

¹ АО «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Томск² Национальный исследовательский Томский политехнический университет³ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПО ДАННЫМ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С УЧЁТОМ РЕАКЦИИ СЕТИ

Моделирование электрической нагрузки является одной из наиболее трудно решаемых задач моделирования режимов электроэнергетической системы в целом. Это обусловлено как многочисленностью и разнообразием электрических нагрузок, так и их изменчивым поведением. Значительная доля нагрузок не может быть с достаточной точностью описана типовыми характеристиками, поэтому для их уточнения и актуализации в энергосистемах проводятся специальные активные эксперименты. Однако это решает проблему лишь отчасти, так как охватить такими экспериментами все нагрузки во всех возможных состояниях не представляется физически возможным. Целью работы является разработка методики определения статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем по напряжению путем математической обработки данных пассивного наблюдения за параметрами электрического режима. Методика основана на разработанной математической модели, учитывающей вероятностный характер изменения мощности нагрузки и напряжения питающей сети, а также корреляционные связи между ними. В общем случае таких корреляционных связей две: изменение мощности нагрузки, вызванное изменением напряжения, и изменение напряжения в точке питания, вызванное изменением мощности нагрузки. Первая связь отражает «естественную» статическую характеристику нагрузки, а вторая – явление, получившее название «реакция сети». Учет «реакции сети» необходим при обработке данных пассивного эксперимента, что предъявляет дополнительные требования к применяемым методикам. Отличием предложенной методики является использование законов распределения вероятности вместо самих измеренных величин. Благодаря этому методика может применяться в сочетании с методами кластерного анализа, представляющими результаты измерений в виде гауссовой смеси. Предложенная методика может быть использована для автоматизации процесса определения статических характеристик нагрузки по данным измерений без проведения активных экспериментов, что в перспективе позволит охватить все телеизмеряемые узлы нагрузки во всех возможных состояниях.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, статическая характеристика нагрузки, пассивный эксперимент, кластерный анализ, реакция сети, система случайных величин, ковариационная матрица, эллипс рассеивания.

ВВЕДЕНИЕ

В расчётах установившихся режимов для получения более точных результатов важно иметь модель нагрузки, отражающую её поведение при изменениях параметров режима энергосистемы. На сегодняшний день моделирование нагрузки в современных программных комплексах для расчёта электрических режимов осуществляется с помощью статических характеристик нагрузки по напряжению и частоте (далее – СХН). Как правило, для расчёта установившихся режимов ограничиваются использованием только СХН по напряжению, так как расчёты производят при номинальной частоте электрического тока.

Определение СХН по напряжению может осуществляться расчётным и экспериментальным путём [1-4]. В работах [5-8] авторами подчеркнуто, что в виду значительного разнообразия состава нагрузок и их конфигурации определение СХН расчётным способом на текущий момент времени практически не применяется.

Наиболее точным способом определения СХН по напряжению является проведение экспериментов [9]. Данные эксперименты, в свою очередь, принято разделять на активные и пассивные эксперименты. В каждом случае основная идея заключается в регистрации значений напряжения в питающем узле энергосистемы и соответствующих им значений активной и реактивной мощности нагрузки.

Отличие активных и пассивных экспериментов заключается в характере изменения параметров режима. В случае активных экспериментов осуществляются принудительные изменения параметров режима, под действием которых происходит изменение напряжения питающего узла в максимально возможных пределах. При этом регистрируются величины активной и реактивной мощностей нагрузки. Проведение пассивных экспериментов не подразумевает никакого внешнего вмешательства в режим работы энергосистемы, а регистрируются естественные изменения напряжения.

Активный эксперимент позволяет определить СХН по напряжению наиболее точно. Действительно, как отмечено в [5, 10], точность в активном эксперименте достигается за счёт малой продолжительности эксперимента и широкого диапазона изменения напряжения. Малая продолжительность эксперимента позволяет выбрать такое состояние нагрузки, при котором собственные изменения мощности нагрузки минимальны. Широкий диапазон изменения напряжения повышает обусловленность системы уравнений, по которой могут быть определены коэффициенты СХН [11].

Несмотря на представленные преимущества проведения активного эксперимента, его использование весьма ограничено. Во-первых, как уже было отмечено, происходит вмешательство в режим работы энергосистемы, что может привести к снижению надёжности работы энергосистемы или возникновению аварийной ситуации [7, 12]. Во-вторых, для проведения

активных экспериментов необходимо проводить специальные организационные мероприятия и предварительные расчёты с целью выбора наиболее оптимальной траектории изменения режима.

