

**УДК 621.315.611**

Н.К. Полуянович, к.т.н., Доцент (ИРТСиУ, ЮФУ) Г. Таганрог

О.В. Качелаев, аспирант (ИНЭП, ЮФУ) Г. Таганрог

М.Н. Дубяго, к.т.н., Доцент (ИРТСиУ, ЮФУ) Г. Таганрог

## **НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ РОБАСТНОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В МИКРОСЕТИХ С МЕХАТРОННОЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМОЙ**

*В данной работе управление энергопотреблением системы оптимизировано с помощью НС-алгоритма алгоритма оптимизации. Создана интеллектуальная система прогнозирования энергопотребления для потребителей с атипичным характером электропотребления в зависимости от требуемой точности прогноза. Приведено решение такой проблемы как краткосрочное прогнозирование электропотребления. Прогнозирование производилось с использованием инструментов глубокого машинного обучения (Deep Learning). Создан и протестирован генетический алгоритм подбора гиперпараметров нейронной сети. Исследовано влияние на точность прогнозирования использования метода скользящего окна.*

**Введение.** Актуальность исследования обоснована нормативными документами, устанавливающими необходимость прогнозирования потребления электроэнергии в целях оптимизации баланса между производством и потреблением электрической энергии, обеспечивающего стабильность энергосистемы [1]. Необходимость в повышении точности прогнозирования объемов потребления электроэнергии диктуется существующими рыночными отношениями между субъектами оптового рынка, а также их взаимной ответственностью за результаты действий, связанных с выработкой, распределением и потреблением электроэнергии [2]. Поэтому упреждающее прогнозирование электрических нагрузок является важным аспектом в обеспечении как нормальных экономических отношений между указанными субъектами, так и адекватного технического обслуживания энергосистем и сопутствующего оборудования. Особенное внимание уделяется созданию интеллектуальной системы прогнозирования энергопотребления для потребителей с атипичным характером электропотребления в зависимости от требуемой точности прогноза, учитывающей кроме целевых параметров электросети (активная P и реактивная Q мощности), зависящих от характера технологических процессов предприятий, также некоторые другие важные воздействующие факторы: социально-экономические (час суток; день недели; порядковый номер дня в году; признак праздника или массовых событий); метеорологические, в частности, влияние ветро-холодового индекса на

степень потребления электроэнергии. Таким образом встает задача разработки интеллектуального устройства адаптивного прогнозирования режимов энергопотребления электросети [3].

**Эволюционное проектирования архитектуры НС.** Генетический алгоритм используется для решения задачи выбора архитектуры полно связной прямой нейронной сети (НС). В данной топологии генетический алгоритм используется для поиска общей структуры НС, а не метода обучения. рис.1. Ключевыми элементами предлагаемой топологии являются база знаний (БЗ), модули генерации новых особей, обучения ИНС, оценки особей, а также генерация особей. Оператор скрещивания взаимодействует исключительно с главной хромосомой. Оператор инверсии работает с главной хромосомой и дочерними хромосомами, соответствующими входам и выходам. Оператор мутации взаимодействует с главной хромосомой и дочерней хромосомой, отвечающей за количество нейронов. Таким образом, за входы и выходы отвечают только генератор новых особей и база знаний.

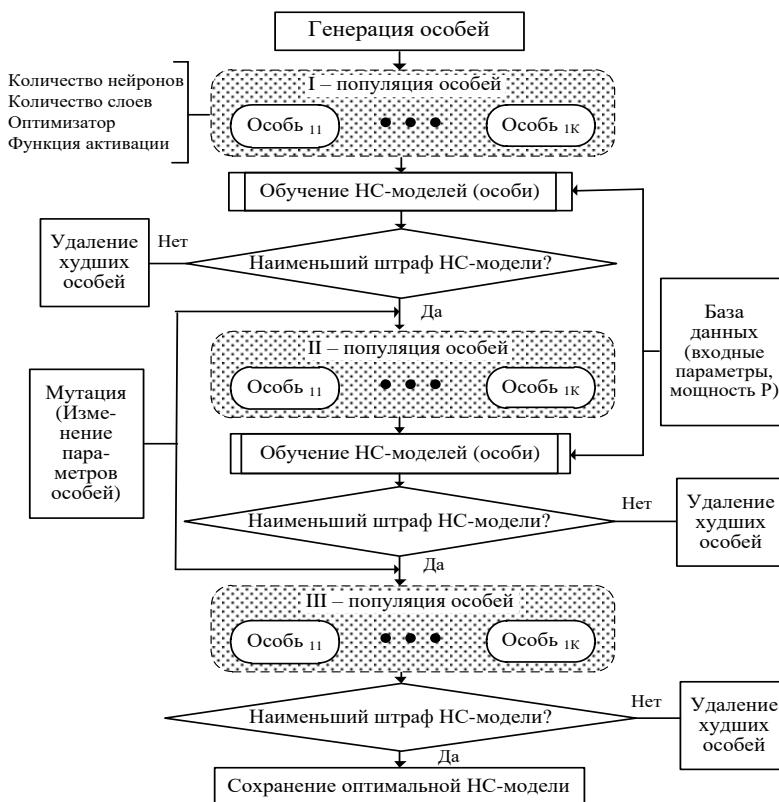


Рис. 1. Генетический алгоритм подбора гиперпараметров НС-модели

**Реализация упреждающего управления.** Процессы прогнозирования потребления электроэнергии в настоящее время организационно и технически разрознены. Их объединение позволит оптимизировать управление передачей и распределением электроэнергии. Автоматизированные системы учета электрической энергии приобретут новую интеллектуальную функ-

