

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-20-28

## Влияние статических характеристик современных видов нагрузки на режимы работы электрических сетей

В.В. Буслов, Н.Ш. Чемборисова

Одна из основных задач ведения режима работы энергосистем — поддержание нормального уровня напряжения в контрольных точках энергосистемы и у потребителя. Режим напряжений в электрической сети должен соответствовать требованиям ГОСТ 32144—2013 в отношении допустимых отклонений напряжения для потребителей электрической энергии. Кроме того, желательным является оптимальное напряжение, при котором для производства единицы продукции затраты минимальны. Каждая нагрузка характеризуется различным потреблением активной и реактивной мощностей в зависимости от напряжения, что приводит к изменениям режимных параметров сети. Таким образом, при исследовании режимов работы электроэнергетической системы необходимо учитывать статические характеристики нагрузки по напряжению.

Выполнены расчеты электрических режимов (в программном комплексе RastrWin3) и матрицы Якоби, аппроксимация полученного массива данных методами Гаусса, Крамера, а также численными методами.

Определено распределение потребления мощности в отдельном доме/квартире, получены современные уравнения статических характеристик нагрузки коммунально-бытового характера для отдельного дома/квартиры, а также узлов нагрузки классов напряжения 6—20 кВ и 110—220 кВ, рассчитаны нормированные списки сенсорности узлов для различных электрических сетей. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании современных электрических сетей, оптимизации режимов работы электрических сетей, а также решении вопросов оперативно-диспетчерского управления.

По итогам сравнения полученных уравнений статических характеристик нагрузок с типовыми доказано, что внедрение энергоберегающих технологий, а также применение современных типов энергопринимающих устройств приводит к необходимости изменения типовых статических характеристик нагрузки. Установлена необходимость представления нагрузки в узлах полными моделями статических характеристик.

*Ключевые слова:* статические характеристики нагрузки, энергоберегающие технологии, матрица Якоби, нормированный список сенсорности.

*Для цитирования:* Буслов В.В., Чемборисова Н.Ш. Влияние статических характеристик современных видов нагрузки на режимы работы электрических сетей // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 20—28. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-20-28.

## The Static Characteristics of Modern Load Types and Their Influence on the Electric Network Operating Modes

V.V. Buslov, N.Sh. Chemborisova

One of the main aims pursued in conducting a power system operating mode is to maintain the normal voltage level at the control points of the power system and at its consumers. The voltage operation parameters in the electric network must meet the requirements of Russian State Standard (GOST) 32144 2013 in regard of permissible voltage deviations for electric energy consumers who are powered from this network. In addition, it is desirable for the consumer to have an optimal voltage level at which the costs for producing a unit of goods are kept to a minimum. Each load is characterized by different active power consumption and reactive power absorption as a function of voltage, which leads to changes in the network operating parameters. Thus, in studying the electric power system operating modes, it is necessary to take into account the load static voltage characteristics.

In this study, the electrical regimes were numerically analyzed (using the RastrWin3 software package), the Jacobi matrix was calculated, and the resulting data array was approximated using the Gauss, Cramer, and numerical methods.

The distribution of power consumption in an individual house/apartment is determined; modern equations for the static characteristics of domestic loads for an individual house/apartment and for load nodes belonging to the 6-20 kV and 110-220 kV voltage classes are derived, and standardized node sensor lists for different electrical networks are calculated.

The study results can be used in designing modern electrical networks, in optimizing the network operating modes, and in settling operational dispatch control matters.

It has been proven based on the results from comparing the obtained equations of static load characteristics with the typical ones that the introduction of energy saving technologies and the use of modern types of electrical appliances generate the need to change the typical static load characteristics. The necessity of representing the load at nodes by full models of static load characteristics is shown.

*Key words:* static load characteristics, energy saving technologies, Jacobian matrix, normalized sensor list.

*For citation:* Buslov V.V., Chemborisova N.Sh. The Static Characteristics of Modern Load Types and Their Influence on the Electric Network Operating Modes. Bulletin of MPEI. 2021;2:20—28. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-20-28.

## Введение

Слабыми местами электроэнергетической системы (ЭЭС), по мнению А.З. Гамма, И.И. Голуб, называются такие элементы схем, которые являются причиной существования в ней сенсоров [1, с. 43]. На слабость элементов схемы ЭЭС оказывает влияние выбор их параметров и режим сети. Есть ветви, слабые независимо от изменения режима, они определяются инвариантными к режиму факторами: топологией схемы сети и параметрами ее элементов, информацию о которых содержит матрица узловых проводимостей, использующаяся в расчетах установившихся режимов энергетических систем.

Один из возможных вариантов анализа параметров схемы — учет узловых салдо-проводимостей. Достоинство его использования состоит в физической обоснованности и прямой связи с параметрами режима. При применении указанной возможности разделения матрицы Якоби на составляющие, получается, что одна из них инвариантна к режиму и является матрицей узловых проводимостей в действительной форме, а вторая зависит от нагрузок и модулей узловых напряжений.

Результаты анализа позволяют намного ускорить вычисления при контроле допустимости режимных параметров, оперативной надежности и экономичности режима, построить информационную и управляющую системы на новых принципах, выбрать конфигурацию сети и параметры ее элементов. Для этого необходимы учет слабых мест узлов в ЭЭС [1, с. 43], а также их чувствительность.

Доказано, что определить чувствительность узлов можно с помощью матрицы узловых проводимостей [2, с. 17]. Для этого достаточно использовать мнимую составляющую разности  $\Delta V_i$  между собственной  $u_i$  и суммой взаимных проводимостей  $u_{ij}$  для каждого  $i$ -го узла. Чем больше  $\Delta V_p$ , тем более жестким или сенсорным считается узел в зависимости от характера разницы (емкостного или индуктивного). Узлы, модули напряжений которых сильнее всего меняются при одних и тех же внешних возмущениях, — сенсорные, а имеющие противоположные свойства — жесткие.

Знание сенсорности узлов при построении энергосистемы с активно-адаптивной сетью позволяет оп-

тимизировать расстановку устройств автоматического управления режимом [3, с. 95]. Так, модуль и фаза напряжения сенсорных узлов сильно зависят от внешних возмущений и колебаний нагрузки, жесткие узлы способствуют повышению пропускной способности присоединенных связей. В слабых связях при изменении режима раньше, чем в других связях, может быть достигнут предел пропускной способности, меняющийся при изменении состояния системы [4, с. 31]. Нормализация уровней напряжения с использованием ранжированного по степени жесткости списка узлов позволяет одновременно уменьшить потери активной мощности в сети, т. е. помочь при решении задачи оптимизации режима по условию минимизации активных потерь в сети.

Чувствительность узлов можно использовать для расстановки компенсирующих устройств таким образом, чтобы их суммарная мощность стала минимальной при максимальном эффекте ее использования [5, с. 10].

Следует учитывать, что токи короткого замыкания (ТКЗ) в большой степени влияют на конфигурацию сети, устанавливаемое оборудование и режим работы сети, поэтому для оптимальной установки устройств, ограничивающих ТКЗ, можно использовать обобщенные показатели схемы сети [6, с. 26]. Один из способов ограничения ТКЗ — снижение жесткости узлов схемы. Кроме того, для предварительного анализа параметров сети возможно использование пересчитанной в шунт нагрузки в узле. При учете нагрузки позиция узла в ранжированном списке немного меняется (на несколько позиций) или остается неизменной.

Рационально при определении слабых мест и узлов для расстановки источников реактивной мощности (ИРМ) и усиления электрической сети в целом использование обобщенных параметров, выводимых из матрицы узловых проводимостей [7, с. 11]. Прикладываемые возмущающие воздействия в разных точках ЭЭС вызывают в большей степени реакцию параметров режима одних и тех же узлов и ветвей [8, с. 319]. Реакция сенсоров зависит от существования слабых мест. Данное обстоятельство позволяет изучить факторы, определяющие существование слабых связей и узлов, и предложить способы усиления связей и изменения

проводимостей узлов с целью изменения характера поведения ЭЭС в разных режимах, варьируя ее показатели сенсорности.

Картина слабых связей и сечений коренным образом меняется при перестройке традиционных потоков распределений и увеличении тяжести режимов. Исследование чувствительности узлов можно взять в качестве одного из направлений структурного анализа ЭЭС, использующего оценку реакций напряжений узлов на изменение нагрузок в них. Интерес представляют именно самые жесткие и сенсорные узлы, так как их реакция на нагрузку достаточно показательна. Установка стационарных средств контроля качества электроэнергии в сети целесообразна в узлах с наибольшей чувствительностью, при этом жесткие и сенсорные узлы для оценки отклонений напряжения наиболее показательны [9, с. 15].

### Современные статические характеристики нагрузки

В каждом жилом помещении, будь то квартира в многоквартирном доме, часть дома или коттедж, установлены бытовая техника и инженерное оборудование, потребляющие электрическую энергию. Поскольку у каждого потребителя свой набор электроприемников различных производителей, то получить действительные статические характеристики нагрузки (СХН) не представляется возможным. Поэтому для упрощения и усреднения все домашние электроприемники сведены к нескольким видам, СХН которых известны.

Для определения актуальных СХН возьмем современное оборудование, которое уже стоит или планируется к установке в большинстве помещений. Основные потребители электрической энергии в домах: электроплита, посудомоечная и стиральная машины, система вентиляции, осветительные приборы, холодильник, электрообогреватель, система электрического подогрева пола, телевизор, компьютер, принтер, аудиосистема, водонагреватель (котел), кондиционер, электрочайник, электроутюг, миксер, мясорубка, фен и др. В скором будущем к ним добавится электромобиль, который можно будет использовать не только как автомобиль, но и как накопитель электроэнергии, перемещаемый в любой узел распределительной сети [10, 11].

Всю электрическую технику в домах разделим на 4 вида по типам нагрузки.

**Нагревательная нагрузка.** Целью (все нагревательные электроприборы, а также трубчатые электронагреватели в посудомоечной, стиральной машинах и теплых полах) является только нагрев, вся мощность преобразуется в тепло, поэтому характеристика указанной нагрузки представлена только постоянным сопротивлением.

**Двигательная нагрузка.** Поскольку чаще всего в домашних устройствах установлены асинхронные двигатели (АД), которые мало изменились в своем устрой-

стве за последние годы, то возьмем давно известные статические характеристики асинхронного двигателя [12, с. 37].

**Энергосберегающие лампы.** Их статические характеристики получены экспериментальным путем и хорошо известны [12, с. 22].

**Техника, имеющая в своем составе стабилизатор и/или инвертор.** Источники вторичного электропитания (ИВЭП) электронной аппаратуры представляют собой сочетание различных функциональных узлов электроники, выполняющих различные виды преобразования электрической энергии, а именно, выпрямление, фильтрацию, трансформацию (масштабирование), регулирование (с целью стабилизации определенного параметра), усиление сигналов и др. [13]. Величина выходного напряжения варьируется углом открывания диодов на выпрямляющем устройстве, подаваемым управляющей платой с обратной связью. Любое повышение или понижение входного напряжения приводит только к большему или меньшему значению протекаемого тока на силовых элементах, т. е. к выделению на них тепла. Такие потери учитываются в КПД устройства и могут не рассматриваться в настоящем исследовании.

Каждая техника имеет разброс в мощности в зависимости от производителя, выполняемых функций и класса, исходя из этого, выберем средние показатели потребления активной и реактивной мощностей. В различных источниках коэффициенты спроса и использования также отличаются, поэтому были приняты усредненные значения. В таблице 1 собрана и посчитана информация по потреблению мощности домашними электроприборами.

Вся указанная техника была разделена на 4 вида. Суммировав расчетную мощность приборов в соответствии с каждой категорией, получим данные, приведенные в таблице 2.

По известным СХН каждой категории рассчитаны значения активной и реактивной мощностей единичного потребителя в зависимости от напряжения (рис. 1). Все графики и таблицы с нагрузкой построены в зависимости от линейного напряжения, используемого в программном комплексе RastrWin3.

Для вывода уравнения актуальных СХН единичного потребителя проведена аппроксимация полученного массива рассчитанных значений отдельно для активной и реактивной мощностей следующими способами:

- аппроксимацией встроенной функцией в MS Excel;
- решением системы из трех уравнений второй степени ( $P(U) = P_{\text{ном}}(a_0 + a_1(U/U_{\text{ном}}) + a_2(U/U_{\text{ном}}))^2$  при задании трех точек (включая номинальную — 380 В, а  $P_{\text{ном}}$  — в качестве неизвестной));
- вычислением нескольких систем из трех уравнений (два второй степени и  $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ ) при задании нескольких пар точек ( $P_{\text{ном}}$  принята за точку 380 В);
- решением системы из двух уравнений первой степени ( $P(U) = P_{\text{ном}}(a_0 + a_1(U/U_{\text{ном}}))$ ) при задании двух точек ( $P_{\text{ном}}$  — в качестве неизвестной);

Таблица 1

Нагрузка домашних электроприборов

Наименование	Количество, шт	$P_{уст}$ , кВт	$P_{общ}$ , кВт	$K_c$	$K_n$	$\cos(\varphi)$	$P_{расч}$ , кВт	$Q_{расч}$ , квар.
Электроплита	1	10,0	10,0	0,4	0,8	1,00	3,200	0,000
Посудомоечная машина	1	2,20	2,20	0,3	0,8	0,80	0,528	0,396
Вентиляция	3	0,35	1,05	0,5	0,8	0,70	0,420	0,428
Розетки	16	0,10	1,600	0,3	0,7	0,85	0,336	0,208
Освещение комнат	30	0,027	0,81	0,6	0,6	0,70	0,292	0,297
Освещение гостиных	20	0,036	0,72	0,8	0,8	0,70	0,461	0,470
Освещение кухни	12	0,03	0,36	1,0	0,8	0,70	0,288	0,294
Холодильник	1	0,10	0,10	0,6	0,9	0,70	0,054	0,055
Электрообогреватель	1	1,80	1,80	0,8	0,8	1,00	1,152	0,000
Теплые полы	3	1,10	3,30	0,5	1,0	1,00	1,650	0,000
Телевизор, компьютер, принтер, аудиосистема	1	0,80	0,80	0,8	1,0	0,90	0,640	0,310
Стиральная машина	1	2,30	2,30	0,1	1,0	0,80	0,230	0,173
Водонагреватель	1	2,00	2,00	0,6	0,8	1,00	0,960	0,000
Кондиционер	1	2,30	2,30	0,7	0,8	0,80	1,288	0,966
Электрочайник	1	2,00	2,00	0,3	1,0	1,00	0,600	0,000
Электроутюг	1	1,50	1,50	0,3	1,0	1,00	0,450	0,000
Миксер, мясорубка, пылесос	2	0,75	1,50	0,3	1,0	0,70	0,450	0,459
Фен	1	1,50	1,50	0,3	1,0	0,90	0,450	0,218

• решением нескольких систем из уравнения первой степени и  $a_0 + a_1 + a_2 = 1$  при задании нескольких различных точек ( $P_{ном}$  взята за точку 380 В).

Из полученных пар уравнений выбраны те, которые давали значения активной и реактивной мощностей, наиболее близкие к полученным при всех значениях напряжения из анализируемого диапазона:

$$P(U) = 13,121 \left( 0,6805 - 0,8237 \left( \frac{U}{0,38} \right) + 1,1432 \left( \frac{U}{0,38} \right)^2 \right);$$

$$Q(U) = 3,374 \left( 6,8782 - 11,6968 \left( \frac{U}{0,38} \right) + 5,8186 \left( \frac{U}{0,38} \right)^2 \right).$$

Следующий этап работы — определение СХН на шинах центров питания 6–20/0,4 кВ и 110–220/6–20 кВ. Для этого использованы схемы семи реальных фидеров 0,4 кВ и семи реальных фидеров 6–10 кВ с разной длиной и количеством потребителей, взятых в качестве примера в Московской области. На каждом фидере у потребителя нагрузка задана полученными уравнениями с учетом коэффициентов одновременности [14] и несовпадения максимумов нагрузки [15]. Аналогично предыдущему этапу выполнена аппроксимация различными способами, и для центров питания получены следующие уравнения СХН.

Таблица 2

Расчетная мощность приборов в зависимости от категории

Тип техники	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , квар.
Нагревательная	8,9222	0,0000
Двигательная	0,73370	0,5273
Освещение	1,04040	1,0614
Инверторная и стабилизационная	2,42510	1,7850
Сумма	13,1214	3,3737

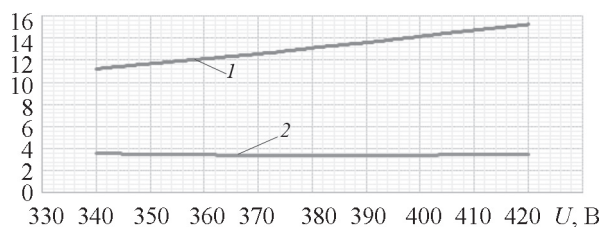


Рис. 1. Полученные СХН: 1 — P, кВт; 2 — Q, квар.

Для уровня напряжения 0,4 кВ:

$$P(U) = 0,3135 \left( -0,243 + 0,952 \left( \frac{U}{0,38} \right) + 0,292 \left( \frac{U}{0,38} \right)^2 \right);$$

$$Q(U) = 0,0726 \left( 7,742 - 13,18 \left( \frac{U}{0,38} \right) + 6,438 \left( \frac{U}{0,38} \right)^2 \right).$$

Для 6–20 кВ:

$$P(U) = 0,07827 \left( -0,1811 + 0,7822 \left( \frac{U}{10} \right) + 0,3989 \left( \frac{U}{10} \right)^2 \right);$$

$$Q(U) = 0,018411 \left( 6 - 10,403 \left( \frac{U}{10} \right) + 5,403 \left( \frac{U}{10} \right)^2 \right).$$

Для 110–220 кВ:

$$P(U) = 3,478 \left( 0,6 - 0,642 \left( \frac{U}{110} \right) + 1,042 \left( \frac{U}{110} \right)^2 \right);$$

$$Q(U) = 2,62 \left( 4,23 - 5,54 \left( \frac{U}{110} \right) + 2,31 \left( \frac{U}{110} \right)^2 \right).$$

Для качественного сравнения полученных кривых, а также типовых СХН [12, с. 94], задаваемых постоянными сопротивлениями, и СХН из [16, с. 26–28], изображенных на рис. 2, рассмотрим углы касательных к этим кривым в характерных точках, а именно, в  $0,8U_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном}}$  и  $1,2U_{\text{ном}}$ .

Полученные значения изменения углов касательных к СХН из [16, с. 26–28] в течение суток составляют:

- для активной мощности — от 8,9 до 13°;
- для реактивной мощности — от 2 до 25,3°.

Вычисленные значения разницы угла касательной к типовой СХН и к рассчитанным в СХН равны:

- для активной мощности — от 21,5 до 22,6°;
- для реактивной мощности — от 54,7 до 100,6°.

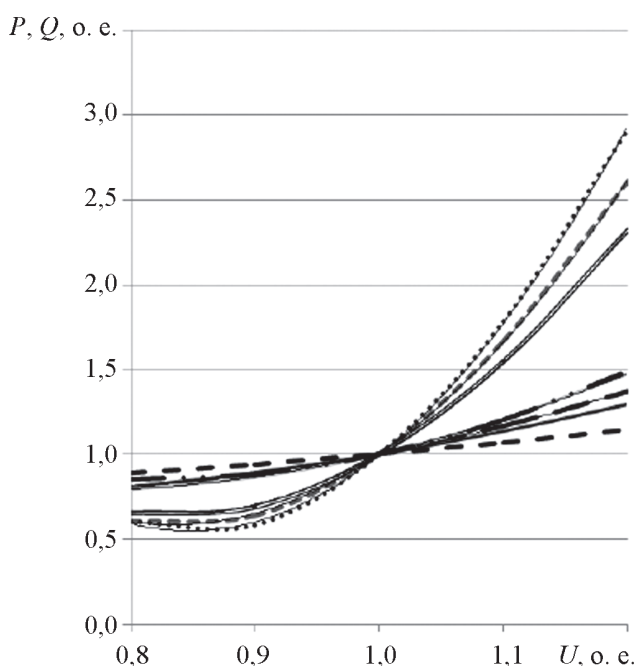


Рис. 2. Расчетные зависимости  $P(U)$  и  $Q(U)$  ВЛ ПС 110 кВ

Таким образом, сравнив типовые СХН с рассчитанными, можно сделать вывод, что изменение состава домашнего электрооборудования повлияло на типовую модель представления СХН коммунально-бытового типа. Несмотря на то, что наклон кривой активной мощности незначительно отличается от наклона типовой СХН, он все равно больше, чем изменения наклона кривой СХН в течение суток [16, с. 29]. Характер кривой зависимости реактивной мощности от напряжения изменился еще больше из-за появления большего количества двигательной нагрузки, освещения, потребляющего реактивную мощность, и выпрямительной техники. Полученные характеристики ведут к изменению чувствительности узлов, перераспределению потоков мощности в сети, а также изменению значений напряжения в узлах относительно существующих типовых характеристик.

### Влияние статических характеристик нагрузки на чувствительность узлов электрических сетей

Для опытно-экспериментального анализа влияния полученных СХН на чувствительность узлов и параметры режима выбрана электрическая сеть с линиями 110 и 220 кВ, а также подстанции, понижающие напряжения до 10 кВ. Девятнадцатиузловая схема замещения взятой электрической сети представлена на рис. 3. Для нее проведен анализ чувствительности узлов при задании нагрузок различными способами, а также при отсутствии нагрузок вовсе.

Способ задания нагрузки в узлах почти не влияет на порядок узлов в ранжированном списке сенсорности, нет дрейфа узлов, это означает, что для данной сети чувствительность узлов в большей степени определяется топологией и параметрами электросетевого оборудования, чем нагрузками. Полное отсутствие нагрузки аналогично приводит только к изменению чувствительности узлов с  $\Delta V$ , близкой к нулю.

Исследование краевых узлов в нормированных списках относительно узлов 5 и 13, которые, вне зависимости от наличия или способа задания нагрузки, не меняют значение  $\Delta V$  (табл. 3), показало, что для взятой сети нормированное значение чувствительности при заданиях нагрузки различными способами уже близки друг к другу, но также завышены, если нагрузки заданы не как СХН.

Незначительное изменение значения нормированной чувствительности связано с тем, что значение, по которому происходило нормирование, было постоянным. Если взять наименьшее по модулю изменяющееся значение  $\Delta V$ , т. е. узел 1, изменение нормированной величины будет более заметным. Таким образом, для взятой электрической сети при заданном уровне нагрузки чувствительность узлов практически не зависит от способа задания нагрузки.

Стоит обратить внимание, что уровень нагрузок задан таков, что с шин бесконечной мощности в рас-

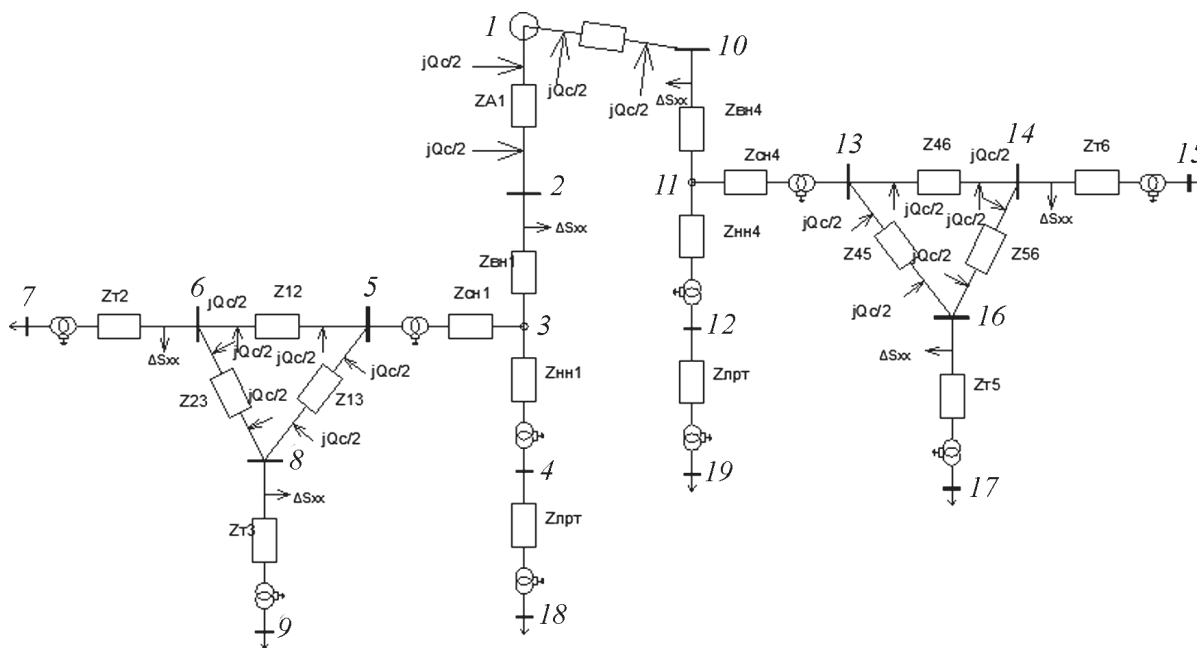


Рис. 3. Схема замещения электрической сети

Таблица 3

Нормированный список сенсорности узлов

Без НГ			Постоянная мощность			Постоянная проводимость			СХН		
Номер узла	$\Delta B$	$\frac{abs(\Delta B_i)}{abs(\Delta B_s)}$	Номер узла	$\Delta B$	$\frac{abs(\Delta B_i)}{abs(\Delta B_s)}$	Номер узла	$\Delta B$	$\frac{abs(\Delta B_i)}{abs(\Delta B_s)}$	Номер узла	$\Delta B$	$\frac{abs(\Delta B_i)}{abs(\Delta B_s)}$
18	-3,4694	49563,4	18	-3,6383	51975,5	18	-3,6584	52263,4	18	-3,6315	51878,20
19	-2,8199	40285,1	19	-2,9578	42253,7	19	-2,9759	42513,7	19	-2,9519	42170,79
6	-0,3567	5096,50	6	-0,3568	5096,50	6	-0,3567	5096,50	6	-0,3568	5096,490
7	3,9193	55989,3	7	3,8565	55092,6	7	3,84730	54960,7	7	3,8594	55134,11
12	9,8791	141129,7	12	9,8791	141129,7	12	9,8790	141129,7	12	9,8791	141129,71
4	10,7377	153395,7	4	10,7377	153395,7	4	10,7377	153395,7	4	10,7377	153395,71

смагриваемые электрические сети выдавалось порядка 230 МВт, при том, что данная мощность передавалась по 3...4 ЛЭП 220 кВ, натуральная мощность каждой из которых составляет в среднем 135 МВт. Можно сделать вывод о целесообразности увеличения мощности нагрузки в 2,25 раза.

Нормированный список, предложенный в табл. 4, для сравнения дополнен режимом с заданием номинальной нагрузки моделью СХН.

Оказалось, что при задании нагрузки моделью постоянной мощности расчет электрического режима разошелся из-за недопустимого снижения напряжения в узле 10 кВ. При задании нагрузки другими моделями, напряжение в том же самом узле сохраняет запас статической устойчивости по напряжению. Как следует из табл. 4, дрейф самых жестких и сенсорных узлов снова не произошел, однако разброс нормированных значений для каждого узла еще больше увеличился.

Следующей изучаемой схемой стала реальная пятидесятиузловая электрическая сеть, содержащая узлы классов напряжения 110 кВ, 220 кВ, 500 кВ, генераторы в узлах 10 кВ и 16 кВ, характеризующаяся высокой неоднородностью.

В ранжированном списке сенсорности произошел дрейф значительного числа узлов при задании СХН новыми моделями, причем свой порядок меняли не только центральные узлы, но и жесткие, а также самые чувствительные узлы — 7 и 8, являющиеся генераторными. Данное обстоятельство указывает на то, что существуют такие крупные электрические сети, для которых задание СХН современными моделями очень важно при предварительном анализе методом обобщенных параметров.

Нормированный список сенсорности относительно узла 3 для семи самых жестких и девяти самых сенсорных узлов дан в табл. 5.

Таблица 4

## Нормированный список сенсорности узлов

СХН			Постоянная проводимость ( $\times 2,25$ )			СХН ( $\times 2,25$ )		
Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$	Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$	Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$
18	-3,63147	51878,2	18	-3,89469	55638,4	18	-4,24178	60596,9
19	-2,95196	42170,8	19	-3,17096	45299,4	19	-3,31348	47335,4
6	-0,35675	5096,5	6	-0,35676	5096,6	6	-0,35676	5096,60
7	3,85939	55134,1	7	3,75725	53675,0	7	3,67227	52461,0
12	9,87908	141129,7	12	9,87908	141129,7	12	9,87908	141129,7
4	10,73770	153395,7	4	10,73770	153395,7	4	10,73770	153395,7

Таблица 5

## Нормированный список сенсорности узлов

Без НГ			Постоянная мощность			Постоянная проводимость			СХН		
Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$	Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$	Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$	Номер узла	$\Delta B$	$abs(\Delta B_i)/abs(\Delta B_s)$
5	-1,07708	107708,0	5	-1,07678	25316,70	5	-1,07677	24983,10	5	-1,07679	26502,90
6	-0,92330	92330,00	6	-0,92330	21708,20	6	-0,92462	21452,90	6	-0,92330	22725,00
47	-0,02259	2258,500	47	-0,01804	424,1000	50	-0,01747	405,3000	47	-0,01804	444,1000
50	-0,01747	1747,000	50	-0,01747	410,7000	33	-0,00910	211,1000	50	-0,01747	430,0000
33	-0,00910	910,0000	13	-0,00991	233,1000	13	-0,00338	78,40000	13	-0,00989	243,5000
13	-0,00178	178,0000	33	-0,00910	214,0000	35	-0,00208	48,30000	33	-0,00910	224,0000
016	-0,00056	56,00000	35	-0,00206	48,30000	37	-0,00180	41,80000	35	-0,00202	49,70000
34	0,01725	1725,000	34	0,01718	403,9000	46	0,03261	756,5000	34	0,01718	423,0000
46	0,03291	3291,000	46	0,03284	772,0000	48	0,04148	962,5000	46	0,03284	808,2000
48	0,04159	4159,000	48	0,04148	975,4000	47	0,08427	1955,100	48	0,04149	1021,200
10	7,53396	753396,0	10	7,53518	177163,7	10	7,53522	174831,0	10	7,53517	185461,6
12	7,53399	753398,8	12	7,53521	177164,6	12	7,53525	174831,9	12	7,53521	185462,5
9	7,53400	753400,0	9	7,53523	177165,0	9	7,53527	174832,2	9	7,53523	185462,9
11	7,53400	753400,0	11	7,53523	177165,0	11	7,53527	174832,2	11	7,53523	185462,9
8	8,60593	860593,4	8	8,60721	202368,8	7	8,60725	199704,1	7	8,60721	211847,3
7	8,60594	860593,5	7	8,60721	202368,8	8	8,60725	199704,1	8	8,60721	211847,4

Для данной сети характерно, что значения нормированной чувствительности самых жестких узлов занижены при задании неполными СХН, в отличие от предыдущих схем. При задании моделью постоянной мощности самые сенсорные узлы меняются местами. В списке жестких узлов также происходит дрейф узлов при различных способах задания моделей нагрузок. Это означает, что для данной схемы нельзя упрощать СХН при анализе электрической сети методом обобщенных параметров.

**Заключение**

Обобщенные параметры позволяют эффективно расставлять устройства автоматического управления режима, что является важной задачей при проектировании активно-адаптивной сети, в составе которой есть

компенсирующие устройства. Кроме того, ранжированный список узлов позволяет получить информацию о наиболее жестких узлах, в которых необходимо ограничивать токи короткого замыкания в первую очередь. Порядок узлов в ранжированном списке сенсорности в большей степени определяется топологией и параметрами электросетевого оборудования, однако исследование крупной пятидесятиузловой электрической сети показывает, что нагрузки тоже влияют на чувствительность узлов, и не только находящихся в середине списка, но и краевых. Задание нагрузки упрощенными моделями приводит к тому, что нормированная чувствительность узлов может быть как завышена для маленьких сетей, так и занижена для больших сетей, относительно ситуации, в которой нагрузки были бы заданы по полной СХН.

Выявлено, что при увеличении нагрузки при задании нагрузки моделью постоянной мощности расчет электрического режима расходится из-за недопустимого снижения напряжения в узлах. Однако при задании нагрузки другими моделями в тех же самых узлах сохраняется запас статической устойчивости по напря-

### Литература

1. **Гамм А.З., Голуб И.И.** Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах. Иркутск: Изд-во ЭИ СО РАН, 1996.

2. **Чемборисова Н.Ш., Буков И.В.** Анализ свойств отдельных узлов в интеллектуальной сети // Интеллектуальные энергосистемы: Труды I Междунар. молодежного форума. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. Т. 1. С. 16—20.

3. **Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш.** Применение методик оценки сенсорности узлов ЭЭС на основании разложения матрицы Якоби // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 6. С. 95—96.

4. **Гамм А.З., Голуб И.И., Бершанский Р.В.** Эффективный метод определения слабых связей в электроэнергетической системе // Электричество. 2010. № 9. С. 31—37.

5. **Лопатин О.А., Чемборисова Н.Ш.** Использование параметров сети и обобщенных показателей режима для расстановки компенсирующих устройств // Электричество. 2011. № 3. С. 10—12.

6. **Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш.** Предварительный анализ параметров сети для расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов // Электричество. 2012. № 8. С. 26—30.

7. **Радилов Т.В.** Разработка методики моделирования установившихся режимов электроэнергетических систем с гибкими электропередачами: дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во НИУ «МЭИ», 2014.

8. **Yuan-Lin C., Chi-Wei C., Chun-Chang L.** Efficient Methods for Identifying Weak Nodes in Electrical Power Networks // Generation, Transmission and Distribution. 1995. V. 142. No. 3. Pp. 317—322.

9. **Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш.** Определение чувствительных узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармоник // Электричество. 2013. № 8. С. 15—20.

10. **Kempton W.** Vehicle-to-grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California. Berkeley: University of California, 2001.

11. **Kydd P.H., Anstrom J.R., Heitmann P.D., Komara K.J., Crouse M.E.** Vehicle-solar-grid Integration: Concept and Construction // IEEE Power Energy Technol. Syst. J. 2016. V. 3. No. 3. Pp. 81—88.

12. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань.** Математические модели узлов нагрузки электроэнер-

жению. Это означает, что, анализируя электрическую сеть методом обобщенных параметров, нельзя упрощать модели СХН. Следует применять полноценную современную модель, чтобы решения, принимаемые на основе анализа, были верными и более эффективными.

### References

1. **Gamm A.Z., Golub I.I.** Sensory i Slabye Mesta v Elektroenergeticheskikh Sistemakh. Irkutsk: Izd-vo SEI SO RAN, 1996. (in Russian).

2. **Chemborisova N.Sh., Bukov I.V.** Analiz Svoystv Otdel'nykh Uzlov v Intellektual'noy Seti. Intellektual'nye Energosistemy: Trudy I Mezhdunar. Molodezhnogo Foruma. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Un-ta, 2013;1:16—20. (in Russian). (in Russian).

3. **Baranov I. L., Chemborisova N.Sh.** Primenenie Metodik Otsenki Sensornosti Uzlov EES na Osnovanii Razlozheniya Matritsy Yakobi. Mezhdunarodnyy Zhurnal Eksperimental'nogo Obrazovaniya. 2012;6:95—96. (in Russian).

4. **Gamm A.Z., Golub I.I., Bershanskiy R.V.** Effektivnyy metod opredeleniya slabykh svyazey v elektroenergeticheskoy sisteme. Elektrichestvo. 2010; 9:31—37. (in Russian).

