

* * *

Определение чувствительных узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармониках

БАРАНОВ И.Л., ЧЕМБОРИСОВА Н.Ш.

Для анализа и управления режимами электроэнергетических систем проводится оценка чувствительности (сенсорности) узлов, т.е. реакция их напряжений на изменение реактивной мощности нагрузки. Сопоставлены методики оценки сенсорности рассматриваемых узлов по значениям сальдо-проводимостей и данным сингулярного анализа матриц Якоби в полной, сокращенной и упрощенных (блочной-диагональной, блочной и ленточной) формах. Приведены результаты моделирования распространения высших гармоник напряжения по электрической сети, показывающие значительную несинусоидальность напряжения в наиболее сенсорных узлах.

Ключевые слова: энергосистемы, напряжение, реактивная мощность, матрица Якоби, узловые проводимости, несинусоидальность напряжения, моделирование

Исследование чувствительности узлов является одним из направлений структурного анализа электроэнергетических систем (ЭЭС), использующее оценку реакций напряжений узлов на изменение нагрузок в них. Узлы, в которых при изменении нагрузки на единицу напряжение изменяется сильнее всего, называются чувствительными (сенсорными); характеризующиеся наименьшим изменением напряжения, — жесткими [1]. Интерес представляют именно самые жесткие и сенсорные узлы, так как их реакция на изменение нагрузки достаточно показательна.

The sensitivity of grid nodes, i.e., the response of their voltages to variation of load reactive power, is estimated for analyzing and controlling the operating modes of electric power systems. Techniques used to estimate the sensitivity of the considered nodes from the balance admittances and from data obtained from a singular analysis of Jacobians written in full, reduced, and simplified (block-diagonal, block, and band) forms are compared. The results from simulating the propagation of higher harmonic voltage components over the electric network are presented, which demonstrate that the voltages at the most sensitive nodes have a considerably distorted waveform.

Key words: power systems, voltage, reactive power, Jacobian, nodal admittances, distortion of voltage sine-wave form, simulation

Во многих отечественных энергосистемах наибольшая доля нарушений стандартов по качеству электроэнергии связана с недопустимыми отклонениями напряжений и значительным содержанием высших гармонических составляющих напряжения. Нарушение стандартов качества электроэнергии приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей и повышенному износу оборудования как в сетевых компаниях, так и у потребителей. Для предотвращения подобных явлений многие российские энергокомпании активно работают над созданием систем контроля и управления каче-

ством электроэнергии. Установка стационарных средств контроля качества электроэнергии в сети может быть целесообразна в узлах с наибольшей чувствительностью на основной частоте и высших гармониках [2]. Наиболее показательными при оценке отклонений напряжения являются, например, жесткие и сенсорные узлы, имеющие специфические свойства [3, 4]. Интерес представляет поиск узлов, в которых генерируются высшие гармонические составляющие с наибольшей и наименьшей амплитудой, и узлов, в которых подавление гармоник, образующихся во внешней сети, наиболее эффективно. Для поиска чувствительных узлов на основной частоте и высших гармониках в статье обосновывается и предлагается использование метода сальдо-проводимостей, проводится сопоставление его с другими методами.

Оценка чувствительности узловых напряжений.

Для выявления сенсорных и жестких узлов существует множество способов, наибольшее распространение среди которых получили методики, основанные на анализе матрицы узловых проводимостей, матрицы Якоби, расчетах режимов и статистических исследованиях. (Подробная библиография приведена в [5].)

Для проведения исследования и сопоставления методов использована часть схемы электрической сети Белгородской энергосистемы ОЭС Центра, фрагмент которой представлен на рис. 1. На схеме показан также ретроспективный режим, полученный на основании замеров.

