

3. Толстихина Е.А., Толстихина Л.В. Многоцелевая вероятностная коррекция режима электрической сети на множестве Парето// Электричество. 2013. №6. 13-18 с.

4. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.

Научный руководитель: Л. В. Толстихина, к.н.т., доцент, кафедра Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей Саяно-Шушенского филиала Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Н.Л. Бацева¹, А.В. Панкратов¹,
А.С. Тавлинцев², О.Ю. Малоземова²

1. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ЭНИН, кафедра «Электрические сети и электротехника»
2. ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», УралЭНИН, кафедра «Автоматизированные электрические системы»

Зависимость изменения мощности нагрузки от напряжения при медленных изменениях параметров режима называется статической характеристикой нагрузки (СХН) по напряжению [1]. Использование СХН по напряжению позволяет рассчитывать режим с меньшей погрешностью, и, как следствие, дает возможность уточнить допустимые по условиям устойчивости перетоки мощности.

Основой получения СХН являются натурные эксперименты, при проведении которых принудительно изменяют режим по напряжению на шинах нагрузки, фиксируя при этом соответствующие изменения мощности. Последний раз такие эксперименты в России проводились в 70-х, начале 80-х. Соответственно, на данный момент остро стоит вопрос обновления этих данных.

Необходимость актуализации альбомов СХН обусловлена еще и тем, что статические характеристики используются в современных программных комплексах, с помощью которых решаются задачи диспетчерского управления и планируются объемы поставок электроэнергии на оптовом рынке.

Пренебрегая влиянием колебаний частоты в энергосистеме, аналитическое выражение для изменения, например, реактивной мощности от изменения напряжения можно записать следующим образом:

$$Q = Q_{\bar{u}_{аз}} \cdot \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\bar{u}_{аз}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\bar{u}_{аз}}} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $U_{\bar{u}_{аз}}$ – базовое напряжение узла нагрузки (электроустановки);

$Q_{\bar{u}_{аз}}$ – потребление реактивной мощности, соответствующее базовому напряжению;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты полинома.

Следует отметить, что структура выражения (1) справедлива и для активной мощности.

В статье методика определения коэффициентов полиномов СХН приведена только для реактивной мощности.

Проблема экспериментального определения коэффициентов полиномов СХН заключается в том, что состав электроприемников на исследуемом предприятии может изменяться в течение эксперимента. Согласно выражению (1), изменение состава электроприемников можно охарактеризовать как изменение базовой мощности, соответствующей базовому напряжению [2]. Для решения этой проблемы необходимо соблюдать некоторые особенности выполнения эксперимента и применять специальные алгоритмы обработки данных.

В ходе разработки методики определения СХН был проведен эксперимент на второй секции шин 6кВ подстанции 35/6кВ «Сибкабель» (г. Томск) и в результате были получены исходные данные для определения коэффициентов полинома (1): массивы значений междуфазного напряжения, трехфазной активной мощности и трехфазной реактивной мощности.

Графически зависимость $Q=f(U)$ по данным активного эксперимента представлена на рисунке 1.

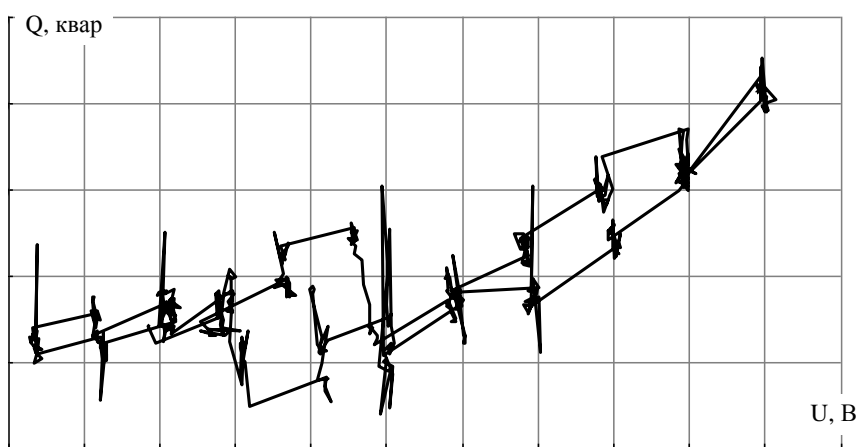


Рис. 1. График зависимости $Q=f(U)$

В качестве базового значения принято значение напряжения, соответствующее нормальному положению устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), тогда каждое измеренное значение напряжения можно перевести в относительные единицы по формуле:

$$U_{*i} = \frac{U_i}{U_{баз}}. \quad (2)$$

Изменения напряжения могут быть вызваны как изменением положения РПН, так и случайным поведением нагрузки, а также погрешностью средств измерения. Для того чтобы отфильтровать колебания, которые не связаны с изменением положения РПН, выполняется проверка по условию:

$$|U_{*i+1} - U_{*i}| \cdot 100\% > 1\%. \quad (3)$$

Условие (3) должно выполняться при переключении отпаяк РПН, так как одна ступень привода РПН изменяет напряжение от 1% и более [1]. Если для точек (i) и (i+1) условие (3) выполняется, то пара точек оставляется для дальнейшего процесса определения коэффициентов полинома. Удовлетворяющие условию (3) измерения показаны на рисунке 2 черным цветом, измерения, которые не соответствуют данному условию, показаны серым цветом.

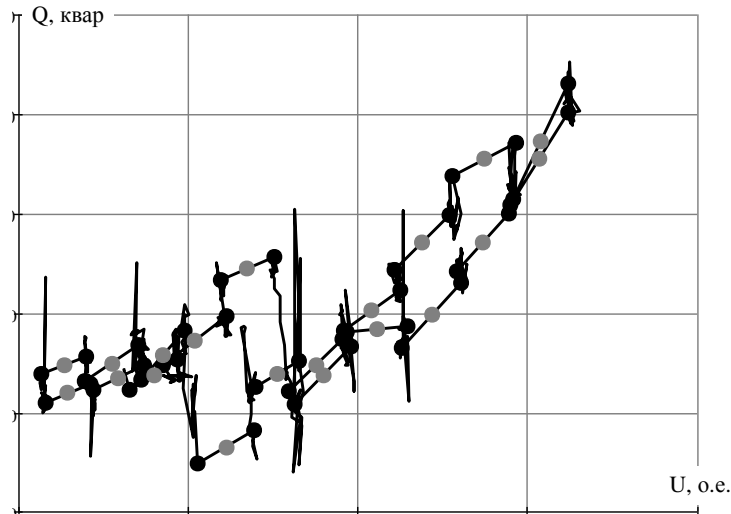


Рис. 2. Выделение пар соседних точек, на интервале времени между которыми происходит перевод РПН для реактивной мощности

Для решения задачи исключения пар точек, между которыми базовая мощность меняется можно использовать значения регулирующего эффекта нагрузки KQ_j [4, 5], рассчитанного для пар точек по формуле:

$$KQ_j = \frac{Q_{j+1} - Q_j}{U_{*j+1} - U_j} \cdot \frac{U_{*j+1} + U_{*j}}{Q_{j+1} + Q_j}. \quad (4)$$

На рисунке 3 черным цветом показаны измерения, которые оставлены для дальнейших вычислений по условию (4) (точки 11, 15, 6, 7, 2, 12, 3).

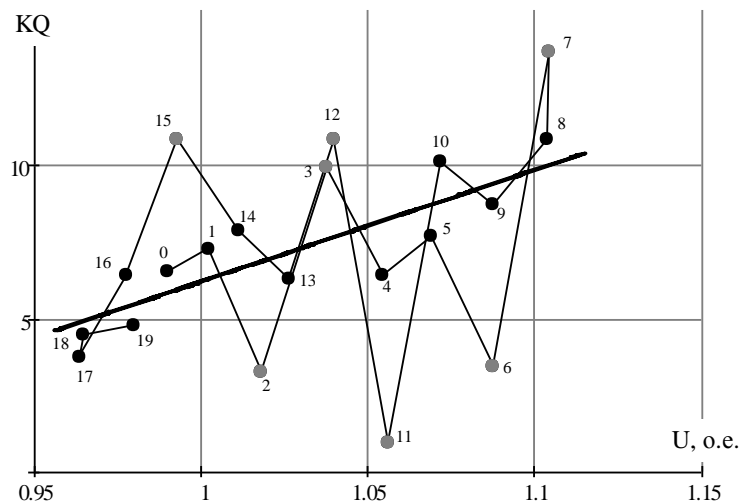


Рис. 3. Регулирующие эффекты по реактивной мощности после исключения пар точек

Для определения коэффициентов полиномов предлагается использовать метод последовательных приближений, суть которого состоит в нахождении алгоритма поиска по известному приближению искомой величины следующего, более точного приближения [3].

Первое приближение строится на расчете значений базовой мощности, по которой далее вычисляются значения мощности в относительных единицах и значения коэффициентов полинома.

Для расчета значений базовой мощности используются координаты середин отрезков:

$$U_{*cj} = \frac{U_{*j+1} + U_{*j}}{2}; Q_{cj} = \frac{Q_{j+1} + Q_j}{2}. \quad (5)$$

Выбор базовой мощности первого отрезка делается исходя из предположения, что в относительных единицах средняя мощность этого отрезка равна 1 о.е. Учитывая, что

активный эксперимент начинается при нормальном положении РПН и напряжении, близком к базовому значению, такое предположение можно считать истинным, тогда

$$Q_{баз}(0) = Q_c(0). \quad (6)$$

Значения базовой мощности последующих отрезков получают исходя из условия, что мощность, представленная в относительных единицах, между парами точек не изменяется.

Зная базовую мощность предыдущего отрезка, можно определить базовую мощность следующего отрезка по формуле:

$$Q_{баз}(j+1) = \frac{Q_{j+2} \cdot Q_{баз}(j)}{Q_{j+1}}. \quad (7)$$

Осуществим перевод мощностей в относительные единицы:

$$Q^*_j = \frac{Q_j}{Q_{баз}(j)}; Q^*_i = \frac{Q_{j+1}}{Q_{баз}(j)}. \quad (8)$$

Составим систему уравнений:

$$\begin{pmatrix} Q^*_{*0} \\ Q^*_{*1} \\ \dots \\ Q^*_{*N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & U^*_{*0} & U^*_{*0}{}^2 \\ 1 & U^*_{*1} & U^*_{*1}{}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & U^*_{*N} & U^*_{*N}{}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Система уравнений (9) относится к переопределенным системам линейных алгебраических уравнений, в которых число уравнений больше числа неизвестных. Решение системы производится с помощью метода наименьших квадратов [3]. Полученные в результате значения коэффициентов полиномов a_0, a_1, a_2 являются первым приближением.

Далее используем метод последовательных приближений. Исходя из предположения о том, что в пределах j -го отрезка базовая мощность остается неизменной, можно рассчитать значения базовой мощности для каждого из отрезков:

$$Q_{баз}(j) = \frac{Q_{cj}}{a_0 + a_1 \cdot U^*_{*cj} + a_2 \cdot U^*_{*cj}{}^2}. \quad (10)$$

Дальнейшие действия по определению уточненных коэффициентов полинома повторяются: используя формулу (8), значения измеренных мощностей переводят в относительные единицы; затем с помощью формулы (9) уточняют коэффициенты a_0, a_1, a_2 .

Следует отметить, что итерационный метод не учитывает условия

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1. \quad (11)$$

поэтому статические характеристики могут удаляться от точки с координатами (1;1) с каждой последующей итерацией. Во избежание этого достаточно каждый раз умножать

полученные коэффициенты на величину $\frac{1}{a_0 + a_1 + a_2}$ 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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [Q^*_{*i} - (a_0 + a_1 \cdot U^*_{*i} + a_2 \cdot U^*_{*i}{}^2)]^2} \quad (12)$$

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

В ходе обработки данных активного эксперимента было сделано 66 итераций для реактивной мощности (для активной мощности 155).

Коэффициенты полинома СХН для начального и конечного приближений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов полинома СХН

Номер приближения	a_0	a_1	a_2	σ_Q
0	-13,103	22,668	-8,628	0,138
66	52,048	-108,651	57,599	0,016

На рисунке 4, а), б) показаны значения мощностей в относительных единицах и соответствующие им статические характеристики, рассчитанные методом наименьших квадратов. На рисунке 4, а) – результаты первого приближения, б) – результаты 66-ой итерации.

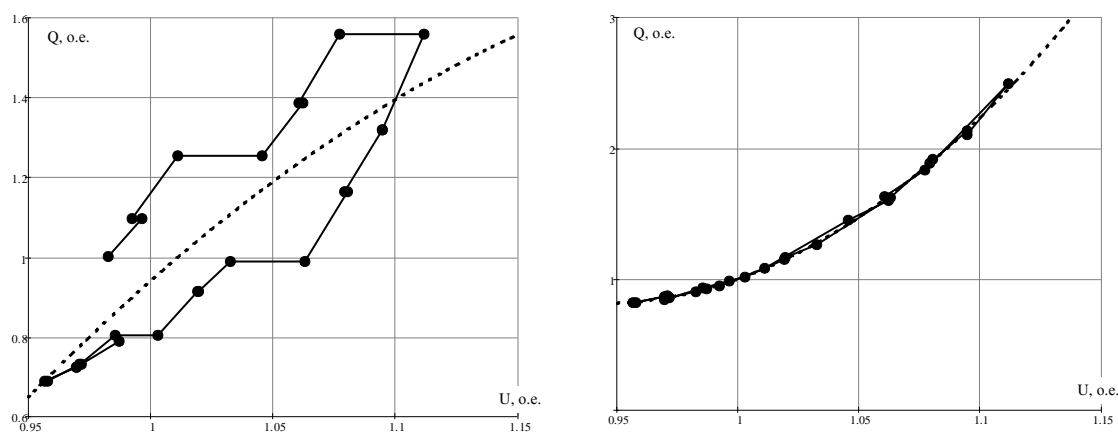


Рис. 4. СХН по реактивной мощности: а) – результаты первого приближения; б) – результаты наиболее точного приближения

По рисунку 4, а) видно, что форма СХН по реактивной мощности, полученная при достаточном количестве итераций достаточно точно повторяет полином второй степени. Результаты, полученные с помощью представленной методики, сравнивались с результатами, полученными после обработки измерений, полученных при проведении пассивного эксперимента. В исследуемом диапазоне изменения напряжения СХН практически совпали, что говорит о низкой степени погрешности определения коэффициентов полиномов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
- Паздерин А.В., Суворов А.А., Тавлинцев А.С., Чусовитин П.В., Юдин А.В. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки. // Научное обозрение. 2013. №7.
- Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. – М.: изд-во Наука, 1972. – 400с.
- Гуревич Ю.Е и др. Устойчивость нагрузки электрических систем/ Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатрян. М.: Энергоиздат, 1981. 208с.
- Гуревич Ю.Е и др. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. 248с.

Научный руководитель: А.С. Тавлинцев, ассистент кафедры автоматизированных электрических систем УралЭНИН УрФУ.