

Никитенко Михаил Артемович

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Цифровая диспетчеризация в электроэнергетике: экономика гибкости и балансировки

Аннотация. Статья рассматривает цифровую диспетчеризацию как рыночно-технологическую инфраструктуру, обеспечивающую экономику гибкости и балансировки в электроэнергетике. Предлагается целостная рамка «цифровой экономики гибкости», увязывающая вероятностное прогнозирование нагрузки и ВИЭ, ко-оптимизацию энергии, резервов и сетевых ограничений, локализованные ценовые сигналы и верифицируемое исполнение через платформы SCADA/EMS/DMS/DERMS и агрегаторов. Показано, что переход от точечных к вероятностным прогнозам в сочетании со скользящим планированием с короткими интервалами расчёта снижает избыточное резервирование и среднюю стоимость балансировки. Узловое ценообразование и локальные рынки гибкости уменьшают вне-рыночный redispatch и точнее отражают дефициты в распределённых сетях. Для оценки сравнительной эффективности ресурсов вводится прикладная метрика CoDF (удельная стоимость поставленной гибкости), позволяющая сопоставлять управляемый спрос, накопители и маневренную генерацию и настраивать рыночные правила. Обоснована необходимость координации TSO–DSO для предотвращения двойного учёта услуг и приоритизации локальных задач сети. Подчёркнута ключевая роль киберустойчивости (защищённая телеметрия, цифровые подписи, режимы деградации) для масштабируемых расчётов и доверия участников. Полученные результаты формируют практические ориентиры для регуляторов, системных и сетевых операторов при проектировании рынков и цифровых платформ гибкости.

Ключевые слова: цифровая диспетчеризация; экономика гибкости; балансировка; узловые цены; локальные рынки гибкости; DER/агрегация; ко-оптимизация; CoDF; TSO–DSO; киберустойчивость.

Nikitenko Mikhail Artemovich

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Digital dispatching in the electric power industry: the economy of flexibility and balancing

Annotation. The article considers digital dispatching as a market-technological infrastructure that ensures the economy of flexibility and balancing in the electric power industry. A holistic framework of the "digital economy of flexibility" is proposed, linking probabilistic load and RES forecasting, co-optimization of energy, reserves and network constraints, localized price signals and verified execution through SCADA/EMS/DMS/DERMS platforms and aggregators. It is shown that the transition from point to probabilistic forecasts in combination with sliding planning with short calculation intervals reduces excess reservation and the average cost of balancing. Nodal pricing and local flexibility markets reduce off-market redispatch and more accurately reflect deficits in distributed networks. To assess the comparative efficiency of resources, an applied metric CoDF (specific cost of delivered flexibility) is introduced, which allows comparing controlled demand, storage devices and maneuverable generation and adjusting market rules. The need for TSO–DSO coordination to prevent double accounting of services and prioritize local network tasks is substantiated. The key role of cyber

resilience (secure telemetry, digital signatures, degradation modes) for scalable calculations and participant trust is emphasized. The results obtained form practical guidelines for regulators, system and network operators when designing markets and digital platforms for flexibility.

Keywords: digital dispatch; flexibility economics; balancing; nodal pricing; local flexibility markets; DER/aggregation; co-optimization; CoDF; TSO–DSO; cyber resilience.

Введение

Цифровая трансформация электроэнергетики развивается на фоне трёх взаимосвязанных тенденций — децентрализации, декарбонизации и цифровизации. Быстрый рост доли переменной генерации (ветровой и солнечной), появление распределённых энергоресурсов (DER), электромобилей и систем накопления, а также усложнение потокораспределения в распределительных сетях повышают требования к оперативности и качеству диспетчерского управления. В этой среде устойчивость энергосистемы определяется не столько установленной мощностью, сколько доступной гибкостью — способностью быстро и экономично изменять выработку и/или потребление для поддержания баланса, частоты и напряжения [1].

Традиционно диспетчеризация трактовалась как техническая функция управления генерацией и сетевыми ограничениями. Однако по мере роста неопределённости и стоимости отклонений её природа становится экономической: требуются прозрачные механизмы выявления и закупки гибкости из множества источников — от манёвренной генерации и гидроаккумулирующих станций до спросо-реагирования, виртуальных электростанций и накопителей энергии. Цифровые платформы (SCADA/EMS/DMS/DERMS), алгоритмы прогнозирования и оптимизации в реальном времени, а также открытые интерфейсы для агрегаторов переводят диспетчеризацию в разряд рыночно-технологической инфраструктуры, где балансировка обеспечивается через конкурентные торги и стандартизованные услуги [2 – 4].