Прямым методом определения зависимости отклонений напряжения в узле от значения реактив-

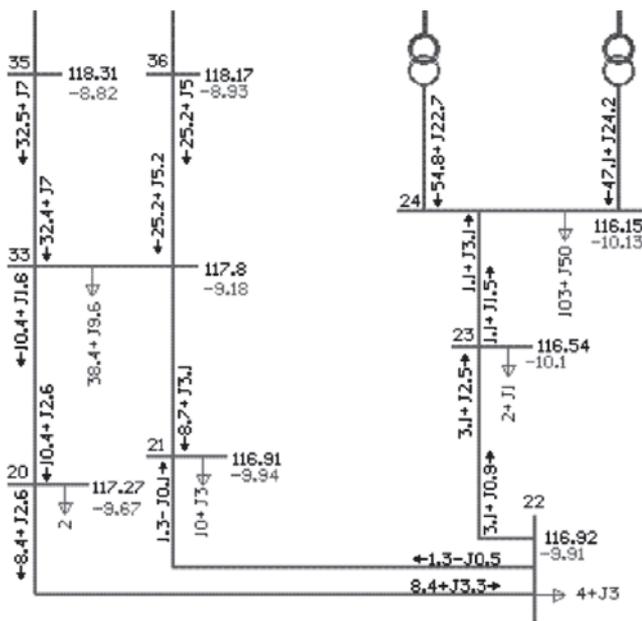


Рис. 1. Схема и режим рассматриваемого фрагмента Белгородской энергосистемы

ной мощности его нагрузки является расчет ряда режимов. При этом стоит отметить необходимость наличия электрической удаленности рассматриваемого узла от генераторных опорных и балансирующих узлов, так как шины бесконечной мощности — это абсолютно жесткий узел, наличие которого может существенно влиять на степень сенсорности соединенных с ним узлов.

Разность реактивных мощностей, необходимых для отклонения напряжения в узле сети 110 кВ на небольшое значение от значения в исходном нормальном установившемся режиме (в данном случае $\pm 2\%$), позволяет ранжировать узлы по степени жесткости (рис. 2).

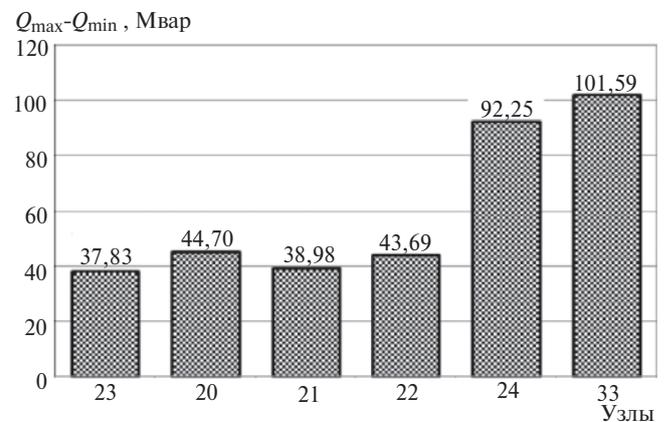


Рис. 2. Разность реактивных мощностей в узлах для крайних рассчитанных режимов

Очевидно, что в наиболее чувствительных узлах 23 и 21 для отклонения напряжения требуется меньшее изменение реактивной мощности нагрузки, а в наиболее жестких 24 и 33 это изменение максимально. Для отклонения модуля напряжения в наиболее жестком узле 33 на то же значение потребуется на 63,76 Мвар больше, чем в самом сенсорном узле 23.

Если же варьировать не напряжения, а реактивную мощность нагрузки в узлах, например от исходного значения ($Q_{\min} = Q_{\text{н.исх}}$) до максимального ($Q_{\max} = Q_{\text{н.исх}} + DQ$), то получается диаграмма, показанная на рис. 3. По оси ординат откладывается разность расчетного изменения напряжения в узле $[U(Q_{\min}) - U(Q_{\max})]$ при изменении реактивной мощности нагрузки от Q_{\min} до Q_{\max} .

Поддержание напряжения в сенсорных узлах требует меньшего значения реактивной мощности. С другой стороны, при необходимости балансирования (потребления и генерации) реактивной мощности при минимальном изменении режима узла по напряжению средства компенсации реактивной мощности следует размещать в жестких узлах.

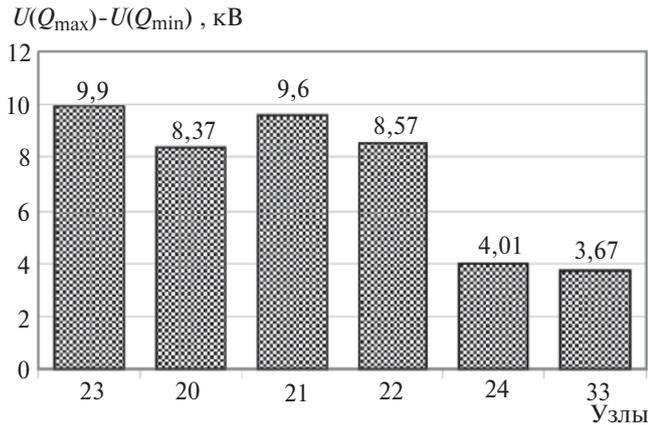


Рис. 3. Разность напряжений в узлах рассматриваемой части сети при изменении реактивной мощности нагрузки

Для анализа чувствительности узловых напряжений k -узловой схемы к изменению нагрузки часто применяется [5, 6] сингулярный анализ обратной матрицы Якоби (определенной для заданного режима в общепринятой форме балансов мощностей в полярной системе координат). Для этого проводится ее разложение на ортогональные матрицы W и V размером $(2k \times 2k)$:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial Q}{\partial U} \\ \frac{\partial P}{\partial d} \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial Q}{\partial U} \\ \frac{\partial P}{\partial d} \end{pmatrix} = (WSV^T)^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial Q}{\partial U} \\ \frac{\partial P}{\partial d} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь $S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_{2k})$ – диагональная матрица сингулярных значений.

Чувствительности фаз s_{di} и модулей s_{Ui} узловых напряжений определяются суммами:

$$\begin{aligned} s_{di} &= \sum_{j=1}^{2k} \frac{v_{ij} w_{ji}^T}{s_j}, \quad i = 1, \dots, k; \\ s_{Ui} &= \sum_{j=1}^{2k} \frac{v_{ij} w_{ji}^T}{s_j}, \quad i = k + 1, \dots, 2k. \end{aligned} \quad (2)$$

Если минимальное сингулярное значение существенно отличается от остальных, то уравнения системы (2) представляются как

$$\begin{aligned} s_{di}^{(1)} &= \frac{v_{ij} w_{ji}^T}{s_j}, \quad i = 1, \dots, k; \\ s_{Ui}^{(1)} &= \frac{v_{ij} w_{ji}^T}{s_j}, \quad i = k + 1, \dots, 2k. \end{aligned} \quad (3)$$

где k – число узлов расчетной схемы.

Время расчета матриц разложения для схем большой размерности может быть достаточно большим. В [7] предлагается уменьшать размерность анализируемой матрицы Якоби до размерности одного из четырех её блоков:

$$J_R = \frac{\partial Q}{\partial U} - \frac{\partial Q}{\partial d} \frac{\partial P}{\partial d}^{-1} \frac{\partial P}{\partial U}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial Q}{\partial U}, \frac{\partial Q}{\partial d}, \frac{\partial P}{\partial d}, \frac{\partial P}{\partial U}$ – подматрицы частных производных активных P и реактивных Q мощностей по модулю U и фазе d узловых напряжений.

Результаты оценки жесткости узлов для полной и сокращенной матриц Якоби в рассмотренном режиме (рис. 1) показаны на рис. 4.

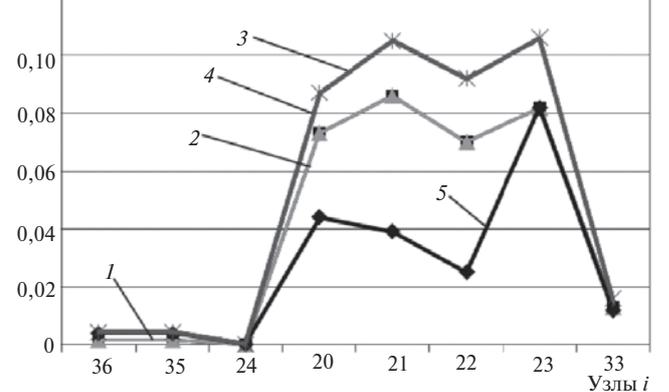


Рис. 4. Сенсорность модулей узловых напряжений в представлении матрицы Якоби: 1 – в полной форме J ; 2 – в сокращенной форме J_R ; 3 – блочно-диагональном представлении J_{BD} ; 4 – блоком J_{QU} ; 5 – диагональю J_D

Для ускорения итерационного решения уравнений установившегося режима выполняются сокращения матрицы Якоби за счет обнуления части её элементов. В контексте решаемой задачи с полученными ранее результатами сопоставлены результаты анализа сокращенных матриц Якоби:

с блочной диагонализацией J_{BD} (в матрице J блоки $\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial Q}{\partial d} = 0$) (рис. 4, линия 3);

одним блоком $J_{QU} = \frac{\partial Q}{\partial U}$ полной матрицы J ($\frac{\partial P}{\partial d} = \frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial Q}{\partial d} = 0$) (рис. 4, линия 4);

ленточным диагональным представлением – матрицей J_D ($J_{Dii} = J_{ii}$; $D_{Dij} = 0, i \neq j$) (рис. 4, линия 5).

Соответствующие числовые значения результатов сингулярного анализа приведены в таблице.

Оценки на основании полной и сокращенной матриц Якоби (характеристики 1 и 2) практически совпадают (см. таблицу), а оценка на основании блочно-диагонального представления J_{BD} (характеристика 3) совпадает с оценкой на основании блока J_{QU} матрицы Якоби (характеристика 4). Во всех случаях наиболее жестким является узел 24, узел 23 – наиболее чувствительным по модулю напряжения.

Применимость методов сингулярного анализа определяется значительной неоднородностью в ЭЭС. Утяжеление режима значительно влияет на локализацию чувствительных элементов, изменение которой называется дрейфом сенсоров или из-

Узлы	Показатели чувствительности при различном представлении исходной матрицы Якоби							
	s_i^{Pd} по полной \mathbf{J}	s_i^{QU} по полной \mathbf{J}	s_i^{QU} по \mathbf{J}_R	s_i^{Pd} по \mathbf{J}_{BD}	s_i^{QU} по \mathbf{J}_{BD}	s_i^{Pd} по \mathbf{J}_D	s_i^{QU} по \mathbf{J}_D	s_i^{QU} по \mathbf{J}_{QU}
36	0,00002	0,00183	0,00183	0,00004	0,00439	0,00003	0,00404	0,00439
35	0,00002	0,00182	0,00182	0,00004	0,00438	0,00003	0,00408	0,00438
24	0,00000	0,00034	0,00034	0,00000	0,00034	0,00000	0,00034	0,00034
20	0,00062	0,07300	0,07300	0,00074	0,08700	0,00038	0,04400	0,08700
21	0,00073	0,08600	0,08600	0,00089	0,10500	0,00034	0,03900	0,10500
22	0,00060	0,07000	0,07000	0,00078	0,09200	0,00021	0,02500	0,09200
23	0,00071	0,08200	0,08200	0,00091	0,10600	0,00000	0,08200	0,10600
33	0,00011	0,01300	0,01300	0,00014	0,01600	0,00010	0,01200	0,01600

менением состава наиболее чувствительных узлов. Ввиду этого наиболее чувствительные узлы могут называться сенсорными переменными [7, 8]. В решаемой задаче необходим метод, для которого не характерно такое явление. Выявление наиболее чувствительных и жестких узлов проводится с использованием диагональных элементов матрицы узловых проводимостей [5]. При этом необходимым условием является значительно больший модуль диагонального элемента строки по сравнению с недиагональными элементами.

Развитием и упрощением такого подхода является метод узловых сальдо-проводимостей DB_i [2, 9–11], являющийся оценочным. Достоинством методов, использующих матрицу узловых проводимостей, является их физическая обоснованность и прямая связь с параметрами режима. При использовании указанной в [5] 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. Сальдо-проводимость определяется из матрицы узловых проводимостей как

$$DB_i = B_{ii} - \operatorname{Im} \sum_{j=1}^L \dot{a} Y_{ij} - \operatorname{Im} \sum_{j=1}^K \dot{a} Y_{ijT}, \quad (5)$$

где B_{ii} – мнимая составляющая диагонального элемента матрицы узловых проводимостей, соответствующего i -му узлу; $\sum_{j=1}^L \dot{a} Y_{ij}$ и $\sum_{j=1}^K \dot{a} Y_{ijT}$ – суммы проводимостей присоединенных к i -му узлу L линий электропередачи и K трансформаторов соответственно [12].

Полученное ранжирование по сальдо-проводимостям (рис. 5) подтвердило чувствительность узла 23 и жесткость узлов 24 и 33.

Взаимосвязь отклонений и несинусоидальности напряжений в узлах ЭЭС. Множество присоединен-

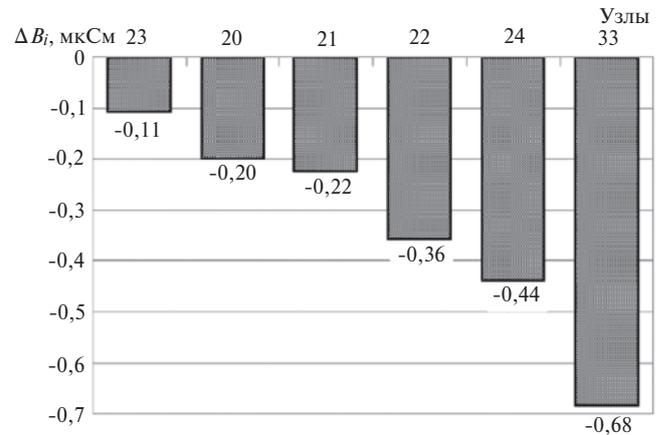


Рис. 5. Ранжирование узлов по сальдо-проводимостям DB_i

ных к узлу ветвей может приводить к большому суммарному значению токов подпитки короткого замыкания (КЗ) в этом узле [11, 12].

Взаимосвязь приращений напряжения, реактивной мощности нагрузки и тока (мощности) трехфазного КЗ приведена в [13, 14]:

$$DQ_i = \frac{dU_i\%}{100\%} S_{ki}. \quad (6)$$

Уравнение (6) получено при $DP_i = 0$ при изменении реактивной мощности в узле на DQ_i . Переходя к приращению напряжения в абсолютных единицах, выделим наиболее чувствительные по модулю напряжения узлы, т.е. узлы с максимальным отношением DU_i / DQ_i :

$$\frac{DU_i}{DQ_i} = \frac{U_{ном}}{S_{ki}} = \frac{U_{номi}}{I_{ki}^{(3)} U_{номi}} = \frac{1}{I_{ki}^{(3)}}, \quad (7)$$

где DQ_i – инъекция реактивной мощности в узле i ; dU_i – размах изменения напряжения в i -м узле от номинального значения (в %); S_{ki} и $I_{ki}^{(3)}$ – мощность и ток трехфазного КЗ в i -м узле соответственно.

Таким образом, в общем случае для узлов с высокой чувствительностью характерны меньшие

токи КЗ. В узлах с противоположными свойствами – в наиболее жестких узлах – ток трехфазного КЗ.

Амплитуда гармонической составляющей напряжения $U^{(n)}$ в точке присоединения нелинейной нагрузки определяется через эквивалентное сопротивление системы Z_{iS} в точке ее присоединения:

$$U^{(n)} = I_i^{(n)} Z_{iS}. \quad (8)$$

При создании расчетных моделей распространения высших гармоник по сети значение комплексного сопротивления Z_{iS} , как правило, заменяется лишь реактивной составляющей эквивалентного шунта X_{cS} [13, 14]. Значение Z_{iS} обратно пропорционально току КЗ I_K в точке его присоединения:

$$|Z_{iS}| = X_{cS} = \frac{U^2}{S_K} = \frac{U_\phi}{I_K^{(3)}}, \quad (9)$$

где U , U_ϕ – междуфазное и фазное напряжения; S_K , $I_K^{(3)}$ – мощность и ток трехфазного КЗ на шинах при номинальном напряжении.

Представим эквивалентную проводимость как

$$Y_{iS} = B_{\text{пр}i} + B_{\text{вн}i} = DB_i + B_{\text{вн}i}, \quad (10)$$

где $B_{\text{пр}i}$ и $B_{\text{вн}i}$ – мнимые составляющие проводимостей присоединенных к узлу ветвей и внешнего эквивалента остальной сети соответственно; DB_i – сальдо-проводимость узла.

Таким образом, при отсутствии резонансных явлений значение сальдо-проводимости DB_i определяет значение эквивалентного сопротивления сети в j -м узле, а это значит, что и амплитуды высших гармонических составляющих при таких условиях будут в соответствии с (8) и (9) выше в узлах, где сальдо-проводимость наименьшая, т.е. в наиболее чувствительных узлах.

Результаты математического моделирования распространения высших гармоник по исследуемой сети. Действующий стандарт по качеству электроэнергии [15] нормирует гармонические составляющие напряжения в сетях до 220 кВ включительно значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U^{(n)}}$ (до $n=40$) и значением суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U , %. Для каждого из них регламентированы нормально допустимый и предельно допустимый уровни. Усредненные на 10-минутных интервалах (непрерывного измерения продолжительностью в одну неделю) 95% измерений не должны превышать нормально допустимый и 100% измерений не должны превышать предельно допустимый уровни.

Расчет режимов энергосистем на высших гармониках проводится в программном комплексе B2 Spice, позволяющем определять параметры режимов электрических схем практически любой сложности [16]. Моделирование сети проводится наиболее простым и наглядным способом с помощью RLC-схем замещения и источников тока рассматриваемых частот.

Среди генерируемых нелинейными нагрузками гармоник наибольшую мощность, как правило, несут 5-я и 7-я составляющие. Вместе с тем, параметры схемы замещения на этих гармониках наиболее близки к параметрам на основной частоте.

Достаточно широко также проводится моделирование режимов 11-й и 13-й гармоник. Подобно 5-й и 7-й гармоникам, они также генерируются наиболее крупными источниками несинусоидальности напряжения в сети – выпрямителями, дуговыми сталеплавильными печами и сварочными установками. Режимы гармоник более высоких порядков, как правило, не моделируются из-за их малого значения и недостаточной для моделирования точности имеющихся исходных данных.

На рис. 6 показаны амплитуды высших гармонических составляющих напряжения ($n=5, 7, 11, 13$) в узлах рассматриваемой сети 110 кВ, возникающих при включении нелинейной нагрузки в узлы 21, 24 и 33.

При расположении источника гармоник в сенсорном узле (рис. 6,а) наблюдаются значительные амплитуды гармоник напряжения в ближайших узлах. При этом в более жестких узлах (24, 33, 35, 36) наблюдаются пониженные амплитуды рассматриваемых гармоник напряжения.

При расположении мощной нелинейной нагрузки в жестком узле (рис. 6,б) амплитуды напряжений гармоник $U_i^{(n)}$ снижаются. Вместе с тем, в чувствительных узлах наблюдаются наивысшие амплитуды гармоник. Именно в этих узлах при наличии нелинейных электроприемников, являющихся источником гармонических составляющих, следует ожидать наибольших амплитуд распространяющихся далее по сети гармоник. Кроме того, в сенсорных узлах снижение на единицу недопустимо больших амплитуд высших гармоник напряжения, образующихся во внешней сети, требует наименьшей установленной мощности фильтрокомпенсирующих устройств. Именно в этих узлах целесообразно проводить фильтрацию высших гармонических составляющих. При размещении задающего тока того же значения в узле 33 подтверждается свойство жестких узлов снижать амплитуды напряжения генерируемых в них гармоник (рис. 6,в).

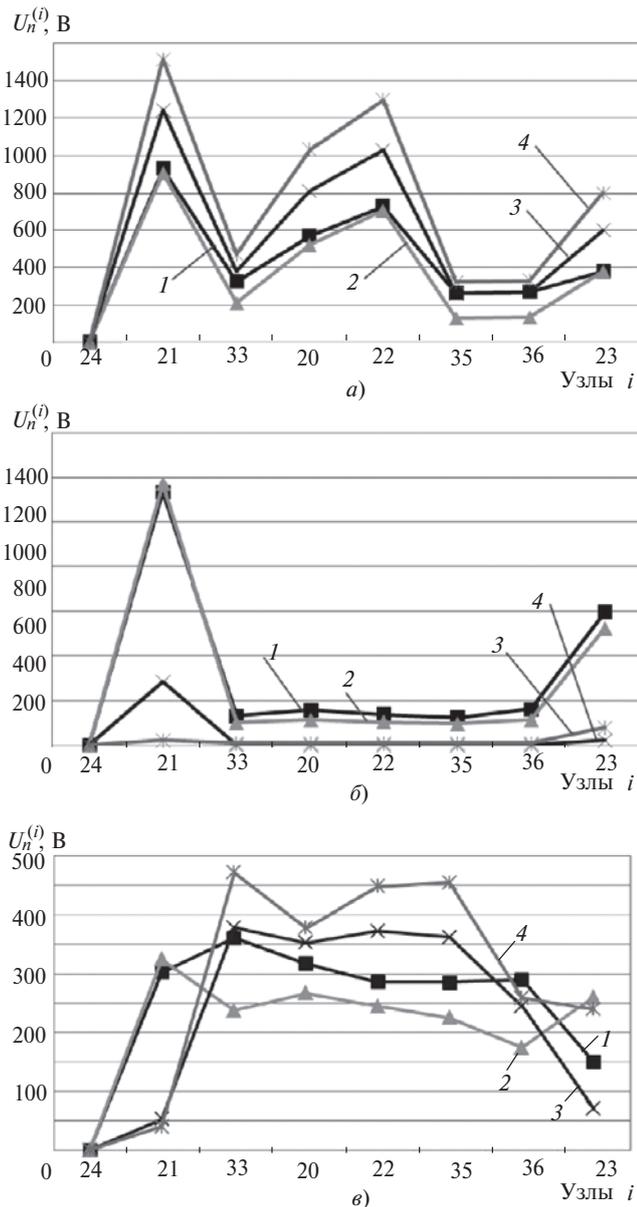


Рис. 6. Напряжения ВГ в узлах сети при расположении источника в сенсорном узле 21 (а), в жестком узле 24 (б) и в жестком узле 33 (в): 1 – $U_i^{(5)}$; 2 – $U_i^{(7)}$; 3 – $U_i^{(11)}$; 4 – $U_i^{(13)}$

Выводы. 1. Методики определения чувствительности узловых напряжений с использованием сингулярного анализа матрицы Якоби и расчетов режимов, а также метод сальдо-проводимостей одинаково выявили сенсоры и наиболее жесткие узлы.

2. Для оценки чувствительности узловых напряжений применим сингулярный анализ блока QU матрицы Якоби, а также формы с блочной и ленточной диагонализацией.

3. Узлы с наибольшей чувствительностью более других подвержены нарушениям по гармоническому составу кривой напряжения, а присоединенная в таких узлах мощная нелинейная нагрузка вызывает наибольшие гармонические искажения в других узлах электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савоськин Н.Е. Надежность электрических систем. — Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2004.
2. Баранов И.Л., Чемборисова Н.Ш. Отклонения и несинусоидальность напряжения в чувствительных узлах ЭЭС. — Научные труды III Международ. научно-технической конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». — Екатеринбург: УрФУ, 2012, т. 2.
3. Фарафонов В.Е., Чемборисова Н.Ш. Способ нормализации уровней напряжения в ЭЭС. — Труды 8-го Международ. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, 16–19 июня 2009 г. — Санкт-Петербург, 2009.
4. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. Использование жестких узлов при нормализации напряжения в сетях мегаполисов. — Труды 9-го Международ. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, 13–16 сентября 2011 г. — Санкт-Петербург: Изд-во ЛЭТИ, 2011.
5. Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З. и др. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. — Новосибирск: Наука, 1999.
6. Kundur P. Power System Stability and Control. — New-York: McGraw-Hill, 2006.
7. Gao B., Morison G.K., Kundur P. Voltage stability evaluation using modal analysis. — Transactions on Power Systems, November 1992, vol. 7, № 4.
8. Болоев Е.В. Обнаружение сенсорных и слабых мест в ЭЭС линейными методами вероятностного потокораспределения. — Научные труды III Международ. научно-технической конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». — Екатеринбург: УрФУ, 2012, т. 1.
9. Лопатин О.А., Чемборисова Н.Ш. Использование параметров сети и обобщенных показателей режима для расстановки компенсирующих устройств. — Электричество, 2011, № 3.
10. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. Повышение эффективности расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов. — Новое в российской электроэнергетике, 2011, № 4.
11. Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш., Мулиц Н.С. Формализованная расстановка устройств управления режимами в сетях мегаполисов. — Электричество, 2012, № 5.
12. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2000.
13. Ежков В.В., Зарудский Г.К., Зуев Э.Н. и др. Электрические системы в примерах и иллюстрациях: Учебное пос. для электроэнерг. спец./Под ред. В.А. Строева. — М.: Высшая школа, 1999.
14. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии/Под ред. Ю.В. Шарова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
15. ГОСТ Р 54149—2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2012.
16. Хайнеман Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем. — М.: ДМК Пресс, 2005.

[23.04.13]

Авторы: Баранов Игорь Леонидович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ) в 2011 г. Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».

Чемборисова Наиля Шавкатовна окончила в 1974 г. Ташкентский политехнический институт по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2004 г. защитила докторскую диссертацию «Обобщенные показатели в задачах управления установившимися режимами ЭЭС» в ИСЭМ СО РАН. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».