.1 Диспетчерское управление должно осуществлять физическое управление всеми электростанциями в полном соответствии с правилами пула и действующими техническими нормами и правилами.

7.2 Диспетчерское управление должно подавать распорядителю системы финансовых расчетов диспетчерский журнал, в котором фиксируются все команды, подаваемые блоками в течение суток.

7.3 Диспетчерское управление должно вести учет всех команд, подаваемых по блокам, которые включают заданную диспетчером нагрузку каждому блоку. Данные этого учета передаются распорядителю системы финансовых расчетов;

7.4 Правила не дают никакой гарантии производителю электрической энергии относительно включения его в график нагрузки в случае подачи им завышенной ценовой заявки.

Для оптимального функционирования энергетической системы должен соблюдаться баланс между производством электроэнергии и ее потреблением. Для того, чтобы описать

систему, работающую без вмешательства человека в ее функционирование, представляется необходимым разработать имитационную модель, симулирующая производство и распределение электроэнергии. Но при составлении модели необходимо учесть, что производство энергии зависит от большого числа внешних факторов, независящих от персонала и производство электроэнергии носит заметный сезонный характер. Для оптимального функционирования энергосистемы выработка электроэнергии не должна снижаться ниже уровня X_H . Значения средней выработки в реальном масштабе времени может быть выражено функцией времени $X_{CP}=f(t)$ и в каждый моделируемый момент времени пересчитывается. Данные для вычисления средней мощности будут найдены экспериментально по отчетности энергогенерирующих системных агентов. Данные по потреблению электроэнергии находятся в базе данных системы энергосистемы.

Имитационная модель периодически с временным шагом "разыгрывает" ситуацию, которая может случиться на уровнях энергопроизводства и потребления. Если объем производимой электроэнергии достаточен для покрытия заявок потребителей, то электроэнергия распределяется по установленной договорной схеме: фиксируется количество электроэнергии, которое будет произведено каждой генерирующей установкой; на основании поданных потребителями заявок на поставку электроэнергии определяется точное количество энергии необходимое для потребления каждому потребителю; определяется стоимость произведенной электроэнергии; устанавливается отпускная цена; производятся взаиморасчеты.

Если в системе сложилась ситуация, что предложение на поставку электроэнергии не покрывает заявки потребителей, то работа энергосистемы будет идти по следующей схеме: оценивается объем производимой энергии по каждому производителю; определяется точное количество электроэнергии необходимое каждому потребителю; изыскиваются резервы внутри системы, для полного покрытия потребления. Если их недостаточно, то изыскивается возможность закупки энергии за пределами системы. При отсутствии таковой, в качестве крайней меры, производится сброс потребительской нагрузки; оценивается себестоимость энергии; определяется отпускная цена; анализируется причина сложившейся ситуации. Если дефицит электроэнергии образовался по вине ее производителя, то к нему применяются штрафные санкции; производятся взаиморасчеты между энергосистемой и его субъектами с учетом штрафа

Объем производства и потребления электрической энергии в значительной степени зависит от сезонов года и климатических условий, а также социально-экономических условий для данного периода. Для прогнозирования надежности системы энергоснабжения региона надо экспериментально-статистически исследовать эту зависимость.

Алгоритм имитационного исследования можно разделить на три основных этапа (рис. 2): установление экономико-математической зависимости между производством и потреблением электроэнергии с одной стороны и временем года с другой; моделирование производства и потребления электроэнергии во времени; проверка полученной модели на адекватность производственному процессу.

