

## **ВЫБОР МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО СУТОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОСТАВОК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОПТОВОМ РЫНКЕ**

*Аннотация:* Работа посвящена проблеме выбора модели прогнозирования электропотребления при решении задачи оперативного суточного планирования поставок электроэнергии на оптовом рынке. Аргументируется выбор искусственных нейронных сетей и метода группового учета аргументов для прогнозирования процессов производства и потребления электроэнергии.

*Ключевые слова:* оптовый рынок электроэнергии, оперативное планирование поставок электроэнергии, модели прогнозирования электропотребления, искусственные нейросети, генетический алгоритм, регрессионный анализ, метод группового учета аргументов

### **Введение**

Согласно принятым на сегодняшний день нормативным документам оптовый рынок электроэнергии (ОРЭ) должен перейти на новую модель функционирования, уже прошедшую апробацию на рынках многих зарубежных стран и получившую название модели двухсторонних договоров и балансирующего рынка. Одна из отличительных его особенностей состоит в образовании и организации функционирования в общей структуре ОРЭ рынка на сутки вперед с балансирующей частью, на которой производится покупка недостающих поставщику объемов электроэнергии либо продажа излишне заказанных объемов на аукционе. В связи с чем, возникают новые задачи организационного управления, реализация которых требует разработки принципиально новых средств автоматизации процессов управления, математического и компьютерного моделирования, на основе применения современных методов моделирования и информационно-технологического обеспечения. К числу таких относится и задача оперативного суточного планирования поставок электроэнергии на оптовом рынке [2].

### **Анализ проблемы**

Как известно, при практической реализации задачи планирования поставок электроэнергии на ОРЭ на следующий за текущим расчетный месяц используется определенный порядок составления прогнозного физического и прогнозного финансового балансов купли-продажи электроэнергии и взаимодействия субъектов ОРЭ [10].

Этот этап составления плана поставок и потребления электроэнергии осуществляется с учетом территориальной и временной иерархической последовательности принятия решений соответствующими субъектами ОРЭ и системой его организационного управления с целью разработки сбалансированного по возможностям в объединенной энергосистеме (ОЭС) плана производства электроэнергии блоками электростанций. Он предназначен в целом для определения прогнозных объемных показателей работы ОЭС таких, как объем выработки электроэнергии и ее передача по магистральным высоковольтным линиям передач, объем обмена мощности и энергии в межгосударственных узлах перетоков, объем электропотребления, полный и удельный расход топлива, а также других технико-экономических показателей работы субъектов ОРЭ. Полученные в результате применения методов прогнозирования значения выше указанных параметров, после определенной коррекции специалистами-экспертами и формального утверждения соответствующими органами системы организационного управления ОРЭ становятся плановыми для работы ОЭС на последующий месяц.

Следует также отметить, что в настоящее время, согласно Правил ОРЭ [9], каждый день в определенное регламентом время поставщик электроэнергии обязан предоставить Распорядителю ОРЭ прогноз электропотребления на каждый расчетный период (в настоящее время он равен одному часу) предстоящих суток, а также заявку (прогноз) суточного потребления. В свою очередь Распорядитель системы расчетов обязан на основе этих данных подготовить прогноз электропотребления на каждый расчетный период предстоящих суток с учетом прогноза метеорологических условий на предстоящие сутки, прогноза внешних перетоков мощности, а также других факторов, которые могут существенно повлиять на фактическое потребление электрической энергии.

Очевидно, что при такой организации составления прогноза электропотребления его основной – трендовой составляющей должен был стать суммарный график электропотребления на каждый расчетный период предстоящих суток, а также суммарный объем суточного потребления, заявленный поставщиками. По сути, он представляет собой заказ на производство электроэнергии, выполнение которого должно быть обеспечено. Однако практика показывает, что заявленных поставщиками данных о суточных объемах электропотребления и их почасовых графиков, недостаточно для составления прогноза электрической нагрузки. Зачастую они существенно отличаются от данных последующего фактического потребления. Можно предположить, что это связано с тем, что указанные субъекты энергорынка используют для целей прогнозирования разные методы и средства, которые могут и не отвечать современным требованиям к точности и достоверности.

