

УДК 621.311.016:519.23

## МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Хрущев Юрий Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор кафедры электрических сетей и электротехники  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: khrushchev@tpu.ru

**Панкратов Алексей Владимирович,**

канд. техн. наук, ассистент кафедры электрических сетей и электротехники  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: pank@tpu.ru

**Бацева Наталья Ленмировна,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: davek-19K@yandex.ru

**Полищук Владимир Иосифович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: polischukvi@tpu.ru

**Тавлинцев Александр Сергеевич,**

ассистент кафедры автоматизированных электрических систем УралЭНИН  
«Уральский Федеральный университет», Россия, 620002, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, д. 19. E-mail: winddaes@gmail.com

*Актуальность работы обусловлена отсутствием в настоящее время учета фактических параметров и характеристик электрических нагрузок при моделировании и исследовании режимов энергосистем, так как последний раз данные об электрических нагрузках обновлялись более двадцати лет назад. Внимание именно к статическим характеристикам связано с тем, что они используются в настоящее время в программных комплексах, на базе которых решаются задачи диспетчерского управления и планируются объемы поставок электроэнергии на оптовом рынке. При использовании статических характеристик помимо классических задач анализа установившихся режимов определяются пределы апериодической статической устойчивости, производится анализ динамических переходов, уточняются ограничения при определении максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях энергосистем, выполняются расчеты комплексной нагрузки.*

**Цель исследования:** разработка и апробация методики идентификации полиномиальной модели электрической нагрузки по результатам активного эксперимента.

**Методы исследования:** В качестве исходных данных были использованы массивы значений напряжения, активной и реактивной мощностей. Для математической обработки экспериментальных данных с целью идентификации статических характеристик нагрузки по напряжению применялись два математических метода: метод последовательных приближений и метод наименьших квадратов для решения плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений. Все расчеты выполнялись в программном комплексе MathCAD.

**Результаты:** Выявлены и апробированы математические методы обработки экспериментальных данных для решения задачи идентификации статических характеристик нагрузки по напряжению. Показано, что статическую характеристику реактивной мощности следует представлять полиномом второй степени, в то время как статическую характеристику по активной мощности лучше представлять линейной зависимостью. Получены коэффициенты полиномов второй степени, которые могут быть использованы для моделирования нагрузки при расчетах электрических режимов.

**Ключевые слова:**

Статические характеристики нагрузки, ток, напряжение, активная мощность, реактивная мощность, подстанция, энергосистема, экспериментальные данные.

### Введение

Одной из важных задач, решаемых в процессе функционирования рынка электрической энергии, является выявление ограничений на передачу электрической энергии и мощности по сечениям и отдельным элементам электрической сети. Задачи повышения точности определения таких ограничений являются крайне важными, поскольку их грубая оценка приводит к завышению запасов по параметрам режима и, как следствие, к недоиспользованию возможностей повышения технико-экономических показателей электроэнергетической системы (ЭЭС).

Известно, что большое влияние на точность определения ограничений по транспортной способности ЭЭС оказывает выбор способа моделирования электрической нагрузки. Моделирование нагрузки для анализа режимов работы ЭЭС связано с определенными трудностями, обусловленными тем, что в каждом узле имеется большое количество электроприемников, различающихся по мощности, параметрам, нагрузке и условиям работы. Существенно различается и состав нагрузки, а точная информация по составу и параметрам электроприемников узла нагрузки зачастую отсутствует.

Большое значение вопросу моделирования нагрузок стало уделяться после серии крупных аварий в зарубежных ЭЭС, когда отсутствие учета фактических значений параметров и характеристик нагрузки привело к нарушению устойчивости работы ЭЭС, проблемам восстановления питания в послеаварийном режиме и причинению значительного ущерба потребителям [1–3].

В России увеличивающийся интерес к вопросу корректного представления электрической нагрузки в расчетных моделях ЭЭС связан, в первую очередь, с утерей актуальности данных, прежде всего, о статических характеристиках нагрузки (СХН) по напряжению, обновлявшихся последний раз более двадцати лет назад. Пристальное внимание именно к статическим характеристикам связано с тем, что в настоящее время они используются в программных комплексах, на базе которых решаются задачи диспетчерского управления и планируются объемы поставок электроэнергии на оптовом рынке. При их использовании помимо классических задач анализа установившихся режимов с повышенной точностью определяются пределы аperiодической статической устойчивости, производится анализ динамических переходов ЭЭС, выполняются расчеты статической устойчивости сложной (комплексной) нагрузки [4–6].

При учете поведения нагрузки применяется ее эквивалентирование (моделирование), когда нагрузку представляют либо совокупностью эквивалентных синхронных и асинхронных электродвигателей и статической частью, либо уравнениями, описывающими процессы в узле, либо статическими и динамическими характеристиками по напряжению и частоте [6–11].

### Характеристика объекта исследования

Идентификация СХН по напряжению выполнялась для электроприемников, питаемых от второй секции шин 6 кВ подстанции 35/6 кВ Сибкабель (далее – Подстанция), которая находится в собственности ЗАО «Сибкабель» (г. Томск). Следует отметить, что ЗАО «Сибкабель» относится к многономенклатурным предприятиям, где в одном цеху выпускается несколько видов кабельной продукции, номенклатура которой меняется день ото дня в зависимости от покупательского спроса, следовательно, особенностью режима работы предприятия является неоднородный по времени технологический процесс с постоянно изменяющимся режимом работы электрооборудования, что создает определенные трудности в получении СХН, связанные с разработкой процедуры фильтрации экспериментальных данных.

Согласно схеме Подстанции, представленной на рис. 1, на ней установлены два трансформатора марки ТДНС-10000/35 с диспетчерскими номерами Т-1 и Т-2 и следующими техническими характеристиками: номинальная мощность 10 МВА; пределы регулирования напряжения  $\pm 8 \times 1,5 \%$ ; напряжение обмоток  $U_{в.ном} = 36,75$  кВ;  $U_{н.ном} = 6,3$  кВ; номер положения привода устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) в нормальном режиме работы 11.

Исследуемые электроприемники запитаны от трансформатора с диспетчерским номером Т-2.

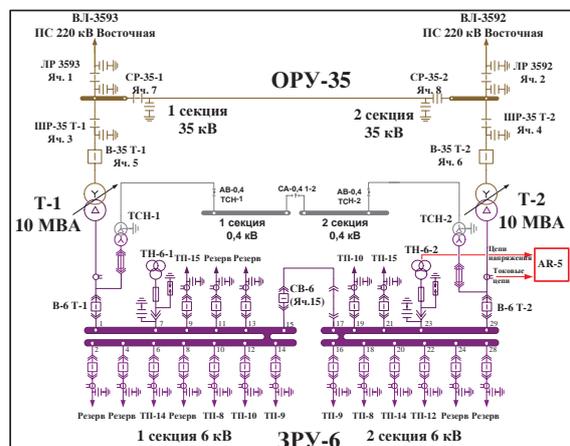


Рис. 1. Схема подстанции 35/6 кВ Сибкабель

Fig. 1. Arrangement of Sibkabel 35/6 kV substation

Класс точности трансформаторов тока (ТТ) 0,2S, класс точности трансформаторов напряжения (ТН) 0,5.

К шинам 0,4 кВ трансформаторных подстанций (ТП) подключены компенсирующие устройства, которые при проведении активного эксперимента были отключены.

От второй секции шин запитаны электроприемники, характеристика которых приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Электроприемники, питаемые от второй секции шин 6 кВ**Table 1.** Power consumers supplied from the second section of 6 kV bars

Номер ячейки, согласно рис. 1 Cell number according to Fig. 1	Номер ТП/Цеха Transformer sub-station (TS)/Works-shop	Характеристика электроприемников Power consumer characteristics
16	9/11, 6	Освещение, водонагревательная установка, подъемники, вальцовочные станки Lightning, water heating unit, elevator, plate rolling machine
18	8/4	Освещение, синхронные двигатели СД-2 и СД-4 марки СДРЗ-14-56-12-УЗ и СД-4 of SDR3-14-56-12-UZ brand
19	10/3, 11	Освещение, вентиляция, кран-балки, фольгорезка, насосы, перемоточные механизмы, компрессоры, градирня Lightning, ventilation, overhead crane track, foil cutter, pumps, winding devices, compressors, cooling tower
20	14/8, 12, 13	Освещение, вентиляция, станция обеззараживания Lightning, ventilation, sterilizing station
21	15	Освещение складов Warehouse lightning
22	12/3	Насосы, перемоточные механизмы, компрессоры, градирня Pumps, winding devices, compressors, cooling tower

#### Методика проведения активного эксперимента

Методы определения СХН по напряжению делятся на три вида: метод активного эксперимента, метод пассивного эксперимента, расчетный метод [6–8, 11].

Активный эксперимент используется для определения СХН по напряжению при принудительном изменении в определенном диапазоне напряжения в узле нагрузки. При этом измеряются напряжение, активная и реактивная мощности узла нагрузки, а при необходимости, отдельные электроприемников.

Пассивный эксперимент основан на наблюдении за параметрами режима в течение определенного промежутка времени, например суток, и регистрации значений напряжения и мощностей узла нагрузки.

Расчетный метод заключается в определении СХН узла на основе данных о схеме электроснабжения узла нагрузки и о статических характеристиках мощности электроприемников, или групп электроприемников, полученных экспериментально либо с использованием обобщенных характеристик мощности.

Среди представленных методов активный эксперимент считается наиболее точным методом определения СХН, так как характеристики снимаются в ходе натурных испытаний в период эксплуатации энергообъекта.

В результате анализа электрических схем ЗАО «Сибкабель» было установлено, что при проведении активного эксперимента изменение напряжения будет осуществляться при помощи РПН Т-2 Подстанции. Объекты, режим работы или состояние электрооборудования которых изменятся из-за проведения активного эксперимента, не были выявлены.

Эксперимент проводился по согласованной с ЗАО «Сибкабель» Программе испытаний, согласно которой:

- утвержден порядок планируемых оперативных переключений, обеспечивающих проведение измерений по разработанной Программе испытаний;
- сформирована группа лиц, участвующих в эксперименте, назначены её руководители;
- разработаны инструкции по проведению работ для лиц, входящих в сформированную группу. Активный эксперимент был проведен в следующем порядке:
  - предварительно выполнены необходимые организационные и технические мероприятия, в том числе: подготовка рабочего места, установка и подключение цифрового анализатора электропотребления AR5 (Испания). Анализаторы серии AR5 являются программируемыми приборами, которые измеряют, вычисляют и сохраняют в памяти измеренные параметры режима электрических сетей и имеют внутреннюю память для сохранения всех измеренных параметров для дальнейшей загрузки в компьютер с помощью специализированного программного обеспечения [12]. Анализатор был подключен к вторичным цепям ТТ классом точности 0,2S В6 Т2, ячейка 29 и ТН классом точности 0,5 ТН-6–2 Подстанции по схеме, приведенной на рис. 1, проверен и настроен.
- определены допустимые уровни повышения и понижения напряжения на шинах 6 кВ Подстанции. С помощью расчетов было установлено, что уровни напряжения при проведении эксперимента не будут превышать установленного диапазона 7,2–5,9 кВ. Максимальное значение напряжения ограничивается условиями эксплуатации электрооборудования, а минимальное – условиями устойчивости узла нагрузки. Полный диапазон изменения напряжения будет больше 15 % от  $U_{ном}$ , что соответствует условиям проведения активного эксперимента [6–8, 11].
- в соответствии с утверждённой Программой испытаний с помощью устройства РПН Т-2 на второй секции шин 6 кВ изменялось напряжение, при этом продолжительность работы на каждой ступени с постоянным напряжением составляла не менее 2-х минут, а общая продолжительность эксперимента составила 41 мин. Изменение напряжения проводилось при постоянном контроле частоты сети.

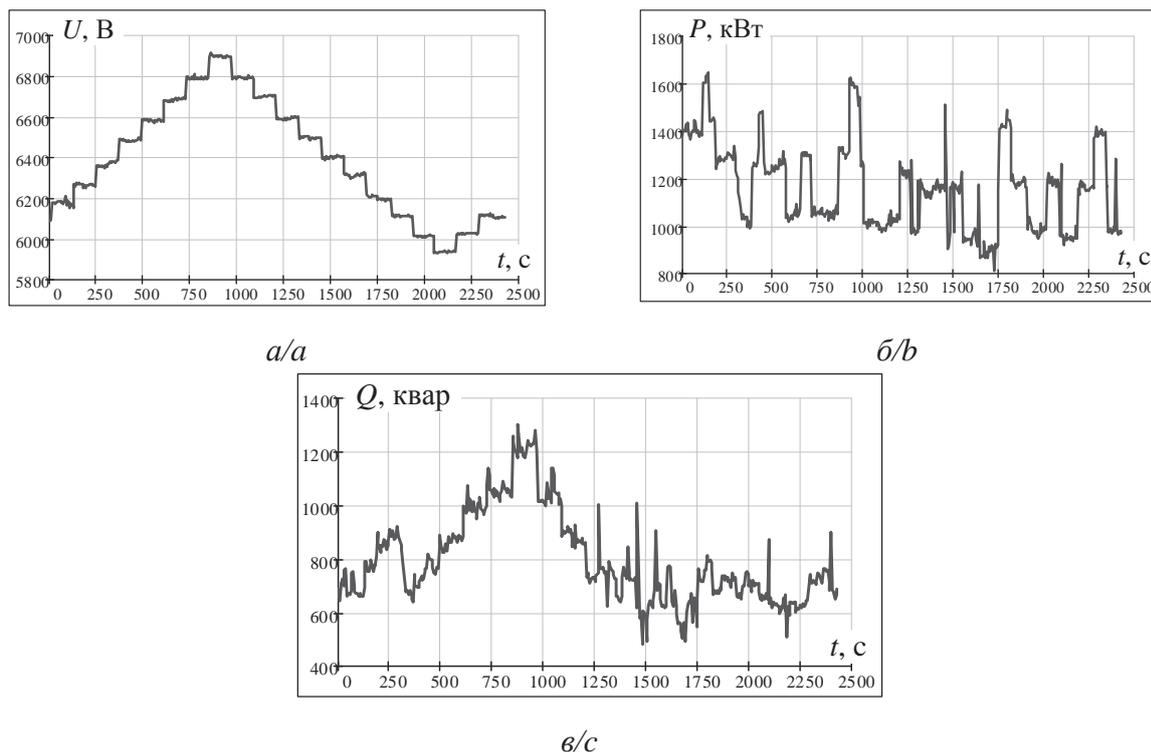


Рис. 2. Графики зависимости от времени: а) напряжения; б) активной мощности; в) реактивной мощности

Fig. 2. a) voltage; b) active power; c) reactive power time dependence curves

- предварительно построены зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  и оценено изменение электропотребления, вызванное изменением состава потребителей.

После проведения эксперимента был сформирован файл, содержащий массивы измерений междуфазного напряжения  $U_i$ , трехфазной активной мощности  $P_i$ , трехфазной реактивной мощности  $Q_i$ .

#### Анализ экспериментальных данных

При проведении активного эксперимента были измерены  $N+1=489$  значений междуфазного напряжения  $U_i$ , трехфазной активной мощности  $P_i$ , трехфазной реактивной мощности  $Q_i$ .

На рис. 2, а–в приведены графики зависимостей измеренных значений напряжения, активной и реактивной мощности от времени.

Зависимости  $P_i=f(U_i)$  и  $Q_i=f(U_i)$  будут выглядеть так, как это показано на рис. 3, а, б соответственно.

В ходе активного эксперимента изменение состава потребителей не было, но постоянства мощностей нагрузки не наблюдается в силу индивидуальных особенностей режима работы предприятия, а именно неоднородного по времени технологического процесса с постоянно изменяющимся режимом работы электрооборудования. Диапазон изменения напряжения составил 15,75 %. Значение частоты за период измерений составляло 50 Гц. Данные активного эксперимента признаны удовлетворительными для идентификации СХН по напряжению.

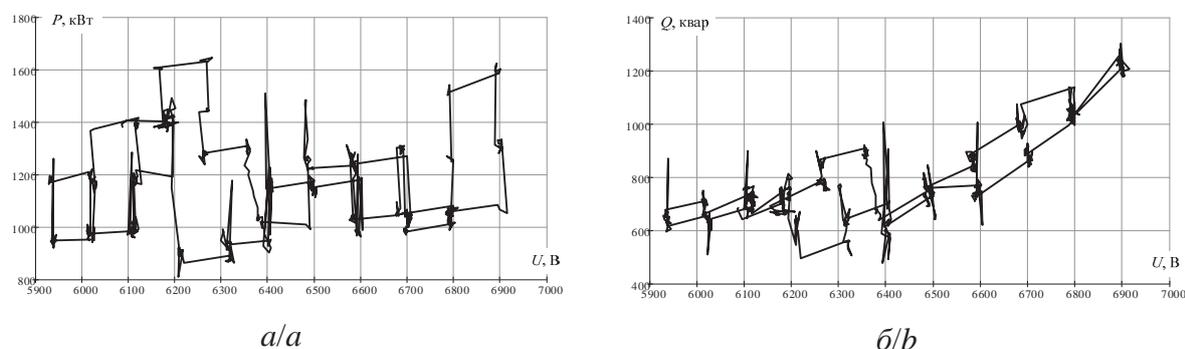


Рис. 3. Графики зависимости: а)  $P_i=f(U_i)$ ; б)  $Q_i=f(U_i)$

Fig. 3. Dependence diagrams: a)  $P_i=f(U_i)$ ; b)  $Q_i=f(U_i)$

### Математические основы и методика обработки экспериментальных данных

В качестве математической модели для идентификации СХН по напряжению могут быть использованы формулы (1), (2), представляющие собой полиномы второй степени [6–8, 11]:

$$P = P_{\text{БАЗ}} \cdot \left( a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} + a_2 \left( \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right)^2 \right); \quad (1)$$

$$Q = Q_{\text{БАЗ}} \cdot \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} + b_2 \left( \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где  $U_{\text{БАЗ}}$  – базисное напряжение узла нагрузки (электроустановки);  $P_{\text{БАЗ}}$ ,  $Q_{\text{БАЗ}}$  – потребление активной и реактивной мощности, соответствующее базисному напряжению;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коэффициенты полиномов.

Полученные экспериментальные данные содержат регулярную и нерегулярную составляющие потребления мощности. Регулярная составляющая описывает настоящее изменение процесса потребления, а нерегулярная характеризует случайный процесс потребления, а вместе с этим и вероятные отклонения значений мощности.

Применительно к задаче идентификации СХН нерегулярную составляющую можно охарактеризовать изменением значения базисной мощности  $P_{\text{БАЗ}}$ , соответствующей заданному базисному напряжению  $U_{\text{БАЗ}}$ , при неизменности коэффициентов полиномов, представленных в относительных единицах. Изменение базисной мощности учитывает как непостоянство состава электроприемников во время проведения эксперимента и особенности технологического процесса, так и погрешность измерений. Фактически идентификация СХН по напряжению сводится к решению одной из следующих задач: нахождению массива значений базисной мощности  $P_{\text{БАЗ}i}$ , соответствующей моментам проведения измерений  $t_i$  – нерегулярная составляющая, либо к нахождению значений коэффициентов полиномов СХН – регулярная составляющая. Значения мощности, полученные при одном и том же значении напряжения, могут значительно отличаться. Это означает, что нерегулярная составляющая оказывает существенное, а порой и определяющее влияние на результаты измерений, поэтому в методике идентификации СХН по напряжению по результатам активного эксперимента необходимо предусмотреть выделение регулярной составляющей.

Наиболее широко используемый метод, когда присутствует нерегулярная составляющая и требуется определить коэффициенты многочлена, входящие в него линейно, – это аппроксимация по наименьшим квадратам [13–18].

Для удобства набор значений  $U_i$ ,  $P_i$ ,  $Q_i$ , полученный для одного и того же момента времени  $t_i$ , будем называть измерением с порядковым номером  $i$ .

В качестве базисного напряжения  $U_{\text{БАЗ}}$  принимают значение напряжения, соответствующее нормальному положению устройства РПН. Значение базисного напряжения является константой.

Каждое значение напряжения  $U_i$  переводят в относительные единицы по формуле:

$$U_{*i} = \frac{U_i}{U_{\text{БАЗ}}}. \quad (3)$$

Так как активный эксперимент проводился при изменении напряжения узла нагрузки с помощью РПН, то из полученных массивов экспериментальных данных следует выделить те, которые соответствуют моментам времени перед изменением напряжения и сразу после изменения напряжения. Такими данными являются пары соседних измерений, на интервале времени между которыми происходит перевод устройства РПН. Измерения получены с минимальной разницей по времени, поэтому вероятность существенного изменения базисной мощности между ними мала и можно утверждать, что именно на соседние измерения нерегулярная составляющая оказывает наименьшее влияние. Помимо этого, между такими точками производится принудительное изменение напряжения. Реакция нагрузки на такое изменение напряжения обусловлена в первую очередь «естественной» СХН.

Одна ступень привода РПН изменяет напряжение от 1 % и более [19, 20], поэтому для выделения пар измерений можно использовать условие:

$$|U_{*i+1} - U_{*i}| \cdot 100 \% > 1 \%. \quad (4)$$

Если для измерений ( $i$ ) и ( $i+1$ ) условие (4) выполняется, то пара измерений оставляется для дальнейшего процесса идентификации СХН. Если условие не выполняется, то производится фильтрация измерений. Количество пар измерений, оставленных для дальнейшего процесса идентификации СХН, будет соответствовать количеству переводов устройства РПН во время проведения активного эксперимента.

Важным является тот факт, что следует рассматривать не отдельные измерения, а именно пары, которые на данном этапе одни и те же как для активной, так и для реактивной мощности.

После выделения пар измерений получится  $M+1$  отрезков с номером  $j=0...M$ . Если обозначить номер начала отрезка  $2 \cdot j$ , а номер конца отрезка  $2 \cdot j+1$ , то массив первых измерений всех отрезков можно обозначить, как  $U_{*2j}$ ,  $P_{2j}$ ,  $Q_{2j}$ , а массив вторых измерений всех отрезков, как  $U_{*2j+1}$ ,  $P_{2j+1}$ ,  $Q_{2j+1}$ .

Дальнейший алгоритм строится на предположении, что в точках  $(U_{*2j}, P_{2j})$  и  $(U_{*2j+1}, P_{2j+1})$  базисная мощность  $P_{\text{БАЗ}j}$ , а в точках  $(U_{*2j}, Q_{2j})$  и  $(U_{*2j+1}, Q_{2j+1})$  базисная мощность  $Q_{\text{БАЗ}j}$  неизменны, поэтому из оставленных для дальнейшего процесса идентификации СХН пар измерений следует исключить те, между которыми базисная мощность меняется.

Для решения задачи исключения пар измерений, между которыми базисная мощность меняется

ся, можно использовать значения регулирующих эффектов нагрузки  $KP_j$  и  $KQ_j$ , рассчитанных для пар измерений по формулам из [6, 7]:

$$KP_j = \frac{P_{2,j+1} - P_{2,j}}{U_{*2,j+1} - U_{*2,j}} \cdot \frac{U_{*2,j+1} + U_{*2,j}}{P_{2,j+1} + P_{2,j}}; \quad (5)$$

$$KQ_j = \frac{Q_{2,j+1} - Q_{2,j}}{U_{*2,j+1} - U_{*2,j}} \cdot \frac{U_{*2,j+1} + U_{*2,j}}{Q_{2,j+1} + Q_{2,j}}. \quad (6)$$

При неизменном значении базисных мощностей  $P_{\text{БАЗ}j}$  и  $Q_{\text{БАЗ}j}$  на значения регулирующих эффектов не окажет влияние представление напряжения в относительных единицах, а мощностей – в именованных, так как отношения мощностей являются безразмерными величинами.

Если базисные мощности изменяются в пределах одного отрезка (от момента времени  $t_{2j}$  до момента времени  $t_{2j+1}$ ), то значение регулирующих эффектов будет отличаться от вычисленных при неизменных  $P_{\text{БАЗ}j}$  и  $Q_{\text{БАЗ}j}$ .

В ограниченном диапазоне изменения напряжения, таком, который обычно принимают при проведении активного эксперимента, регулирующие эффекты нагрузки изменяются незначительно, а зависимости  $KP(U_*)$  и  $KQ(U_*)$  близки к линейным [6–8].

Таким образом, для идентификации СХН остается ограниченное количество измерений.

Опыт анализа данных активных экспериментов показывает, что по активной мощности могут быть отфильтрованы одни измерения, а по реактивной – совершенно другие. В рамках предлагаемой методики фильтрация измерений по активной и реактивной мощности проводится отдельно, и наборы пар измерений, оставленных для дальнейшей идентификации СХН, различны, поэтому введем следующие обозначения: количество пар измерений после фильтрации по активной мощности обозначим  $M_p+1$ , по реактивной мощности  $M_q+1$ , номера отрезков по активной мощности  $j_p=0...M_p$ , по реактивной мощности  $j_q=0...M_q$ , массивы первых измерений, оставленных для рассмотрения отрезков по активной мощности ( $U_{*2,j_p}, P_{2,j_p}$ ), по реактивной мощности ( $U_{*2,j_q}, Q_{2,j_q}$ ), а массивы вторых измерений ( $U_{*2,j_p+1}, P_{2,j_p+1}$ ) и ( $U_{*2,j_q+1}, Q_{2,j_q+1}$ ) соответственно. Массивы напряжения после исключения пар измерений для активной и реактивной мощностей становятся различными, использование индексов  $j_p$  или  $j_q$  покажет, какой из массивов напряжения используется.

Для идентификации СХН по напряжению предлагается использовать метод последовательных приближений, суть которого состоит в нахождении алгоритма поиска искомой величины по известному приближению следующего, более точного приближения [13–18].

Первое приближение строится на расчете значений базисных мощностей, по которым затем вычисляются значения мощностей в относительных единицах и значения коэффициентов полиномов.

Для расчета значений базисной мощности можно использовать формулы:

$$U_{*(j_p)} = \frac{U_{*(2-j_p+1)} + U_{*(2-j_p)}}{2}; P_{(j_p)} = \frac{P_{(2-j_p+1)} + P_{(2-j_p)}}{2}; \quad (7)$$

$$U_{*(j_q)} = \frac{U_{*(2-j_q+1)} + U_{*(2-j_q)}}{2}; Q_{(j_q)} = \frac{Q_{(2-j_q+1)} + Q_{(2-j_q)}}{2}. \quad (8)$$

Базисная мощность первого отрезка принимается равной одной относительной единице. Учитывая, что активный эксперимент начинается при нормальном положении РПН и напряжении, близком к базисному значению, такое предположение можно считать истинным, тогда  $P_{\text{БАЗ}(0)}=P_{(0)}$ ;  $Q_{\text{БАЗ}(0)}=Q_{(0)}$ .

Зная базисную мощность предыдущего отрезка, определяют базисную мощность следующего отрезка по формулам (9):

$$P_{\text{БАЗ}(j_p+1)} = \frac{P_{2,j_p+2} \cdot P_{\text{БАЗ}(j_p)}}{P_{2,j_p+1}};$$

$$Q_{\text{БАЗ}(j_q+1)} = \frac{Q_{2,j_q+2} \cdot Q_{\text{БАЗ}(j_q)}}{Q_{2,j_q+1}}. \quad (9)$$

Осуществляют перевод мощностей в относительные единицы по формулам (10, 11):

$$P_{*2,j_p} = \frac{P_{2,j_p}}{P_{\text{БАЗ}(j_p)}}; P_{*2,j_p+1} = \frac{P_{2,j_p+1}}{P_{\text{БАЗ}(j_p)}}; \quad (10)$$

$$Q_{*2,j_q} = \frac{Q_{2,j_q}}{Q_{\text{БАЗ}(j_q)}}; Q_{*2,j_q+1} = \frac{Q_{2,j_q+1}}{Q_{\text{БАЗ}(j_q)}}. \quad (11)$$

Используя метод наименьших квадратов [13, 15, 16, 18], составляют систему уравнений вида (12), например, для активной мощности:

$$\begin{pmatrix} P_{*0} \\ P_{*1} \\ \dots \\ P_{*M_p+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & U_{*0} & U_{*0}^2 \\ 1 & U_{*1} & U_{*1}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & U_{*M_p+1} & U_{*M_p+1}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Система уравнений (12) относится к переопределенным системам линейных алгебраических уравнений, в которых число уравнений больше числа неизвестных.

Для решения системы уравнений (12) можно ввести обозначения:

$$x = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 1 & U_{*0} & U_{*0}^2 \\ 1 & U_{*1} & U_{*1}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & U_{*M_p+1} & U_{*M_p+1}^2 \end{pmatrix};$$

$$b = \begin{pmatrix} P_{*0} \\ P_{*1} \\ \dots \\ P_{*M_p+1} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Применяя критерий минимизации суммы квадратов разностей правой и левой частей системы, то есть

$$(Ax - b)^T \cdot (Ax - b) \rightarrow \min, \quad (14)$$

получают решение

$$A^T Ax = A^T b \Rightarrow x = (A^T A)^{-1} \cdot A^T b, \quad (15)$$

где  $A^T$  – транспонированная матрица.

Полученные в результате значения коэффициентов полиномов  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  являются первым приближением.

Исходя из предположения о том, что в пределах  $j$ -го отрезка базисная мощность остается неизменной, рассчитывают значения базисной мощности для каждого из отрезков:

$$P_{\text{БАЗ}(j_p)} = \frac{P_{c_{j_p}}}{a_0 + a_1 \cdot U_{*c_{j_p}} + a_2 \cdot U_{*c_{j_p}}^2}; \quad (16)$$

$$Q_{\text{БАЗ}(j_q)} = \frac{Q_{j_q}}{b_0 + b_1 \cdot U_{*j_q} + b_2 \cdot U_{*j_q}^2}. \quad (17)$$

Повторяют действия по определению уточненных коэффициентов полиномов: используя формулы (10), (11), значения измеренных мощностей переводят в относительные единицы; затем с помощью формул (12)–(15) уточняют коэффициенты  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$ .

Следует отметить, что итерационный метод не учитывает условия

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1; \quad b_0 + b_1 + b_2 = 1, \quad (18)$$

поэтому СХН могут удаляться от точки с координатами (1;1) с каждой последующей итерацией. Во избежание этого достаточно каждый раз умножать полученные коэффициенты на величину  $\frac{1}{a_0 + a_1 + a_2}$

для активной мощности и на величину  $\frac{1}{b_0 + b_1 + b_2}$

для реактивной, и, таким образом, с каждой новой итерацией уточнять значения коэффициентов.

Для оценки точности предлагается использовать значение среднеквадратического отклонения всех оставленных после фильтрации значений мощности, представленных в относительных единицах:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot M_p + 2} \times \sum_{i_p=0}^{2 \cdot M_p + 1} [P_{*i_p} - (a_0 + a_1 \cdot U_{*i_p} + a_2 \cdot U_{*i_p}^2)]^2}; \quad (19)$$

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot M_q + 2} \times \sum_{i_q=0}^{2 \cdot M_q + 1} [Q_{*i_q} - (b_0 + b_1 \cdot U_{*i_q} + b_2 \cdot U_{*i_q}^2)]^2}. \quad (20)$$

Итерационный процесс следует продолжать до тех пор, пока значение среднеквадратического отклонения уменьшается.

### Апробация методики

В качестве базисного напряжения было принято значение напряжения, соответствующее нормальному положению РПН Т-2:  $U_{\text{БАЗ}}=6200$  В.

Все значения напряжения были переведены в относительные единицы по формуле (3). Из общего массива измерений выделены те измерения, которые соответствуют моментам времени перед изменением напряжения и сразу после изменения напряжения по условию (4). Результаты представлены на рис. 4, 5.

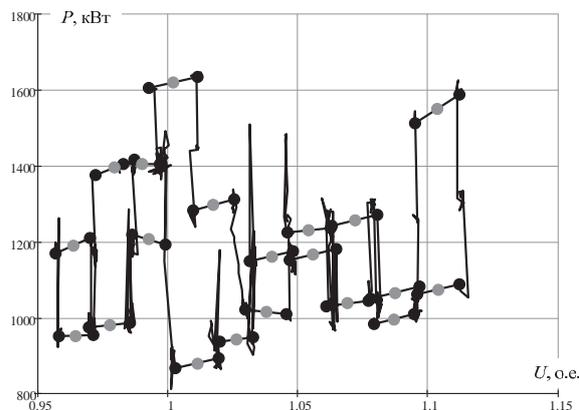


Рис. 4. Выделение пар соседних измерений для активной мощности

Fig. 4. Selection of neighboring measurements pairs for active power

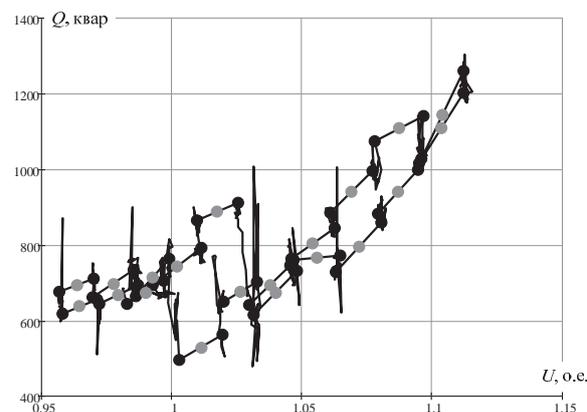


Рис. 5. Выделение пар соседних измерений для реактивной мощности

Fig. 5. Selection of neighboring measurements pairs for reactive power

Далее, используя значения регулирующих эффектов нагрузки  $KP_i$  и  $KQ_i$ , рассчитанные для каждой из оставленных пар измерений по формулам (5) и (6), были исключены те пары измерений, между которыми базисная мощность меняется. Результаты представлены на рис. 6, 7.

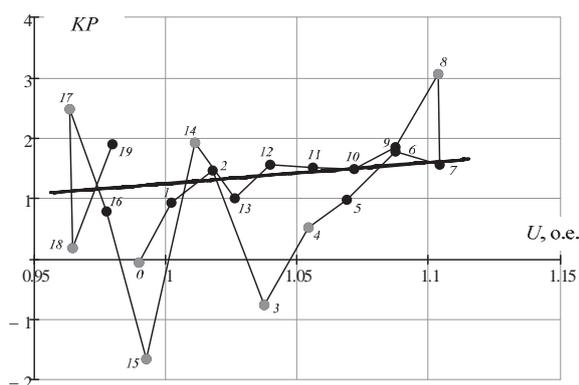


Рис. 6. Регулирующие эффекты по активной мощности после исключения пар измерений

Fig. 6. Active power regulation coefficients of load after exclusion of measurements pairs

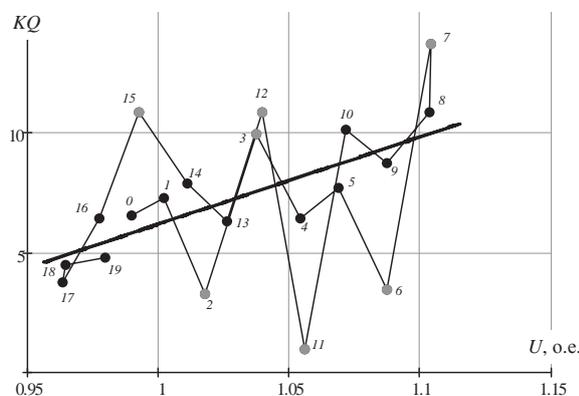


Рис. 7. Регулирующие эффекты по реактивной мощности после исключения пар измерений

Fig. 7. Reactive power regulation coefficients of load after exclusion of measurements pairs

На рис. 6, 7 показаны отбракованные измерения по активной мощности (№ 15, 3, 0, 18, 8, 4, 17, 14) и по реактивной мощности (№ 11, 15, 6, 7, 2, 12, 3). Для активной и реактивной мощностей номера отбракованных измерений не совпадают. Для наглядности показана линейная аппроксимирующая прямая для оставшихся пар измерений, полученная по методу наименьших квадратов. По рисункам видно, что после фильтрации значительных отклонений измеренных значений от аппроксимирующей прямой нет, что позволяет сделать вывод о пригодности данных активного эксперимента для определения коэффициентов полиномов СХН.

Первое приближение базисных мощностей для первого отрезка:  $P_{\text{БАЗ}(0)}=1606$  кВт;  $Q_{\text{БАЗ}(0)}=644$  кВАр. Базисные мощности первого и последующих отрезков, рассчитанные по формулам (7), (8), (9), представлены в табл. 2.

Процесс идентификации СХН по активной мощности при последовательной отбраковке отрезков представлен на рис. 8 и в табл. 3.

Таблица 2. Результаты расчета значений базисных мощностей

Table 2. Results of calculation of basic capacity values

Номер отрезка Section number	$P_{\text{БАЗ}}, \text{ кВт}$ $P_{\text{BAS}}, \text{ kWt}$	$Q_{\text{БАЗ}}, \text{ кВАр}$ $Q_{\text{BAS}}, \text{ kVAr}$
0	1606,119	644,091
1	1260,819	633,541
2	989,717	610,731
3	993,809	639,928
4	975,532	772,314
5	906,253	757,797
6	1172,444	738,557
7	1115,199	711,785
8	1139,078	617,413
9	941,697	915,854
10	897,65	985,717
11	1023,986	899,244
12	1445,519	880,815

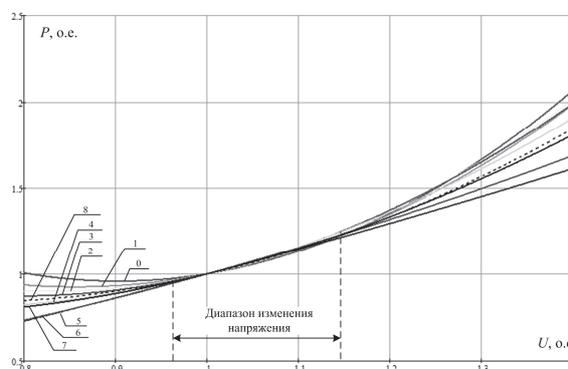


Рис. 8. СХН по активной мощности при последовательной отбраковке отрезков

Fig. 8. Load static characteristics (LSC) by active power at sequence section sorting out

Таблица 3. Коэффициенты полинома СХН по активной мощности, среднеквадратические отклонения и значения регулирующего эффекта

Table 3. Polynomial coefficients of LSC by active power, root-mean-square deviations and power regulation coefficients of load

Номера отфильтрованных отрезков Numbers of sorted out sections	Коэффициенты полинома Polynomial coefficients			Среднеквадратическое отклонение Root-mean-square deviation	Регулирующий эффект Controlling effect
	$a_0$	$a_1$	$a_2$		
нет/по	4,629	-8,136	4,507	0,0073	0,878
15	3,559	-6,158	3,598	0,0065	1,038
15, 3	3,256	-5,686	3,429	0,0054	1,172
15, 3, 0	2,822	-4,9	3,078	0,0051	1,256
15, 3, 0, 18	1,971	-3,293	2,322	0,005	1,351
15, 3, 0, 18, 8	-0,119	0,821	0,298	0,0039	1,417
15, 3, 0, 18, 8, 4	0,186	0,163	0,651	0,0034	1,465
15, 3, 0, 18, 8, 4, 17	1,481	-2,277	1,796	0,0029	1,315
15, 3, 0, 18, 8, 4, 17, 14	2,024	-3,272	2,248	0,0027	1,224

По рис. 8 видно, что при последовательной отбраковке отрезков вначале наблюдается существенное изменение формы получаемой характеристики, а, начиная с семи отбракованных отрезков, форма характеристики меняется незначительно. Этот факт позволяет сделать вывод, что после исключения семи отрезков фильтрацию следует прекратить. Среднеквадратическое отклонение, как и ожидалось, уменьшается с каждым новым убранным отрезком.

Процесс идентификации СХН по реактивной мощности при последовательной отбраковке отрезков представлен на рис. 9 и в табл. 4.

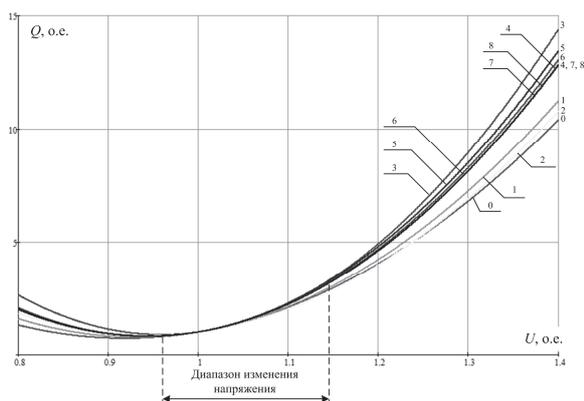


Рис. 9. СХН по реактивной мощности нагрузки при последовательной отбраковке отрезков

Fig. 9. LSC by load reactive power at sequence section sorting out

Таблица 4. Коэффициенты полинома СХН по реактивной мощности, среднеквадратические отклонения и значения регулирующего эффекта

Table 4. Polynomial coefficients of LSC by reactive power, root-mean-square deviations and power regulation coefficients of load

Номера отфильтрованных отрезков Numbers of sorted out sections	Коэффициенты полинома Polynomial coefficients			Среднеквадратическое отклонение Root-mean-square deviation $\sigma_Q$	Регулирующий эффект Controlling effect $KQ_j$
	$b_0$	$b_1$	$b_2$		
нет/по	35,884	-76,611	41,723	0,0383	6,835
11	42,003	-88,61	47,602	0,0331	6,594
11, 15	43,261	-89,949	47,684	0,0328	5,419
11, 15, 6	64,732	-133,2	69,462	0,0265	5,724
11, 15, 6, 7	53,084	-110,527	58,439	0,0187	6,351
11, 15, 6, 7, 2	54,871	-114,603	60,729	0,0161	6,855
11, 15, 6, 7, 2, 12	53,119	-110,92	58,797	0,0156	6,674
11, 15, 6, 7, 2, 12, 3	52,048	-108,651	57,599	0,0157	6,547

Динамика изменения формы характеристики, значений среднеквадратического отклонения и регулирующего эффекта позволяет сделать вывод, что отбраковку можно было прекратить уже после отсеивания четырех отрезков.

На рис. 10 и 11 приведены полученные СХН по активной и реактивной мощностям соответственно. Контроль точности осуществлялся по значениям среднеквадратических отклонений.

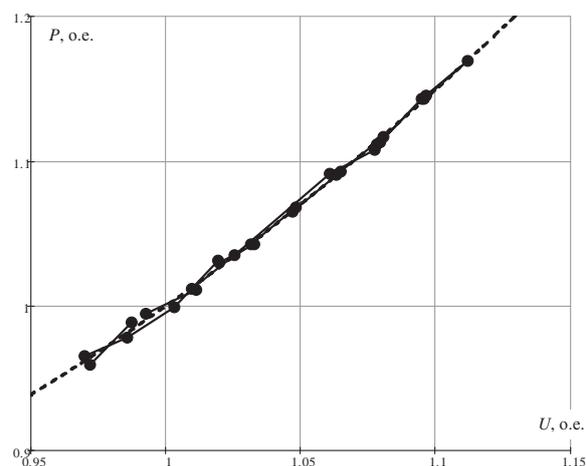


Рис. 10. СХН по активной мощности

Fig. 10. LSC by active power

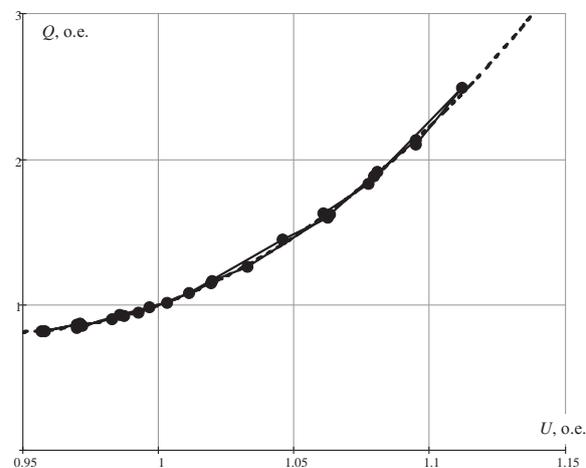


Рис. 11. СХН по реактивной мощности

Fig. 11. LSC by reactive power

В табл. 5 и 6 приведены итоговые коэффициенты полиномов, среднеквадратические отклонения и значения регулирующих эффектов для СХН, представленных на рис. 10, 11.

**Таблица 5.** Итоговые коэффициенты полиномов СХН по активной мощности, среднеквадратическое отклонение и значение регулирующего эффекта

**Table 5.** Overall polynomial coefficients of LSC by active power, root-mean-square deviation and power regulation coefficients of load

Номера отфильтрованных отрезков Numbers of sorted out sections	Коэффициенты полиномов СХН LSC polynomial coefficients			Среднеквадратическое отклонение Root-mean-square deviation	Регулирующий эффект Controlling effect
	$a_0$	$a_1$	$a_2$		
15, 3, 0, 18, 8, 4, 17, 14	1,481	-2,277	1,796	0,003	1,224

**Таблица 6.** Итоговые коэффициенты полиномов СХН по реактивной мощности, среднеквадратическое отклонение и значение регулирующего эффекта

**Table 6.** Overall polynomial coefficients of LSC by reactive power, root-mean-square deviation and power regulation coefficients of load

Номера отфильтрованных отрезков Numbers of sorted out sections	Коэффициенты полиномов СХН LSC polynomial coefficients			Среднеквадратическое отклонение Root-mean-square deviation	Регулирующий эффект Controlling effect
	$b_0$	$b_1$	$b_2$		
11, 15, 6, 7, 2, 12, 3	52,048	-108,651	57,599	0,016	6,547

**Выводы**

1. Анализ экспериментальных данных показал, что их можно признать удовлетворительными и использовать для идентификации СХН по напряжению.
2. Во время проведения активного эксперимента напряжение изменялось в диапазоне (0,97–1,14) от  $U_{\text{БАЗ}}$ . В этом диапазоне форма характеристик отличается незначительно, чего нельзя сказать об абсолютных значениях коэффициентов полиномов, изменяющихся в достаточно широких пределах. Более информативным показателем правильности процедуры идентификации СХН является регулирующий эффект нагруз-

ки, который изменяется для активной мощности в пределах 0,878–1,465, а для реактивной – в пределах 5,419–6,835. Исследуемая нагрузка имеет итоговое значение регулирующего эффекта по активной мощности несколько большее, чем приведено в [6–8], что связано с проведением эксперимента на шинах 6 кВ, а по реактивной мощности полученное значение регулирующего эффекта не противоречит сведениям из [6–8].

3. Использование линейной СХН для активной мощности предпочтительнее, так как неопределенность значения второй производной обеспечивает высокую чувствительность коэффициентов полинома второй степени к погрешности измерений и не позволяет достоверно их определить в столь узком диапазоне изменения напряжения. Кривизна СХН для реактивной мощности достаточно четко выражена, поэтому описание полиномом второй степени подходит лучше, а коэффициенты полинома определяются с высокой степенью достоверности.
4. Полученные коэффициенты полиномов СХН можно использовать для практического представления статических характеристик по активной и реактивной нагрузке Подстанции, обеспечивающей питание промышленных потребителей (кабельное производство), при условии такого изменения напряжения, как при проведении активного эксперимента, а описание квадратичных полиномов СХН в формате программного комплекса для расчета режимов ЭЭС можно представить выражениями:

$$P(U) = P_{\text{БАЗ}} \cdot \left[ \begin{matrix} 1,481 - 2,277 \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} + \\ + 1,796 \left( \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right)^2 \end{matrix} \right];$$

$$Q(U) = Q_{\text{БАЗ}} \cdot \left[ \begin{matrix} 52,048 - 108,651 \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} + \\ + 57,599 \left( \frac{U}{U_{\text{БАЗ}}} \right)^2 \end{matrix} \right].$$

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Rahim A.A., Hashim M.F., Siam M.F.M. Load model derivation based on load response to actual disturbances in Malaysia power system // The 5<sup>th</sup> IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, AsiaPES 2012. – Phuket, Thailand, 2-4 April 2012. – P. 128-133.
2. Li Shi-Hua. Power Grid Crises Management and Research on Load-Model of Power Grid // Proceeding of the IEEE Power Systems Conference and Exposition. – Wuhan, 2009. – P. 1556-1561.
3. Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models / A. Maitra, A. Gaikwad, P. Zhang, M. Ingram, D.L. Mercado, W.D. Woitt // Proc. of the IEEE Power Systems Conference and Exposition. – Atlanta, 2006. – P. 1446-1551.

4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
5. Калентиюнок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
6. Гуревич Ю.Е. Расчетные модели нагрузки для анализа переходных процессов в электрической системе. – М.: Энергоиздат, 1978. – 46 с.
7. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
8. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 248 с.

9. Identification of the static characteristics of large load centers / A.V. Pazderin, A.A. Suvorov, A.S. Tavlintsev, P.V. Chusovitin, A.V. Yudin // Scientific Review. – 2013. – № 7. – P. 270–275.
10. Identification of Static Polynomial Load Model Based On Remote Metering Systems Information / A. Tavlintsev, A. Pazderin, OI. Malozemova, P. Chusovitin // Proc. of the 13<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Wroclaw, Poland, 1–3 November, 2013. – P. 213–216.
11. Горбунова Л.М., Портной М.Г., Рабинович Р.С. Экспериментальные исследования режимов энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.
12. Анализатор электропотребления CIRCUTOR (AR5). Руководство пользователя. URL: [http://atvelectro.ru/d/405126/d/ar5\\_ar5-l\\_manual.pdf](http://atvelectro.ru/d/405126/d/ar5_ar5-l_manual.pdf) (дата обращения: 20.02.2014).
13. Воскобойников Ю.Е. Построение регрессионных моделей в пакете MATCAD. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. – 220 с.
14. Гайдышев И.П. Анализ и обработка данных. – СПб.: Питер, 2001. – 750 с.
15. Гурский Д.А. Вычисления в MATCAD 12. – СПб: Питер, 2006. – 544 с.
16. Демидович Б.П. Численные методы анализа. – М.: Гос. Изд-во физико-математической литературы, 1962. – 367 с.
17. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т. Т. 1. / пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
18. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1972. – 400 с.
19. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др. / под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
20. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

Поступила 27.06.2014 г.

UDC 621.311.016:519.23

## THE TECHNIQUE FOR IDENTIFYING LOAD STATIC CHARACTERISTICS BASED ON EXPERIMENTAL DATA

**Yuriy V. Khrushchev,**

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: khrushchevv@tpu.ru

**Aleksey V. Pankratov,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: pank@tpu.ru

**Natalia L. Batseva,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: davek-19K@yandex.ru

**Vladimir I. Polishchuk,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: polischukvi@tpu.ru

**Aleksandr S. Tavlintsev,**

Ural Federal University, 19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia.  
E-mail: winddaes@gmail.com

*The urgency of the discussed issue is caused by the deficiency of the recordkeeping of power load actual parameters and characteristics for simulation, verification and analysis of power system regimes, since this information was updated more than twenty years ago. The attention to static characteristics is occurred due to their use in special software packages for dispatching operation control and electrical energy supply planning. Unless classical tasks of steady state regimes evaluation it turns to be possible to subsist an aperiodic steady-state stability limits, to analyze dynamic transitions, to confirm limits under calculations of emergency transfer capability, to calculate a complex load.*

*The main aim of the study is to develop and improve the technique of polynomial load model derivation based on experimental data.*

*The methods used in the study. Voltage, active power and reactive power instantaneous values are used as the master data. The successive approximation method and least-square method for the calculation of ill-conditioned linear equation systems are used as the methods of mathematical treatment for the polynomial load model derivation. Calculations are done by software package MathCAD.*

*The results. The authors found out and evaluated mathematical methods of experimental data treatment for identifying load static characteristics. It is indicated that the static reactive power characteristic should be represented by the quadratic polynomial model while static active power characteristic should be represented by linear dependence. Polynomial coefficients of the second order were obtained and can be used for load simulation when calculating electric mode.*

### **Key words:**

*Static characteristics of load, current, voltage, active power, reactive power, substation, power system, experimental data.*

## REFERENCES

1. Rahim A.A., Hashim M.F., Siam M.F.M. Load model derivation based on load response to actual disturbances in Malaysia power system. *5<sup>th</sup> IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, AsiaPES 2012*. Phuket, Thailand, 2–4 April 2012. pp. 128–133.
2. Li Shi-Hua. Power Grid Crises Management and Research on Load-Model of Power Grid. *Proceeding of the IEEE Power Systems Conference and Exposition*, 2009. pp. 1556–1561.
3. Maitra A., Gaikwad A., Zhang P., Ingram M., Mercado D.L., Witt W.D. Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models. *Proc. of the IEEE Power Systems Conference and Exposition*, 2006. pp. 1446–1551.
4. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [The issues of the electrical system stability]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p.
5. Kalentionok E.V. *Ustoychivost elektroenergeticheskikh sistem* [Stability of the electrical energy systems]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2008. 375 p.
6. Gurevich Yu.E. *Raschetnye modeli nagruzki dlya analiza perekhodnykh protsessov v elektricheskikh sistemakh* [The analytic load models for analyzing transients in electrical systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1978. 46 p.
7. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Ustoychivost nagruzki elektricheskikh sistem* [Load stability of the electrical systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 208 p.
8. Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v rashchetakh energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley* [Application of electrical load mathematical models for calculating energy systems and power supply reliability of industrial consumers]. Moscow, Eleks-KM Publ., 2008. 248 p.
9. Pazderin A.V., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Chusovitin P.V., Yudin A.V. Identification of the static characteristics of large load centers. *Scientific Review*, 2013, no. 7, pp. 270–275.
10. Tavlintsev A., Pazderin A., Malozemova OI., Chusovitin P. Identification of Static Polynomial Load Model Based On Remote Metering Systems Information. *Proc. of the 13<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2013. pp. 213–216.
11. Gorbunova L.M., Portnoy M.G., Rabinovich R.S. *Eksperimentalnye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental researches of energy systems regimes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 448 p.
12. *Analizator elektropotrebleniya CIRCUTOR (AR5). Rukovodstvo polzovatelya* [Analyzing assembly of electrical energy consumption CIRCUTOR (AR5). User manual]. Available at: [http://atvelectro.ru/d/405126/d/ar5\\_ar5-l\\_manual.pdf](http://atvelectro.ru/d/405126/d/ar5_ar5-l_manual.pdf) (accessed 20 February 2014).
13. Voskoboinikov Yu.E. *Postroenie regressionnykh modeley v pakete MATHCAD* [Composition of regressive models in software MATHCAD]. Novosibirsk, Sibstrin Publ., 2009. 220 p.
14. Gaydyshev I.P. *Analiz i obrabotka dannykh* [Data analysis and processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001. 750 p.
15. Gurskiy D.A. *Vychisleniya v MATHCAD 12* [Calculations in MATHCAD 12]. St. Petersburg, Piter Publ., 2006. 544 p.
16. Demidovich B.P. *Chislennyye metody analiza* [Numerical methods of analysis]. Moscow, GIFML Publ., 1962. 367 p.
17. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh* [Methods and technique of signal processing under physical measurements]. Moscow, Mir Publ., 1983. 312 p.
18. Khemming R.V. *Chislennyye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Numerical methods for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 400 p.
19. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti* [Electrical systems. Electrical networks]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1998. 511 p.
20. Faybisovich D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Designing of electrical networks. Reference book]. Moscow, ENAS Publ., 2006. 320 p.

Received: 27 June 2014.