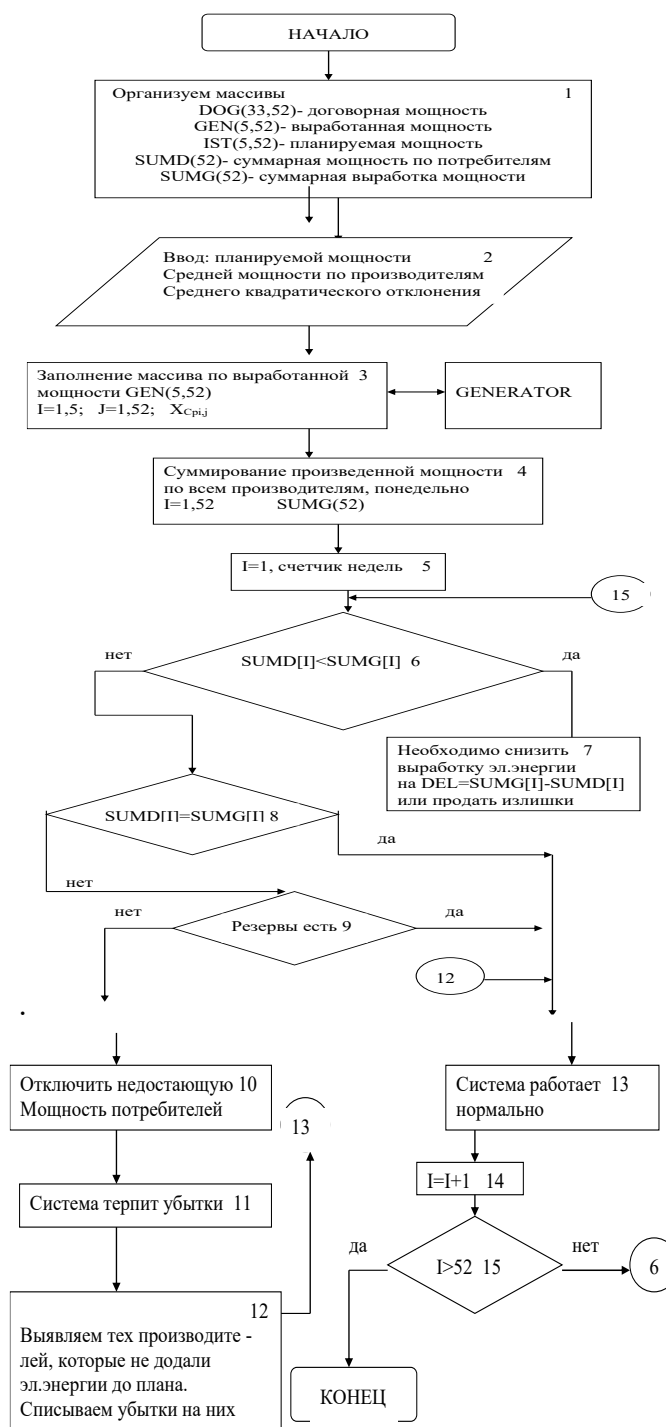


Рисунок 2 – Имитационный алгоритм энергобаланса территориальной электроэнергетической системы

Зависимость выработки и потребления от сезона весьма сложна, так как на динамику этих процессов влияет большое количество посторонних факторов (климатические условия, тенденции в развитии производства, нестабильности экономики, энергетическая обстановка в других регионах, состояние оборудования генерирующих станций, аварийные ситуации и др.). в результате этого формула, выражающая взаимосвязь между количеством произведенной и потребленной электроэнергии и временем года будет носить приближенный характер. Данная модель в общей системе территориальной

электроэнергетики выполняет функцию предиктивного мониторинга, который используя раздел регрессионного анализа в режиме реального времени, оперируя с историческими и текущими данными, строит спредсказательную модель. Предварительный функционально-статистический анализ территориальных энергосистемных процессов дает возможность выдвинуть гипотезу, что в основе этих зависимостей лежит полиномиальная зависимость, которая выражается следующей формулой

$$F(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+\dots+a_nt^n \quad (2)$$

Используя пакет Statistica**, в разделе корреляционно-регрессионного анализа, были найдены численные значения коэффициентов выражения (2) Информационной базой анализа послужили статистические данные администрации региона за последние пять лет. В результате обработки регрессионные модели производства и потребления имеют следующий вид:

Для производства

$$Y=606,7+171,6x-55,4x^2+5,57x^3-0,169x^4 \quad (3)$$

Для потребления

$$Y=1132-172x+12,33x^2 \quad (4)$$

Результаты экспериментально-статистического регрессионного моделирования в графической форме приведены на рисунках 3 - 6.

