

УДК 621.311

## Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой

С.В. Балдов, О.А. Бушуева, Д.Н. Кормилицын, А.И. Кулешов, Ю.С. Мешкова, А.Ю. Мурзин, А.А. Шулпин  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: murzin@rza.ispu.ru, aash111@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Статические характеристики нагрузки по напряжению используются в расчетах электро-энергетических режимов и управлении ими, при оценке устойчивости узлов нагрузки для повышения надежности и экономичности функционирования электроэнергетических систем. Характеристики, полученные в конце XX века, устарели и требуют корректировки в связи с изменениями в составе оборудования электрических сетей и их структуре, а также в составе и режимах работы нагрузки. Материалы статьи содержат результаты выполнения научно-исследовательской работы «Исследование статических характеристик нагрузки промышленных потребителей в электрических сетях 6–10 кВ по энергообъекту в операционной зоне филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Центра» по заказу некоммерческого партнерства «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения».

**Материалы и методы:** Для получения статических характеристик нагрузки по напряжению использованы результаты активных и пассивных экспериментов на энергообъекте – ПС 110 кВ Ивановская-12, а также вычислительных экспериментов с применением специализированного программного комплекса «Энергия УР». Обработка результатов активных и пассивных экспериментов произведена с использованием программного комплекса Statistica 12.

**Результаты:** Получены коэффициенты квадратичных полиномов, определяющих статические характеристики нагрузки по напряжению, по активной и реактивной мощности для различных узлов комплексной нагрузки на сторонах 6 и 110 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12.

**Выводы:** Полученные в результате исследований коэффициенты квадратичных полиномов статических характеристик нагрузки по напряжению позволяют создать более точные модели узлов комплексной нагрузки для расчетов электроэнергетических режимов и статической устойчивости электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, энергообъект, комплексная электрическая нагрузка, приемник электрической энергии, подстанция, статическая характеристика нагрузки, активная мощность, реактивная мощность, напряжение.

## Determination of voltage steady-state load characteristics in electric networks with diverse loads

S.V. Baldov, O.A. Bushueva, D.N. Kormilitsyn, A.I. Kuleshov, Yu.S. Meshkova, A.Yu. Murzin, A.A. Shulpin  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: murzin@rza.ispu.ru, aash111@yandex.ru

### Abstract

**Background:** Voltage steady-state load characteristics are used for calculating electrical network states and network control as well as for estimating voltage stability and increasing the reliability and efficiency of electric power systems.

The characteristics obtained in the late 20<sup>th</sup> century are now obsolete and should be corrected according to the changes in both the overall network structure and specific network components as well as the load types and operating characteristics. The paper shows the results of the authors' research titled «Study of voltage steady-state load characteristics in 6–110 kV power networks in the Central Interregional Dispatching Office operational area of «SO UPS», JSC. The research was commissioned by the nonprofit partnership «Russian National Committee of the International Council on Large Electric Systems».

**Materials and methods:** Voltage steady-state load characteristics were determined through active and passive experiments on the 110 kV substation «Ivanovskaya-12» as well as modeling in the «Energy UR» software. The results of the active and passive experiments were processed in the «Statistica 12» software.

**Results:** We obtained the coefficients of quadratic polynomials describing voltage steady-state load characteristics for different electrical nodes at the 6 and 110 kV buses of 110 kV substation «Ivanovskaya-12».

**Conclusions:** The computed polynomial coefficients of the voltage steady-state load characteristics can be used to create a more accurate model of various loads for calculating electrical power states and analyzing steady-state stability of power systems.

**Key words:** electric power system, electric facility, diverse load, receiver of electric energy, substation, steady-state load characteristics, active power, reactive power, voltage.

В расчетах установившихся режимов и статической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) нагрузка потребителей моделируется зависимостями активной  $P(U)$  и реактивной  $Q(U)$  мощности от напряжения, получившими название статических характеристик нагрузки (СХН) по напряжению.

В СССР до 80-х годов XX века в расчетах установившихся режимов и статической устойчивости ЭЭС использовались типовые СХН, которые были, в основном, получены экспериментальным путем, как для отдельных электроприемников, так и для комплексных узлов электрической нагрузки<sup>1</sup> [1–5].

СХН используются при решении задач повышения надежности и экономичности функционирования ЭЭС, в частности: в расчетах электроэнергетических режимов и управлении ими; при оценке устойчивости узлов нагрузки и энергосистем<sup>2</sup> [6].

В последние годы в ОАО «СО ЕЭС» России проводятся работы по получению новых СХН по напряжению для энергообъектов, находящихся в различных операционных зонах.

Одним из направлений этих работ является корректировка имеющихся типовых СХН в связи с изменениями в составе оборудования ЭЭС, а также в составе и режимах работы потребителей.

Ниже рассматриваются вопросы разработки индивидуальной методики определения СХН по напряжению комплексной нагрузки ПС 110 кВ Ивановская -12.

Для определения СХН по напряжению могут использоваться различные подходы.

При выборе способа получения СХН по напряжению необходимо учитывать как причинный, детерминированный, так и случайный, вероятностный характер изменения электрической нагрузки.

Детерминированный характер изменения нагрузки проявляется в явно выраженной цикличности суточной (недельной, сезонной) закономерности. Цикличность режима электропотребления проявляется в наличии естественного изменения нагрузок в зависимости от дня недели или календарной даты.

Случайный характер изменения нагрузки проявляется даже в тех случаях, когда оборудование имеет достаточно четкий цикл работы и строгую повторяемость операций в потреблении ими электроэнергии из сети энергосистемы. Все эти обстоятельства изменяют как мгновенное значение потребляемой нагрузки,

<sup>1</sup> РД 34.20.577. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Ч. 1.

<sup>2</sup> СО 153-34.20.576-2003. Методические указания по устойчивости энергосистем; СТО 59012820.29.240.007-2008 «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем».

так и его продолжительность. Точный учет всех этих обстоятельств невозможен именно из-за их случайного характера.

Изменение нагрузки в функции напряжения  $P(U)$  также имеет причинно-обусловленную детерминированную и случайную вероятно-статистическую составляющие. Например, детерминированная составляющая обусловлена запрограммированным режимом работы регулирующих напряжение устройств, случайная составляющая – непредсказуемыми изменениями величины, состава и режима работы нагрузок.

Таким образом, изменение электрических нагрузок во времени, в функции напряжения, обусловленное влиянием индивидуальных и большого числа независимых случайных факторов, имеет причинно-детерминированную и вероятностно-статистическую природу.

Проведен анализ влияния различных факторов на СХН по напряжению на исследуемом энергообъекте. Установлено, что выбор способа определения СХН по напряжению в узле комплексной нагрузки электрической сети объекта зависит от индивидуальных особенностей энергообъекта, а именно:

- наличия крупных по мощности высоковольтных и низковольтных потребителей электроэнергии (ПЭЭ);
- состава разных групп (по СХН) низковольтных ПЭЭ;
- режима работы низковольтных ПЭЭ, однородных по группам СХН;
- наличия промышленных ПЭЭ и различной нагрузки городской электрической сети в составе узла комплексной нагрузки;
- характера изменения нагрузки в течение времени суток, рабочих и выходных дней, а также по сезонам года.

Выбор методики исследования СХН по напряжению определяется указанными индивидуальными особенностями энергообъекта.

Для получения СХН по напряжению для энергообъектов с учетом их особенностей можно использовать следующие методы:

- расчетный;
- экспериментальный;
- комплексный (сочетание экспериментального с расчетным).

При использовании расчетного метода для совокупности из  $k$  групп однотипных ПЭЭ СХН по напряжению могут быть определены по следующим выражениям:

$$P_{\text{np}}(U) = \sum_{i=1}^k \alpha_i P_i(U) + \alpha_{\pi} \Delta P(U); \quad (1)$$

$$Q_{\text{np}}(U) = \sum_{i=1}^k \beta_i Q_i(U) + \beta_{\pi} \Delta Q(U), \quad (2)$$

где  $P_{\text{np}}(U)$  и  $Q_{\text{np}}(U)$  – СХН по напряжению для активной и реактивной нагрузки соответственно;  $P_i(U)$  и  $Q_i(U)$  – СХН по напряжению для от-

дельных однотипных групп ПЭЭ;  $\Delta P(U)$  и  $\Delta Q(U)$  – зависимости потерь мощности от напряжения в электрической сети;  $\alpha_j, \beta_j, \alpha_\pi, \beta_\pi$  – весовые коэффициенты, определяемые по составу ПЭЭ в расчетной нагрузке энергообъекта.

Для использования предложенного подхода к получению СХН по напряжению необходимы следующие данные:

- СХН по напряжению отдельных однотипных групп ПЭЭ;
- состав однотипных групп ПЭЭ в расчетной комплексной нагрузке рассматриваемого узла электрической сети.

В большинстве случаев имеются аналитические выражения СХН по напряжению для определенного состава ПЭЭ (асинхронных и синхронных двигателей, осветительных установок с различными источниками света, дуговых сталеплавильных печей). Данные по СХН для других групп ПЭЭ (сварочных установок, подъемно-транспортных механизмов, индукционных и лифтовых установок) ограничены либо вообще отсутствуют.

Расчетный метод получения СХН по напряжению целесообразно использовать при наличии в узле комплексной нагрузки определенного количества ПЭЭ с известными СХН. Он применим, в основном, для промышленных предприятий, имеющих в своем составе высоковольтные ПЭЭ с известными типовыми СХН по напряжению.

Применение экспериментального метода для получения СХН по напряжению возможно двумя путями:

- с использованием данных пассивного эксперимента;
- с использованием данных активного эксперимента.

Возможности получения СХН по напряжению для исследуемого энергообъекта по данным пассивного эксперимента весьма ог-

раничены. Это связано, в первую очередь, с малыми изменениями напряжения и потребляемой активной мощности в узле комплексной нагрузки за рассматриваемый часовой интервал времени (рис. 1).

