

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева

Томский политехнический университет, г. Томск

Учет статических характеристик нагрузки необходим для повышения адекватности расчетных моделей электроэнергетических систем в целом. Экспериментальные исследования являются единственным способом их достоверного определения. Измеряемая мощность зависит как от реакции объекта на изменение питающего напряжения, так и от случайного процесса изменения нагрузки. В общем случае строгого универсального решения, позволяющего выделить естественную статическую характеристику нагрузки из экспериментальных данных, не существует. В статье предложена авторская методика, являющаяся частным решением этой задачи. Методика включает выделение соседних пар отсчетов, между которыми питающее напряжение заметно изменяется, фильтрацию выделенных пар отсчетов с помощью значений регулирующего эффекта нагрузки и последующее выделение из экспериментальных данных естественной статической характеристики нагрузки, представленной полиномом второй степени. Приведен пример использования методики для определения статической характеристики нагрузки по напряжению предприятия ЗАО «Сибкабель», г. Томск. Изложенные в статье положения могут быть использованы для разработки методов определения статических характеристик нагрузки по результатам измерений, полученных как при проведении активных экспериментов, так и в других эксплуатационных режимах электроэнергетических систем.

Ключевые слова: статическая характеристика нагрузки, экспериментальные исследования, ток, напряжение, мощность, регулирующий эффект нагрузки, понижающая трансформаторная подстанция.

Введение

Основным инструментом, используемым при осуществлении функций оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике, является расчетная математическая модель электроэнергетической системы [1, 2]. На основании расчетной модели решаются такие важные задачи, как расчет установившихся режимов и статической устойчивости, определение максимально-допустимых и аварийно-допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, формирование инструктивных материалов для диспетчерских центров, разработка требований к логике действия и настройке устройств противоаварийной и режимной автоматики. От точности расчета электрических режимов зависит устойчивая и надежная работа электроэнергетического оборудования.

Одним из ключевых факторов, влияющих на точность расчетной математической модели, является способ задания электрической нагрузки. Существуют, по меньшей мере, четыре способа представления нагрузки: постоянным током, постоянной мощностью, постоянным сопротивлением или проводимостью, а также с помощью статических характеристик нагрузки [3].

Наиболее полно свойства нагрузки отражают статические характеристики. Однако на практике в

подавляющем большинстве случаев продолжают использовать представление нагрузки с помощью постоянных мощностей. Это вызвано двумя причинами: во-первых, использование статических характеристик нагрузки вместо постоянных мощностей существенно усложняет расчетную модель и затрудняет расчеты, а во-вторых, отсутствуют характеристики, которые можно было бы использовать.

В настоящее время с развитием программных комплексов расчета режимов электроэнергетических систем, таких как «RastrWin3» и «КОСМОС», первая проблема частично решена, и на первый план выходит решение второй проблемы, связанной с получением достоверных статических характеристик узлов нагрузки.

Большинство сведений о статических характеристиках нагрузки были получены при экспериментальных исследованиях, проводившихся три и более десятилетия назад [4]. Однако за это время состав потребителей электрической энергии существенно изменился как количественно, так и качественно, а данные о статических характеристиках устарели.

Расчетный метод определения статических характеристик для крупных узлов нагрузки, как правило, не применим в связи с невозможностью

учета всей необходимой информации о внутренних схемах электроснабжения потребителей и технологических особенностей производства [5].

Таким образом, единственный путь корректного учета нагрузки статическими характеристиками при расчете электрических режимов состоит в проведении экспериментальных исследований этих характеристик.

Актуальность и научная значимость вопроса

Экспериментальному определению статических характеристик нагрузки посвящены работы отечественных и зарубежных ученых [5–15]. Однако при решении этой задачи на практике кроме организационных и технических трудностей проведения эксперимента приходится сталкиваться и с методическими вопросами, не вполне проработанными на сегодняшний день. К таким вопросам можно отнести оценку точности получаемых статических характеристик, задачу планирования эксперимента с учетом требуемой точности, а также разработку методики обработки экспериментальных данных. Решению последней из перечисленных задач посвящена настоящая статья.

Экспериментальными данными, используемыми для получения статических характеристик нагрузки по напряжению, являются массивы значений напряжения $U_{(i)}$, активной мощности $P_{(i)}$, реактивной мощности $Q_{(i)}$, измеренные для одних и тех же моментов времени $t_{(i)}$, где $i = 1, 2, \dots$ – порядковый номер отсчета. Экспериментальные данные можно получить при проведении активного и пассивного экспериментов. При пассивном эксперименте напряжение изменяется естественным образом за счет колебаний в системе, а при активном эксперименте напряжение изменяют принудительно.

И в том и в другом случае на величину мощностей P и Q оказывают влияние две составляющих: первая обусловлена реакцией нагрузки на изменение питающего напряжения, а вторая вызвана случайными колебаниями мощности нагрузки. Таким образом, при обработке результатов экспериментов необходимо выделить первую составляющую и по возможности избавиться от второй.