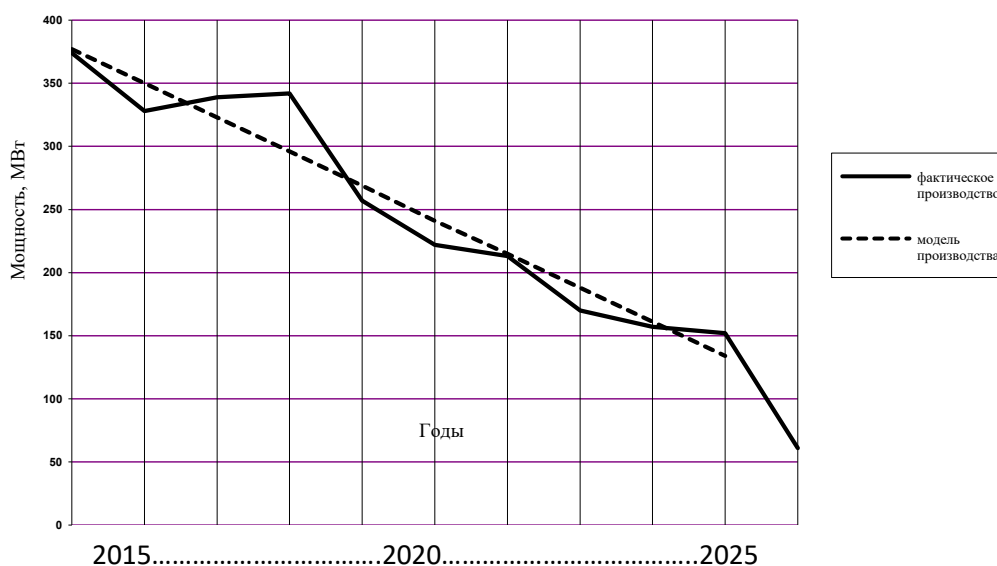


Рисунок 3 – Динамика производства электроэнергии

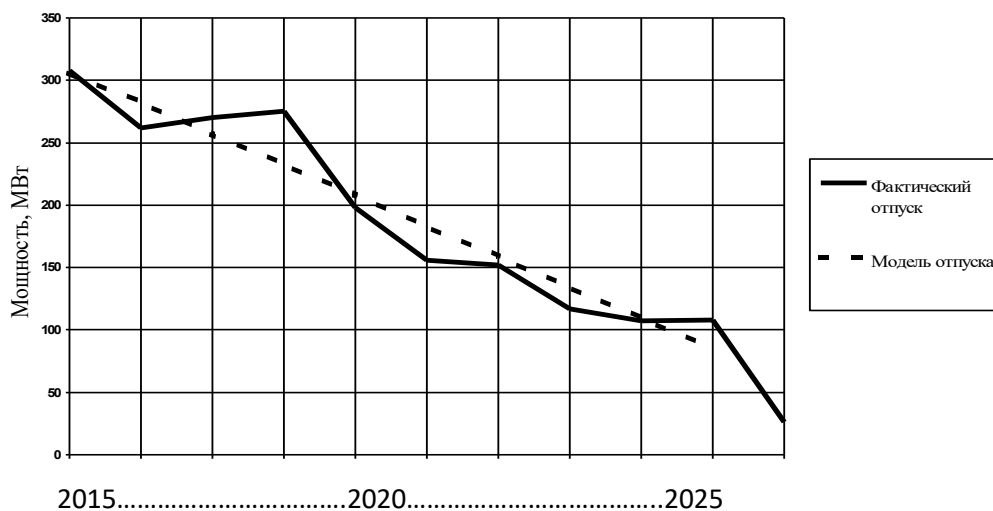


Рисунок 4 – Динамика отпуска электроэнергии

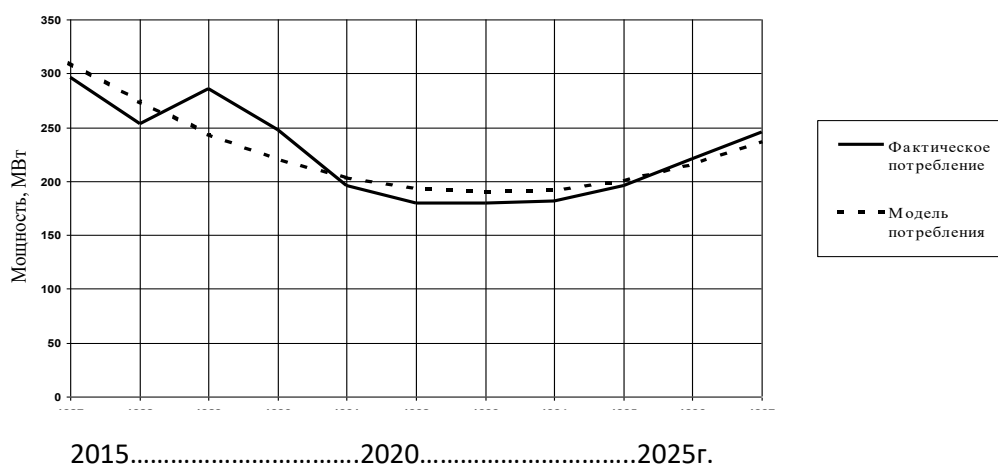


Рисунок 5 – Динамика потребления электроэнергии

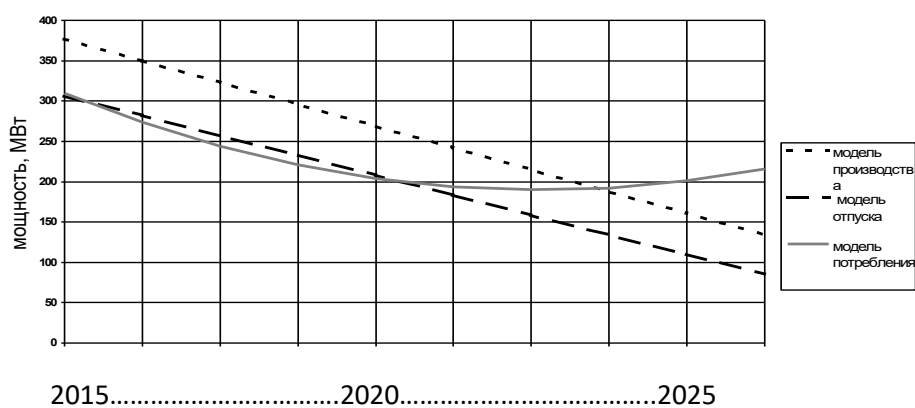


Рисунок 6 – Модели производства, отпуска и потребления электроэнергии

Адекватность моделей производственному процессу определяем с помощью оценки следующих показателей:

-корреляционное отношение - Q . При $Q > 0,8$ существует высокая корреляционная зависимость:

-для производства $Q=0,83$;

-для потребления $Q=0,94$;

Коэффициент детерминации D - характеризует взаимосвязь выбранных факторов и аргументов, $0 < D < 1$. Чем выше коэффициент детерминации, тем существеннее связь:

-для производства $D=0,7$;

-для потребления $D=0,9$;

Коэффициент Фишера F - характеризует соответствие модели производственному процессу $F_{\text{расч.}} > F_{\text{табл.}}$. Чем больше расчетное значение коэффициента превышает табличное, тем эффективнее уравнение регрессии:

-для производства $F_{\text{расч.}} = 4$ $F_{\text{табл.}} = 3,65$;

-для потребления $F_{\text{расч.}} = 9$ $F_{\text{табл.}} = 3,35$.

Таким образом, анализ вышеперечисленных показателей дает основание утверждать об адекватности полученных экономико - математических моделей, отражающих сезонные колебания производства и потребления электроэнергии.