Кроме того необходимо учитывать, что возможности ОЭС в плане покрытия заявленной нагрузки, как правило, имеют ограничения. Поэтому приходится при разработке предварительного диспетчерского и расчетного диспетчерского графиков и в процессе диспетчерского управления дополнительно решать задачи управления электропотреблением. В этих условиях становится принципиально важным, чтобы поставщики электроэнергии, система диспетчерского управления, Распорядитель ОРЭ использовали одну и ту же компьютерную модель прогнозирования для решения задач планирования электропотребления и активной нагрузки (выработки электроэнергии). В противном случае оказывается весьма затруднительным получить общесистемный прогноз электропотребления, а затем и прогноз активной нагрузки в ОЭС, а, следовательно, и выполнить расчет ее планового торгового графика производства электроэнергии и другие плановые расчеты с приемлемой для практического использования точностью.

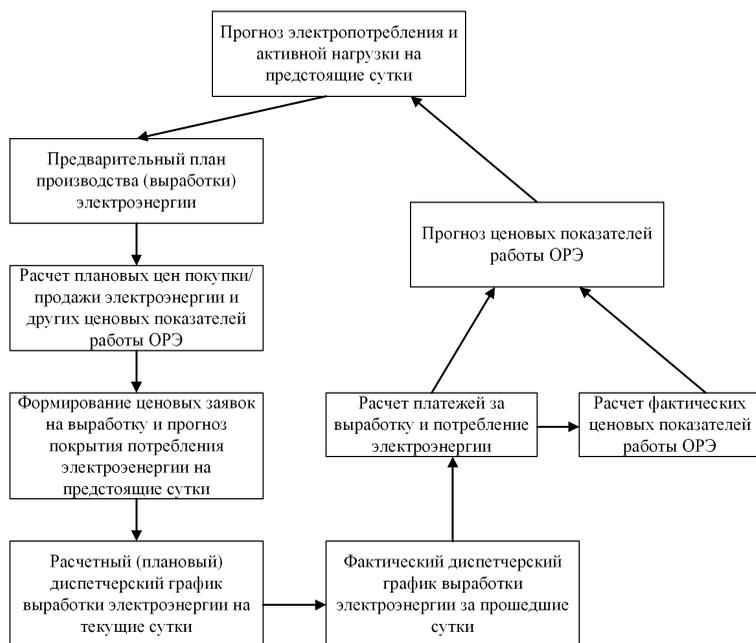


Рис. 1 – Технологический процесс принятия решений по планированию поставок электроэнергии

Технологический процесс принятия решений (рис. 1) по планированию поставок электроэнергии регламентирован в нормативных документах [3,8]. В работе [9] показано, что планирование

поставок електроенергії повинно здійснюватися на основі почасових даних прогнозу електропотреблення, активної навантаження генеруючих блоків, почасових цін за вироботку електроенергії, ряду системних послуг, а також на розрахункових даних об оптимальному виборі складу включеного генеруючого обладнання, отриманих на основі їх використання.

Дані прогнозу об зміні значень вказаних параметрів на заданому інтервалі планування графіка електричної навантаження призначені для наступного рішення задач планування поставок електроенергії: планування балансу виробництва і споживання електроенергії; планування почасової вироботки об'ємів електроенергії; планування почасового розподілу активної навантаження між блоками електростанцій; розрахунок планових ценових показників функціонування ОПЕ.

### **Постановка задачі**

В [2] обґрунтована необхідність створення єдиного підходу для рішення задач прогнозування на основі застосування сучасних методических засобів математического моделювання.