Несмотря на заметный прогресс в автоматическом регулировании и прогнозировании, в отрасли сохраняется разрыв между технологическими возможностями и рыночным дизайном. Часто модернизация ограничивается обновлением ИТ/ОТ-контуров без формализации экономической ценности гибкости, локализации услуг и верификации исполнения. Это сдерживает допуск новых ресурсов к рынкам системных услуг и повышает совокупную стоимость балансировки.

Цель статьи — предложить целостную рамку «цифровой экономики гибкости», связывающую архитектуру цифровой диспетчеризации с механизмами оценки и закупки гибкости в разных горизонтах времени. В рамках работы: формализуется понятие гибкости и даётся таксономия источников (генерация, накопители, спрос, DER/VPP, электромобильность); предлагаются метрики оценки ценности гибкости, включая совокупную стоимость поставки (CoDF) и вклад в надёжность; рассматриваются механизмы балансировки (FCR/aFRR/mFRR, резервы замещения, услуги напряжения, управление перегрузками) и их отражение в рыночных правилах; обсуждаются координация TSO–DSO, локализация услуг и верификация; очерчиваются требования к киберустойчивости и операционной модели данных [5, 6].

Научная новизна и практическая значимость заключаются в увязке методологии экономической оценки гибкости с прикладной архитектурой цифровой диспетчеризации и наборами услуг балансировки. Предложенные подходы могут служить ориентиром для регуляторов, системных и сетевых операторов, а также для участников рынка — генераторов, агрегаторов и крупных потребителей.

Анализ существующих методов и подходов

Современная цифровая диспетчеризация — это связка прогнозирования, оптимизации, рыночных механизмов и оперативного исполнения; ценность проявляется лишь при их совместной работе. Прогнозирование перешло от единственной траектории к вероятностным сценариям нагрузки и ВИЭ, что позволяет рассчитывать требуемую

гибкость по часам, а не «на всякий случай». Качество моделей оценивают не только по средней ошибке, но и по устойчивости к структурным сдвигам (электрификация, новые профили потребления). Поэтому вместе с моделями разворачивают MLOps-контур: мониторинг дрейфа, переобучение, тестирование и валидация — без этого решения быстро устаревают [7].

Оптимизационный слой опирается на ко-оптимизацию энергии и всех типов резервов: система одновременно выбирает графики генерации, объёмы вверх/вниз и допустимые скорости изменения мощности, удерживая равновесие при флуктуациях. Сетевые ограничения встраиваются в расчёт сразу, снижая объём вне-рыночного redispatch и делая ценовые сигналы локально осмысленными. Повсеместно внедряется «скользящее» планирование с коротким шагом: обновление решений каждые несколько минут резко уменьшает издержки от прогнозных ошибок. В распределительных сетях при высокой доле инверторов критично учитывать напряжение и реактивную мощность; цифровые двойники и доверенные модели предотвращают конфликты между локальным качеством напряжения и системной балансировкой.

Рыночный слой следует за оптимизацией: расчётные периоды укорачиваются, узловые цены точнее сигнализируют дефициты гибкости, а там, где доминирует зональная модель, её дополняют аукционами гибкости. Механизмы редкости и «pay-for-performance» выравнивают стимулы: быстрая и точная реакция оплачивается выше, невыполнение — штрафуются. Это формирует экономическую дисциплину, без которой цифровая диспетчеризация остаётся красивой оболочкой [8].

Интеграция DER и спросо-реагирования меняет адресатов команд: потребитель и малая генерация становятся поставщиками услуг. На практике важны предквалификация и каталог услуг (объём, длительность, скорость, частота активаций), надёжная маршрутизация команд по стандартным протоколам и корректная базовая линия для расчётов. Минимизация ошибок CBL, автоматическая проверка аномалий и прозрачная отчётность повышают доверие и реальное участие ресурсов.

Координация TSO–DSO движется к гибридным схемам: локальные задачи (перегрузки, напряжение) закрываются «внизу», а на оптовый уровень передаётся «очищенная» потребность. «Склейка» обеспечивается обменом данными о доступности и цене гибкости, общими приоритетами и едиными реестрами — это исключает двойной учёт и конфликты по времени.

Управление сетевыми ограничениями получает цифровой апгрейд: оптимизация топологии, устройства управления потоками, FACTS/HVDC и динамические пределы линий (DLR) высвобождают скрытую пропускную способность. Цифровые двойники позволяют заранее проверить, что дешевле — локальный рынок гибкости или усиление сети. Эффект напрямую зависит от доверия к данным: при нехватке или низком качестве телеметрии выгоды тают.

Болезненные точки: слабая интероперабельность данных и протоколов, ограниченная наблюдаемость распределительных сетей, чувствительность расчётов к сбоям связи и синхронизации времени, непростая оценка износа накопителей. Киберустойчивость — не «дополнение», а базовое требование: сегментация OT/IT, минимальные привилегии, обнаружение аномалий и режимы деградации, при которых балансировка и расчёты сохраняются даже при частичных отказах.

Опыт показывает: лучшие результаты возникают, когда вся «цепочка» собрана end-to-end — вероятностные прогнозы задают потребность, ко-оптимизация учитывает сеть и резервы, узловые/локальные цены отражают предельную ценность, а AGC/DERMS обеспечивают доставку услуги; верификация и расчёты прозрачны и юридически значимы. Система переходит от реактивного тушения отклонений к предиктивному управлению.

Дальнейший вектор: ещё более плотная связка прогнозирования и управления в реальном времени, короткие торговые интервалы, локализация цен в распределительных

сетях, массовый допуск агрегированных ресурсов при низких транзакционных издержках, сочетание локальных рынков с интеллектуальным управлением потоками и DLR, стандартизованные интерфейсы и «нулевое доверие». Это не «одна технология», а согласованная экосистема — от датчика до расчётного алгоритма.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты показывают, как «цепочка ценности» цифровой диспетчеризации — от вероятностных прогнозов и ко-оптимизации до локализованных ценовых сигналов и верифицируемого исполнения — меняет экономику гибкости и балансировки. Переход от точечных к вероятностным прогнозам снижает потребность в страховых резервах при прежней надёжности: резерв закладывается там и тогда, где риск высок, а средняя стоимость балансировки падает. Критично сопровождать модели MLOps-контуром: дрейф данных без переобучения быстро превращается в избыточные закупки гибкости.

Ко-оптимизация энергии, резервов и сетевых ограничений устойчиво превосходит поэтапные процедуры: она сразу выдаёт технически реализуемый и экономически согласованный план, сокращает вне-рыночный redispatch и делает цены пространственно осмысленными. Узловые предельные цены отражают сетевые «узкие места», а явное планирование ramping предотвращает дефициты скорости изменения мощности.

В исполнении выигрывает частый пересчёт: пятиминутные итерации с актуальными метеоданными и телеметрией снижают отклонения от графика. Но связь и задержки становятся полноценным ограничением: план ценен лишь при своевременной доставке команд и юридически значимой телеметрии (цифровые подписи, след событий).

Локальные закупки гибкости в распределительных сетях уменьшают потребность в капитальных мерах; цифровые двойники и каталоги услуг позволяют точно «лечить» перегрузки и напряжение. Качество базовой линии и M&V определяют справедливые выплаты и доверие участников; прозрачные параметры портфелей агрегаторов упрощают настройку услуг под нужды сети.

Сравнение технологий требует единой метрики. CoDF (удельная стоимость поставленной гибкости) даёт базу для выбора между управляемым спросом, накопителями и маневренной генерацией и помогает корректировать рыночные правила, если издержки выше ожидаемых выплат.

Нодальная модель лучше транслирует локальные дефициты и снижает redispatch; при росте DER усиливается смысл «микро-локальных» механизмов на уровне фидера. Короткие расчётные интервалы и «скользящее» планирование сокращают экстренные активации, но повышают требования к ИТ/ОТ-инфраструктуре и устойчивости каналов связи.