Сопоставляя полученные модели (рис.3 – 6), можно сделать следующие выводы. В период с ноября по март в энергосистеме наблюдается превышение потребления электроэнергии над ее производством. Поэтому, зная это, необходимо заранее к этому периоду выискивать дополнительные резервы мощности внутри системы, заключать договора на поставку электроэнергии с энергопроизводителями других регионов, повышать эффективность и надежность использования оборудования.

Компьютерный эксперимент на базе данной программы и сведений о затратах, необходимых для расчета отпускной цены, (взяты из базы данных энергосистемы) представил прогнозную оценку себестоимости и отпускную цену на 2026-2027 годы. Результаты расчета следующие:

Статьи расходов	Сумма, тыс.тенге
1. Затраты на топливо	: 29576.00
2. Услуги производственного характера	: 20792.00
3. Вспомогательные материалы	: 6515.00
4. Фонд оплаты труда	: 10342.00
5. Амортизационные отчисления	: 4818.00
6. Прочие затраты	: 9723.00
7. Выработанная электроэнергия, (МВт/ч)	: 100.94
8. Фактический отпуск электроэнергии, (МВт/ч)	: 58.01
9. Потребление составит, (МВт/ч)	: 286.46
Себестоимость 1кВт/ч электроэнергии	: 1.16 тенге
Отпускная цена 1кВт/ч электроэнергии	: 1.53 тенге

Прогноз основных технико-экономических показателей деятельности энергосистемы до 2028 года.

ГОД	ВЫРАБОТКА	ОТПУСК	ПОТРЕБЛЕНИЕ	
2026	100.94	58.01	286.46	
2027	73.90	33.45		320.57
2028	46.86	8.89	361.04	
2029	19.82	-15.67	407.87	
2002	-7.22	-40.23	461.06	
2030	-44.07	-74.60	510.80	
2031	-120.17	-148.22	527.65	
2032	-147.21	-172.78	599.92	

По результатам компьютерного эксперимента построены прогнозы производства и потребления электроэнергии (рис.7).