В общем виде поставленная задача не имеет строгого решения, так как отсутствует априорная информация об обеих составляющих. Тем не менее, могут быть найдены различные частные решения. Основными направлениями для получения частных решений являются: проведение эксперимента при условии минимизации случайных колебаний мощности нагрузки [5], ввод допущений, упрощающих решение задачи [8], сбор дополнительной информации, например, вероятностных характеристик исследуемой нагрузки [16], применение специальных средств обработки сигналов,

таких как фильтрация, регрессионный и кластерный анализ [17].

Рассмотрим один из возможных вариантов решения задачи на примере получения статической характеристики активной мощности нагрузки по напряжению $P_* = f(U_*)$. Все приводимые ниже рассуждения справедливы и для реактивной мощности.

Постановка задачи

Имеются экспериментальные данные $U_{(i)}, P_{(i)}$, полученные при проведении активного эксперимента, при котором напряжение изменялось переводом устройства регулирования напряжения (РПН) питающего трансформатора. Необходимо определить коэффициенты a_0, a_1, a_2 статической характеристики нагрузки по напряжению, представленной в относительных единицах полиномом $P_*(U_*) = a_0 + a_1U_* + a_2U_*^2$.

Теоретическая часть

Для решения поставленной задачи используются следующие положения:

1. На всем протяжении эксперимента статическая характеристика нагрузки в относительных единицах может быть с достаточной точностью аппроксимирована полиномом второй степени вида $P_*(U_*) = a_0 + a_1U_* + a_2U_*^2$, коэффициенты a_0, a_1, a_2 которого не изменяются или изменяются незначительно.

2. Для перевода статической характеристики нагрузки в именованные единицы используют базисные значения напряжения U_{BAS} , и мощности $P_{BAS}(t_i)$, причем базисное напряжение остается неизменным $U_{BAS} = \text{const}$, а базисная мощность может изменяться.

3. Статическая характеристика нагрузки в именованных единицах представлена выражением

$$P(U) = P_{BAS}(t_i) \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{BAS}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{BAS}} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где P и U – мощность и напряжение в именованных единицах.

В правой части выражения (1) два множителя: первый обусловлен случайными колебаниями мощности нагрузки, а второй – реакцией нагрузки на изменение питающего напряжения.

4. Случайные колебания и дрейф мощности характеризуются изменением значения базисной мощности $P_{BAS}(t_i)$, при этом исследуемая нагрузка переходит с одной статической характеристики на другую, полученную умножением на соответствующий масштабирующий коэффициент. В то же время, при переводе в относительные единицы делением на значение базисной мощности $P_{BAS}(t_i)$,

согласно положению 1, все статические характеристики совпадают.

5. Зависимость базисной мощности от времени имеет случайный характер, однако, чем ближе по времени моменты времени t_i и t_{i+1} , для которых получена базисная мощность, тем выше вероятность того, что базисная мощность останется неизменной или изменится незначительно

$$P_{BAS}(t_i) \approx P_{BAS}(t_{i+1}). \quad (2)$$

6. Значение регулирующего эффекта нагрузки для момента времени t_i , может быть рассчитано по формуле

$$KP_i = \frac{P_{(i+1)} - P_{(i)}}{U_{*(i+1)} - U_{*(i)}} \cdot \frac{U_{*(i+1)} + U_{*(i)}}{P_{(i+1)} + P_{(i)}}. \quad (3)$$

Подставив в (3) значения мощностей $P_{(i)}$ и $P_{(i+1)}$, полученные по статической характеристике (1), выполняя условие (2), значение базисной мощности в числителе и знаменателе сократится и не окажет влияния на величину KP_i , а зависимость $KP_i(U_i)$ будет представлять собой монотонную функцию, при нарушении условия (2) зависимость $KP_i(U_i)$ будет иметь случайные выбросы. Последнее соображение можно использовать для фильтрации исходных данных.

7. При незначительном изменении напряжения $U_i \approx U_{i+1}$ реакция нагрузки, обусловленная статической характеристикой, будет незначительной. Такие данные в большей степени подвержены влиянию случайной составляющей и мало пригодны для определения статической характеристики

нагрузки. Поэтому методика должна предусматривать выделение пар отсчетов, между которыми напряжение изменяется существенно.

На основании приведенных выше положений разработана следующая методика определения статической характеристики нагрузки по экспериментальным данным:

1. Переводят измеренные значения напряжения в относительные единицы по формуле

$$U_{*(i)} = \frac{U_{(i)}}{U_{BAS}}. \quad (4)$$

2. Выделяют пары отсчетов: $U_{*1(j)}$ и $P_{1(j)}$ – значения напряжения в относительных единицах и мощности в именованных единицах, измеренные до j -го перевода РПН, $U_{*2(j)}$ и $P_{2(j)}$ – значения напряжения в относительных единицах и мощности в именованных единицах, измеренные после j -го перевода РПН, $j=1, 2, \dots$ – порядковый номер перевода РПН, используя условие

$$\left| U_{*(i+1)} - U_{*(i)} \right| \cdot 100\% > \Delta U\%, \quad (5)$$

где $\Delta U\%$ – ступень РПН питающего трансформатора в %.

