

Особенности прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями в Республике Казахстан

^{1*}**ДРУЖИНИН Валерий Михайлович**, PhD, старший преподаватель, druzhinin_vm@mail.ru,

²**ГРЕБЕННИКОВ Евгений Юрьевич**, генеральный директор, maneb1@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», пр. Республики, 30, Темиртау, Казахстан,

²ТОО «СЭС Сарань», ул. Жамбыла, 85В, Сарань, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В Республике Казахстан прогнозирование выработки электрической энергии солнечными электростанциями осуществляется по децентрализованной модели. Это означает, что объекты сами прогнозируют погоду и выработку и несут ответственность за результаты прогнозирования. Актуальной проблемой является несоответствие прогнозных данных и фактической выработки. Это может привести к необходимости корректировки финансовых и технических моделей. В статье рассматриваются методы прогнозирования, фундаментальные правовые допуски и ограничения. Кроме того, продемонстрированы реально достижимые результаты прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и приведены объективные аргументы, указывающие на сложность создания объективных прогнозов, изложены возможные меры по совершенствованию процесса прогнозирования и обработки его результатов.

Ключевые слова: электрическая энергия, производство электрической энергии, возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, прогнозирование производства электрической энергии.

Введение

С принятием в 2009 году Закона Республики Казахстан № 165-IV «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» [1] в нашей стране начался амбициозный процесс строительства и ввода в эксплуатацию солнечных, ветряных, биогазовых и гидроэлектростанций с целевыми индикаторами по доведению их доли в общем объеме производства электроэнергии до 6% в 2025 году, к 2030 году – 15%, к 2050 году на возобновляемые и альтернативные источники энергии должно приходиться не менее половины всего совокупного энергопотребления. Солнечные электростанции (далее СЭС) играют важную роль в реализации государственной программы перехода к возобновляемым источникам энергии (далее ВИЭ) и снижении зависимости от ископаемых видов топлива. В промышленной эксплуатации указанного рода объектов ВИЭ значительное внимание уделяется организации процесса качественного прогнозирования выработки электрической энер-

гии, так как работа СЭС напрямую зависит от множества переменных факторов, таких как климатические условия, сезонные изменения и время суток. Процесс прогнозирования производства электрической энергии и постоянное его совершенствование представляют собой важную комплексную практическую и научно-методическую задачу для эффективного планирования и непосредственно самого обслуживания СЭС. В настоящее время существует множество методов прогнозирования выработки электрической энергии СЭС, в числе которых, к примеру, можно отметить статистические подходы, машинное обучение, физические модели и другие, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения.

Методы прогнозирования

1. Статистические методы. Классические статистические методы, такие как регрессия, используются для прогнозирования выработки электроэнергии. Эти методы основываются на исторических данных о выработке электроэнергии и параметрах

погодных условий, таких как температура, облачность и солнечное излучение и др.

2. Машинное обучение. Модели машинного обучения, включая модели на основе нейронных сетей, становятся все более распространенными. Они позволяют учитывать сложные и нелинейные зависимости между переменными и могут адаптироваться к новым данным. Одним из известных методов является использование рекуррентных нейронных сетей, которые хорошо справляются с временными рядами.

3. Физические модели. Физические модели прогнозируют выработку электроэнергии на основе математических уравнений, описывающих процессы преобразования солнечной энергии в электрическую. Эти модели требуют подробной информации о конструкции СЭС, географическом положении и погодных условиях.

Следует отметить, что с учетом имеющихся в настоящее время программно-вычислительных возможностей и передовых комплексов, а также принимая во внимание их ценовую доступность, преимущественное большинство СЭС на территории Республики Казахстан в своей деятельности использует услуги проверенных и зарекомендовавших себя лидеров (провайдеров) в области прогнозирования производства солнечной энергии. Качество доступной на настоящий момент достоверности прогнозирования крупными мировыми провайдерами подтверждается тем, что наряду с непосредственно СЭС их услугами пользуются и сами крупнейшие национальные системные операторы, системообразующие энергопоставляющие компании, как для прогнозирования выработки электроэнергии на национальном, региональном и корпоративном уровнях для оптимизации энергетической инфраструктуры и более эффективного управления ресурсами, так и для прогнозирования стоимости электроэнергии для национальных рынков на сутки вперед.

Современные комплексные сервисы предполагают минимальные требования к инфраструктуре СЭС, разрешение и частота обновления прогнозов адаптируются под спецификацию заказчика для максимального соответствия его потребностям. Горизонт прогнозирования составляет до 10–14 дней, использование совокупности наиболее передовых моделей численного прогнозирования позволяет достичь максимальную точность прогнозов. Оценка неопределенности погодных условий позволяет формировать вероятностные границы прогнозов, что способствует более точному определению рисков в планировании. Учитывая современное состояние развития

технологий прогнозирования, следует обратить внимание на то, в каких конкретных правоприменительных условиях, допусках и ограничениях действуют СЭС на территории Республики Казахстан при формировании, учете и обработке прогнозов. В частности, в соответствии с рядом основополагающих нормативно-правовых актов в области электроэнергетики – законом Республики Казахстан от «Об электроэнергетике» №588 9 июля 2004 года, приказом министра энергетики Республики Казахстан «Об утверждении Правил функционирования балансирующего рынка электрической энергии» №112 от 20 февраля 2015 года (зарегистрирован в Министерстве юстиции РК 26 марта 2015 года №10532) [2, 3] и рядом других, объекты ВИЭ, в том числе СЭС, обязаны систематически (примечание – годовой, месячный, суточный, часовой прогнозы) предоставлять прогнозные данные о выработке электрической энергии системному оператору и другим уполномоченным государственным органам для планирования производства/потребления и осуществления иных правовых, технических действий в пределах своих полномочий.

При этом следует особо отметить ряд важных допусков и ограничений, распространяющих свое действие на владельцев СЭС при осуществлении прогнозирования выработки электрической энергии:

1. Корректировка суточного графика прогнозов выработки электрической энергии. В соответствии с подпунктом 8) пункта 5 статьи 19-1 Закона РК «Об электроэнергетике» объекты ВИЭ (в том числе СЭС), имеющие долгосрочные договоры с Единым закупщиком, имеют право корректировать плановые заявки на увеличение и уменьшение суточного графика производства-потребления электрической энергии, утвержденного системным оператором АО «Кегок» РК не позднее чем за два часа до наступления соответствующего часа при условии сохранения баланса производства-потребления электрической энергии в указанном суточном графике производства-потребления электрической энергии. Согласно предписанному системным оператором алгоритму подписанная заявка отправляется в журнал корректировок диспетчеру регионального диспетчерского центра (далее РДЦ), в чьей зоне ответственности находится субъект, скорректировавший свою заявку, диспетчеру национального диспетчерского центра (далее НДЦ), а также всем пользователям, относящимся к субъектам из справочника «Цены по договорам Единого закупщика с ВИЭ». После публикации заявок диспетчер РДЦ осуществляет проверку и техническую

экспертизу заявок и публикует ее результат напротив заявки – (согласовано, не согласовано). При этом диспетчер НДЦ рассматривает корректировку при совокупном выполнении нескольких условий: 1) заявка согласована диспетчером РДЦ; 2) в журнале заявок есть согласованные РДЦ заявки как с положительными значениями (на увеличение), так и с отрицательными (на уменьшение) за один и тот же час в одной и той же зоне балансирования. Если до начала операционного часа, в котором планировалась корректировка в указанной зоне в соответствующий час, не появилось заявки с обратным знаком от другого субъекта, то в статусе рассмотрения НДЦ системного оператора автоматически появляется запись – отсутствует баланс производства-потребления электрической энергии. По истечении операционных суток специалист НДЦ формирует суточный график производства-потребления электрической энергии с учетом корректировок, который утверждается главным диспетчером. По данным казахстанской Ассоциации ВИЭ «QAZAQ GREEN», норма по корректировке плановых заявок за 2 часа до наступления соответствующего часа имеет отлагательное условие и применяется только при условии сохранения баланса производства-потребления электрической энергии. То есть до начала операционного часа, в котором планировалась корректировка в указанной зоне, должна появиться заявка с обратной корректировкой от другого субъекта. В случае, если этого не происходит, диспетчеры НДЦ системного оператора отклоняют такие корректировки. Указанное обстоятельство делает норму по корректировке трудно выполнимой, что как следствие, в том числе приводит к тому, что к концу любых отчетных периодов аналитическая информация по прогнозам/фактам также становится не совсем корректной.

2. Ответственность объектов ВИЭ за положительные и отрицательные дисбалансы. Приказом министра энергетики Республики Казахстан № 141-н/к от 28 марта 2025 года «О внесении изменений и дополнений в некоторые приказы министра энергетики Республики Казахстан» утверждены следующие новые правила и формулировки: 1) для энергопроизводящих организаций, использующих возобновляемые источники энергии, заключивших долгосрочный договор купли-продажи электрической энергии с единым закупщиком электрической энергии после 1 июля 2023 года, значения повышающего и понижающего коэффициентов определяются в следующем порядке: значение повышающего коэффициента, указанного в настоящем пункте, приравнивается к

1,3 для часа операционных суток, в котором значение положительного дисбаланса превышает допустимый диапазон отклонения; значение понижающего коэффициента, указанного в настоящем пункте, приравнивается к 0,7 для часа операционных суток, в котором модуль значения отрицательного дисбаланса превышает допустимый диапазон отклонения, а также о предполагаемом диапазоне погрешности за дисбалансы; 2) для энергопроизводящих организаций, использующих возобновляемые источники энергии, заключивших долгосрочный договор купли-продажи электрической энергии с единым закупщиком электрической энергии после 1 июля 2023 года, значения допустимых отклонений равны диапазону $\pm 5\%$ от планового значения отпуска электрической энергии в сеть, включенного в суточный график производства-потребления электрической энергии, утвержденный системным оператором.

С учетом вышеописанных правовых допусков, ограничений и требований в целях анализа складывающейся ситуации и реально достижимых результатов прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями на территории РК, приведем некоторые примеры отклонений и расчета финансовых потерь от данных отклонений на основании внутренних статистических данных Ассоциации солнечной энергетики РК «QAZAQ GREEN».

Пример №1_посуточные отклонения СЭС в течение года.

Если принять плановую выработку за 100% (ось X), то диапазон суточных отклонений в течение года варьируется от -240% (отрицательный дисбаланс) до 70% (положительный дисбаланс) на примере посуточных отклонений СЭС установленной мощностью 100 МВт в Центральном Казахстане за 11 месяцев 2024г. в % от планового показателя (рисунок 1). В некоторые дни диапазон посуточных отклонений СЭС достигает высоких значений для СЭС установленной мощностью 100 МВт в Центральном Казахстане. Особенно это прослеживается в период межсезонья: октябрь-ноябрь и март-апрель.

Пример №2_среднемесячные отклонения СЭС.

Если принять плановые значения за 100% (ось X), то среднемесячные отклонения для СЭС установленной мощностью 100 МВт в Центральном Казахстане варьируются от -14,7% (отрицательные дисбалансы) до 4,9% (положительные дисбалансы) за 11 месяцев 2024 года (рисунок 2).

Пример №3_расчет финансовых потерь при применении коэффициентов



Рисунок 1 – Посуточные отклонения СЭС в течение года

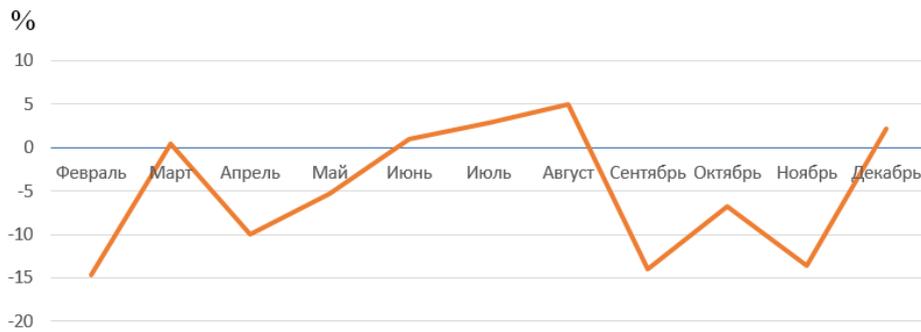


Рисунок 2 – Среднемесячные отклонения СЭС

0,7 и 1,3 за дисбалансы за год.

В таблице приведены финансовые потери при применении коэффициентов 0,7 и 1,3 за дисбалансы СЭС в Центральном Казахстане.

Статистическая картина указывает на то, что фактически диапазон погрешности возможно установить $\pm 15\%$ по итогам месячной выработки, а уже состоявшееся применение допустимых отклонений в диапазоне $\pm 5\%$ является очень амбициозной задачей для СЭС и в настоящее время не отражает реальной картины результатов прогнозирования. Коэффициенты (1,3 и 0,7) являются очень высокими и приведут к значительным финансовым затратам компаний производителей электрической энергии с помощью ВИЭ. Принимая во внимание вышеуказанные статистические данные и расчеты, необходимо привести следующие аргументы, прямо указывающие на сложность создания объективных прогнозов в настоящее время: 1) Глобальное повсеместное изменение климата в настоящий момент приводит к стихийным бедствиям, серьезным образом, отражающимся на всех странах Центральной Азии, причиняя убытки на сумму около 10 млрд долларов США и затрагивая жизни почти трех миллионов человек каждый год [4]. В

Республике Казахстан данные риски играют важнейшую роль с точки зрения прогнозирования выработки электроэнергии в силу ее географического месторасположения. Таким образом, все ключевые климатические индикаторы свидетельствуют о неослабевающем и продолжающемся изменении климата, все более частом возникновении и интенсификации экстремальных явлений с неопределенностью будущего состояния атмосферы. 2) Основной сложностью прогнозирования непосредственно на территории Республики Казахстан является резко континентальный климат с характерными значительными амплитудами суточных и сезонных температур воздуха, периодическими аномальными осадками в виде дождя и снега. 3) Строительство либо размещение в районе расположения СЭС крупных промышленных предприятий (таких, например, как ГЭС, являющейся по своему назначению комплексным ирригационным-энергетическим гидроузлом с соответствующим влиянием на многолетнее регулирование стоков близлежащих рек, либо горно-металлургических комбинатов, других крупных промышленных производств) оказывает и в будущем окажет значительные непредсказуемые изменения непосредственно на климат в регионе путем

Финансовые потери при применении коэффициентов 0,7 и 1,3 за дисбалансы СЭС в Центральном Казахстане (фрагмент, за периоды с 01.02.2024 г. по 10.02.2024 г. и с 21.12.2024 г. по 31.12.2024 г.)

| Дата | Отклонения, тыс. кВт/ч | Тариф, тенге за 1 кВт | Коэффициент | Финансовые потери, тенге |
|---------------|------------------------|-----------------------|-------------|--------------------------|
| 01.02.2024 г. | -25127 | 57,44 | 0,7 | -1010306,416 |
| 02.02.2024 г. | 64387 | 57,44 | 1,3 | 4807906,064 |
| 03.02.2024 г. | 62941 | 57,44 | 1,3 | 4699930,352 |
| 04.02.2024 г. | 58553 | 57,44 | 1,3 | 4372269,616 |
| 05.02.2024 г. | 44583 | 57,44 | 1,3 | 3329101,776 |
| 06.02.2024 г. | -63432 | 57,44 | 0,7 | -2550473,856 |
| 07.02.2024 г. | 87465 | 57,44 | 1,3 | 6531186,48 |
| 08.02.2024 г. | -73116 | 57,44 | 0,7 | -2939848,128 |
| 09.02.2024 г. | 21112 | 57,44 | 1,3 | 1576475,264 |
| 10.02.2024 г. | 186443 | 57,44 | 1,3 | 13922071,7 |
| 21.12.2024 г. | 14298 | 57,44 | 1,3 | 1067660,256 |
| 22.12.2024 г. | -3724 | 57,44 | 0,7 | -149734,592 |
| 23.12.2024 г. | -22351 | 57,44 | 0,7 | -898689,008 |
| 24.12.2024 г. | -4132 | 57,44 | 0,7 | -166139,456 |
| 25.12.2024 г. | -162466 | 57,44 | 0,7 | -6532432,928 |
| 26.12.2024 г. | -17819 | 57,44 | 0,7 | -716466,352 |
| 27.12.2024 г. | -72148 | 57,44 | 0,7 | -2900926,784 |
| 28.12.2024 г. | 25895 | 57,44 | 1,3 | 1933631,44 |
| 29.12.2024 г. | 23308 | 57,44 | 1,3 | 1740454,976 |
| 30.12.2024 г. | -25808 | 57,44 | 0,7 | -1037688,064 |
| 31.12.2024 г. | -21703 | 57,44 | 0,7 | -872634,224 |
| ИТОГО | | | | 302306145,6 |

воздействия на естественные водные циклы как на микроклиматическом уровне, так и в более широком диапазоне на региональном уровне. 4) В Центрально-Азиатском регионе лишь только реализуется проект Всемирного банка и Глобального фонда по модернизации гидрометеорологических служб стран Центральной Азии. При этом в настоящий момент имеет место необходимость дальнейшего совершенствования развитости аппаратно-технического комплекса системы мониторинга и прогнозирования метеорологических условий.

Выводы

С учетом реально складывающейся правоприменительной практики и объективных возможностей программно-вычислительных комплексов по прогнозированию представляется возможным делать вывод о целесообразности реализации следующего комплекса мер по совершенствованию процесса прогнозирования и алгоритмов статистического и коммерческого учета этих данных. Данный комплекс мер состоит из двух групп.

Первая группа мер – меры технического характера:

Создание парсера прогнозируемых результатов клиентского модуля субъекта

балансирующего рынка электроэнергии с использованием элементов искусственного интеллекта. В целях исключения «человеческого» фактора необходимо разработать специальное программное обеспечение «парсинг прогнозируемых результатов» со следующим назначением и областью применения:

1) автоматическое извлечение прогнозных данных из информационного потока (создание службы контроля, которая будет периодически подключаться к серверу FTP для получения файлов с прогнозами выработки электрической энергии, разработка протокола взаимодействия с сервером, процесса аутентификации и методов загрузки файлов);

2) автоматическое заполнение клиентского модуля согласно форме балансирующего рынка электроэнергии;

3) автоматическое подписание в связи логин/пароль;

4) автоматическая отправка заявки на продажу электрической энергии;

5) автоматическая отправка табличной формы excel на e-mail системного оператора;

6) при возникновении требования о не-

обходимости либо возможности корректировки прогнозных данных, программное обеспечение должно иметь возможность автоматически повторять данные операции ровно каждые два часа.

Более плотная инструментальная установка современных станций мониторинга погоды с их последующей интеграцией в единую конфигурацию со специальными датчиками, полностью автоматизированных и передающих данные через равные промежутки времени, в том числе техническое перевооружение имеющихся метеорологических радаров и станций «Казгидромет», сети метеорологического и гидрологического мониторинга.

Ревизия и оптимизация процесса предоставления данных через глобальные стандартизированные системы, координируемые Всемирной метеорологической организацией.

Вторая группа мер – меры организационно-правового характера:

Разработка нормативных предложений по предоставлению для вновь вводимых проектов СЭС отлагательного условия о том, что желаемый диапазон погрешности должен быть установлен только по итогам опытно-тестового переходного периода (с учетом оценки успешности прогнозов и интенсивности/повторяемости синоптических циклов раз в пять лет) для обеспечения вновь вводимых СЭС необходимыми историческими, техническими, информационно-вычислительными массивами реально складывающихся в районе метеорологических данных.

Предоставление нормативных предложений по установлению для энергопроизводящих организаций, использующих возобновляемые источники энергии, заключивших долгосрочный договор купли-продажи электрической энергии с единым закупщиком электрической энергии значений допусти-

мых отклонений в диапазоне $\pm 15\%$ от планового значения отпуска электрической энергии в сеть, включенного в суточный график производства-потребления электрической энергии, утвержденный системным оператором, и установлению справедливых значений повышающего и понижающего коэффициентов исходя из допустимых отклонений в диапазоне $\pm 15\%$ от планового значения.

Совместно с системным оператором и АО «КОРЭМ» разработать и реализовать техническую возможность добавления в опцию подачи заявки на корректировку суточного прогноза функции апелляции, где энергопроизводящая организация на ВИЭ может указывать причину отклонения, т.е. неподконтрольные внешние факторы, в том числе природные стихии, ограничение от внешних сетей и др.

Совместно с системным оператором и АО «КОРЭМ» разработать и реализовать техническую возможность принятия заявки на корректировку суточного графика на уменьшение до 0 вне зависимости от баланса производства-потребления на данный час в случае отключения линий электропередач, не принадлежащих объекту ВИЭ.

Рассмотреть возможность по устранению условий по сохранению баланса производства-потребления электрической энергии в случае корректировки от объектов ВИЭ. В свою очередь, это предоставит возможность более оперативно корректировать график генерации объектами ВИЭ, которые будут отражать реальные условия, при которых работают эти объекты (погодные условия, технические условия работы линий и т.д.).