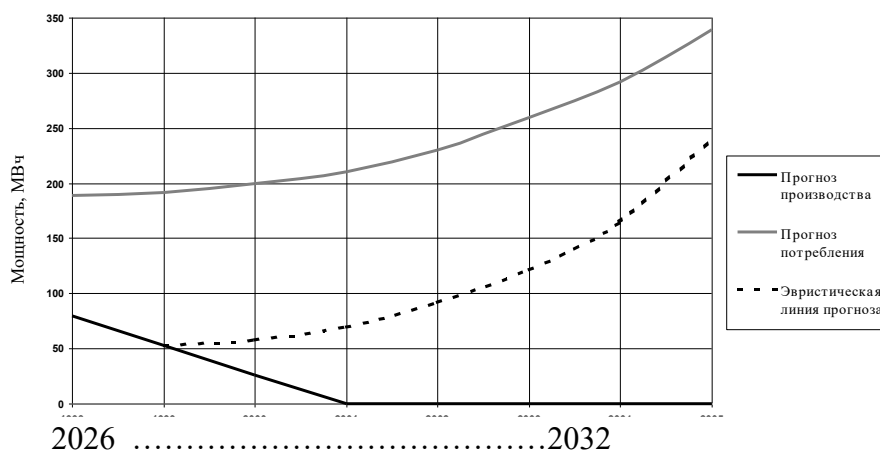


Рисунок 7 – Прогноз производства и потребления электроэнергии

В результате прогноза выявлено, что объем потребления электроэнергии будет постепенно расти. Производство электроэнергии будет продолжать падать и в 2029 году упадет до нуля. Но такая ситуация практически невозможна, так как чревата серьезными последствиями для региона. Поэтому в настоящее время руководством предприятия разрабатываются мероприятия по устранению причин, приведших к снижению выработки электрической энергии.

В связи с этим можно предположить, что в результате принятия инвестиционных мер производство электроэнергии в будущем будет увеличиваться и постепенно покроет объем потребления (рис.7). Таким образом, дефицит электроэнергии, должен гипотетически уменьшаться (рис.8).

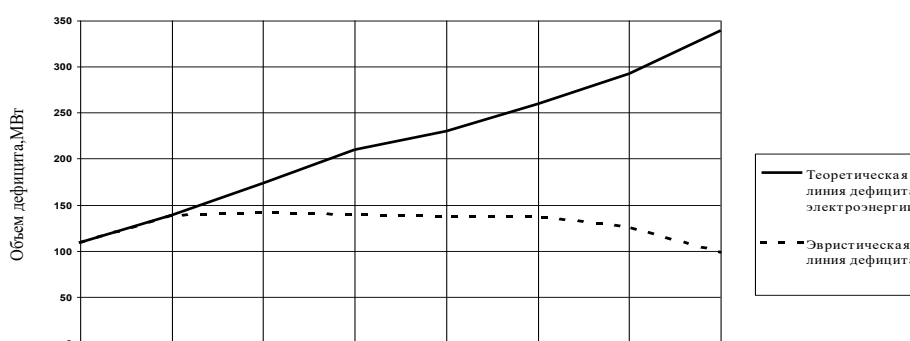


Рисунок 8 – Гипотетическая модель прогноза дефицита электроэнергии

Таким образом, из приведенных исследований можно сделать следующие выводы. В регионе исследования наблюдается дефицит электроэнергии, что считается временным явлением. Для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию со стороны новых потребителей стремительно растущей среды региональной беспилотной мобильности и дата-центров - на данной территории необходим реинжиниринг существующей энергосистемы, путем создания альтернативной подсистемы электрогенерирования на принципах интегрирования ресурсов малой и возобновляемой энергетики

Заключение.

В работе исследован кибер-подход к энергообеспечению системы территориальной воздушной мобильности на примере локальной урбанизированной территории, предложена концептуальная парадигма энергообеспечения данной территории на базе восстанавливаемых источников энергообеспечения. В качестве методологии исследований ресурсов региональной возобновляемой энергетики в городской воздушной мобильности использован геосистемный подход, в котором геосистема рассматривается как динамическая композиция природных и искусственных подсистемных иерархий и ресурсов таких как: ветровые, солнечные ресурсы, ресурсы малой гидроэнергетики, теплонасосы и водородная энергетика. В результате экспертизы существующих и перспективных систем генерации электроэнергии на территории РК, с целью оценки перспектив предстоящего инвестирования в эту область, было выявлено, что наибольшее предпочтение эксперты отдают малой атомной энергетике. С целью оптимального социально-экономического решения в области развития энергетического обеспечения региона на базе возобновляемых источников электроэнергии была разработана организационно-техническая целевая кибер-модель, состоящая из энерго-производителей на возобновляемых энерго-платформах в составе генерирующих частных агентов с единой диспетчеризацией. Для прогнозирования результативности, интегрированной в единую региональную кибер-среду объектов возобновляемой электроэнергетики, были построены регрессионные модели. Для исследования функционала энергосистемы, работающей без вмешательства человека в управление, была разработана имитационная модель, программное приложение и проведен компьютерный эксперимент. Результаты эксперимента представлены в графическом формате.

Список литературы

1. Hanna, R., Kreindler, G. & Olken B. (2021). Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from “three-in-one” in Jakarta. *Science* 2017, 357, 89-93. <https://doi.org/10.1126/science.aan2747>
2. Eliasson, J. Efficient transport pricing—why, what, and when? *Communications in Transportation Research* 2021, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100006>.
3. Wang, K. & Qu, X. (2023). Urban aerial mobility: Reshaping the future of urban transportation. *The Innovation* 2023, 4, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100392>.
4. Urban air mobility: Is this a different way of saying “aviation in cities”. *Uniting Aviation* (10 июля 2019). Дата обращения: 10 ноября 2019.
5. Сюй, Дж., Гуань, К., Ван, Ю., Чжуан, Дж. & Ган, В. (2025). Систематический обзор развития городской воздушной мобильности: технологические вызовы беспилотников eVTOL и политика на малых высотах в Шэньчжэне. *Дроны* 9, 842. <https://doi.org/10.3390/drones9120842>.
6. Gipson, L. (2017). NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study; NASA: Washington, DC, USA, Volume 7.
7. Wang, G., Hu, Y., Song, B. & Tan, C. (2015). Optimization design and flight time evaluation of electric unmanned aerial vehicle power system. *J. Aerosp. Power* 30, 1834–1840. [Google Scholar].
8. Frederick, Z.J., Hallock, T.J., Ozoroski, T.A., Chapman, J.W., Kuhnle, C.A. & Frederic, P.C. (2023). Design Exploration of a Mild Hybrid Electrified Aircraft Propulsion Concept. In *Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum*, San Diego, CA, USA, 12–16 June p. 4226. [Google Scholar]
9. Liu, L., Du, M., Zhang, X., Zhang, C., Xu, G. & Wang, Z. (2016). Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 37, 144–162. [Google Scholar].

9. Stroeve, S. H., Blom, H. A. P. & (Bert) Bakker, G. J. (2008). Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation,” *Safety Science*, vol. 47, no. 2, pp. 238–249, Jun., doi: 10.1016/j.ssci.2008.04.003.
10. Ni, X., Wang, H., Che, C., Hong, J. & Sun Z. (2019). Civil aviation safety evaluation based on deep belief network and principal component analysis. *Safety Science*. Vol. 112, pp. 90-95, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.012>
11. Li, X. et al. (2024). "IMTCN: An Interpretable Flight Safety Analysis and Prediction Model Based on Multi-Scale Temporal Convolutional Networks," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 289-302, Jan. doi: 10.1109/TITS.2023.3308988. keywords:
12. Yang, L. & Chen, X. (2023). Research on data-driven flight safety risk assessment and time series forecasting method. *IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Dali, China, 2023, pp. 480-485, doi: 10.1109/ICCASIT58768.2023.10351761.
13. Друкер, П. (2002). Эффективное управление –М.: ФАИР-ПРЕСС, -288 с.
14. Бир Ст. Кибернетика и управление производством. Изд-во «Наука», 1965.
15. Соколов, А.В. (2007). Форсайт: взгляд в будущее. Форсайт, №1 (1), С. 8-15.