3. Определяют значения регулирующего эффекта нагрузки KP_j для каждой выделенной пары отсчетов в соответствии с выражением (3).

4. Производят фильтрацию полученных пар измерений, значения регулирующего эффекта KP_j которых заметно выбиваются из монотонной зависимости $KP_j(U_j)$.

5. Определяют коэффициенты a_0, a_1, a_2 методом наименьших квадратов из выражения (6):

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & U_{*1(1)} & (U_{*1(1)})^2 & P_{1(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & U_{*2(1)} & (U_{*2(1)})^2 & P_{2(1)} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & U_{*1(2)} & (U_{*1(2)})^2 & 0 & P_{1(2)} & 0 & \dots & 0 \\ 1 & U_{*2(2)} & (U_{*2(2)})^2 & 0 & P_{2(2)} & 0 & \dots & 0 \\ 1 & U_{*1(3)} & (U_{*1(3)})^2 & 0 & 0 & P_{1(3)} & \dots & 0 \\ 1 & U_{*2(3)} & (U_{*2(3)})^2 & 0 & 0 & P_{2(3)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & U_{*1(N)} & (U_{*1(N)})^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_{1(N)} \\ 1 & U_{*2(N)} & (U_{*2(N)})^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_{2(N)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \left(\frac{-1}{P_{BAS(1)}} \right) \\ \left(\frac{-1}{P_{BAS(2)}} \right) \\ \left(\frac{-1}{P_{BAS(3)}} \right) \\ \dots \\ \left(\frac{-1}{P_{BAS(N)}} \right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где N – количество оставшихся после фильтрации пар измерений.

Выражение (6) является системой, составленной из уравнений вида

$$P_{1(j)} = P_{BAS(j)} \left[a_0 + a_1 U_{*1(j)} + a_2 (U_{*1(j)})^2 \right]; \quad (7)$$

$$P_{2(j)} = P_{BAS(j)} \left[a_0 + a_1 U_{*2(j)} + a_2 (U_{*2(j)})^2 \right] \quad (8)$$

с условием, что в уравнениях (7), (8) для каждой пары измерений $U_{*1(j)}$ и $U_{*2(j)}$, $P_{1(j)}$ и $P_{2(j)}$ базисная мощность $P_{BAS(j)}$ остается постоянной, а $a_0 + a_1 + a_2 = 1$.

В выражении (6) $2N+1$ уравнений и $N+3$ неизвестных. Значит, при $N=2$ система имеет единственное решение, а при $N>2$ система становится переопределенной. Для решения переопределенной системы уравнений используют метод наименьших квадратов. Таким образом, для определения статической характеристики нагрузки, заданной квадратичным полиномом, с помощью предложенной методики достаточно двух переводов РПН трансформатора, при условии, что в моменты перевода РПН $P_{BAS}(t_i) = \text{const}$.

Кроме искомых коэффициентов полинома a_0, a_1, a_2 методика позволяет определить также значения базисной мощности $P_{BAS(j)}$, соответствующие моментам перевода РПН.

Практическая значимость, предложения и результаты внедрений, результаты экспериментальных исследований

Практическое применение описанной методики рассмотрим с помощью исходных данных, полученных в апреле 2014 года в г. Томске при проведении активного эксперимента на ЗАО «Сибкабель». Питание нагрузки ЗАО «Сибкабель» осуществляется в тупиковом режиме от понижающей трансформаторной подстанции 35/6 кВ. Тип питающего трансформатора ТДНС-10000/35 с РПН $8 \times 1,5\%$.

Напряжение на нагрузке изменялось каждые 2 мин с помощью перевода РПН в соседнее положение в следующей последовательности: от нормального положения до максимально допустимого, затем до минимально допустимого и обратно до нормального положения.

Напряжение изменялось в пределах $(0,99 \dots 1,15)U_{НОМ}$, диапазон составил 16%. Длительность активного эксперимента составила 40 мин, за это время перевод РПН был осуществлен 20 раз. Измерения напряжения и мощности производились по стороне 6 кВ через каждые 5 с с помощью анализатора качества электрической энергии АР-5.

Нагрузка ЗАО «Сибкабель» имеет резкопеременный характер, связанный с технологическими особенностями производства, что хорошо видно на графике (рис. 1, б). Очевидно, что для данного при-

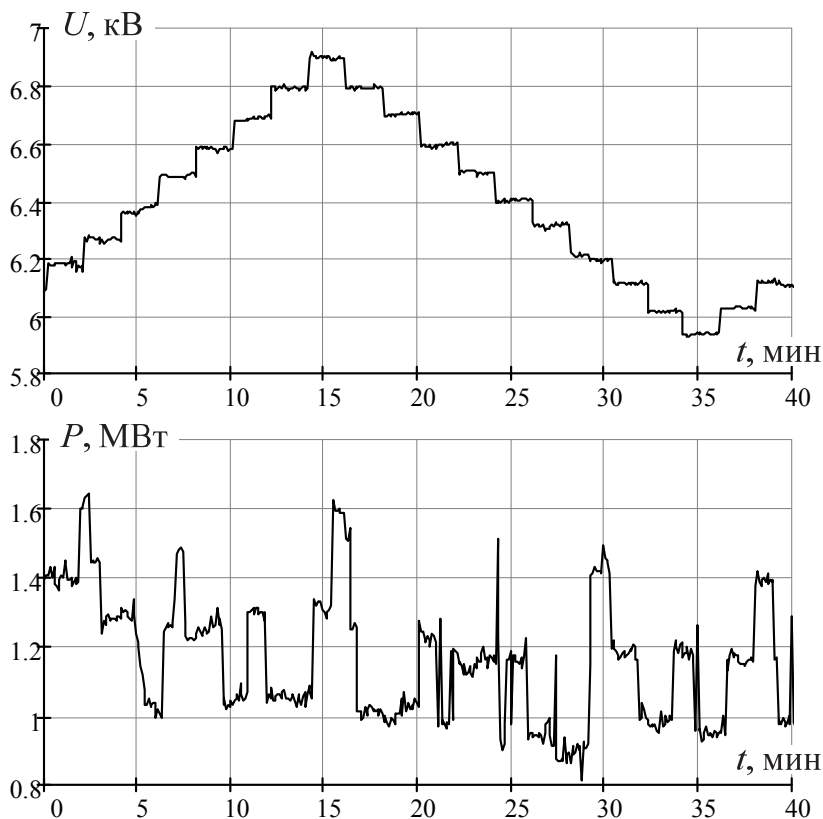


Рис. 1. Графики зависимости напряжения (а) и активной мощности (б) от времени

мера использование алгоритмов, описанных в [5], не приемлемо. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 2 приведены результаты эксперимента в координатах $P(U)$ и аппроксимирующий полином второй степени.

Согласно методике измеренные значения напряжения переводят в относительные единицы по формуле (4), используя базисное напряжение $U_{BAS} = 6,2$ кВ. Затем с помощью условия (5) выделяют пары отсчетов $U_{*1(j)}$ и $P_{1(j)}$, $U_{*2(j)}$ и $P_{2(j)}$, соответствующие моментам измерений до и после перевода РПН. Выделенные пары отсчетов приведены на рис. 3, цифрами обозначены порядковые номера j -го перевода РПН.

Далее по формуле (3) рассчитывают регулирующие эффекты нагрузки KP_j для выделенных пар отсчетов. Полученные результаты приведены в табл. 1.

На следующем этапе производят фильтрацию пар отсчетов по значениям регулирующего эффек-

та нагрузки. Процесс фильтрации проиллюстрирован на рис. 4, на котором показаны значения регулирующих эффектов нагрузки KP_j в зависимости от средних значений напряжения $U_{*1(j)} + U_{*2(j)}/2$.

Все полученные точки аппроксимированы прямой. Введен доверительный интервал $\pm 50\%$, границы которого показаны пунктирными линиями. Точки с номерами 1, 4, 5, 9, 16, 18, 19, не попавшие в доверительный интервал, отмечены на рисунке косыми крестами и из дальнейшего рассмотрения исключены.

Следует отметить, что фильтрация – процесс творческий. Ее результат не является однозначным и зависит от настройки параметров фильтра, поэтому в каждом конкретном случае в зависимости от разброса значений KP_j доверительный интервал и сам алгоритм фильтрации может быть разным.

После фильтрации осталось $N=13$ пар измерений. Из них составлена система уравнений вида (6). Результатом ее решения стали коэффициенты

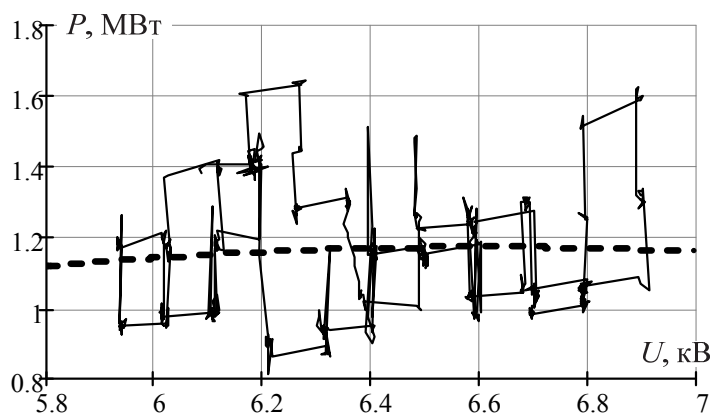


Рис. 2. График зависимости мощности от напряжения и аппроксимирующая кривая

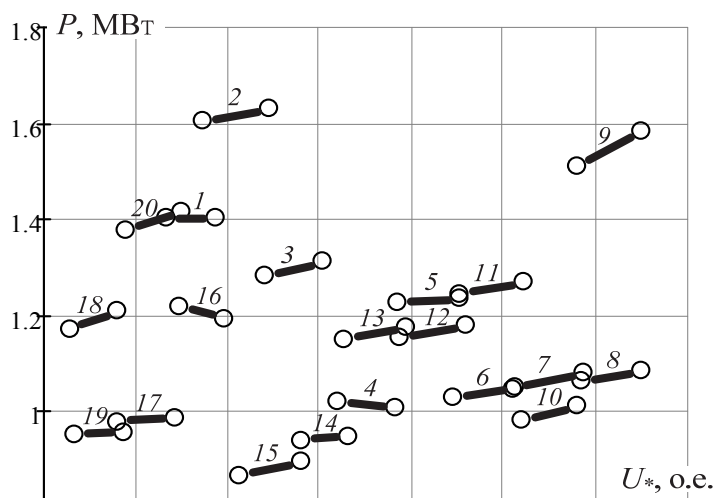


Рис. 3. Пары отсчетов, соответствующие моментам измерений до и после перевода РПН

Таблица 1

Выделенные пары отсчетов и регулирующие эффекты нагрузки

j	$U_{*1(j)}$, о.е.	$P_{1(j)}$, кВт	$U_{*2(j)}$, о.е.	$P_{2(j)}$, кВт	KP_j
1	0,983	1,406	0,997	1,404	-0,06
2	0,993	1,606	1,011	1,634	0,92
3	1,010	1,282	1,025	1,312	1,46
4	1,030	1,021	1,046	1,009	-0,76
5	1,046	1,225	1,063	1,235	0,51
6	1,061	1,030	1,077	1,045	0,98
7	1,078	1,050	1,097	1,082	1,78
8	1,096	1,062	1,112	1,086	1,55
9	1,112	1,587	1,095	1,513	3,05
10	1,095	1,009	1,079	0,983	1,85
11	1,081	1,272	1,063	1,242	1,47
12	1,065	1,181	1,047	1,151	1,51
13	1,048	1,176	1,032	1,147	1,55
14	1,033	0,949	1,020	0,937	0,99
15	1,020	0,893	1,003	0,865	1,92
16	0,999	1,194	0,986	1,219	-1,67
17	0,986	0,987	0,970	0,975	0,79
18	0,970	1,210	0,957	1,171	2,48
19	0,958	0,951	0,971	0,953	0,17
20	0,972	1,376	0,987	1,417	1,89

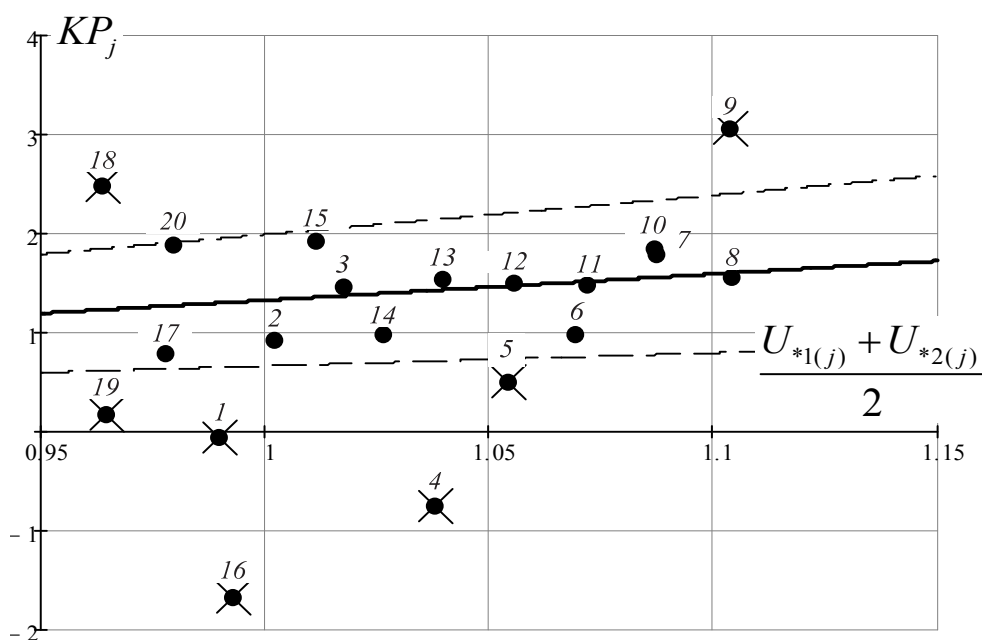


Рис. 4. Фильтрация пар отсчетов

Таблица 2

Значения базисной мощности

j	$P_{BAS(j)}$, МВт	j	$P_{BAS(j)}$, МВт
1	1615,6	8	1081,1
2	1267,2	9	1101,1
3	943,7	10	910,2
4	944,4	11	866,4
5	929,2	12	1009,9
6	883,2	13	1434,2
7	1138,9		

$a_0 = 1,458$, $a_1 = -2,233$, $a_2 = 1,775$ и значения базисной мощности $P_{BAS(j)}$, соответствующие моментам перевода РПН (табл. 2).

Полученная статическая характеристика нагрузки в относительных единицах приведена на рис. 5.

Для контроля точности статической характеристики нагрузки сравним ее с ранее полученной для тех же данных с помощью метода последовательных приближений [17]. Значения коэффициентов, полученные в [17]: $a_0 = 1,481$, $a_1 = -2,277$, $a_2 = 1,796$. При изменении напряжения в диапазо-

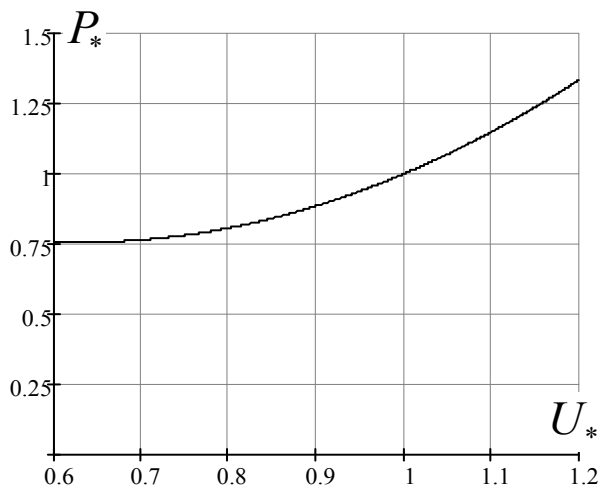


Рис. 5. Статическая характеристика активной мощности нагрузки по напряжению

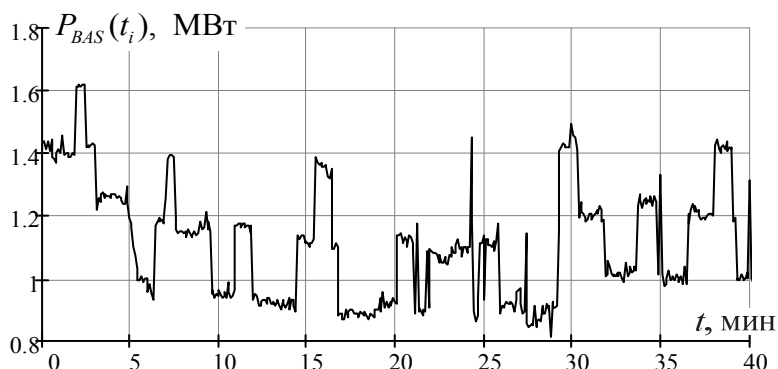


Рис. 6. График изменения базисной мощности

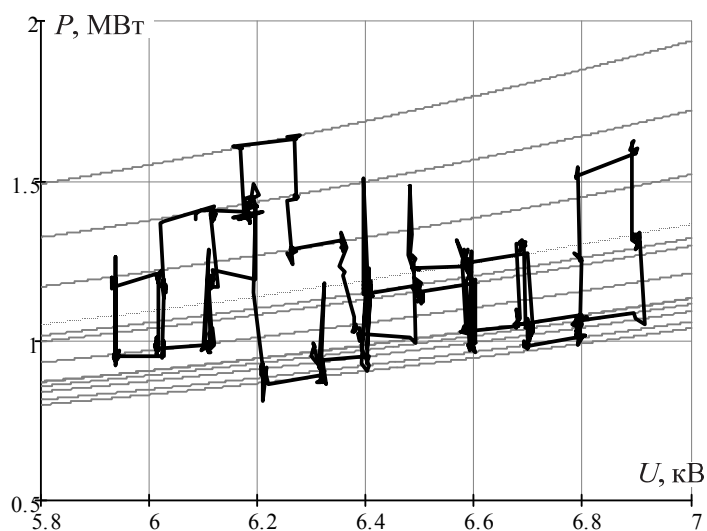


Рис. 7. График зависимости $P(U)$ и статические характеристики

не 0,75...1,2 погрешность характеристики не превышает 0,2 %, что является весьма точным совпадением.

Знание коэффициентов a_0, a_1, a_2 позволяет рассчитывать значения базисной мощности, характеризующей случайные колебания нагрузки по формуле

$$P_{BAS}(t_i) = \frac{P_{(i)}}{a_0 + a_1 \frac{U_{(i)}}{U_{BAS}} + a_2 \left(\frac{U_{(i)}}{U_{BAS}} \right)^2}. \quad (9)$$

Полученные результаты приведены на рис. 6.

На рис. 7 проиллюстрирован переход процесса с одной естественной статической характеристики нагрузки на другую при изменении базисной мощности.

Таким образом, поставленная задача решена: исходные данные разделены на случайную составляющую $P_{BAS(j)}$ и статическую характеристику нагрузки по напряжению, представленную в относительных единицах полиномом $P_*(U_*) = a_0 + a_1 \cdot U_* + a_2 \cdot U_*^2$.

Заключение

Единственным способом корректного моделирования электрических нагрузок с помощью статических характеристик является экспериментальное определение этих характеристик.

При обработке результатов эксперимента необходимо отделить реакцию объекта на изменение напряжения от случайных колебаний мощности. Эта задача не имеет однозначного универсального решения.

С помощью предложенной в статье методики обработки результатов активного эксперимента, основанной на выделении соседних пар отсчетов, между которыми имеются заметные изменения напряжения, процедуры фильтрации полученных пар отсчетов, выделения случайной составляющей процесса изменения нагрузки и естественной статической характеристики нагрузки по напряжению, была решена задача определения статической характеристики резкопеременной нагрузки.

Изложенные в статье положения могут быть использованы для разработки методов определения статических характеристик нагрузки по результатам измерений, полученных как при проведении активных экспериментов, так и в других эксплуатационных режимах электроэнергетических систем.

Литература

1. Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 № 1172 // Собрание законодательства РФ. – 2014. – № 34. – Ст. 4677.

2. Регламент внесения изменений в расчетную модель электроэнергетической системы. – <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=125> (дата обращения: 12.12.2014).

3. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Альянс, 2009. – 592 с.

4. Горбунова, Л.М. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, П.С. Рабинович. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.

5. Гуревич, Ю.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 248 с.

6. Учет статических характеристик нагрузки при расчетах режимов энергосистем / Д.Н. Дадоннов, В.Г. Гольдштейн, Е.А. Кротков, М.М. Птичкин // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 35–37.

7. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.А. Суворов, А.В. Паздерин, А.С. Тавлинцев и др. // Научное обозрение. – 2013. – № 7. – С. 270–275.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.960-961.969

8. Фишов, А.Г. Использование спорадических нарушений режима для определения крутизны статических характеристик узлов нагрузок / А.Г. Фишов, Д.А. Мышлянников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 176–180.

9. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золоев // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 67–71.

10. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / А.А. Шульпин, А.Ю. Мурзин, О.А. Бушueva и др. // Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та. – 2014. – № 6. – С. 22–30.

11. Identification of Static Polynomial Load Model Based On Remote Metering Systems Information / A.S. Tavlintsev, A.V. Pazderin, OI. Malozemova, P.V. Chusovitin // Proc. of the 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 1–3 November, Wroclaw, 2013. – P. 213–216. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737910

12. Static Load Modeling Using the PMU Data Installed on the University Load / J. Kim, S. Han, B. Lee et al. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2012. – No. 7(5). – P. 653–658. DOI: 10.5370/JEET.2012.7.5.653

13. Load Modeling Using Genetic Algorithms / Z.-Y. Dong, J. Ma, R.-M. He, D.J. Hill // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation

(CEC 2007), Singapore, 25–28 September, Singapore, 2007. – P. 2909–2916. DOI: 10.1109/CEC.2007.4424841

14. Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models / A. Gaikwad, A. Maitra, P. Zhang et al. // *Proceedings of the IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE'06)*, Atlanta, USA, 29 October–1 November, 2006. – P. 1446–1551. DOI: 10.1109/PSCE.2006.296230

15. Жежеленко, И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик

электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко, Е.А. Кротков, В.П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 220 с.

16. Воробьев, С.Н. Цифровая обработка сигналов / С.Н. Воробьев. – М.: Академия, 2013. – 320 с.

17. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / А.В. Панкратов, Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева и др. // *Изв. Томск. политехн. ун-та.* – 2014. – № 4 (325). – С. 164–175.

Панкратов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические сети и электротехника», Томский политехнический университет, г. Томск; pank@tpu.ru.

Полищук Владимир Иосифович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические сети и электротехника», Томский политехнический университет, г. Томск; poloschukvi@tpu.ru.

Бацева Наталья Ленмировна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические сети и электротехника», Томский политехнический университет, г. Томск; DAVEK-19K@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27 января 2015 г.

DOI: 10.14529/power150102

MEASUREMENT-BASED APPROACH FOR IDENTIFICATION OF STATIC LOAD MODELS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.V. Pankratov, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, pank@tpu.ru,
V.I. Polishchuk, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, poloschukvi@tpu.ru,
N.L. Batseva, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, DAVEK-19K@yandex.ru

The accountability of static load models is needed to increase the validity of electric power system simulation or prediction models. Measurement-based approach is the unique method to identify them adequately. The measured power depends on both load reaction to supply voltage alteration and random processes of load alteration. Basically there is no universal method to single out the inherent static load model from experimental data. The paper offers the proprietary technique which is the particular solution of the task. The technique considers the selection of neighboring pairs of measurement references with the supply voltage altering significantly between them; the exclusion of selected pairs by power regulation coefficient of load and then subsequent selection of the inherent static load model presented as the polynomial load model. The application of the technique to identify static load model at “Sibkabel” industrial enterprise (Tomsk city) is presented in the paper. The ideas considered in the paper can be used for future development of static load model identification methods with the data obtained during both active experiment and in other operating modes of electric power systems.

Keywords: static load model, experimental researches, current, voltage, power, power regulation coefficient of load, step-down transformer substation.

References

1. [On Authorization of the Rules of Whole Market for Electricity and Power and Application of Reformation Acts of Russian Federation Government on Questions of Self-organization and Operation Whole Market for Electricity and Power]: *Postanovlenie Pravitelstva RF* [RF Government Authorization] 27th of December 2010, no. 1172. (in Russ.)

2. *Reglament vneseniya izmeneniy v raschetnyuyu model elektroenergeticheskoy sistemy* [The Order of Application of Revisions in Simulation Model of Electric Power System]. Available at: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=125> (accessed 12 December 2014).

3. Idel'chik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electric Power Systems and Networks]. Moscow, Al'ians Publ., 2009. 592 p.

4. Gorbunova L.M., Portnoy M.G., Rabinovich R.S. *Eksperimentalnye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental Power System Researches]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 448 p.
5. Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh energosistem i nadezhnosti electrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley* [Mathematical Models Application of an Electrical Load in the Calculation of Energy Systems and Power Supply Reliability of Industrial Consumers]. Moscow, Eleks-KM Publ., 2008. 248 p.
6. Dadonov D.N., Goldshteyn V.G., Krotkov E.A., Ptichkin M.M. [The Accountability of Static Load Models in Calculations of Electrical Power System Modes]. *Izvestiya vysshikh uchebnikh zavedeniy. Electromekhanika* [The Bulletin of Higher Education Establishment. Electro mechanics], 2011, no. 3, pp. 35–37. (in Russ.)
7. Suvorov A.A., Pazderin A.V., 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. (in Russ.) DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.960-961.969
8. Fishov A.G., Myshlyannikov D.A. [The Application of Sporadic Modes Disturbances for identification of Static Load Model Steepness]. *Nauchnie problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* [Research Issues of Siberia and Russian Far East Transport], 2014, no. 3, pp. 176–180. (in Russ.)
9. Kravchenko V.F., Nagay V.I., Burakov I.F., Zolov B.P. [The Techniques of Measured Data Processing for Identification of Static Load Models of Electrical Network Nodes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Electromekhanika* [The Bulletin of Institution of Higher Education. Electromechanics], 2014, no. 6, pp. 67–71. (in Russ.)
10. Shul'pin, A.A., Murzin A.Yu., Bushueva O.A., Kuleshov A.I., Baldov S.V., Meshkova Yu. S., Kormilitsyn D.N. [The Identification of Static Load Models in Electrical Networks with a Complex Load]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [The Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2014, no. 6, pp. 22–30. (in Russ.)
11. Tavlintsev A.S., Pazderin A.V., Malozemova O.I., Chusovitin P.V. [Identification of Static Polynomial Load Model Based On Remote Metering Systems Information]. *Proceedings of the 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2013, pp. 213–216. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737910
12. Kim J., Han S., Lee B., Song H., Kim H., Shin J., Kim T. Static Load Modeling Using the PMU Data Installed on the University Load. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2012, no. 7(5), pp. 653–658. DOI: 10.5370/JEET.2012.7.5.653
13. Dong Z.-Y., Ma J., He R.-M., Hill D.J. Load Modeling Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*, 2007, pp. 2909–2916. DOI: 10.1109/CEC.2007.4424841
14. Gaikwad, A., Maitra A., Zhang P., Ingram M., Mercado D.L., Woitt W.D. Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models. *Proceedings of the IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE'06)*, 2006, pp. 1446–1551. DOI: 10.1109/PSCE.2006.296230
15. Zhezhelenko I.V., Krotkov E.A., Stepanov V.P. *Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschetakh kharakteristik elektricheskikh nagruzok potrebiteley* [The Techniques of Random Simulation in Characteristic Calculations of Consumer Power Loads]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 220 p.
16. Vorob'ev S.N. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Numerical Signal Treating]. Moskow, Akademiya Publ., 2013. 320 p.
17. Pankratov A.V., Khrushchev Yu.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tavlintsev A.S. [The Technique for Identifying Load Static Characteristics Based on Experimental Data]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [The Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2014, no. 4 (325), pp. 164–175. (in Russ.)

Received 27 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Панкратов, А.В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11–20. DOI: 10.14529/power150102

REFERENCE TO ARTICLE

Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150102