5. **Lopatin O.A., Chemborisova N.Sh.** Ispol'zovanie Parametrov Seti i Obobshchennykh Pokazateley Rezhima dlya Rasstanovki Kompensiruyushchikh Ustroystv. Elektrichestvo. 2011;3:10—12. (in Russian).

6. **Frolov O.V., Chemborisova N.Sh.** Predvaritel'nyy Analiz Parametrov Seti dlya Rasstanovki Ustroystv Ogranicheniya Tokov Korotkogo Zamykaniya v Setyakh Megapolisov. Elektrichestvo. 2012;8:26—30. (in Russian).

7. **Radilov T.V.** Razrabotka Metodiki Modelirovaniya Ustanovivshikhsya Rezhimov Elektroenergeticheskikh Sistem s Gibkimi Elektroperedachami: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo NIU «MEI», 2014. (in Russian).

8. **Yuan-Lin C., Chi-Wei C., Chun-Chang L.** Efficient Methods for Identifying Weak Nodes in Electrical Power Networks. Generation, Transmission and Distribution. 1995;142;3:317—322.

9. **Baranov I.L., Chemborisova N.Sh.** Opredelenie Chuvstvitel'nykh Uzlov Elektroenergeticheskikh Sistem na Osnovnoy Chastote i Vysshikh Garmonik. Elektrichestvo. 2013;8:15—20. (in Russian).

10. **Kempton W.** Vehicle-to-grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California. Berkeley: University of California, 2001.

11. **Kydd P.H., Anstrom J.R., Heitmann P.D., Komara K.J., Crouse M.E.** Vehicle-solar-grid Integration: Concept and Construction. IEEE Power Energy Technol. Syst. J. 2016;3;3:81—88.

12. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan'.** Matematicheskie Modeli Uzlov Nagruzki Elektro-



гетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2013.

13. **Гребенников В.В.** Источники вторичного электропитания электронной аппаратуры [Электрон. ресурс] [www.portal.tpu.ru:7777/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/students/Tab4/Tab/04\\_Electronics\\_22\\_Power\\_Supply\\_2017\\_v2.pdf](http://www.portal.tpu.ru:7777/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/students/Tab4/Tab/04_Electronics_22_Power_Supply_2017_v2.pdf) (дата обращения 20.07.2020).

14. **СП 256.1325800.2016.** Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа (с Изменениями № 1, 2, 3).

15. **Приказ Минэнерго РФ № 250 от 06.05.2014 г.** «Об утверждении Методических указаний по определению степени загрузки вводимых после строительства объектов электросетевого хозяйства, а также по определению и применению коэффициентов совмещения максимума потребления электрической энергии (мощности) при определении степени загрузки таких объектов» [Электрон. ресурс] <https://base.garant.ru/70670870> (дата обращения 20.07.2020).

16. **Балдов С.В. и др.** Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 6. С. 22—30.

energeticheskikh Sistem, Postroennye na Osnove Faznykh Koordinat. Irkutsk: Izd-vo IrGUPS, 2013. (in Russian).

13. **Grebennikov V.V.** Istochniki Vtorichnogo Elektropitaniya Elektronnoy Apparatury [Elektron. Resurs] [www.portal.tpu.ru:7777/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/students/Tab4/Tab/04\\_Electronics\\_22\\_Power\\_Supply\\_2017\\_v2.pdf](http://www.portal.tpu.ru:7777/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/students/Tab4/Tab/04_Electronics_22_Power_Supply_2017_v2.pdf) (Data Obrashcheniya 20.07.2020). (in Russian).

14. **SP 256.1325800.2016.** Elektroustanovki Zhilykh i Obshchestvennykh Zdanij. Pravila Proektirovaniya i Montazha (s Izmeneniyami № 1, 2, 3). (in Russian).

15. **Prikaz Minenergo RF № 250 ot 06.05.2014 g.** «Ob Utverzhenii Metodicheskikh Ukazaniy po Opredeleniyu Stepeni Zagruzki Vvodimyykh Posle Stroitel'stva Ob'ektov Elektrosetevogo Khozyaystva, a Takzhe po Opredeleniyu i Primeneniyu Koeffitsientov Sovmeshcheniya Maksimuma Potrebleniya Elektricheskoy Energii (Moshchnosti) pri opredelenii Stepeni Zagruzki Takikh Ob'ektov» [Elektron. Resurs] <https://base.garant.ru/70670870> (Data Obrashcheniya 20.07.2020). (in Russian).

16. **Baldov S.V. i dr.** Opredelenie Staticheskikh Kharakteristik Nagruzki po Napryazheniyu v Elektricheskikh Setyakh s Kompleksnoy Nagruzkoy. Vestnik IGEU. 2014;6:22—30. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Буслов Виктор Владимирович** — аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: [BuslovVV@mpei.ru](mailto:BuslovVV@mpei.ru)

**Чемборисова Наиля Шавкатовна** — доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: [Nelya1998@mail.ru](mailto:Nelya1998@mail.ru)

#### Information about authors:

**Buslov Viktor V.** — Ph.D.-student of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: [BuslovVV@mpei.ru](mailto:BuslovVV@mpei.ru)

**Chemborisova Nailia Sh.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: [Nelya1998@mail.ru](mailto:Nelya1998@mail.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 14.08.2020

**The article received to the editor:** 14.08.2020