цию – возможность прогнозирования состояния электросети (НС подсистема прогнозирования и ППР, рис.2). Это позволяет реализовать при помощи НС - прогнозирования систему упреждающего управления.

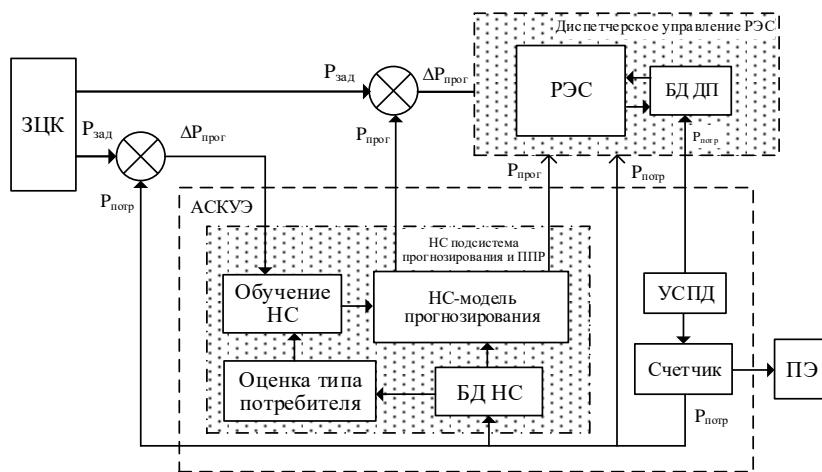


Рис. 2. Структурная схема планово-упреждающего управления

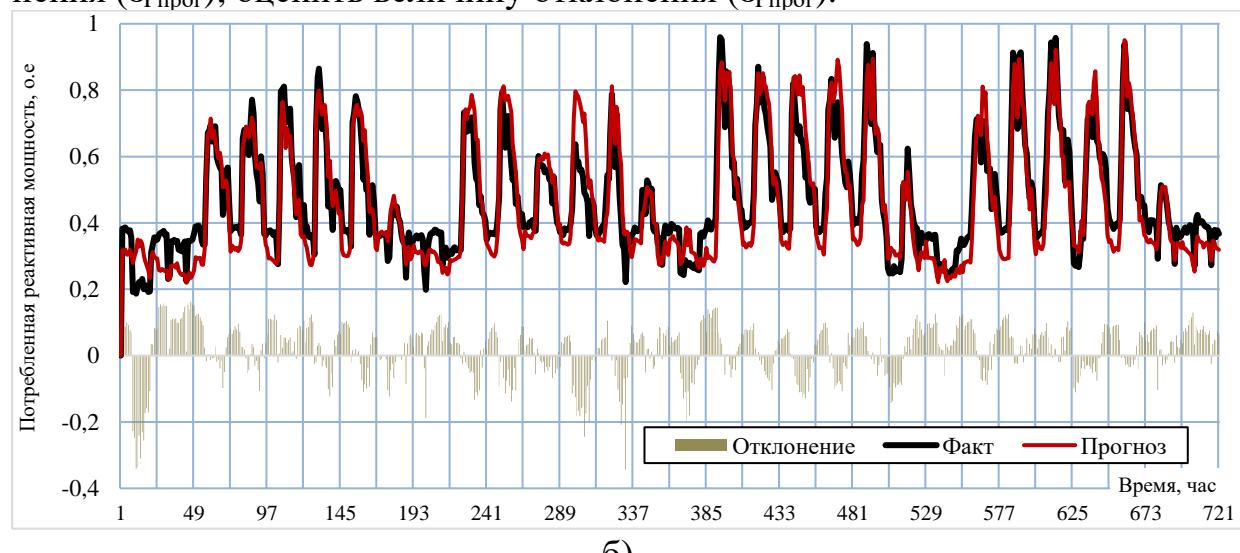
В распределительных электросетях при плановом управлении возникает необходимость в получении прогнозной информации о потреблении электроэнергии (ЭЭ) на как можно большие интервалы времени. Реализация такого прогноза, возможна добавлением системы управления следующих блоков: подсистемы прогнозирования и система поддержки принятия решений (СППР) рис.2, где: ЗЦК - заданные цели и критерии управления; РЭС - распределительные электрические сети; ПЭ - потребители электроэнергии.

**Результаты работы СППР.** Блок анализа ЭП выполняет сравнение объема заказанной ЭЭ ( $P_{зад}$ ) и прогнозного значения потребленной ЭЭ ( $P_{прог}$ ) на обозреваемый период. Рассчитанная погрешность ( $\epsilon_p$ ) направляется в блок советчика оператора. Блок советчика оператора производит расчет отклонения прогнозных величин потребленной мощности ( $P_{прог}$ ) от фактических ( $P_{погр}$ ) на основании текущих данных, снимаемых со счетчика ЭЭ и полученных в результате работы блока НС-модель прогнозирования. Производит обработку и преобразование данных, поступающих на диспетчерский пульт в удобный для оператора вид. С блока советчика оператора снимаются следующие данные:  $F_{рф}$ ,  $p_{прог}$ ,  $\epsilon_p$ , графики зависимости  $P_{прог}(t)$  и  $P_{факт}(t)$ , график отклонения прогноза для потребления ЭЭ выше среднего значения за рассматриваемый период, сообщения об увеличении отклонения прогнозирования больше заданного предела и начале переобучения.

Оператор получает информацию об отклонениях технологических переменных, и на основании полученных данных оператор диспетчерского управления РЭС принимает решение о заказе необходимого объема ЭЭ ( $\sum P_{прог}$ ), получает возможность контролировать возможные всплески и снижения потребления ЭЭ у потребителя (пример приведен на рис. 5.7), ненормированную работу оборудования (рис. 3), а также дополнительно контролировать адекватность работы НС-модели (вывод расчета погрешности).

На рис. 3, приведен график сравнения фактической и прогнозной кривой потребления. На котором длительность выполненного прогноза – один месяц (720 часов). Профиль потребителя ЭЭ имеет аддитивно-случайный характер по причине ненормированного графика работы.

Для информирования лица, принимающего решения (ЛПР) на график сравнения потребления мощности добавлен результат расчета отклонения прогноза в виде диаграммы с учетом полученного знака ошибки. Что позволяет оператору: обнаружить временные интервалы, где было отклонение прогнозных значений от фактических ( $\epsilon_{\text{Прог}}$ ); оценить протяженность отклонения ( $\epsilon_{\text{Прог}}$ ); оценить величину отклонения ( $\epsilon_{\text{Прог}}$ ).



б)

Рис. 3 Сравнение фактических и прогнозных значений мощности

Оценка погрешности представленного графика сравнения потребленной мощности, на месяц, приведен в таблице 1. Исследование проводилось как с использованием ранее созданного генетического алгоритма (ГА) для подбора гиперпараметров НС-модели и алгоритма прогнозирования со скользящим окном (СО), так и без них.

Таблица 1. Ошибка прогнозирования при различных функциях потерь

Функция потерь	Характер потребления электроэнергии	Погрешность прогнозирования, %							
		Циклический		Аддитивно-случайный		Аддитивный			
		Без СО и ГА	ГА без СО	Без ГА со СО	ГА без СО	Без СО и ГА	ГА + СО	СО без ГА	ГА + СО
MSE		5.75	3.56	4.07	2.42	5.58	5.01	10.08	5.44
Хьюбер		5.46	1.16	9.78	0.38	2.48	1.57	4.97	2.42
Коши		5.77	3.1	8.4	5.02	9.8	3.37	15.7	5.09

На графики добавлена гистограмма отклонения прогнозного значения

от фактического, что позволяет быстрее оценить, как изменения в работе потребителя, так и проконтролировать работоспособность НС-модели. Показано, что благодаря интеграции данных замеров и прогнозных значений электропотребления появляется возможность осуществлять интеллектуальное упреждающее управление режимами работы электрических сетей, что дает существенное улучшение их технических и экономических показателей.

**Заключение.** Применение разрабатываемой интеллектуальной системы прогнозирования позволит решать данную проблему и обеспечит экономию энергетических ресурсов, что повысит эффективность управления электроснабжением, большую надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей, а также прибыль энергетических предприятий. Возможность использование в системах технологического управления региональными сетевыми компаниями, составляющими основу иерархической автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учета электроэнергии, за счет учета и упреждающего прогнозирования активной и реактивной мощности электропотребителей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ от 9 сентября 2023 г. N 1473 "Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности" // размещен в СПС "Консультант Плюс" <https://base.garant.ru/407632842/>.
2. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурков Д.В. Нейросетевой метод прогнозирования электропотребления и его инструментальная реализация. Монография // Ростов-на-Дону; Таганрог, Изд-во ЮФУ 2023. С. 183.
3. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. / Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89508609983; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Качелаев Олег Вадимович. – Южный Федеральный Университет; e-mail: [22.olezhka@mail.ru](mailto:22.olezhka@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 89281163960; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: [w\\_m88@mail.ru](mailto:w_m88@mail.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.