Анализ часовых графиков напряжения и активной мощности в узле комплексной нагрузки (рис. 1) показывает, что изменение напряжения не превышает 0,33 % от величины номинального напряжения сети, при этом изменение потребления активной нагрузки превышает 15 % от среднего значения, что обусловлено изменением состава электроприемников и их режимов работы.

Применение активного эксперимента для получения СХН по напряжению возможно при изменении напряжения в приемлемом (достаточном) диапазоне в ограниченном временном интервале. Т.е. при проведении активного эксперимента СХН по напряжению можно получить для каждого типа электрической нагрузки и их совокупностей в результате изменений напряжения на шинах узлов комплексной нагрузки или питающей подстанции и выполняя замеры мощностей  $P$  и  $Q$ . Имеется достаточное количество литературы по проведению активных экспериментов и обработке полученных данных, особенно для однофакторного эксперимента [7–9].

Основное достоинство использования активного эксперимента для получения СХН по напряжению – это получение данных для всего диапазона изменения напряжения в конкретном узле комплексной нагрузки.

При подготовке проведения эксперимента необходимо установить граничные значения изменения напряжения и его интервалы варьирования, которые зависят от возможностей регулирующих устройств и требований к качеству электроэнергии у электроприемников.

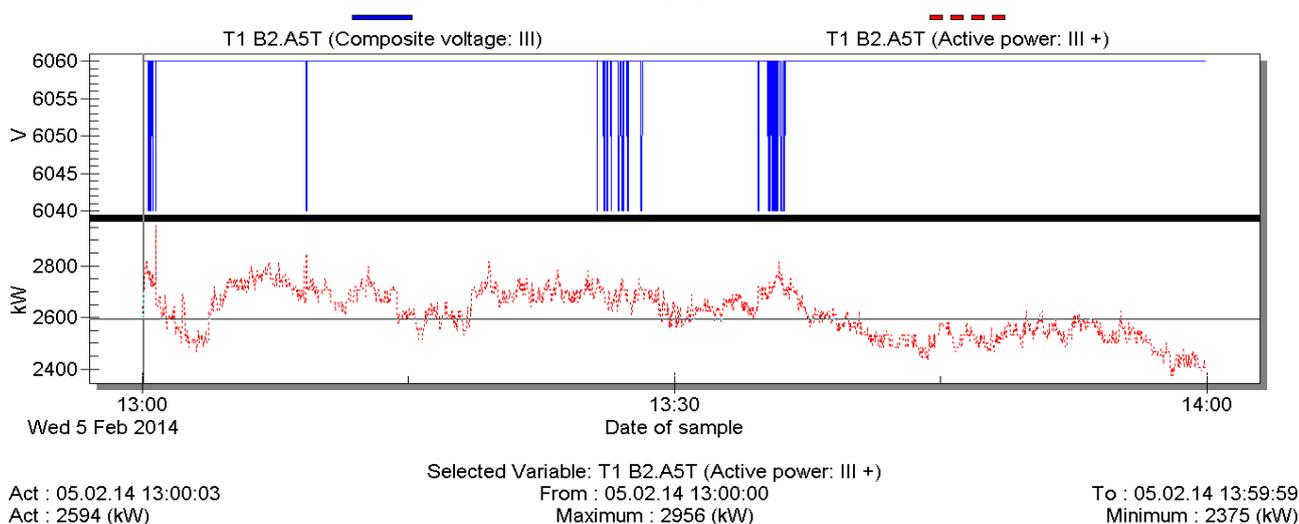


Рис. 1. Часовые графики напряжения и активной мощности в узле комплексной нагрузки, полученные при проведении пассивного эксперимента с использованием анализатора электропотребления AR.5M

Основная проблема получения СХН путем проведения активного эксперимента – это невозможность контроля изменяющихся СХН ПЭЭ. Поэтому эксперимент проводится при допущении неизменности СХН отдельных ПЭЭ, а влияние изменяющихся СХН отдельных ПЭЭ на СХН узла нагрузки принято считать помехами.

Указанное допущение может привести к значительной погрешности при определении СХН. Это касается случаев, когда пределы изменения напряжения ограничены, мощные ПЭЭ, влияющие на СХН исследуемого узла нагрузки, отсутствуют, а у нескольких групп ПЭЭ, соизмеримых по мощности, во время эксперимента потребляемая мощность, режим работы и, соответственно, индивидуальные СХН изменяются в широких пределах.

На рис. 2 приведены графики изменения напряжения, активной и реактивной мощностей, полученные в результате проведения ак-

тивного эксперимента на шинах 6 кВ узла комплексной нагрузки ПС 110 кВ Ивановская -12.

Как правило, регрессионная общепринятая зависимость СХН по напряжению описывается полиномом второй степени:

$$P(U) = P_{\text{ном}} [a_0 + a_1(U/U_{\text{ном}}) + a_2(U/U_{\text{ном}})^2]; \quad (3)$$

$$Q(U) = Q_{\text{ном}} [b_0 + b_1(U/U_{\text{ном}}) + b_2(U/U_{\text{ном}})^2], \quad (4)$$

где  $P_{\text{ном}}$  и  $Q_{\text{ном}}$  – активная и реактивная мощности нагрузки при номинальном напряжении;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение нагрузки или сети;  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты (параметры) моделей для активной и реактивной мощности соответственно.

Для определения коэффициентов регрессионных моделей может быть использован метод наименьших квадратов (наиболее распространенный), метод моментов и метод максимального правдоподобия.

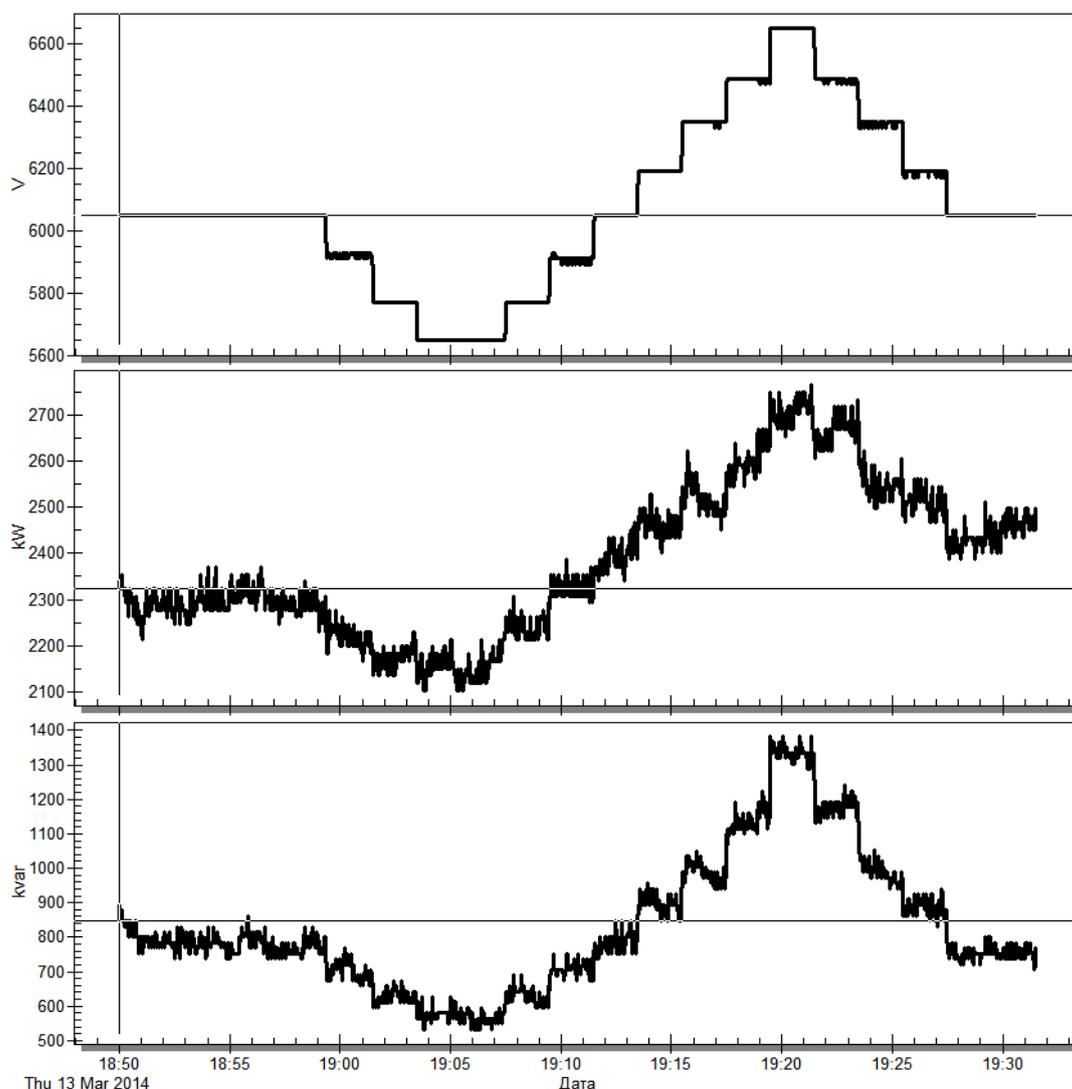


Рис. 2. Графики изменения напряжения, активной и реактивной мощностей, полученные при проведении активного эксперимента на шинах 6 кВ узла комплексной нагрузки



Excel, данные из которого экспортируются в программный комплекс Statistica 12.

С помощью программного комплекса Statistica 12 производится:

– проверка исходных данных на «нормальность» по критериям Хи-квадрат и Колмогорова;

– определение коэффициентов регрессии с использованием одного из нескольких методов (чаще всего методом наименьших квадратов);

– определение статистических характеристик коэффициентов регрессии, в том числе: стандартного отклонения; уровней значимости; доверительных интервалов для коэффициентов регрессии при заданном уровне значимости;

– определение статистических характеристик уравнения регрессии, в том числе: множественного коэффициента корреляции  $R$ ; множественного коэффициента детерминации  $R^2$ ; остаточной дисперсии; коэффициента Фишера и др.;

– исключение ошибок при использовании статистических выражений, имеющих сложную структуру.

Проверка гипотезы адекватности регрессионных моделей осуществляется на основании критерия Фишера, для чего вычисляется остаточная дисперсия по выражению

$$D_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p - 1}, \quad (13)$$

где  $D_{\text{ост}}^2$  – остаточная дисперсия;  $Y_i$  – опытные данные потребляемой мощности (активной или реактивной);  $\hat{Y}_i$  – данные прогноза потребляемой мощности (активной или реактивной);  $n$  – число опытов;  $p$  – число регрессоров регрессионного уравнения.

После вычисления остаточной дисперсии рассчитывается дисперсия среднего:

$$D_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n - 1}. \quad (14)$$

В итоге расчетный коэффициент Фишера, определенный по выражению

$$F_p = \frac{D_{\text{ср}}^2}{D_{\text{ост}}^2}, \quad (15)$$

либо сравнивается с табличным значением  $F_T$  и при удовлетворительных результатах ( $F_p > F_T$ ) считается, что модель предсказывает

результаты опыта лучше среднего значения, либо, зная  $F_p$  и  $F_T$ , определяется вероятность  $\alpha$  того, что случайная величина  $Y$  с данным распределением Фишера не превысит принятый уровень значимости  $\alpha_n$  (для инженерных расчетов технических объектов достаточный уровень значимости принимается  $\alpha_n = 0,05$ ).

Для оценки взаимосвязи между зависимой переменной и совокупностью объясняющих переменных используется коэффициент (индекс) множественной (совокупной) корреляции  $R$ , вычисляемый по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (16)$$

где  $Y_i$  – опытные данные потребляемой мощности (активной или реактивной);  $\bar{S}_i$  – средние значения потребляемой мощности (активной или реактивной) по уравнению регрессии для заданных значений факторов;  $\bar{Y}$  – средние значения потребляемой мощности (активной или реактивной).

Множественный коэффициент детерминации  $R^2$  рассматривается как мера качества уравнения регрессии, характеристика прогностической силы анализируемой регрессионной модели: чем ближе  $R^2$  к единице, тем лучше регрессия описывает зависимость между объясняющими переменными и зависимой переменной.

5. По результатам выполненных на предыдущем этапе расчетов определяются коэффициенты  $a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  полиномов второй степени для СХН по напряжению по активной и реактивной мощностям (при условии постоянства частоты питающей сети) и делаются выводы об адекватности как самих коэффициентов, так и модели в целом.

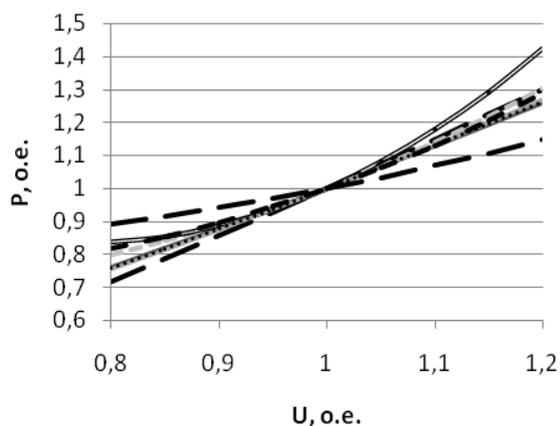
В табл. 1, 2 приведены коэффициенты полиномов второй степени для СХН по напряжению по активной и реактивной мощностям, полученные для узла комплексной нагрузки на шинах 6 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12 для характерных режимов работы. На рис. 3, 4 приведены СХН по напряжению по активной и реактивной мощностям, полученные для узла комплексной нагрузки на шинах 6 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12 для характерных режимов работы.

Таблица 1. Значения коэффициентов квадратичных полиномов СХН по напряжению по активной мощности  $P(U)$  по вводу 6 кВ В-1 трансформатора Т1 ПС 110 кВ Ивановская-12 по результатам активных экспериментов

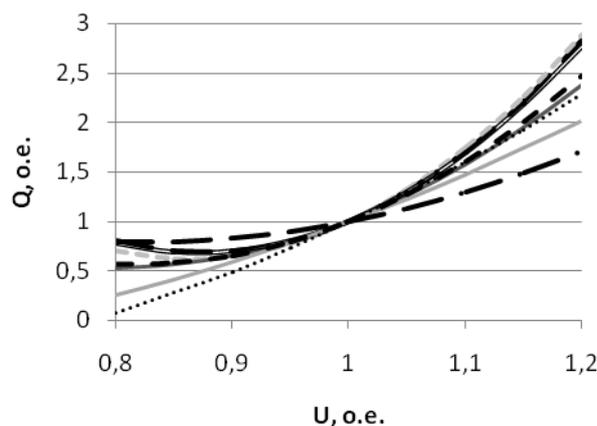
Обозначение коэффициента регрессии	Дата и режим нагрузки						
	13.03.2014	14.03.2014	14.03.2014	16.03.2014	26.03.2014	27.03.2014	27.03.2014
	Вечерний максимум	Ночной минимум	Утренний максимум	Максимум выходного дня	Вечерний максимум	Ночной минимум	Утренний максимум
$a_0$	-0,25	1,03	0,06	2,82	0,00	0,00	1,14
$a_1$	1,04	-1,32	0,64	-5,10	0,71	0,74	-1,45
$a_2$	0,21	1,29	0,30	3,28	0,29	0,26	1,31

Таблица 2. Значения коэффициентов квадратичных полиномов СХН по напряжению по реактивной мощности  $Q'(U)$  по вводу 6 кВ В-1 трансформатора Т1 ПС 110 кВ Ивановская-12 по результатам активных экспериментов

Обозначение коэффициента регрессии	Дата и режим нагрузки						
	13.03.2014	14.03.2014	14.03.2014	16.03.2014	26.03.2014	27.03.2014	27.03.2014
	Вечерний максимум	Ночной минимум	Утренний максимум	Максимум выходного дня	Вечерний максимум	Ночной минимум	Утренний максимум
$b_0$	16,50	15,24	7,70	15,50	0,00	0,00	9,26
$b_1$	-36,05	-33,94	-18,02	-33,97	-2,41	-3,50	-21,27
$b_2$	20,55	19,70	11,32	19,47	3,41	4,50	13,01



— P1(U)    - - - - P2(U)    — P3(U)  
 — P4(U)    — P5(U)    ····· P6(U)  
 - - - P7(U)    — · Ptip(U)



— Q1(U)    - - - - Q2(U)    — Q3(U)  
 — Q4(U)    — Q5(U)    ····· Q6(U)  
 - - - Q7(U)    — · Qtip(U)

Рис. 3. СХН по напряжению по активной мощности по вводу 6 кВ В-1 трансформатора Т1 ПС 110 кВ Ивановская-12: P1(U) – СХН по напряжению по активной мощности для вечернего максимума 13.03.2014; P2(U) – СХН по напряжению по активной мощности для ночного минимума 14.03.2014; P3(U) – СХН по напряжению по активной мощности для утреннего максимума 14.03.2014; P4(U) – СХН по напряжению по активной мощности для максимума выходного дня 16.03.2014; P5(U) – СХН по напряжению по активной мощности для вечернего максимума 26.03.2014; P6(U) – СХН по напряжению по активной мощности для ночного минимума 27.03.2014; P7(U) – СХН по напряжению по активной мощности для утреннего максимума 27.03.2014; Ptip(U) – типовая СХН по напряжению по активной мощности (напряжение 6 кВ)

Рис. 4. СХН по напряжению по реактивной мощности по вводу 6 кВ В-1 трансформатора Т1 ПС 110 кВ Ивановская-12: Q1(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для вечернего максимума 13.03.2014; Q2(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для ночного минимума 14.03.2014; Q3(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для утреннего максимума 14.03.2014; Q4(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для максимума выходного дня 16.03.2014; Q5(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для вечернего максимума 26.03.2014; Q6(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для ночного минимума 27.03.2014; Q7(U) – СХН по напряжению по реактивной мощности для утреннего максимума 27.03.2014; Qtip(U) – типовая СХН по напряжению по реактивной мощности (напряжение 6 кВ)

Полученные СХН по напряжению на напряжении 6 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12 различаются для расчетных режимов (ночной минимум, утренний или вечерний максимум), что обусловлено изменениями в составе и потребляемой мощности ПЭЭ в узлах комплексной нагрузки 6 кВ.

СХН по напряжению на стороне 110 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12 определялись с помощью вычислительных экспериментов с применением программного комплекса «Энергия УР» [12–14], так как методом активного эксперимента данные СХН получить невозможно.

Вычислительные эксперименты проводились следующим образом:

1. Расчеты выполнялись для трех характерных режимов: утреннего и вечернего максимума и ночного минимума нагрузок.

2. Напряжение на высшем напряжении трансформаторов ПС 110 кВ Ивановская-12 из-

менялось в процессе вычислительного эксперимента заданием соответствующего значения на балансирующих узлах.

3. В расчетах не учитывалось регулирование напряжения с помощью устройств РПН трансформаторов.

4. Нагрузки задавались СХН на напряжении 6 кВ, полученными в результате активного эксперимента (коэффициенты полиномов СХН по напряжению приведены в табл. 1, 2).

5. В ходе вычислительных экспериментов производился анализ полученных результатов.

6. Определялись зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  на стороне 110 кВ трансформаторов ПС 110 кВ Ивановская-12.

7. Обработка результатов расчетов заключалась в «нормализации» результатов расчета путем пересчета их в относительные

единицы. За базисное напряжение было принято номинальное напряжение 110 кВ, а за базисные мощности – рассчитанные значения мощностей на стороне 110 кВ трансформаторов при номинальном напряжении.

8. Полученные зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  на стороне 110 кВ трансформаторов ПС 110 кВ Ивановская-12 аппроксимировались квадратичными полиномами.

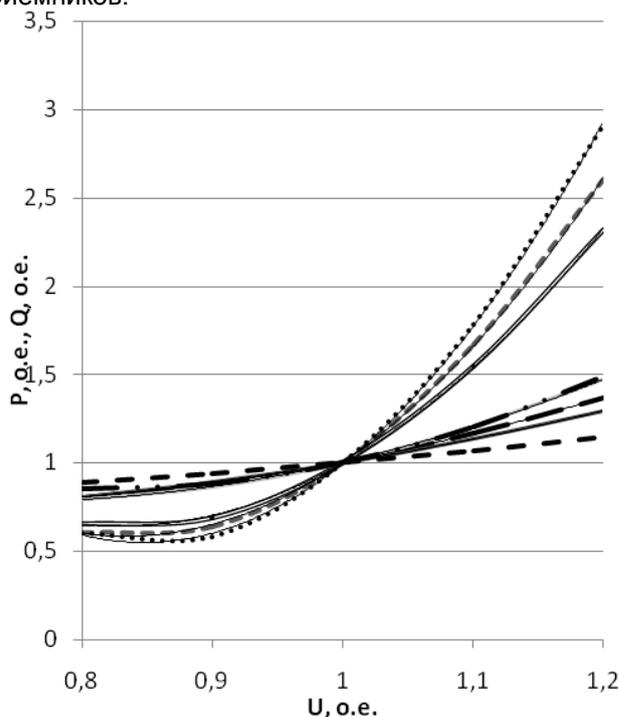
9. Выполнялась окончательная процедура «центрирования» коэффициентов аппроксимации, которая заключалась в обеспечении равенства единице для суммы полиномиальных коэффициентов. Так как величина необходимой корректировки составляла менее 1 %, то корректировка выполнялась за счет коэффициентов  $a_0$  и  $b_0$ .

На рис. 5 приведены расчетные зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  в относительных единицах на стороне 110 кВ трансформатора ПС 110 кВ Ивановская-12 и их аппроксимации полиномами второго порядка.

Полученные СХН по напряжению на сторонах 6 и 110 кВ ПС 110 кВ Ивановская-12 отличаются от типовых СХН большей крутизной, что объясняется изменениями в характеристиках, составе и потребляемой мощности ПЭЭ ПС 110 кВ Ивановская-12.

### Заключение

Метод активного эксперимента для получения СХН по напряжению целесообразно использовать для узла комплексной нагрузки с преобладанием в нем большого количества разнотипных по мощности и режимам работы электроприемников.



Необходимыми условиями проведения активного эксперимента являются наличие возможности изменения напряжения в узле в достаточно широком диапазоне и обеспечение требований качества электроэнергии у электроприемников.

При отсутствии физической возможности изменения напряжения в узле комплексной нагрузки целесообразно использовать комплексный подход. Для отдельных электроприемников либо групп ПЭЭ с однотипным электрооборудованием СХН по напряжению целесообразно определять, используя метод активного эксперимента, а для всего узла комплексной нагрузки СХН по напряжению целесообразно определять, используя расчетный метод.

### Список литературы

1. **Жданов П.С.** Устойчивость электрических систем: учебник для энерг. и электротехн. вузов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948.
2. **Горбунова Л.М., Гуревич Ю.Е.** Экспериментальное определение характеристик нагрузки энергосистем // Труды ВНИИЭ. Вып. 29. – М.: Энергия, 1967.
3. **Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е.** Обобщение статической характеристики нагрузки  $Q = f(U)$  // Электричество. – 1975. – № 12.
4. **Гуревич Ю.Е., Хачатрян Э.А.** Расчет статических характеристик крупных узлов нагрузки с использованием типовых параметров. – М.: Всесоюзный институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 1980.
5. **Экспериментальные исследования режимов энергосистем / под ред. С.А. Совалова.** – М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. **Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е.** Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электропитания промышленных потребителей. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008.

— P вечер 13.03.2014	$y = 2,174x^2 - 2,933x + 1,758$ $R^2 = 1$
- - - Q вечер 13.03.2014	$y = 15,09x^2 - 25,16x + 11,06$ $R^2 = 0,999$
— P утро 14.03.2014	$y = 1,267x^2 - 1,312x + 1,045$ $R^2 = 1$
— Q утро 14.03.2014	$y = 12,23x^2 - 20,28x + 9,051$ $R^2 = 0,999$
— P ночь 14.03.2013	$y = 3,214x^2 - 4,726x + 2,511$ $R^2 = 1$
..... Q ночь 14.03.2014	$y = 19,07x^2 - 32,30x + 14,23$ $R^2 = 0,999$
- - Типовая P (110кВ)	
— • Типовая Q (110кВ)	

Рис. 5. Расчетные зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  в относительных единицах на стороне 110 кВ трансформатора Т1 ПС 110 кВ Ивановская-12 и их аппроксимации полиномами второго порядка

7. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983.

8. **Алберт А.** Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание: пер. с англ. – М.: Наука, 1977.

9. **Дрэйпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. – М.: Финансы и статистика, 1987.

10. **Боровиков В.П.** STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2001.

11. **Электронный учебник по промышленной статистике.** М., StatSoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.statsoft.ru/home/portal/textbook\\_ind/default.htm](http://www.statsoft.ru/home/portal/textbook_ind/default.htm).

12. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611423. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем («Энергия УР») / Н.Б. Ильичев, А.И. Кулешов, В.А. Серов. 2004.

13. **Ильичев Н.Б., Кулешов А.И., Серов В.А.** Расчеты установившихся режимов, потеря электроэнергии и токов короткого замыкания на единой модели электрической сети в программном комплексе ENERGYCS // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2008.

14. **Кулешов А.И., Прахин Б.Я.** Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – 171 с.

### References

1. Zhdanov, P.S. *Ustoychivost' elektricheskikh sistem* [Stability of electric power systems]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1948.

2. Gorbunova, L.M., Gurevich, Yu.E. *Eksperimental'noe opredelenie kharakteristik nagruzki energosistem* [Experimental determination of power system load characteristics]. *Trudy VNIIE* [VNIIE proceedings]. Moscow, Energiya, 1967, issue 29.

3. Gurevich, Yu.E., Libova, L.E. *Obobshchenie staticheskoy kharakteristiki nagruzki  $Q = f(U)$*  [Generalization of the static characteristics of the load  $Q = f(U)$ ]. *Elektrichestvo*, 1975, no. 12.

4. Gurevich, Yu.E., Khachatryan, E.A. *Raschet staticheskikh kharakteristik krupnykh uzlov nagruzki s ispol'zovaniem tipovykh parametrov* [Calculation of the static characteristics of the major load centers using standard parameters]. Moscow, Vsesoyuznyy institut povysheniya kvalifikatsii rukovodyashchikh rabotnikov i spetsialistov, 1980.

5. *Eksperimental'nye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental studies of electrical system modes]. Moscow, Energoatomizdat, 1985.

6. Gurevich, Yu.E., Libova, L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh*

*ti energosistem i nadezhnosti elektroobrazovaniya promyshlennykh potrebiteley* [Using mathematical models of electric load in the calculations of power system stability and power supply reliability for industrial consumers]. Moscow, ELEKS-KM, 2008.

7. Ayvazyan, S.A., Enyukov, I.S., Meshalkin, L.D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied statistics: Fundamentals of modeling and preprocessing of data]. Moscow, Finansy i statistika, 1983.

8. Albert, A. *Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoe otsenivanie* [Regression pseudoinverse and recursive estimation]. Moscow, Nauka, 1977.

9. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regreSSIONnyy analiz* [Applied Regression Analysis]. Moscow, Finansy i statistika, 1987.

10. Borovikov, V.P. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [STATISTICA: the art of data computer analysis]. Saint-Petersburg, Piter, 2001.

11. *Elektronnyy uchebnyy po promyshlennoy statistike* [Electronic textbook on industrial statistics]. Moscow, StatSoft. Available at: ([http://www.statsoft.ru/home/portal/textbook\\_ind/default.htm](http://www.statsoft.ru/home/portal/textbook_ind/default.htm).)

12. Il'ichev, N.B., Kuleshov, A.I., Serov, V.A. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM «Raschet i analiz ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem («Energija UR»)»* [Certificate of official registration of the computer program «Calculation and analysis of steady-state modes of electric power systems («Energy UR»)»], no. 2004611423, 2004.

13. Il'ichev, N.B., Kuleshov, A.I., Serov, V.A. *Raschet i analiz ustanovivshikhsya rezhimov, poter' elektroenergii i tokov korotkogo zamykaniya na edinoy modeli elektricheskoy seti v programmnom komplekse ENERGYCS* [Calculations of steady-state regimes, electricity losses and short-circuits on a single model of an electrical network in the software package ENERGYCS]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energosistema: upravlenie, konkurentsiya, obrazovanie»* [Collection of reports of the international scientific and technical conference «Power system: governance, competition, education»]. Ekaterinburg, 2008. 14. Kuleshov, A.I., Prakhin, B.Ya. *Raschet i analiz ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem na personal'nykh komp'yuterakh* [Calculation and analysis of steady-state modes of electric power systems on personal computers]. Ivanovo, 2005. 171 p.

**Мурзин Андрей Юрьевич**,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-33,  
e-mail: murzin@rza.ispu.ru

**Шульпин Андрей Александрович**,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: aash111@yandex.ru

**Бушувеева Ольга Александровна**,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: bushuevaoa@yandex.ru

**Кулешов Анатолий Иванович**,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: aikuleshov@yandex.ru

*Балдов Сергей Владимирович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
старший преподаватель кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: bsv-serg@yandex.ru

*Мешкова Юлия Сергеевна,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
старший преподаватель кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: yulia\_meshkova@mail.ru

*Кормилицын Дмитрий Николаевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
e-mail: dimak91dimak91@list.ru