Повышение эффективности и гибкости энергосистемы посредством строительства маневренной генерации системным оператором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Казахстан «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» № 165-IV от 4 июля 2009 года.
2. Закон Республики Казахстан от «Об электроэнергетике» №588 от 9 июля 2004 года.
3. Приказ министра энергетики Республики Казахстан «Об утверждении Правил функционирования балансирующего рынка электрической энергии» №112 от 20 февраля 2015 года (зарегистрирован в Министерстве юстиции РК 26 марта 2015 года №10532).
4. Электронный ресурс <https://blogs.worldbank.org/ru/europeandcentralasia/natural-disasters-cost-central-asia-10-billion-year-are-we-doing-enough>

Қазақстан Республикасындағы күн электр станцияларының электр энергиясын өндіруін болжау ерекшеліктері

¹***ДРУЖИНИН Валерий Михайлович**, PhD, аға оқытушы, druzhinin_vm@mail.ru,

²**ГРЕБЕННИКОВ Евгений Юрьевич**, бас директор, maneb1@mail.ru,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қазақстан,

²«СЭС Сарань» ЖШС, Жамбыл көшесі, 85В, Сарань, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Қазақстан Республикасында күн электр станцияларының электр энергиясын өндіруін болжау орталықтандырылмаған модель бойынша жүзеге асырылады. Бұл дегеніміз, объектілер ауа-райы мен өндірісті өздері болжайды және болжау нәтижелеріне жауап береді. Болжамды деректер мен нақты өндірістің сәйкес келмеуі өзекті мәселе болып табылады. Бұл қаржылық және техникалық модельдерді түзету қажеттілігіне әкелуі мүмкін. Болжау әдістері, іргелі құқықтық рұқсаттар мен шектеулер қарастырылады. Сонымен қатар, күн электр станцияларының электр энергиясын өндіруді болжаудың нақты қол жеткізуге болатын нәтижелері көрсетілген және объективті болжамдар жасаудың күрделілігін көрсететін объективті дәлелдер келтірілген, оның нәтижелерін болжау және өңдеу процесін жетілдірудің мүмкін шаралары көрсетілген.

Кілт сөздер: электр энергиясы, электр энергиясын өндіру, жаңартылатын энергия көздері, күн электр станциялары, электр энергиясын өндіруді болжау.

Features of Forecasting the Generation of Electric Energy by Solar Power Plants in the Republic of Kazakhstan

¹***DRUZHININ Valeriy**, PhD, Senior Lecturer, druzhinin_vm@mail.ru,

²**GREBENNIKOV Yevgeniy**, CEO, maneb1@mail.ru,

¹NPJSC «Karaganda Industrial University», 30 Republic Avenue, Temirtau, Kazakhstan,

²«SES Saran» LLP, 85V Zhambyl Street, Saran, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. In the Republic of Kazakhstan, forecasting of electric energy generation by solar power plants is carried out according to a decentralized model. This means that the facilities themselves predict the weather and production and are responsible for the forecasting results. An urgent problem is the discrepancy between the forecast data and the actual output. This may lead to the need to adjust financial and technical models. This article discusses forecasting methods, fundamental legal tolerances and limitations. In addition, the article demonstrates the achievable results of forecasting the generation of electric energy by solar power plants and provides objective arguments indicating the difficulty of creating objective forecasts, outlines possible measures to improve the forecasting process and processing of its results.

Keywords: electric energy, electric energy production, renewable energy sources, solar power plants, forecasting of electric energy production.

REFERENCES

1. Закон Respubliki Kazahstan «O podderzhke ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii» № 165-IV ot 4 iyulya 2009 goda.
2. Закон Respubliki Kazahstan ot «Ob elektroenergetike» №588 9 iyulya 2004 goda.
3. Prikaz Ministra Energetiki Respubliki Kazahstan «Ob utverzhdenii Pravil funkcionirovaniya balansiruyushchego rynka elektricheskoy energii» №112 ot 20 fevralya 2015 goda (zaregistririvan v ministerstve yusticii RK 26 marta 2015 goda №10532).
4. Elektronnyj resurs <https://blogs.worldbank.org/ru/europeandcentralasia/natural-disasters-cost-central-asia-10-billion-year-are-we-doing-enough>