Одною з відмінних особливостей технологіческого процесу прийняття рішень по плануванню поставок електроенергії є циклічність (повторюемість) і взаємозв'язок розв'язуваних задач по входним і виходним даним. В результаті від точності і достовірності прогнозу електропотреблення суттєво залежить точність рішення задач оптимального розподілу навантаження між генеруючими потужностями, ефективність управління режимами ОЕС і управління електропотреблением. І, що особливо важливо в ринкових умовах, оптова ціна покупки у генеруючих компаній а, відповідно, і оптова ціна продажі постачальникам електроенергії на ОПЕ. Превышення планових значень навантаження над фактическими значеннями, призводить до додатковим платежам за маневренність генеруючих блоків і, відповідно, недопроизводству електроенергії. Зниження планових значень призводить к платежам за пуски додатковим блоків, відповідно, к перепроизводству електроенергії. Такі коливання в свою чергу призводить к збільшенню виробнических витрат генеруючих компаній і системних витрат на диспетчеризацию на одиницю виробленної продукції і погіршенню показників енергоефективності при генеруванні електроенергії.

Вторая відмінна особливість процесів виробництва і споживання електроенергії заключається в тому, що вони визначаються доволно складним характером взаємодіяння сукупності взаємозв'язаних стаціонарних, нестаціонарних і неоднородних випадкових величин. Нестационарність цих процесів обумовлена залежністю ймовірнісних характеристик випад-

ных процессов (математического ожидания, дисперсии и т.д.) от времени. Неоднородность процессов определяется разными вероятностными характеристиками в разные временные интервалы: сезоны года, “регулярные” (рабочие) и “нерегулярные” (выходные и праздничные) дни.

Подробный анализ подходов к разработке математических моделей, алгоритмов их реализации и создания компьютерных средств решения на ЭВМ задач краткосрочного (сутки - неделя), среднесрочного (месячного, от любой произвольной даты до конца текущего месяца) и долгосрочного (на предстоящий месяц, квартал, год) прогнозирования электропотребления и активной нагрузки в ОЭС, который проведен в [3, 4], показал, что на выбор соответствующего метода прогнозирования, влияют следующие факторы: требуемая форма прогноза; горизонт, период и интервал прогнозирования; доступность данных; требуемая точность; поведение прогнозируемого процесса; стоимость разработки, установки и работы с системой; простота работы с системой; понимание и сотрудничество лиц принимающих решения.

Таким образом, в настоящее время сформулированы следующие основные требования, предъявляемые к современным компьютерным моделям прогнозирования [3,4]:

1) интервальность – возможность вычисления прогнозируемой величины для любого временного “окна” от любой даты до конца расчетного периода упреждения;

2) адаптивность – возможность определенных изменений для выполнения требований достижения необходимой точности прогнозирования;

3) рекурсивность – возможность дополнительного обучения системы по мере поступления новых фактических данных для повышения качества прогнозирования;

4) робастность – надежность результатов прогноза, за счет применения адекватных и оптимальных моделей, а также устойчивость по отношению к ошибкам в исходных данных;

5) устойчивость – устойчивость математических прогностических моделей по отношению к ошибкам в исходных данных или частично отсутствию некоторой их части;

6) интерактивность – возможность работы конечных пользователей в интерактивном режиме для ввода корректирующей информации;

7) полнота – возможность реализации функций, присущих объекту прогнозирования и достижение необходимой точности прогнозирования;

8) экономичность – возможность минимизации затрат в плане использования информационных ресурсов и средств автоматизации.

Выбор оптимального метода для решения конкретной практической задачи представляет собой отдельную и довольно непростою задачу. До настоящего времени во многих энергосистемах мира при создании прогностических моделей используются статистические методы анализа: динамические (временные) ряды, т.е. упорядоченные последовательности данных наблюдений за процессом, изменяющимся во времени.

Известно достаточное количество математических стохастических методов прогнозирования графиков электрической нагрузки, основанных на применении для анализа временных рядов регрессионных моделей. Их практическая реализация для уменьшения погрешности расчетов требует сбора, хранения и последующего использования значительных объемов исходных ретроспективных данных почасового фактического производства электроэнергии. А для определения и исправления ошибок, поддержки определенного уровня корректности учета других факторов, влияющих на результат прогноза, не меньшего объема дополнительных данных.