References

1. Hanna, R., Kreindler, G. & Olken, B. (2017). Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from “three-in-one” in Jakarta. *Science*, 357, 89-93. <https://doi.org/10.1126/science.aan2747> Eliasson, J. Efficient transport pricing—why, what, and when? *Communications in Transportation Research* 2021, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100006>.
2. Wang, K. & Qu, X. (2019). Urban aerial mobility: Reshaping the future of urban transportation. *The Innovation* 2023, 4, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100392>.
3. Urban air mobility: Is this a different way of saying “aviation in cities”. *Uniting Aviation Data obrashcheniya: 10 noyabrya 2019*.
4. Syuj, Dzh., Guan', K., Van, Yu., Chzhuan, Dzh. & Gan, V. (2025). Sistematicheskij obzor razvitiya gorodskoj vozduшной mobil'nosti: tehnologicheskie vyzovy bespilotnikov eVTOL i politika na mal'nyh vysotah v Shehn'chzhene. *Drony* 9, 842. <https://doi.org/10.3390/drones9120842>.
5. Gipson, L. (2017). NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study; NASA: Washington, DC, USA, Volume 7.
6. Wang, G., Hu, Y., Song, B. & Tan, C. (2015). Optimization design and flight time evaluation of electric unmanned aerial vehicle power system. *J. Aerosp. Power*, 30, 1834–1840. [Google Scholar].
7. Frederick, Z.J., Hallock, T.J., Ozoroski, T.A., Chapman, J.W., Kuhnle, C.A. & Frederic, P.C. (2023). Design Exploration of a Mild Hybrid Electrified Aircraft Propulsion Concept. In *Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum*, San Diego, CA, USA, 12–16 June, p. 4226. [Google Scholar]
8. Liu, L., Du, M., Zhang, X., Zhang, C., Xu, G. & Wang, Z. (2016). Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* 37, 144–162. [Google Scholar].
9. Stroeve, S. H., Blom H. A. P. & G. J. (Bert) (2008). Bakker, “Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation,” *Safety Science*, vol. 47, no. 2, pp. 238–249, Jun., doi: 10.1016/j.ssci.2008.04.003.
10. Ni, H., Wang, N., Che, S., Hong, J. & Sun Z. (2019). Civil aviation safety evaluation based on deep belief network and principal component analysis. *Safety Science*. Vol. 112, rr. 90-95, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.012>
11. Li, X. et al. (2024). "IMTCN: An Interpretable Flight Safety Analysis and Prediction Model Based on Multi-Scale Temporal Convolutional Networks," in *IEEE Transactions on*

Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 1, pp. 289-302, Jan., doi: 10.1109/TITS.2023.3308988. keywords:

12. Yang, L. & Chen, X. (2023). Research on data-driven flight safety risk assessment and time series forecasting method. IEEE 5th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), Dali, China, pp. 480-485, doi: 10.1109/ICCASIT58768.2023.10351761.

13. Druker, P. (2002). Ehffektivnoe upravlenie –M.: FAIR-PRESS, 288 s.

14. Bir St. Kibernetika i upravlenie proizvodstvom. Izd-vo «Nauka», 1965.

15. Sokolov, A.V. (2007). Forsajt: vzglyad v budushchee. Forsajt, №1 (1), S. 8-15.

АУМАҚТЫҚ АЭРОМОБИЛЬДІЛІККЕ АРНАЛҒАН ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯНЫҢ КИБЕРМОДЕЛІ

Аңдатпа. Мақалада қалалық әуе қозғалысына арналған интеграцияланған энергиямен жабдықтау жүйесінің тұжырымдамалық моделі ұсынылған. Мақаланың мақсаты - қалалық әуе қозғалысына арналған жүйенің беріктігін арттыру. UAM энергетикалық инфрақұрылымының агенттеріне мыналар жатады: eVTOL ұшақтары; жоғары қуатты зарядтау станцияларымен жабдықталған вертипорттар; жоғары жылдамдықты зарядтау жүйелері; энергия сақтау жүйелері; жаңартылатын энергия көздері. UAM үшін аймақтық жаңартылатын энергияны цифрлық түрлендірудің негізгі аспектілері: Ақылды желілер: жасанды интеллект; Заттар интернеті; зарядтау инфрақұрылымы. Вертипорттардың энергетикалық жүйелері қалалық электр желілерімен және төмен биіктіктегі экономикамен біріктірілген. Қалалық инфрақұрылымды дамыту әуе қозғалысына арналған жүйені электр энергетикасы саласының жалпы тұжырымдамасына, соның ішінде инфрақұрылымды бақылауға біріктіреді, бұл Қазақстанда 2025-2031 жылдарға арналған азаматтық пилотсыз авиацияны дамыту жоспарларында көрсетілгендей. Геожүйелер тәсілі қалалық әуе қозғалысына арналған аймақтық жаңартылатын энергия ресурстарын тақырыптық зерттеу әдіснамасы ретінде қолданылады. Соңғы тұжырымдамалық нұсқада қойылған есептердің шешімі аумақтық интеграцияланған векторлық 2-D жүйесі ретінде қарастырылады: тік вектор - геожүйе, ал көлденең вектор - электр энергетикасы саласы. Шешілетін мәселелер ықтималдық, модельдеу, агент, сараптамалық формальды болжау құралдары жұмыс істейтін кибержүйелік модельдеуге қатысты. Мақаладағы болжау модельдеу құралдары электр энергетикасын дамытудың интеграцияланған жүйесіндегі рангтік басымдықтарды бағалау үшін пайдаланылды. Энергетика дамуының келесі салалары үшін маңыздылық рангтері табылды: Келесілер зерттелді: Бағалаулар зерттелді: көмірмен жұмыс істейтін электр энергиясы; ірі көлемді ядролық электр энергиясы; ірі көлемді гидроэлектростанция; шағын гидроэлектростанция; жел электр энергиясы; күн электр энергиясы; жылу сорғылары; шағын атом электр энергиясы; интеграцияланған жаңартылатын энергия көздері; сутегі электр энергиясы. Шағын ядролық энергияға ең көп басымдық берілді, ал екінші басымдық шағын гидроэлектростанцияға берілді. Бұл нәтижелер аймақтың табиғи, климаттық, әлеуметтік-экономикалық және аумақтық-географиялық сипаттамаларымен тығыз байланысты.