Отмеченных недостатков не имеет пассивный эксперимент. В пассивном эксперименте точность может быть обеспечена за счет увеличения объема выборки, так как продолжительность проведения пассивного эксперимента может достигать недель и даже месяцев [12]. В достаточно большом объеме данных нагрузка представлена во всех своих возможных состояниях [6, 13-15], а законы изменения случайных величин проявляются более четко. Это позволяет применять для определения СХН методы теории вероятностей и математической статистики. В частности, линейные СХН по данным пассивного эксперимента определяются с помощью линейной регрессии.

Однако определение СХН с помощью пассивного эксперимента обладает рядом недостатков. Так, из-за малого диапазона изменения напряжения точность определения коэффициентов СХН у пассивного эксперимента будет заведомо ниже, чем у активного [12, 15]. Данный недостаток может быть частично компенсирован, как уже отмечено, большим количеством точек, по которым определяется СХН. Тем не менее, сравнительно точно определить нелинейные СХН по напряжению из-за малого диапазона изменения напряжения не представляется возможным [15]. При этом стоит отметить, что в значительном количестве практических задач по расчёту режимов рассматриваются довольно узкие диапазоны изменения напряжения, где можно ограничиться заданием линейной СХН по напряжению.

Пассивный эксперимент обладает ещё одним существенным недостатком. Для определения СХН по напряжению из экспериментальных данных обычно выполняется статистическая обработка по построению линии регрессии активной P и реактивной Q мощностей нагрузки на напряжение U , совпадающей с линиями СХН. Однако, как отмечено в [4], в случае пассивного эксперимента такая обработка даёт значительную погрешность, так как линии регрессии перестают совпадать с линиями СХН. Причём очень часто возникает ситуация, при которой линии регрессии соответствуют снижению мощности нагрузки при увеличении напряжения, что в подавляющем большинстве случаев не соответствует действительности.

Возникновение такой погрешности связано с тем, что при случайных изменениях мощности нагрузки, которые наблюдаются в пассивном эксперименте, также изменяется напряжение питающего узла за счёт соответствующего изменения падения напряжения. Данное явление изменения напряжения под действием изменения мощности нагрузки получило название «реакция сети» и было рассмотрено Ю.Е. Гуревичем в работах [4, 15]. Им же был предложен способ учёта эффекта реакции сети при обработке результатов пассивного эксперимента.

Однако данный способ обладает рядом недостатков. Во-первых, с его помощью нельзя учесть то обстоятельство, что при проведении пассивного эксперимента нагрузка может находиться в различных состояниях, то есть угол ψ не является постоянным, и

эллипсов рассеивания, которые образуют экспериментальные данные в плоскостях (U, P) или (U, Q) в случае их нормального распределения, может быть выделено несколько. Нормальность распределения случайных колебаний нагрузки продемонстрирована в работах [16-18]. Во-вторых, при учёте реакции сети рассматриваемым способом необходимо осуществлять преобразование всех значений в массивах исходных данных для выполнения аффинного преобразования координат [19], что в случае пассивного эксперимента значительно замедляет обработку данных.

Первый из представленных недостатков может быть устранён путём применения ЕМ-алгоритма кластеризации данных [20]. Применение данного алгоритма оправдано при предположении нормальности распределения экспериментальных данных, которые с использованием данного алгоритма можно аппроксимировать гауссовой смесью [21].

Для устранения второго недостатка в статье предлагается методика учёта реакции сети при определении коэффициентов СХН по результатам пассивного эксперимента путём рассмотрения линейного искажения эллипса рассеивания. Линейность искажения обусловлена малостью колебаний экспериментальных данных вокруг точки математического ожидания при пассивном эксперименте. Такой подход позволяет получить коэффициенты СХН с помощью преобразования параметров распределения, а не самих экспериментальных данных.

В соответствии с этим будет подробно рассмотрено влияние реакции сети на параметры режима в случае простейшей схемы электроснабжения, представляющая корреляционная модель нагрузки, учитывающая реакцию сети, и произведён учёт эффекта реакции сети при определении коэффициентов СХН по напряжению.

РЕАКЦИЯ СЕТИ

Для иллюстрации реакции сети можно рассмотреть простейшую схему электроснабжения нагрузки, которая представлена на **рис. 1**.

Исследуемая нагрузка запитана от шин бесконечной мощности (ШБМ) с напряжением U_c , независимым от величины реактивной нагрузки Q . В случае I (**рис. 1, а**) реакция сети не проявляется, так как сопротивление между узлом нагрузки и ШБМ отсутствует ($X = 0$), а значит, отсутствует падение напряжения, и $U_c = U$. Проявление реакции сети в случае II обусловлено наличием некоторого сопротивления X между узлом нагрузки и ШБМ (**рис. 1, б**). Для наглядной демонстрации влияния реакции сети сопротивление и нагрузка приняты чисто индуктивными.

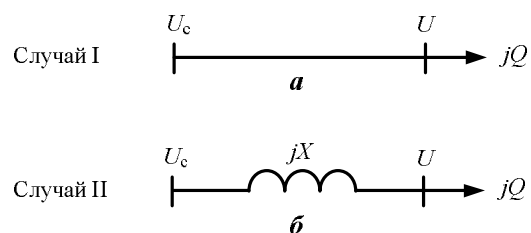


Рис. 1. Простейшая схема электроснабжения:
а – реакция сети отсутствует (случай I);
б – реакция сети проявляется (случай II)

Напряжение в узле нагрузки и величина потребляемой реактивной мощности в случае II связаны соотношением

$$Q(U) = \frac{U(U_c - U)}{X}, \quad (1)$$

где Q – реактивная мощность нагрузки, Вт; U – напряжение в узле нагрузки, В; U_c – напряжение на шинах бесконечной мощности, В; X – сопротивление сети, Вт.

Графическая зависимость $Q(U)$ согласно (1) представляет собой перевернутую параболу с вершиной в точке $(U_c/2, U_c^2/4X)$, которая пересекает ось абсцисс в точках 0 и U_c , как показано на **рис. 2**.

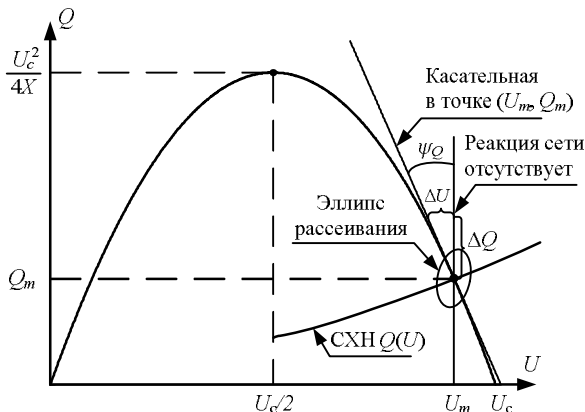


Рис. 2. Демонстрация реакции сети

При $Q = 0$ $U = U_c$ (здесь и далее рассматривается только рабочий диапазон кривой $(U_c/2, U_c)$), так как падение напряжения на сопротивлении X в данном случае согласно (1) отсутствует. По мере увеличения реактивной мощности нагрузки Q от 0 до $U_c^2/4X$ напряжение U уменьшается вплоть до величины $U_c/2$. Дальнейшее увеличение мощности Q невозможно, так как функция проходит через свой максимум.

Через рабочую точку (U_m, Q_m) на **рис. 2** проведена касательная, которая соответствует реакции сети. График реакции сети будет иметь отрицательный наклон ψ_Q , который можно определить через соотношение

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_Q &= k = \frac{dU}{dQ} \Big|_{Q=Q_m} = \frac{X}{\sqrt{U_c^2 - 4Q_m X}} = \\ &= \frac{X}{U_c - 2U_m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где k – коэффициент, определяющий тангенс угла наклона графика реакции сети к оси ординат (далее – коэффициент реакции сети); U_m, Q_m – напряжение, В, и реактивная мощность узла нагрузки, Вт, соответственно в рабочей точке характеристики на **рис. 2** (математические ожидания координат точек, описываемых эллипсом рассеивания).

Из **рис. 2** также видно, что в пределах малых изменений напряжения ΔU и мощности ΔQ влияние эффекта реакции сети можно учесть линейной зависимостью, коэффициент которой определяется по выражению (2).

Также через рабочую точку (U_m, Q_m) на **рис. 2** проходит линия СХН по напряжению. Как уже отмечалось выше, по результатам пассивного эксперимента определяют линейную СХН, которая в рассматриваемом

случае описывается выражением (3):

$$Q(U) = Q_m \left(b_1 \frac{U}{U_m} + b_0 \right) = B_1 U + B_0, \quad (3)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты, характеризующие долю участия составляющих постоянной мощности и постоянного тока, в общей СХН по напряжению в относительных единицах; B_0, B_1 – то же самое, но в именованных единицах.

Стоит отметить, что в выражении (3) величины Q, U и B_0 являются случайными. Величина B_0 соответствует случайным колебаниям мощности нагрузки, независимым от напряжения U . Далее рассматривается определение детерминированной величины B_1 по параметрам распределения, а также представлена математическая модель, учитывающая корреляционный характер зависимости $Q(U)$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (МЕТОДЫ)

Результатами пассивного эксперимента при определении СХН по напряжению для схемы, представленной на **рис. 1, а**, являются вектора измеренных значений напряжения U и реактивной мощности нагрузки Q (в общем случае к этим величинам добавляется вектор измеренных значений активной мощности нагрузки P). Каждая из этих величин является случайной и в общем случае не одномодальной, а многомодальной величиной. Это означает, что она не может быть описана только одним фундаментальным законом распределения, но может быть представлена в виде суммы некоторого их количества [22]. С физической точки зрения каждому составу и состоянию нагрузки, а также каждому режиму электроснабжения будет соответствовать свой закон распределения, а экспериментальные данные представляют собой смесь законов распределения. На первом этапе анализа необходимо определить, к какому состоянию нагрузки относятся те или иные измерения, а также определить параметры соответствующих законов распределения. Это осуществляется с помощью кластерного анализа. Далее рассматриваются преобразования относительно одного выделенного кластера с соответствующими ему параметрами распределения и коэффициентом реакции сети k .

Как уже было отмечено, U и Q являются взаимозависимыми случайными величинами, которые образуют систему (U, Q) . Она описывается следующими параметрами [21]:

- U_m, Q_m – математические ожидания;
- σ_U, σ_Q – среднеквадратические отклонения;
- r – коэффициент корреляции.

Система случайных величин (U, Q) в случае одномодального распределения и отсутствия реакции сети (случай I) полностью определяется математическим ожиданием (U_m, Q_m) и ковариационной матрицей \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} D_U & K_{UQ} \\ K_{UQ} & D_Q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_U^2 & r\sigma_U\sigma_Q \\ r\sigma_U\sigma_Q & \sigma_Q^2 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где D_U, D_Q – дисперсия напряжения и реактивной мощности нагрузки соответственно; K_{UQ} – корреляционный момент между напряжением и реактивной

мощностью нагрузки; σ_U , σ_Q – среднеквадратическое отклонение напряжения и реактивной мощности нагрузки соответственно; r – коэффициент корреляции между напряжением и реактивной мощностью.

При графическом отображении на плоскости в координатах (U, Q) система случайных величин (U, Q) представляет собой эллипс рассеивания **K** с центром в точке (U_m, Q_m) , приведённый на **рис. 3**.

Эллипс рассеивания имеет четыре характерных прямых, которые пересекаются в центре рассеивания. Это две оси симметрии эллипса, которые составляют с осью абсцисс углы, определяемые уравнением

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2r\sigma_U\sigma_Q}{\sigma_U^2 - \sigma_Q^2}, \quad (5)$$

где α – угол между осями симметрии эллипса и осью абсцисс.

Уравнение (5) дает два значения углов α и α_1 , отличающиеся друг от друга на 90° . Другие две прямые – это линии регрессии Q на U и U на Q , углы наклона которых к оси абсцисс определяются по выражениям

$$\operatorname{tg} \alpha_Q = r \frac{\sigma_Q}{\sigma_U}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_U = \frac{1}{r} \frac{\sigma_Q}{\sigma_U}, \quad (7)$$

где α_Q – угол между линией регрессии Q на U и осью абсцисс; α_U – угол между линией регрессии U на Q и осью абсцисс.

Коэффициент B_1 в выражении (3) соответствует тангенсу угла наклона линии регрессии Q на U к оси абсцисс: $B_1 = \operatorname{tg} \alpha_Q$.

Для отражения связи между точками эллипса рассеивания **K**, полученного при условии отсутствия реакции сети (случай I), с точками эллипса рассеивания **K'**, который будет получен при наличии реакции сети (случай II), рассмотрим математическую модель нагрузки, отражающую корреляционную зависимость между мощностью нагрузки Q и напряжением U и их связь с аналогичными значениями (Q' и U'), полученными при наличии реакции сети.

Корреляционная зависимость между Q и U обеспечивается за счёт задаваемых параметров нормального распределения, с помощью которых можно рассчитать коэффициент $B_1 = \operatorname{tg} \alpha_Q$ по выражению (6).

В случае отсутствия реакции сети при случайном изменении мощности нагрузки от Q_m до Q_1 напряжение не изменится, и состояние нагрузки, в исходном режиме описываемое точкой A с координатами (U_m, Q_m) , будет описываться точкой B с координатами (U_m, Q_1) (**рис. 4**).

Наличие реакции сети приводит к тому, что при увеличении мощности в узле нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении X (**рис. 1, б**). При этом уменьшенному относительно U_m значению из-за падения напряжения напряжению U' в узле нагрузки будет соответствовать уменьшенное значение мощности нагрузки Q' (точка C).

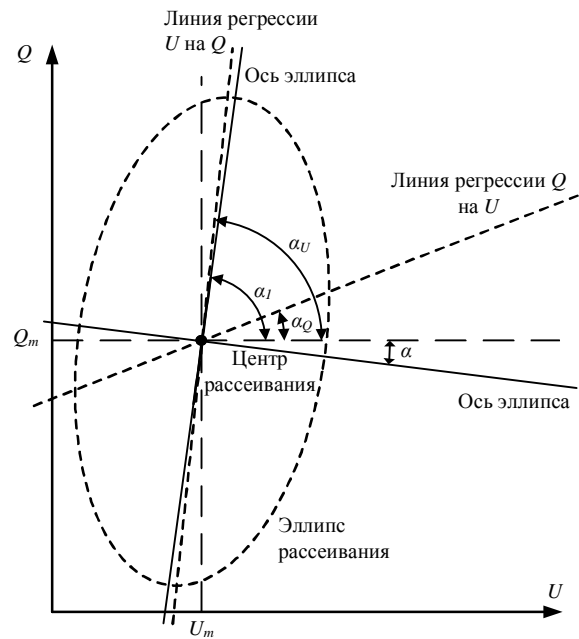


Рис. 3. Эллипс рассеивания при $k = 0$

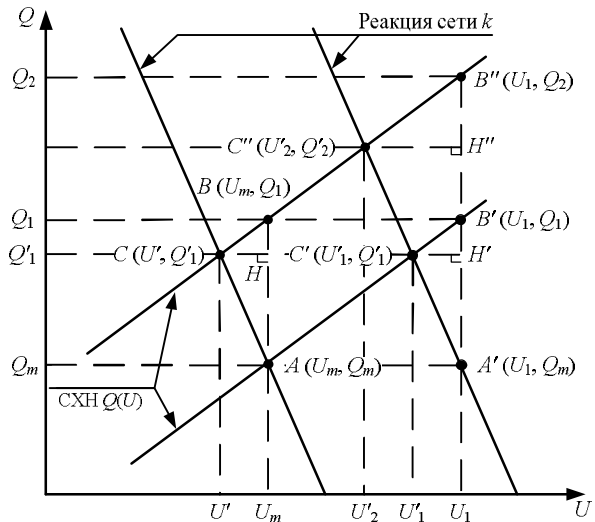


Рис. 4. Пояснения к математической модели

Аналогичные рассуждения применимы и в тех случаях, когда происходит случайное изменение напряжения (система точек $AA'B'C'$), и в тех случаях, когда происходят одновременно случайные изменения напряжения и мощности (система точек $AA'B''C''$).

Осуществив геометрические преобразования в каждом из случаев, можно получить общую систему уравнений (8), которая отражает связь между U и U' а также Q и Q' :

$$\begin{cases} U'_i = U_i + \frac{Q_i - Q_m}{k^{-1} - B_1}; \\ Q'_i = Q_i + \frac{B_1(Q_i - Q_m)}{k^{-1} - B_1}, \end{cases} \quad (8)$$

где i – индекс точки на плоскости (U, Q) .

Система уравнений (8) позволяет осуществить переход от системы случайных величин (U, Q) , соответствующей отсутствию реакции сети (случай I) к системе случайных величин (U', Q') , полученной при наличии

реакции сети (случай II). Для определения СХН с учётом реакции сети необходимо решить обратную задачу: имея массивы U' и Q' , перейти к массивам U и Q , а затем, используя формулу (5), вычислить коэффициент крутизны линейной СХН в именованных единицах B_1 .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХН ПО НАПРЯЖЕНИЮ С УЧЁТОМ РЕАКЦИИ СЕТИ (РЕЗУЛЬТАТЫ)

На рис. 5 представлены результаты моделирования систем случайных величин (U, Q) и (U', Q') , связанных между собой системой уравнений (8) и подчиняющимися нормальному закону распределения.

Из результатов моделирования на рис. 5 видно, что линия регрессии и Q на U , построенная для системы случайных величин (U', Q') , из-за наличия реакции сети не совпадает с заданной СХН. При этом также видно, что тестовые точки при любых значениях напряжения располагаются на линии СХН, что говорит о корректности проведённого моделирования.

Как уже отмечено выше, для получения СХН по напряжению необходимо перейти к системе случайных величин (U, Q) без реакции сети, что позволит определить СХН через коэффициент наклона линии регрессии для полученной системы.

Дисперсия случайной величины Q может быть выражена через дисперсию случайной величины Q' с учётом реакции сети по выражению

$$D_Q = D'_Q (1 - kB_1)^2, \quad (9)$$

где D_Q – дисперсия случайной величины Q ; D'_Q – дисперсия случайной величины Q' .