Анализ ряда литературных источников, позволяет сделать вывод о том, что универсального метода, способного решить проблему прогнозирования характеристик случайных процессов различной природы не существует. Однако выработаны подходы, применение которых при решении конкретных прикладных задач дают возможность построения прогностической модели, обеспечивающей приемлемую для практики достоверность и точность.

В связи с переходом к балансирующему рынку и рынку двухсторонних договоров между непосредственными производителями и поставщиками электроэнергии для решения задачи прогнозирования электрической нагрузки в ЭС, в том числе и на сутки вперед, могут найти и находят применение новые информационные технологии, разрабатываемые на основе использования аппарата искусственных нейронных сетей, генетического алгоритма, метода группового учета аргументов. Таким образом, возникает необходимость сравнить эти методы и проверить их ресурсоемкость в контексте поставленной задачи.

### **Использование генетических алгоритмов**

Одним из методов нахождения экстремумов сложных функций сегодня являются генетические алгоритмы (ГА). ГА являются одной с составных эволюционного моделирования как научного направления, которое базируется на принципах естественного отбора. Генетический алгоритм впервые был предложен в 1975 году в Мичиганском университете Джоном Холландом. Он получил название репродуктивного плана Холланда и в дальнейшем активно использовался в качестве базового алгоритма в эволюционных вычислениях. ГА используются тогда, когда комбинаторная слож-

ность метода полного перебора делает его непригодным из-за большого времени, необходимого для нахождения решения.

Способы применения ГА отличаются инструментами, которые используются при в алгоритме выбора родительских пар [1]:

- **панмиксия**, если родители выбираются из популяции случайным образом, таким чтобы один родитель может быть в паре с самым собою или принимать участие в нескольких парах;

- **селекция**, если значение функции приспособленности родителей выше среднего значения по популяции;

- **инбридинг**, если первый родитель выбирается случайным образом, а второй определяется, как ближайший с наибольшей вероятностью к первому в популяции;

- **аутбридинг**, если первый родитель выбирается случайным образом, а второй является с большей вероятностью самым удаленным от первого в популяции;

- **пропорциональный**, если родители выбираются с вероятностями, пропорциональными их значениям функции приспособленности.

Кроме того, повторная оценка функции приспособленности для сложных проблем, часто является фактором, который ограничивает использование алгоритмов искусственной эволюции. Поиск оптимального решения для сложной задачи высокой размерности часто требует очень затратной оценки функции приспособленности. Также для таким задач возникает проблема размерности, т.е. при большом размере области поиска решений количество элементов, которые будут мутировать также становится очень большим. Это делает использование имеющейся вычислительной техники чрезвычайно проблематичным. К тому же, во многих задачах генетические алгоритмы имеют тенденцию сходиться к локальному оптимуму или даже к спорным точкам, вместо глобального оптимума данной задачи.

### **Использование искусственных нейронных сетей**

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются классом обобщенных нелинейных моделей, которые имеют структуру подобную человеческому мозгу. Их главным преимуществом есть то, что они могут аппроксимировать любую нелинейную функцию с произвольной степенью точности, с помощью соответствующего количества скрытых нейронов. ИНС имеют способность к адаптации, создание ассоциативных связей и обучения. Применительно к задаче прогнозирования в ИНС получение информации из имеющего массива данных заключается в формулировании математического описания закономерностей между этими данными. Однако, невозможно из этих данных получить информацию о структуре математической модели, и потому в ИНС ее необходимо задавать априори. В случае ИНС исследователь описывает эту структуру, путем

выбора количества слоев и нейронов в них, а также выбора вида активационной функции. Это требует глубокого знания не только теории ИНС, но и глубоких знаний о природе исследуемого объекта. Кроме того, возникает необходимость трансформировать объект так, чтобы к нему можно было применить методы ИНС.

В результате следует отметить такие недостатки ИНС [8]:

- отсутствие формализованных алгоритмов настройки сети из-за высокой сложности самой процедуры настройки;
- ИНС требует большого количества времени на ее обучение;
- непрозрачность формирования результатов анализа и их формализации в установленные закономерности;
- высокая сложность внутренней структуры сети и отсутствие четкого формализованного аппарата выбора структуры ИНС.

Таким образом, успешность применения ИНС будет предопределяться обстоятельствами реализации процессов выбора структуры сети, ее обучения под конкретную задачу.

### **Использование регрессионного анализа**

Регрессионный анализ – статистический исследовательский прием установления влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную. Независимые переменные иначе называют регрессорами или предикторами, а зависимые – критериальными. Терминология зависимых и независимых переменных отображает лишь их математическую зависимость, а не причинно-следственные связи. Регрессионный анализ проводится на основе построенного уравнения регрессии и определяет долю каждой независимой переменной в вариации исследуемой (прогнозируемой) зависимой переменной величины. В результате, основной задачей регрессионного анализа является определение влияния факторов на результативный показатель (в абсолютных показателях). Прежде всего для этого необходимо подобрать и обосновать уравнение связи, которое отвечает характеру аналитической стохастической зависимости между исследуемыми признаками. Уравнение регрессии показывает как в среднем изменяется результативный признак под влиянием изменения факторных признаков.

Определение параметров множественной регрессии требует трудоемких расчетов с применением компьютерных систем. Однако полученные результаты будут достоверными и могут широко использоваться в экономической и управленческой деятельности прежде всего для составления долгосрочных прогнозов, а однофакторная модель может быть использована для краткосрочных прогнозов.

В результате можно отметить такие недостатки регрессионного анализа [5]:

– модели, которые имеют слишком маленькую сложность, могут оказаться неточными, а модели, которые имеют избыточную сложность, могут оказаться переобученными;

– данный метод является статистическим и не учитывает аргумент времени, а следовательно не вполне пригоден для случая прогнозирования показателей электропотребления.

### **Использование метода группового учета аргументов**

В алгоритмах самоорганизации моделей сложных систем применяется разделение массива исходных данных на две части, которые называются обучающей и проверочной последовательностью, причем среднеквадратичная ошибка, которая определяется по проверочной последовательности, служит критерием для выбора структуры модели, которая синтезируется по данным обучающей последовательности. В результате возникает необходимость оптимального разделения данных на обучающую и проверочную последовательность, что приводит к выделению и формированию третьей части массива данных – экзаменационной последовательности. Таким образом, ошибка, которая определяется по экзаменационным данным, будет служить критерием оценки проверочной последовательности. А далее процесс оптимизации разделения данных может быть продолжен в точном соответствии с основной идеей теоремы Геделя [7].

В результате критерии выбора моделей делятся на внутренние и внешние. Критерий считается внутренним, если его определение базируется на использовании тех же данных, что и сама синтезируемая модель. А внешними считаются те критерии, которые основаны на новых данных, не использованных при синтезе модели. Таким образом, структура синтезируемой модели с оптимальной сложностью будет отвечать минимуму внешнего критерия.

Перебирая модели от простейшей к более сложным (или, наоборот, от сложных к более простым), всегда находится модель оптимальной сложности, единой для каждого внешнего критерия. Для успешности решения задача моделирование важно выбрать внешний критерий соответственно типу решаемой задачи моделирования.

В методе [6,7], который получил название метода группового учета аргументов (МГУА), применяются две основные структуры генерации большого множества моделей (частичных описаний), которые оцениваются по условию селекции:

– комбинаторные алгоритмы МГУА с обнулением коэффициентов;

– многорядные пороговые алгоритмы МГУА.

В комбинаторных алгоритмах задается некоторое полное описание – модель в виде полинома высокой степени. Частичные описания образуются из полного с помощью приравнивания к нулю (об-

нуление) тех или иных коэффициентов полного описания. Остальные коэффициенты оцениваются с использованием всех точек таблицы исходных данных по методу наименьших квадратов.

Выбор лучшей структуры модели выполняется по одному из внешних критериев - критерию селекции (например, по критерию регулярности или минимума сдвига). Из множества частичных описаний выбирается единый полином - модель оптимальной сложности. Комбинаторные непороговые алгоритмы рекомендуются при  $n < N$ , где  $n$  - количество входных переменных,  $N$  - количество выходных переменных, а число членов полного описания не более 20.

При более сложных задачах моделирования при  $n > N$  применяются многорядные селекционные пороговые алгоритмы МГУА. Некоторые из многорядных алгоритмов МГУА (например, алгоритм с случайным выбором партнеров) могут решать задачи моделирования при количестве входных переменных порядка 1000.

В результате можно отметить такие недостатки:

- немасштабируемость получаемой модели вследствие возможного изменения или уточнения входных данных;
- высокие требования к полноте и непротиворечивости входных данных.

## Выводы

Как показывает проведенный анализ использования методов моделирования при решении задачи выбора и построения модели прогнозирования электропотребления, удовлетворяющей предъявляемым требованиям, всем им присущи определенные недостатки, ограничивающие их предпочтительное применение в данной задаче. Так, ГА имеет тенденцию сходиться к локальному минимуму, структуру ИНС необходимо задавать с самого начала, классический регрессионный анализ не учитывает переменную времени, а для МГУА, чем больше исходных данных будет предоставлено, тем точнее будет синтезирована модель. В результате подтверждается тезис о невозможности построения универсальной оптимальной модели, лишенной всех недостатков рассмотренных методов моделирования.

В тоже время, все же предпочтение следует отдавать ИНС и МГУА, а на последний следует обратить внимание, т.к. он разрешает получать формализованную модель из данных, на которых обучается, с учетом переменной времени и таким образом делает как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы, в зависимости от избранного критерия селекции моделей.

### Список использованных источников

1. Батищев Д.И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов/Д.И. Батищев, С.А. Исачев//Сборник статей ВГУ.- 1997.
2. Борукаев З.Х. Подход к построению компьютерных моделей для оперативного (суточного) планирования поставок электрической энергии в условиях оптового рынка. Часть 1. Формулировка задачи/З.Х. Борукаев, К.Б. Остапченко, О.И. Лисовиченко//Моделювання та інформаційні технології: Зб.наукових праць/ІПМЕ НАН України. – Київ, 2012. – Вип. 63.- С. 192–199.
3. Борукаев З.Х. К вопросу о создании комплексной системы прогнозирования электрической нагрузки/З.Х. Борукаев//Зб.науков.праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці/ІПМЕ НАН України.- Київ, 2006.-Вип. №33.- С. 69–76.
4. Бэнн Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки/Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер.- М.:Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
5. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ/Н. Дрейпер, Г. Смит.- М.: Издательский дом “Вильямс”, 2007. – 912 с.
6. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем/А.Г. Ивахненко. – Киев: Наук. думка, 1981. – 296 с.
7. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей/А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер.- К. : Техніка, 1985. – 223 с.
8. Круглов В.В. Нечеткая логика и нейронные сети/В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов.- М.:Физматлит, 2001. – 221 с.
9. Постанова НКРЕ про затвердження Правил Оптового ринку електричної енергії України від 12 листопада 1997 року №1047а із змінами і доповненнями, внесеними постановами НКРЕ станом на 1 січня 2011 р.
10. Порядок складання прогнозного фізичного балансу електричної енергії Об'єднаної енергетичної системи України та прогнозного балансу її купівлі–продажу в Оптовому ринку електричної енергії України на наступний розрахунковий місяць//Наказ Міністерства палива та енергетики України № 246 від 13.05.2009 р.

Отримано 17.03.2014 р.