Түйін сөздер: жүйе, энергетика, кибертехнология, тәуекел, математикалық бағдарламалық қамтамасыз ету, техникалық қолдау, модельдеу модельдері.

CYBER-MODEL OF RENEWABLE ENERGY FOR TERRITORIAL AIR MOBILITY

Abstract. This article proposes a conceptual model for an integrated energy supply system for Urban Air Mobility (UAM). The aim is to enhance the robustness of the UAM system. UAM energy infrastructure agents include eVTOL aircraft, vertiports equipped with high-capacity charging

stations, high-speed charging systems, energy storage systems, and renewable energy sources. Key aspects of the digital transformation of regional renewable energy for UAM include smart grids, artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and charging infrastructure. Vertiport energy systems are integrated with urban power grids and the low-altitude economy. Urban infrastructure development integrates the air mobility system into the broader electric power framework—including infrastructure monitoring—in alignment with Kazakhstan's civil unmanned aviation development plans for 2025–2031. A geosystem approach was employed as the methodology for examining regional renewable energy resources within the context of urban air mobility. In the final conceptual model, the solution is framed as a spatially integrated 2D vector system: a vertical vector representing the geosystem and a horizontal vector representing the electric power sector. The tasks addressed fall within the realm of cyber-system modeling, utilizing probabilistic, simulation, agent-based, and expert-driven formal foresight tools. Foresight modeling tools were applied to assess priority rankings within the integrated power sector development system. Significance rankings were determined for the following energy development areas: coal-fired power generation, large-scale nuclear power, large-scale hydropower, small-scale hydropower, wind power, and solar power. heat pumps; small-scale nuclear power; integrated renewable energy sources; hydrogen-based power generation. Small-scale nuclear power was given the highest priority, followed by small-scale hydropower. These results are closely linked to the region's natural-climatic, socio-economic, and geographical characteristics.

Keywords: system, energy sector, cyber-technology, risk, mathematical support, technical support, simulation models.

Авторлар туралы мәлімет

Муратхан Бибігүл	Докторант, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан
Кошеков Кайрат Темирбаевич	Д.т.н. профессор, Алматы, Қазақстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Керибаева Талшын Бақытжанқызы	PhD, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының ААА қауымдастырылған профессоры, Азаматтық Авиация Академиясы, Алматы, Қазақстан, E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

Сведение об авторах

Муратхан Бибігүл	Докторант, АО «Академия гражданской авиации», г. Алматы, Казахстан.
Кошеков Кайрат Темирбаевич	Д.т.н., профессор, г. Алматы, Казахстан, E-mail: kkoshekov@mail.ru
Керибаева Талшын Бақытжанқызы	PhD, Асс. профессор АГА, кафедры «Авиационная техника и технологии», АО Академия Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан. E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

Information about the authors

Muratkhon Bibigul	Doctoral candidate, Civil Aviation Academy JSC, Almaty, Kazakhstan.
Koshekov Kairat Temirbaevich	Doctor of Technical Sciences, Professor, Almaty, Kazakhstan E-mail: kkoshekov@mail.ru
Keribayeva Talshyn	PhD, Assoc. Professor ACA, Department of Aviation Engineering and Technologies, Academy of Civil Aviation JSC, Almaty, Kazakhstan, E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz