

Ю. Л. САЕНКО (ПГТУ), В. В. ЛЮБАРЦЕВ (ПГТУ)

Приазовский государственный технический университет, кафедра электрификации промышленных предприятий, Украина, 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629) 44-65-51, тел.: +38(097)778-30-18, эл. почта: [vsayenko@gmail.com](mailto:vsayenko@gmail.com), [lubartsevadim@gmail.com](mailto:lubartsevadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](https://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](https://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### Постановка проблемы

Вопрос эффективного использования электроэнергии на фоне резкого роста ее стоимости становится как никогда актуальным. Немаловажным фактором, требующим снижения потребления электроэнергии, являются выработавшие свой ресурс электрические сети, которые с трудом переносят возросшие нагрузки и требующие модернизации. Оптимизация режима потребления электроэнергии повлечет за собой снижение себестоимости продукции, сохранение конкурентоспособности предприятий.

Одним из вариантов выхода из сложившейся ситуации является уменьшение потерь и увеличение пропускной способности электрических сетей. Решение этой задачи связано, прежде всего, с оптимизацией производственного процесса:

- разнесение во времени нагрузок наиболее мощных электроприёмников для снижения пиковых нагрузок, и как следствие, снижение тока и потерь мощности в сети;
- ограничение холостой работы электроприёмников;
- снижение потребления электроэнергии на собственные нужды;
- работа в ночные смены, когда снижается суммарная нагрузка на электросети и т.д.

В результате выполнения вышеперечисленных мероприятий происходит выравнивание графика нагрузки, снижение потерь мощности в электрических сетях.

### Анализ последних исследований и публикаций

Потери активной мощности, возникающие в элементе электрической сети (кабельной или воздушной линии, трансформаторе и т.д.), зависят не только от величины протекающей активной мощности  $P$ , но и от реактивной  $Q$ :

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_H^2} r. \quad (1)$$

Поэтому важным направлением снижения потерь активной мощности и энергии является компенсация реактивной мощности.

Для решения задачи оптимизации режима электрической сети и уменьшения потерь необходимо знать распределение потоков мощности в ветвях сети. В связи с работой большого числа электроприемников, изменениями конфигурации электрической сети потоки мощности представляют собой случайные процессы, и, как следствие, определение потокораспределения представляет собой достаточно сложную задачу особенно в случае разветвлённых, кольцевых сетей.

Одним из наиболее распространённых методов, позволяющим рассчитать потери в электрической сети является метод эквивалентных сопротивлений [1]. В соответствии с этим методом необходимо найти эквивалентное сопротивление некоторой условной неразветвленной цепи, ток в которой равен току на головном участке сети, и потери равны потерям в сети. При этом принимается допущение, что при изменении тока на головном участке величины токов и на всех остальных участках сети изменяются пропорционально. Однако стоит отметить, что данный метод оценки потерь является весьма приблизительным, и не позволяет с высокой точностью определять потокораспределение в электрической сети современных промышленных предприятий, особенно при наличии резкопеременных нагрузок, различных факторов, влияющих на технологический процесс.

### Цель исследования

Разработка методов оптимизации режима реактивной мощности в сложной разветвлённой

ной сети (на примере ГПП) с экономической точки зрения.

**Основные материалы исследования**

В настоящее время появилось довольно большое количество современных средств, позволяющих решить представленную выше проблему. Их появление в первую очередь связано с развитием вычислительной цифровой техники, большим количеством специализированных программных средств, исследованиями в области искусственного интеллекта. Одним из наиболее прогрессивных и точных методов решения поставленной задачи являются нейронные сети[2].

Рассмотрим применение нейронных сетей для решения задачи расчета и снижения потерь на примере участка электрической сети, приведенной на рис. 1.

Рассматриваемая электрическая сеть содержит как радиальные ветви, так и кольцевой участок с шестью подстанциями, получающий питание от двух секций шин ГПП 10 кВ.

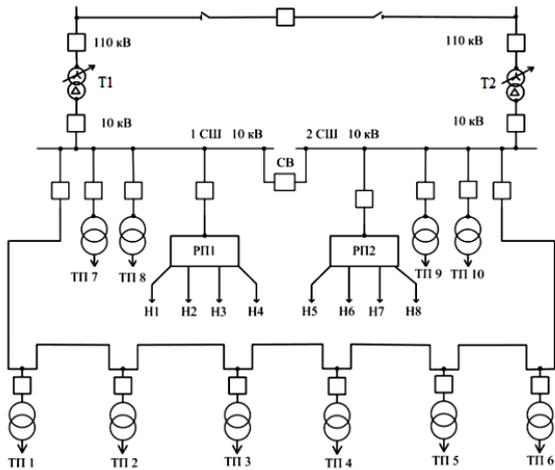


Рис. 1. Электрическая схема моделируемой сети

В качестве средства моделирования предлагается использовать программный комплекс Simulink пакета MATLAB.

При моделировании режима работы электрической сети активные и реактивные нагрузки потребителей задаются независимыми случайными процессами с нормальным законом распределения и экспоненциально-косинусными корреляционными функциями [3].

Параметры случайных процессов изменения нагрузок потребителей задавались максимально приближенными к параметрам работы внутризаводских электрических сетей. Результат моделирования электрических нагрузок приведен на рис.2.

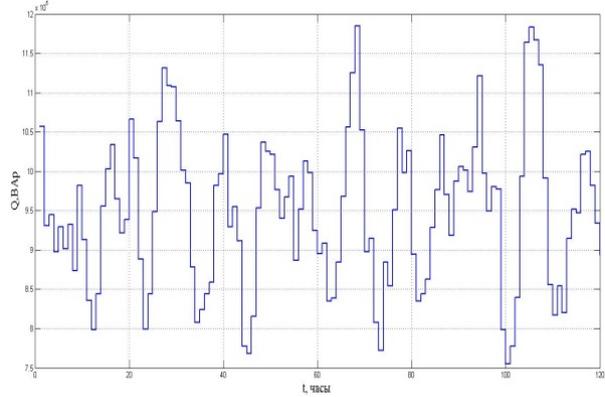


Рис. 2. Пример моделирования графиков реактивной мощности

Одним из наиболее точных и экономически эффективных методов прогнозирования электрических нагрузок являются нейронные сети. Несмотря на некоторые недостатки (сложность настройки, большая выборка данных для тренировки сети) нейронные сети обладают неоспоримым преимуществом – при тренировке они «учатся» воссоздавать очень сложные зависимости с учётом многих факторов, что в итоге даёт преимущество по сравнению с традиционными методами прогнозирования [4,5]. Схема нейронной сети с обратным распространением ошибки, изображенная на рис.3, является одной из наиболее эффективных.

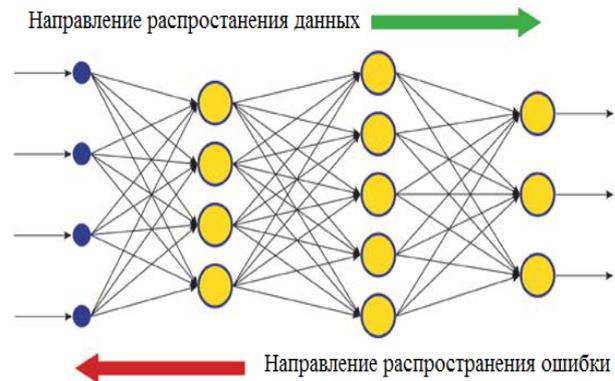


Рис. 3. Обобщенная схема нейронной сети с обратным распространением ошибки

Оптимизация режима реактивной мощности в моделируемой сети осуществляется при помощи компенсирующих устройств, режим работы которых определяется по результатам прогнозирования реактивных нагрузок.

Для прогнозирования была разработана нейронная сеть с обратным распространением ошибки. Нейронная сеть содержит 7 нейронов, функция обучения осуществляется при помощи алгоритма Levenberg-Marquardt back-propagation. Упрощённая схема созданной сети представлена на рис.4.

Рассматриваемая нейронная сеть показывает достаточную эффективность только при достаточном количестве исходных данных об электрических нагрузках отходящих присоединений, которые можно получить только на ГПП. Процессы изменения нагрузки на каждом из ответвлений кольцевого участка сети, как правило, неизвестны. Для решения поставленной задачи в этих условиях возникла необходимость создания нейронной сети, позволяющей произвести прогноз электрических нагрузок, при дефиците исходной информации. Одним из вариантов получения данных для тренировки нейронной сети является измерение нагрузок на рассматриваемых присоединениях с дискретностью в 1 час в течение нескольких дней, с одновременным занесением данных о средних нагрузках. Далее для прогнозирования в нейронную сеть заносятся только данные по средним нагрузкам за предыдущий период.

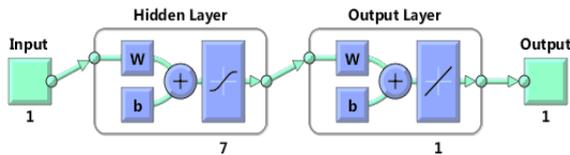


Рис. 4. Структура сети для прогнозирования электрических нагрузок

На рис. 5 представлен результат прогнозирования, полученный с помощью данной нейронной сети.

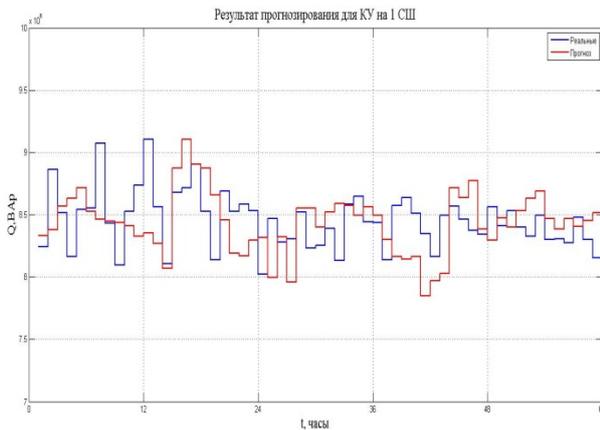


Рис. 5. Прогнозирование реактивной мощности при помощи нейронной сети

В результате была создана нейронная сеть с обратным распространением ошибки, имеющая два входа, два нейрона в скрытом слое и один выход. Метод тренировки сети – алгоритм, Bayesian regulation backpropagation (рис. 6).

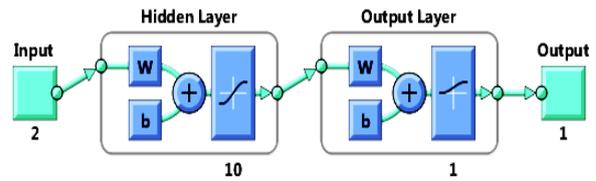


Рис. 6. Структура сети для прогнозирования нагрузок кольцевых распределительных сетей

Для достижения цели снижения затрат, вызванных протеканием реактивной мощности по сети, нельзя определить оптимальные мощности КУ, рассматривая каждый узел отдельно. Установка КУ в одном узле изменяет показатели эффективности установки КУ в других узлах. Особенно это касается сложных сетей, где увеличение мощности КУ в одной точке может привести к увеличению перетоков мощности по другим участкам до такой величины, что увеличившиеся потери могут свести к минимуму экономический эффект от установки КУ.

Приведенные затраты, связанные с передачей, компенсацией и платой за реактивную мощность рассчитываются следующим образом:

$$Z_{\Pi} = Z_{\Pi} + Z_{КУ} + Z_{опл}, \quad (2)$$

где  $Z_{\Pi}$  – затраты связанные с передачей реактивной мощности;

$Z_{КУ}$  – затраты на компенсацию;

$Z_{опл}$  – затраты связанные с оплатой за перетоки реактивной мощности.

Для решения такой задачи используются градиентные методы оптимизации, использующие итерационные алгоритмы постепенного приближения к оптимальному решению [6].

Суть применения данного метода к решаемой задаче заключается в следующем. При получении прогноза потребления реактивной нагрузки на следующий интервал времени производится моделирование работы сети с прогнозными значениями мощностей компенсирующих устройств. Затем мощность компенсации каждого из КУ меняется в некотором диапазоне значений (от 0,8 до 1,3 прогнозируемой необходимой мощности КУ) и при этом производится оценка затрат, связанных с реактивной мощностью. Значение оптимальной мощности КУ соответствует минимальным затратам в моделируемой сети. Данный подход позволяет учесть при помощи средств Simulink все составляющие приведенных затрат, приведенных в выражении (2), и создать в электрической сети оптимальный режим реактивной мощности с экономической точки зрения.

Для сравнения экономического эффекта при внедрении современных методов оптимизации режима реактивной мощности произведено моделирование работы электрической сети в трех случаях:

1) Работа без КУ. Моделирование данной сети необходимо в первую очередь как основа для сравнения эффективности разработанных методов оптимизации. Помимо этого данная ситуация возможна для городских подстанций, многие из которых не имеют компенсирующих устройств.

2) Моделирование сети с КУ, установленными на ГПП. При установке КУ на шинах 10 кВ ГПП прогнозирование мощностей КУ происходит по алгоритму, предполагающему полные данные для прогноза и дальнейшей компенсации реактивной мощности.

3) Моделирование сети с КУ, установленными на ГПП и подстанциях, подключенных к кольцевой распределительной сети. Установка КУ только на головных участках позволяет улучшить режим реактивной мощности в сети, при этом снизив финансовые затраты, обусловленные перетоками реактивной мощности. Но во многих случаях этого может оказаться недостаточно, т.к. даже при достижении приемлемого коэффициента мощности в точке разграничения балансовой принадлежности перетоки реактивной мощности на кольцевом участке сети могут вызвать увеличение затрат из-за потерь электроэнергии. По этой причине целесообразно устанавливать КУ в различных точках кольцевого участка сети.

Для решения этой проблемы была разработана и создана нейронная сеть, способная прогнозировать электрические нагрузки при неполных данных.

Также возникает необходимость выбора точки установки КУ в оптимальных с экономической точки зрения местах. Для этого были проработаны все возможные варианты и выбран оптимальный для снижения затрат.

Для оценки эффективности разработанных методов оптимизации режимов реактивной мощности в таблице 1 приведены затраты при

различном размещении компенсирующих устройств.

Таблица 1

**Сравнение эффективности применения разработанных методов оптимизации за 12 часов**

Место установки КУ	Стоимость потерь активной энергии, грн	Стоимость реактивной энергии, грн	Сумма, грн
БЕЗ КУ	11075	16902	27977
ГПП	11513	189	11702
ГПП и в кольце	9639	263	9902

Следует отметить, что при установке КУ на кольцевом участке сети необходимо учитывать следующие факторы:

- более сложный и иногда неосуществимый с технической точки зрения постоянный учёт потребления электроэнергии для каждого из потребителей;
- влияние на величину затрат места расположения КУ в кольце.

**Выводы**

1. Разработаны методы оптимизации режима реактивной мощности промышленных предприятий с точки зрения снижения затрат, основанные на современных методах машинного обучения и применения нейронных сетей.

2. Эффективность предложенных методов проверена на модели электрической сети с радиальными и кольцевыми участками. Внедрение данных методов оптимизации режима реактивной мощности позволяет получить экономический эффект 1,3 млн. грн. в год для моделируемой сети.

3. Разработанные методы прогнозирования и оптимизации наиболее эффективны при прогнозировании динамично изменяющихся нагрузок, что характерно для современных подстанций. Предложенный подход позволяет значительно уменьшить ошибку прогнозирования в сравнении с традиционными методами.

**REFERENCES**

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Федоров А.А., Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева// Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.  
 2. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.  
 3. Жежеленко И.В. Методы вероятностного

1. Fedorov A.A., Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Fundamentals of power industry]. Moscow, Energiya, 1979. 408p.  
 2. Medvedev V.S. Neyronnye seti MATLAB 6 [Neural networks MATLAB 6]. Moscow, DIALOG-MIFI, 2001. 630 p.  
 3. Zhezhelenko I.V. Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschetakh kharakteristik elektrich-

моделирования в расчётах характеристик электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, В.П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

4. Саенко Ю.Л. Анализ методов прогнозирования реактивных нагрузок промышленных предприятий / Ю.Л. Саенко, В.В. Любарцев // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. трудов. Вып. 30. Т. 2. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ». – (Технические науки). – 2015г. – с.129 – 137.

5. Саенко Ю.Л., Любарцев В.В. Прогнозирование электрических нагрузок с помощью нейронных сетей / Ю.Л. Саенко, В.В. Любарцев // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2015»: Материалы VIII Научно – практической конференции (Одесса, 29.09 – 2.10.2015 г.) – Д.:ДНУЖТ,2015. – с. 80 – 81.

6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

eskikh nagruzok potrebiteley [ Probabilistic simulation methods in the calculation of the characteristics of electrical loads consumer] . – М.: Energoatomizdat, 1990. 128 p.

4. Sayenko Yu.L., Lyubartsev V.V. Analiz metodov prognozirovaniya reaktivnykh nagruzok promyshlennykh predpriyatiy [An analysis of forecasting methods of reactive loads of industrial enterprises] Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: sb. nauk. trudov. Vyp. 30. T. 2. Mariupol': «PSTU». (Tekhnicheskie nauki). 2015. pp.129 – 137.

5. Sayenko Yu.L., Lyubartsev V.V. Prognozirovanie elektricheskikh nagruzok s pomoshch'yu neyronnykh setey [Prediction of electrical loads using neural networks] Elektrifikatsiya transporta «TRANSELEKTRO – 2015»: Materialy VIII Nauchno – prakticheskoy konferentsii (Odessa, 29.09 – 2.10.2015 .) – Д.:ДНУЖТ,2015. pp. 80 – 81.

6. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Power Quality: Guidelines for practical calculations]. – М.: ENAS, 2009. 456 p.

Поступила в печать 13.12.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Повышение цен на электроэнергию, а также плохое состояние электрических сетей вынуждает разрабатывать и внедрять современные методы, позволяющие снизить потребление электроэнергии, а также снизить потери в электросети. Решение этой задачи связано, прежде всего, с оптимизацией производственного процесса: разнесение во времени нагрузок наиболее мощных электроприёмников, ограничение их холостой работы, снижение потребления на собственные нужды, использование оборудования с более высоким КПД а также оптимизация режима реактивной мощности. В настоящее время на многих предприятиях установлены компенсирующие устройства, которые используются с целью снижения коэффициента реактивной мощности в точке балансовой принадлежности до экономического уровня, установленного энергосистемой. Однако при этом не учитывается, что в сложной сети перетоки мощности при неоптимальном размещении компенсирующих устройств и неправильном выборе их мощности могут достигать больших величин, что вызывает увеличение потерь в сети. Разработана программа, реализующая алгоритмы прогнозирования с помощью нейронных сетей на основе как полных, так и не полных данных о величинах электрических нагрузок, а также дальнейшей оптимизации режима реактивной мощности. Также проанализировано влияние места размещения КУ в распределительной сети потребителей на величину затрат. В итоге было достигнуто существенное снижение величины оплаты за реактивную мощность, а также за потери активной энергии в элементах электрической сети.

**Ключевые слова:** оптимизация; нейронные сети; моделирование; реактивная мощность.

## УДК 621.31

Ю. Л. САЕНКО (ПГТУ), В.В. ЛЮБАРЦЕВ (ПГТУ)

Приазовський державний технічний університет, кафедра електрифікації промислових підприємств, Україна, 87500, г. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629) 44-65-51, тел.: +38(097)778-30-18, ел. пошта: [ysayenko@gmail.com](mailto:ysayenko@gmail.com), [lyubartsevadim@gmail.com](mailto:lyubartsevadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](http://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗГАЛУЖЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Підвищення цін на електроенергію, а також поганий стан електричних мереж змушує розробляти і впроваджувати сучасні методи, що дозволяють знизити споживання електроенергії, а також знизити втрати в електромережі. Вирішення цього завдання пов'язане, перш за все, з оптимізацією виробничого процесу: рознесення в часі навантажень найбільш потужних електроприймачів, обмеження їх холостий роботи, зниження споживання на власні потреби, використання обладнання з більш високим ККД а також оптимізація режиму реактивної потужності. В даний час на багатьох підприємствах встановлені пристрої, що

компенсують, які використовуються з метою зниження коефіцієнта реактивної потужності в точці балансової належності до економічного рівня, встановленого енергосистемою. Однак при цьому не враховується, що в складній мережі перетоки потужності при неоптимальному розміщенні пристроїв, що компенсують і неправильному виборі їх потужності можуть досягати великих величин, що викликає збільшення витрат в мережі. Розроблено програму, що реалізує алгоритми прогнозування за допомогою нейронних мереж на основі як повних, так і не повних даних про величини електричних навантажень, а також подальшої оптимізації режиму реактивної потужності. Також проаналізовано вплив місця розміщення КУ в розподільній мережі споживачів на величину витрат. В результаті було досягнуто суттєве зниження величини оплати за реактивну потужність, а також за втрати активної енергії в елементах електричної мережі

**Ключові слова:** оптимізація; нейронні мережі; моделювання; реактивна потужність.

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

## UDC 621.31

Y.SAYENKO (PSTU), V. LIUBARTSEV (PSTU)

Pryazovskyi State Technical University, Department of Industrial Electrical Power Supply, Ukraine, 87500, Mariupol, 7 Universytets'ka, tel.: (0629)-44-65-51, tel.: (0629)-44-65-51, e-mail: [ysayenko@gmail.ru](mailto:ysayenko@gmail.ru), [liubartsevvadim@gmail.com](mailto:liubartsevvadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](http://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR OPTIMIZATION MODE REACTIVE POWER IN AN EXTENSIVE ELECTRIC NETWORK

Increase prices for electricity as well as the poor state of electrical networks force to develop and implement modern methods to reduce power consumption, as well as reduce losses in the power supply. The solution of this problem is primarily due to the optimization of the production process: separation of the most powerful power consumers, limiting their idling, reducing consumption for its own needs, using equipment with higher efficiency and optimization of reactive power mode. Compensating devices are installed today at many enterprises, which are used to reduce reactive power factor to the economic level in the point of common couple. However, it is not considered that the power flows in the complex network with non-optimal placement of the compensating devices and incorrect installation of the power compensation can reach high values, which causes an increase of losses in the network. Program implementing the prediction algorithms has been created with the help of neural networks based on both full and uncomplete data on the values of the electrical loads, as well as further optimization of reactive power mode. The influence of placement of compensating devices in the distributive network on the cost also analyzed. It was finally achieved a significant reduction in the amount of payment for reactive power flows, as well as the loss of active energy in the elements of electrical network.

**Keywords:** optimization; neural network modeling; reactive power.

Internal reviewer *Sychenko V.G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*