Корреляционный момент системы случайных величин (U, Q) можно определить по соотношению

$$K_{UQ} = (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1), \quad (10)$$

где K_{UQ} – корреляционный момент системы случайных величин (U, Q) ; K'_{UQ} – корреляционный момент системы случайных величин (U', Q') .

Из первого выражения системы (8), а также согласно [21] из выражения (9) дисперсия случайной величины U может быть вычислена по формуле

$$D_U = D'_U + k^2 D'_Q - 2kK'_{UQ}, \quad (11)$$

где D_U – дисперсия случайной величины U ; D'_U – дисперсия случайной величины Q' .

Таким образом, система случайных величин (U, Q) с учётом реакции сети описывается математическим ожиданием (U_m, Q_m) и ковариационной матрицей \mathbf{K} :

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} D'_U + k^2 D'_Q - 2kK'_{UQ} & (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1) \\ (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1) & D'_Q (1 - kB_1)^2 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Тогда тангенс угла наклона $\text{tg} \alpha_Q$ к оси абсцисс линии регрессии Q на U , согласно (5), будет определяться соотношением

$$\text{tg} \alpha_Q = \frac{(K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1)}{D'_U - k^2 D'_Q - 2k(K'_{UQ} - kD'_Q)}. \quad (13)$$

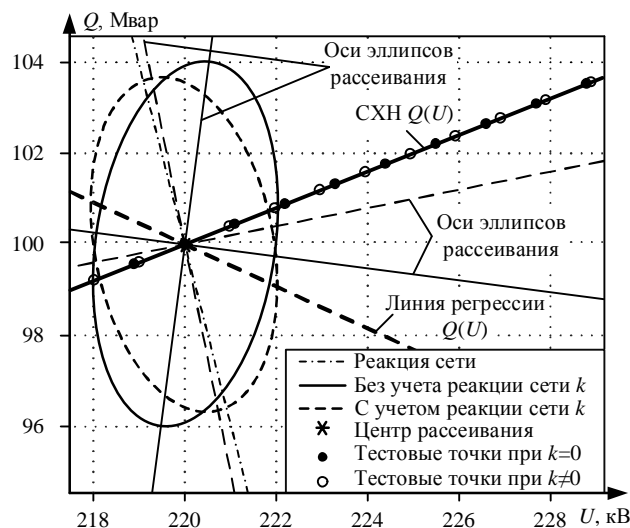


Рис. 5. Демонстрация реакции сети

Из (13) путём преобразований с учётом того, что $B_1 = \text{tg} \alpha_Q$ следует выражение (14) для определения коэффициента B_1 СХН по напряжению:

$$B_1 = \frac{K'_{UQ} - kD'_Q}{D'_U - kK'_{UQ}}. \quad (14)$$

Составляющая СХН B_0 может быть вычислена по формуле

$$B_0 = Q_m - B_1 U_m. \quad (15)$$

Полученные значения B_1 и B_0 являются искомыми значениями регулирующего эффекта нагрузки (B_1) и составляющей СХН, соответствующей постоянству мощности (B_0) в именованных единицах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учёт реакции сети позволяет получить достоверные значения коэффициентов СХН в именованных единицах. Расчёт коэффициентов СХН по методике, предложенной Ю.Е. Гуревичем, показал результаты, которые совпадают с результатами методики, описанной в статье. Однако предложенный в настоящей статье метод может применяться для многомодальных распределений с предварительной кластеризацией данных по ЕМ-алгоритму, что нельзя осуществить с помощью существующих методик. Кроме того, за счёт отсутствия необходимости в предварительном преобразовании исходных данных можно добиться большего быстродействия при автоматизации процесса расчёта СХН по напряжению по результатам пассивного эксперимента.

В качестве развития предложенной методики планируется показать применение предложенной методики в случае многомодального распределения на примере реальных данных. Также планируется разработать методику определения коэффициента реакции сети k с учётом статистических данных для каждого кластера.

Стоит отметить, что предложенная в настоящей статье методика может применяться и в случаях более сложных по сравнению с рассмотренной схемой электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 209 с.
2. Нигаматуллин Р.М. Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №4. С. 65-70. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70.
3. Газизова О.В., Нигаматуллин Р.М. Оценка влияния статических характеристик нагрузки на уровень частоты сети при раздельной работе с энергосистемой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 4. С. 54-63. doi: 10.14529/power200406.
4. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. 246 с.
5. Кондрашов М.А., Кондрашова А.Ю. Программное обеспечение для идентификации фактических статических характеристик нагрузки по напряжению крупных потребителей // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. №5(77). С. 44-50.
6. Тавлинцев А.С. Развитие методов идентификации статических характеристик комплексного узла нагрузки: дис. ... канд. техн. наук 05.14.02 / Тавлинцев Александр Сергеевич. Екатеринбург, 2018. 172 с.
7. Дзюба М.А., Тарасенко В.В., Коржов А.В. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2018. Т. 18. № 2. С. 28-35. doi: 10.14529/power180204.
8. Кондрашов М.А., Попов М.Г. Профили информационного обмена для задачи идентификации статических характеристик нагрузки // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 30-31.
9. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2015. Т. 15. № 1. С. 11-20. doi: 10.14529/power150102.
10. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 1(182). С. 54-59.
11. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук, А.С. Тавлинцев // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 4. С. 164-175.
12. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович, С.А. Савалов, В.Ф. Тимченко. М.: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.
13. Коновалов Ю.С., Кутелевичус И.Б. О возможности определения статических характеристик нагрузки методами математической статистики // Электричество. 1968. №3. С. 11-13.
14. Тавлинцев А.С., Суворов А.А. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 23-28. doi: 10.14529/power170203.
15. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Об определении характеристик нагрузки по напряжению методом пассивного эксперимента // Электричество. 1972. №2. С. 21-24.
16. Козлов В.А. Электроснабжение городов. М.: Энергия, 1977. 280 с.
17. Оценка значений пиков и впадин при ограничении пределов изменения тэта-ординат графиков электрической нагрузки / В.П. Степанов, Е.А. Кротков, А.С. Ведерников, А.В. Гудков, Р.Ф. Идиатуллин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2005. №37. С. 121-127.
18. Петров В.В. Предельные теоремы классического типа для сумм независимых случайных величин // Итоги науки и техники Сер.Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. 1991. Т. 81. С. 10-38.
19. Понарин Я.П. Аффинная и проективная геометрия. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
20. Воронцов К. В., Потапенко А. А. Модификации EM-алгоритма для вероятностного тематического моделирования // Машинное обучение и анализ данных. 2013. Т. 1. № 6. С. 657-686.
21. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
22. Жмылёв С.А., Алиев Т.И. Системы массового обслуживания с полимодальными потоками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 473-478. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478.

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DETERMINATION OF STATIC LOAD MODEL BY VOLTAGE USING STEADY-STATE MEASUREMENTS TAKING INTO ACCOUNT THE NETWORK RESPONSE

Aleksey V. Pankratov

Ph.D. (Engineering), Head of Tomsk Representative Office, System Operator of the United Power System, JSC, Tomsk, Russia. E-mail: pankratovav@kuzb.so-ups.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8176-1925>.

Alexander K. Zhuykov

Undergraduate Student, Power and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: zhuykov_aleksandr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>.

Alena A. Shuvalova

Post-Graduate student, Power Engineering Faculty, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. E-mail: alena_shuvalova_360@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0104-1085>.

Vladimir I. Polishchuk

D.Sc. (Engineering), Professor, Dean, Power Engineering Faculty, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. E-mail: polischuk_vi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>.

Simulation of electric load is one of the most difficult modeling problems of operating condition of the electric power system. It is stipulated by a large number and a variety of electrical loads and their erratic behavior. The considerable share of loads cannot be described with sufficient accuracy by typical characteristics. To refine and actualize them, special staged field tests are carried out in power systems. This does not completely solve the problem. It is impossible to cover all loads in all possible states with such experiments. The purpose of the work is to develop a method for determining the static load model of electric power systems by voltage. The determination is made by mathematical processing of the data of steady-state observation over the parameters of an electrical mode. The method is based on the developed mathematical model considering probability nature of changes in the load power and the supply network voltage as well as the correlations between them. There are two such correlations. Changing the load power caused by a voltage variation. And also a voltage variation at the supply point caused by the change in the load power. The first correlation reflects the natural static load model. The second correlation reflects the "network response". Taking into account the "network reaction" is necessary when processing data from the steady-state measurement. The difference of the proposed method is usage of laws of probability distribution instead of the measured values. This makes it possible to use the method in combination with cluster analysis methods. In these methods, the measurement results are presented in the form of a Gaussian mixture. The proposed method can be used to automate the process of determining the static load models according to the measurements without conducting staged field tests. This will make it possible to cover all the telemetered nodes of load in all possible states in the future.

Keywords: electric power system, static load model, steady-state measurements, cluster analysis, network response, system of random variables, covariance matrix, dispersion ellipse.

REFERENCES

- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Ustichivost nagruzki elektricheskikh system* [Load stability of electrical systems], Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 209 p. (In Russian)
- Nigamatullin R.M. Calculation of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 65-70. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70. (In Russian)
- Gazizova O.V., Nigamatullin R.M. Evaluation of The Effect of Static Load Characteristics on The Level of Frequency During Separate Operations with The Grid. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 54-63. doi: 10.14529/power200406. (In Russian)
- Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennikh potrebiteley* [Application of mathematical models of electric load in calculations of power systems and reliability of power supply to industrial consumers]. Moscow, ELEX_KM Publ., 2008, 246 p. (In Russian)
- Kondrashov M.A., Kondrashova A.Yu. Software for identifying the actual static load characteristics by the voltage of large consumers. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics], 2018, vol. 13, no. 5(77), pp. 44-50. (In Russian)
- Tavlintsev A.S. *Razvitie metodov identifikatsii staticheskikh harakteristik kompleksnogo uzla nagruzki*. Kand. Diss. [Development of methods for identifying the static characteristics of a complex load node: Kand. Diss.], Ekaterinburg, 2018. 172 p.
- Dzyuba M.A., Tarasenko V.V., Korzhov A.V. Method for Determining of Voltage Steady-State Load Characteristics with Subject to The Limitation on Sensitive Parameters and Electrical Safety of Active Experiment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2018, vol. 18, no. 2 pp. 28-35. doi: 10.14529/power180204. (In Russian)
- Kondrashov M.A., Popov M.G. Information exchange profiles for the task of identifying static load characteristics. *Elektro-energetika glazami molodezhi: Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* ["Electric power industry through the eyes of youth". Materials of the XI International Scientific and Technical Conference.]. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ., 2020, pp. 30-31. (In Russian)
- Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Experimental determination of static load characteristics of electric power systems. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11-20. doi: 10.14529/power150102. (In Russian)
- Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zoloev B.P. Determination of Static Characteristics of Power Loads of Network Nodes Based on The Active Experiment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2015, no. 1 (182), pp. 54-59. (In Russian)
- Khrushchev Yu.V., Pankratov A.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* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 325, no. 4, pp. 164-175. (In Russian)
- Gorbunova L.M., Portnoy M.G., Rabinovich R.S., Sovalov S.A., Timchenko V.F. *Ekspperimentalnye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental studies of the modes of energy systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 448 p. (In Russian)
- Konovalov Yu.S., Kugelevichus I.B. On the possibility of determining the static characteristics of the load by methods of mathematical statistics. *Elektrichestvo* [Electricity], 1968, no. 3, pp. 11-13. (In Russian)
- Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. Statistically equilibrium states of load in the problem of static load characteristics identification. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23-28. doi: 10.14529/power170203. (In Russian)
- Gurevich Yu.E., Libova L.E. On determining the characteristics of the load by voltage by the method of steady-state measurements. *Elektrichestvo* [Electricity], 1972, no. 2, pp. 21-24. (In Russian)
- Kozlov V.A. *Elektrosnabzhenie gorodov* [Power supply of cities]. Moscow, Energy Publishing House, 1977, 280 p. (In Russian)

17. Stepanov V.P., Krotkov E.A., Vedernikov A.S., Gudkov A.V., Idiatulin R.F. Estimation of the values of peaks and troughs when limiting the limits of changes in the theta ordinates of electrical load graphs. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2005, no. 37, pp. 121-127. (In Russian)
18. Petrov V.V. Limiting theorems of classical type for sums of independent random variables. *Itogi nauki i tekhn. Ser. Sovrem. probl. mat. Fundam. Napravleniya* [Results of science and technology. Series: modern problems of mat. fundamental direction], 1991, vol. 81, pp. 10-38. (In Russian)
19. Ponarin Ya.P. *Afinnaya i proektivnaya geometriya* [Affine and projective geometry]. Moscow, Moscow Center for Continuing Mathematical Education Publ., 2009. 288 p. (In Russian)
20. Vorontsov K.V., Potapenko A.A. Modifications of the EM algorithm for probabilistic thematic modeling. *Mashinnoe obuchenie i analiz dannyh* [Machine learning and data analysis], 2013, vol. 1, no. 6, pp. 657-686. (In Russian)
21. Wentzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, High School Publ., 2001. 575 p. (In Russian)
22. Zhmylev S.A., Aliev T.I. Queuing systems with polymodal flows. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 473-478. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478. (In Russian)

Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети / А.В. Панкратов, А.К. Жуйков, А.А. Шувалова, В.И. Полищук // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11)

Pankratov A.V., Zhuykov A.K., Shuvalova A.A., Polishchuk V.I. Determination of Static Load Model by Voltage Using Steady-State Measurements Taking into Account the Network Response. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11)