Дефицитное ценообразование приближает краткосрочные цены к предельной ценности неснабжения и стимулирует быстрореагирующие ресурсы; устойчивость эффекта зависит от прозрачной методологии. Координация TSO–DSO с обменом данными о доступности и ценах предотвращает двойной учёт, закрывает локальные задачи «внизу» и выводит на оптовый уровень «очищенную» потребность.

Киберустойчивость — обязательное условие масштабирования: «нулевое доверие», сегментация ОТ/ИТ, подписи телеметрии и режимы деградации обеспечивают непрерывность балансировки и расчётов. Итоговые выводы: (1) вероятностные прогнозы и ко-оптимизация устойчиво снижают совокупные издержки; (2) узловые/локальные цены уменьшают объём ручного вмешательства и повышают предсказуемость выплат; (3) высокая частота расчётов и защищённая верификация переводят балансировку почти в реальное время; (4) метрики вроде CoDF выравнивают поле игры между технологиями. Вперёд — согласование «трёх скоростей» (физика сети, вычисления, рынок): когда расчёты и торги попадают в окно динамики системы, исполнение быстро превращается в денежный результат, а управление становится предиктивным и экономически устойчивым.

Заключение. Цифровая диспетчеризация превращает балансировку из «ремонта по факту» в предиктивный и экономически прозрачный процесс. Ключ к этому — связка вероятностных прогнозов, ко-оптимизации энергии, резервов и сетевых ограничений, локализованных ценовых сигналов и верифицируемого исполнения с высокой частотой пересчётов. Там, где узловые цены и локальные рынки гибкости дополняют друг друга, снижаются объёмы вне-рыночного редиспатча и растёт предсказуемость выплат, а интеграция DER через стандартизованные интерфейсы расширяет предложение быстрой и дешёвой гибкости. Практика показала, что киберустойчивая телеметрия и корректная базовая линия столь же важны, как и сами алгоритмы: без доверия к данным рынок не масштабируется. Впереди — углубление координации TSO–DSO, перенос локализованных цен и аукционов в распределительные сети, дальнейшее повышение частоты торговых интервалов и промышленное использование цифровых двойников. Это позволит направлять реакции именно туда и тогда, где их предельная ценность максимальна, снижая совокупные издержки системы и одновременно повышая её устойчивость.

Список источников

1. Инновационные технологии в управлении системами обеспечения движения поездов / Н. А. Попова, П. А. Бодров, М. К. Попов, А. В. Бутенко // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов V международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 07–08 октября 2021 года / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 48-51.
2. Дагладиян, Г.Д. Применение систем технического зрения на железнодорожном транспорте. / Дагладиян Г.Д., Давыдов Ю.И. Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство" ("Транспорт - 2018"). Т.3. - Ростовн/Д: РГУПС. 2018. - С. 55-59
3. Колобов, И.А. Применение цифровых технологий на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство" ("Транспорт-2018"). Т.3. - Ростовн/Д: РГУПС. 2018. - С.107-110
4. Баринаева В.А., Девятова А.А., Ломов Д.Ю. Роль цифровизации в глобальном энергетическом переходе и в российской энергетике // Вестник международных организаций, 2021. - Т. 16. - № 4. - С. 126-145
5. Текслер А.Л. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли // Цифровая энергетика, 2020. - В. 5. - С. 3-6
6. Ahmad T., Zhang D., Huang C., Zhang H., Dai N., Song Y., Chen H. Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities // Journal of Cleaner Production, 2021. - Vol. 289
7. Ларин, А. С. Роль цифровизации в повышении надежности систем электроснабжения / А. С. Ларин // Студенческий. – 2025. – № 14-7(310). – С. 16-18
8. Донченко, В. А. Концепция единой автоматизированной системы управления энергообъектами распределительных сетей и энергосбытовой деятельностью / В. А. Донченко, О. А. Котова // Электроэнергетика глазами молодежи : Материалы XI Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Ставрополь, 15–17 сентября 2020 года. Том 2. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 50-53

Сведения об авторах

Никитенко Михаил Артемович, магистрант кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» в г. Новочеркасске, Новочеркасск, Россия

Сведения о руководителе

Ланкин Антон Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркасске, Новочеркасск, Россия

Information about the authors

Nikitenko Mikhail Artemovich, Master's student of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Information about the supervisor

Lankin Anton Mikhailovich, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia