

УДК 621.311.1

DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4817

Шифр специальности ВАК: 2.4.3

О влиянии внешней электрической сети на параметры режима узла нагрузки

Н.Л. Бацева[✉], А.К. Жуйков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]batsevan@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Одним из наиболее перспективных способов определения статических характеристик нагрузки по напряжению, отражающих зависимость активной и реактивной мощностей нагрузки от напряжения в узле нагрузки, является пассивный эксперимент, при проведении которого становится заметной реакция внешней по отношению к узлу нагрузки электрической сети. В настоящее время исследовательская задача оценки степени влияния реакции сети на параметры режима до конца не решена, что значительно усложняет процедуру статистической обработки результатов пассивного эксперимента. По этой причине анализ влияния реакции сети на режимные параметры, а также выявление способов уменьшения такого влияния являются актуальными задачами. **Цель.** Количественная оценка влияния реакции сети производится с помощью коэффициентов реакции сети по активной и реактивной мощностям, поэтому целью статьи является анализ изменения величины коэффициентов реакции сети в зависимости от параметров схемы и режима, что позволит выявить способы уменьшения влияния реакции сети. **Методы.** Для анализа использованы преобразования матрицы Якоби с представлением параметров режима и сетевых элементов в виде комплексных чисел. **Результаты.** Получены аналитические выражения, отражающие зависимости коэффициентов реакции сети по активной и реактивной мощностям нагрузки от схемных и режимных параметров в общем случае. **Выводы.** На основании полученных аналитических и графических зависимостей определены мероприятия по снижению влияния реакции сети на режимные параметры узла нагрузки, полученные в пассивном эксперименте. Продemonстрировано, что увеличение электрического сопротивления между узлами питания и подключения нагрузки приводит к увеличению влияния реакции сети, как по активной, так и по реактивной мощности. Предложен практический метод расчёта величины реакции сети. Определены дальнейшие направления по повышению точности оценивания влияния реакции сети с использованием текущих параметров электрического режима и схемы.

Ключевые слова: статические характеристики нагрузки по напряжению, пассивный эксперимент, коэффициенты реакции сети, обратная матрица Якоби, параметры схемы и режима

Для цитирования: Бацева Н.Л., Жуйков А.К. О влиянии внешней электрической сети на параметры режима узла нагрузки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4817

UDC 621.311.1

DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4817

External electric grid impact on mode parameters at a load node

N.L. Batseva[✉], A.K. Zhuykov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]batsevan@tpu.ru

Abstract. Relevance. A passive experiment is one of the advanced techniques for a static load voltage characteristic identification. External electric grid impact on mode parameters at a load node – a grid response – sophisticates the statistical processing of passive experiment results significantly. For this reason, the analysis of a grid response impact and detection of its

reduction are relevant problems. **Aim.** Quantitative evaluation of a grid response impact is produced by grid response active and reactive power coefficients; therefore the aim of this paper is to analyze the variance of grid response coefficients in relation on scheme and mode parameters. This allows finding techniques of reducing a grid response impact. **Methods.** Transformations of the Jacobi matrix, when scheme and mode parameters are formed as complex numbers. **Results.** The authors have proposed the analytic expressions, reproducing dependences of grid response coefficients on scheme and mode parameters in general variants. **Conclusions.** Based on the analytic and schematic dependencies the authors determined the measures for reducing a grid response impact. It is demonstrated that with increase in the impedance among power and load nodes, a grid response impact grows as well by active and reactive power. The authors proposed the practical technique for calculating a grid response impact. The perspective trends for improving accuracy in identifying a grid response impact using current mode and scheme parameters are defined.

Keywords: static load voltage characteristics, passive experiment, grid response coefficients, inverse Jacobi matrix, mode and scheme parameters

For citation: Batseva N.L., Zhuykov A.K. External electric grid impact on mode parameters at a load node. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4817

Введение

Применение результатов пассивного эксперимента для определения статических характеристик нагрузки по напряжению (СХН), несмотря на свою перспективность, связанную с отсутствием вмешательства в текущий режим работы энергосистемы, затруднено. Эти затруднения связаны с несколькими факторами [1–3], главным из которых является влияние внешней электрической сети (реакции сети) на параметры режима в узле нагрузки [4, 5].

На рис. 1 представлен сравнительный анализ статистической обработки результатов пассивного эксперимента при определении СХН для двух случаев: реакция сети практически не проявляется (рис. 1, а); реакция сети искажает эллипс рассеивания, соответствующий измерениям параметров режима в узле нагрузки (рис. 1, б). Эллипсы рассеивания представлены в координатах (ΔU ; ΔP), что соответствует началу координат в точке математического ожидания.

На рис. 1, а эффекта реакции сети не наблюдается, так как изменения нагрузки, которые могли бы вызвать изменение напряжения, обусловленное падением напряжения на сопротивлении связи, минимальны [6, 7]. Такая картина наблюдается в случае отсутствия влияния реакции сети в пассивном эксперименте, а также в случае активного эксперимента, когда нагрузка находится в одном и том же состоянии, а напряжение питающего узла изменяется в максимально широких пределах [8, 9]. Искажение эллипса рассеивания на рис. 1, б обусловлено изменением мощности нагрузки. Такие изменения при проведении пассивного эксперимента часто носят случайный характер [10–13]. Из-за наличия сопротивления между узлом нагрузки и внешней сетью увеличиваются потери напряжения, сопоставимые с изменениями напряжения питающего узла, вызванными не колебаниями нагрузки.

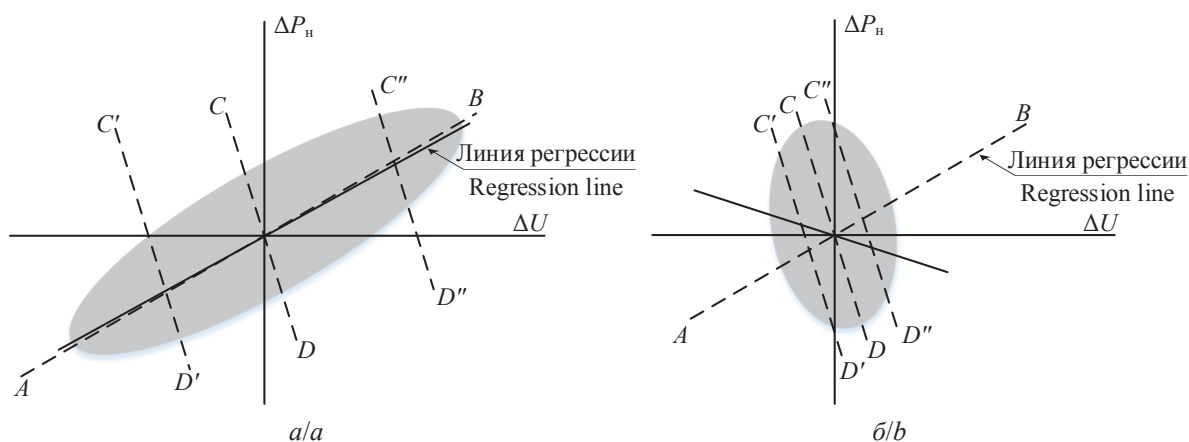


Рис. 1. Влияние реакции сети: а) условия электроснабжения узла нагрузки изменяются сильно, а параметры нагрузки изменяются слабо; б) условия электроснабжения узла нагрузки изменяются слабо, а параметры нагрузки сильно

Fig. 1. Impact of a grid response: а) power supply conditions at a load node change intensely, but load parameters change slightly; б) power supply conditions at a load node change slightly, but load parameters change intensely

Линии CD , $C'D'$ и $C''D''$ соответствуют изменениям нагрузки при постоянных, но различных условиях внешнего электроснабжения. Если бы влияние реакции сети было минимальным, линии проходили бы вертикально [4].

В случае, представленном на рис. 1, a , линейная СХН AB практически совпадает с линией регрессии (ЛР). Как показано в [3, 4, 14, 15], именно на основании этой особенности базируется механизм обработки результатов пассивного эксперимента в случае отсутствия или слабого влияния реакции сети: линейная СХН соответствует линии регрессии P на U в случае активной мощности и Q на U – в случае реактивной мощности.

Из-за значительного влияния реакции сети на рис. 1, b эллипс рассеивания изменяется таким образом, что ЛР перестаёт совпадать с линейной СХН AB . Из этого следует, что учёт реакции сети предполагает более сложную статистическую обработку, чем простое построение ЛР [4, 14, 15]. Обычно обработка сводится к усреднению телеметрии, относящейся к разным условиям электроснабжения, соответствующим линиям CD , $C'D'$ и $C''D''$ [4].

Предлагаемые в работах [4, 16–19] способы учёта влияния реакции сети позволяют с помощью преобразования измерений и/или параметров распределения измерений, полученных при проведении пассивного эксперимента, учесть влияние реакции сети в итоговой СХН. Однако для использования данных способов необходима количественная оценка влияния реакции сети. В работах [4, 16, 17] такая оценка проводится с помощью постоянных величин – коэффициентов реакции сети по активной k_P и реактивной k_Q мощностям нагрузки. Основная проблема с количественной оценкой по коэффициентам заключается в их вычислении и последующем выводе о необходимости учёта влияния реакции сети при вычислении коэффициентов СХН.

Таким образом, для использования методов учёта влияния реакции сети при обработке результатов пассивного эксперимента с целью определения СХН по напряжению актуальной является задача количественной оценки коэффициентов реакции сети. В статье рассматривается случай электроснабжения узла нагрузки от нескольких питающих узлов.

Материалы и методы

Случай электроснабжения узла нагрузки от нескольких питающих узлов

В работах [16, 19] описан простейший случай электроснабжения узла нагрузки, когда нагрузочный узел получает электроэнергию от одного питающего узла и по одной связи. Однако определение коэффициентов реакции сети для реальных схем электроснабжения по этому способу потребует предварительных вычислений, связанных с рас-

чётом эквивалентного сопротивления, возможного питания нагрузки от нескольких узлов, наличия в схеме трансформаторных связей. Кроме того, в схемах замещения реальных энергосистем появится необходимость учёта смешанного характера нагрузки и комплексных сопротивлений сетевых элементов.

На рис. 2 приведена схема электроснабжения узла нагрузки.

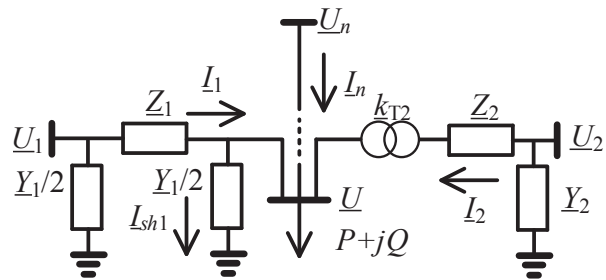


Рис. 2. Схема электроснабжения узла нагрузки
Fig. 2. Power supply scheme of a load node

Исследуемая нагрузка с комплексным напряжением $\underline{U}$ запитана от шин с комплексными напряжениями $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_n$, где n – число шин, питающих узел нагрузки. Связи узла нагрузки с питающими узлами представлены комплексными схемами замещения, учитывающими наличие проводимостей на землю: П-образной схемой замещения линий и Г-образной схемой замещения трансформаторов [20, 21].

Из-за реакции сети при изменении комплексной мощности нагрузки $\underline{S}=P+jQ$ изменяется падение напряжения на n связях узла нагрузки с питающими узлами, что приведёт к изменению комплексного напряжения $\underline{U}$ в узле нагрузки.

Для схемы (рис. 2) напряжение в узле нагрузки $\underline{U}$ и величина потребляемой мощности $\underline{S}$ связаны отношением (1) [21]:

$$\underline{S}(\underline{U}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{Ti}^I (\underline{U}_i - k_{Ti}^U \underline{U})^* \underline{U}}{\underline{Z}_i^*} - \underline{Y}_i^* \underline{U}^* \underline{U} \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{Ti}^I \underline{U}_i^* \underline{U} - k_{Ti}^I k_{Ti}^U \underline{U}^2}{R_i - jX_i} - (G_i + jB_i) \underline{U}^2 \right), \quad (1)$$

где знак $*$ – комплексное сопряжение; k_{Ti}^U – коэффициент трансформации i -й связи по напряжению при переходе со стороны начала i -й связи на сторону узла нагрузки (для линии $k_{Ti}^U = 1$); k_{Ti}^I – коэффициент трансформации i -й связи по току при переходе со стороны начала i -й связи на сторону узла нагрузки (для линии $k_{Ti}^I = 1$); $\underline{Z}_i = R_i + jX_i$ – ком-

плексное сопротивление i -й связи с питающим узлом, приведённое к номинальному напряжению узла нагрузки; $\underline{Y}_i = G_i + jB_i$ – комплексная проводимость на землю i -й связи с питающим узлом, замыкающая к узлу нагрузки и приведённая к номинальному напряжению узла нагрузки.

Из-за наличия комплексных чисел в выражении (1) вычисление напрямую производных $\left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_{P=P_m}$ и

$\left. \frac{\partial U}{\partial Q} \right|_{Q=Q_m}$, соответствующих коэффициентам k_P и

k_Q , представляет трудоёмкую операцию. Для её упрощения можно перейти к вычислению производ-

ных активной $\left. \frac{\partial P}{\partial U} \right|_{U=U_m}$ и реактивной $\left. \frac{\partial Q}{\partial U} \right|_{U=U_m}$

мощностей по напряжению, упростив выражение (1) и выделив действительную и мнимую части.

Учитывая, что $\underline{U} = U \cdot e^{j\delta}$ и $\underline{U}_i = U_i \cdot e^{j\delta_i}$, где δ , δ_i – углы при напряжениях узла нагрузки $\underline{U}$ и узла начала i -й связи $\underline{U}_i$ относительно базисно-балансирующего узла, соотношение (1) можно преобразовать в выражение (2):

$$\begin{aligned} \underline{S}(U) &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{Ti}^I U_i e^{-j\delta_i} U e^{j\delta} - k_{Ti}^U U_i^2 U^2}{R_i - jX_i} - (G_i + jB_i) U^2 \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{Ti}^I U_i U \left(R_i \cos(\delta_i - \delta) - X_i \sin(\delta_i - \delta) \right) - R_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U^2}{R_i^2 + X_i^2} - G_i U^2 \right) + \\ &+ j \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{Ti}^I U_i U \left(X_i \cos(\delta_i - \delta) + R_i \sin(\delta_i - \delta) \right) - X_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U^2}{R_i^2 + X_i^2} - B_i U^2 \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Из выражения (2) следуют выражения (3) и (4) для зависимостей $P(U)$ и $Q(U)$ соответственно:

$$P(U) = \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U \left(R_i \cos(\delta_i - \delta) - X_i \sin(\delta_i - \delta) \right) - R_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U^2}{R_i^2 + X_i^2} - \sum_{i=1}^n G_i U^2, \quad (3)$$

$$Q(U) = \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U \left(X_i \cos(\delta_i - \delta) + R_i \sin(\delta_i - \delta) \right) - X_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U^2}{R_i^2 + X_i^2} - \sum_{i=1}^n B_i U^2. \quad (4)$$

Тогда значения производных $\left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m}$,

$\left. \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m}$, $\left. \frac{\partial P}{\partial U} \right|_{U=U_m}$ и $\left. \frac{\partial Q}{\partial U} \right|_{U=U_m}$ на основании (3)

и (4) в рабочих точках, соответствующих математическим ожиданиям модуля напряжения U_m и угла δ_m , будут соответствовать выражениям (5)–(9):

$$\left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} = \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m \left(R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m) \right)}{R_i^2 + X_i^2}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P}{\partial U} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} &= \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(R_i \cos(\delta_i - \delta_m) - X_i \sin(\delta_i - \delta_m) \right) - 2R_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - 2 \sum_{i=1}^n G_i U_m; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} &= \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m \left(X_i \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cos(\delta_i - \delta_m) \right)}{R_i^2 + X_i^2}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial Q}{\partial U} \right|_{U=U_m} &= \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(X_i \cos(\delta_i - \delta_m) + R_i \sin(\delta_i - \delta_m) \right) - 2X_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - 2 \sum_{i=1}^n B_i U_m. \end{aligned} \quad (8)$$

Матрица Якоби $\mathbf{J}$ при $U=U_m$ и угла $\delta=\delta_m$ примет вид (13) [22]:

$$\mathbf{J} \Big|_{\delta=\delta_m, U=U_m} = \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} & \left. \frac{\partial P}{\partial U} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} \\ \left. \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} & \left. \frac{\partial Q}{\partial U} \right|_{\delta=\delta_m, U=U_m} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Учитывая, что $k_P = \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_{P=P_m, Q=Q_m}$ и $k_Q = \left. \frac{\partial U}{\partial Q} \right|_{P=P_m, Q=Q_m}$, и

на основании выражений (5)–(9) для нахождения коэффициентов k_P и k_Q необходимо вычислить элементы обратной матрицы Якоби $\mathbf{J}^{-1}$ по формуле (10):

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{\mathbf{J}_A^T}{|\mathbf{J}|} = \frac{\begin{pmatrix} \frac{\partial Q}{\partial U} & -\frac{\partial P}{\partial U} \\ -\frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial \delta} \end{pmatrix}}{\frac{\partial P}{\partial \delta} \frac{\partial Q}{\partial U} - \frac{\partial P}{\partial U} \frac{\partial Q}{\partial \delta}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial Q} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициенты $k_P = \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_{P=P_m, Q=Q_m}$ и

$k_Q = \left. \frac{\partial U}{\partial Q} \right|_{P=P_m, Q=Q_m}$ могут быть вычислены по выражениям (11) и (12):

$$k_P = \frac{\partial U}{\partial P} \Big|_{P=P_m, Q=Q_m} = \frac{\frac{\partial Q}{\partial \delta}}{\frac{\partial P}{\partial \delta} \frac{\partial Q}{\partial U} - \frac{\partial P}{\partial U} \frac{\partial Q}{\partial \delta}} \Big|_{U=U_m, \delta=\delta_m} =$$

$$= \frac{-\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (X_i \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2}}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \times \right.}$$

$$\times \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(\frac{X_i \cos(\delta_i - \delta_m) +}{R_i^2 + X_i^2} \right) - 2X_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - \right.}$$

$$\left. - 2 \sum_{i=1}^n B_i U_m \right] - \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(\frac{R_i \cos(\delta_i - \delta_m) -}{R_i^2 + X_i^2} \right) - 2R_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - \right.}$$

$$\left. - 2 \sum_{i=1}^n G_i U_m \right] \times \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (X_i \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right] \quad (11)$$

$$k_Q = \frac{\partial U}{\partial Q} \Big|_{P=P_m, Q=Q_m} = \frac{\frac{\partial P}{\partial \delta}}{\frac{\partial P}{\partial \delta} \frac{\partial Q}{\partial U} - \frac{\partial P}{\partial U} \frac{\partial Q}{\partial \delta}} \Big|_{U=U_m, \delta=\delta_m} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2}}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \times \right.}$$

$$\times \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(\frac{X_i \cos(\delta_i - \delta_m) +}{R_i^2 + X_i^2} \right) - 2X_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - \right.}$$

$$\left. - 2 \sum_{i=1}^n B_i U_m \right] - \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i \left(\frac{R_i \cos(\delta_i - \delta_m) -}{R_i^2 + X_i^2} \right) - 2R_i k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - \right.}$$

$$\left. - 2 \sum_{i=1}^n G_i U_m \right] \times \left[\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I U_i U_m (X_i \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right] \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) позволяют проанализировать зависимости коэффициентов реакции сети от схемных и режимных параметров, хотя на практике их удобно определять путём вычисления отношений приращений напряжения в узле нагрузки, возникающих при малых приращениях мощности в узле нагрузки [18, 22].

Результаты исследования

Примем, что число связей, осуществляющих питание узла нагрузки $n=1$, и коэффициент трансформации связи, питающей узел нагрузки, $k_{Ti}=1$. Тогда выражения для k_P и k_Q после всех преобразований примут вид (13) и (14):

$$k_P = \frac{R_i \cos(\delta_i - \delta_m) - X_i \sin(\delta_i - \delta_m)}{\left(k_{Ti}^I U_i - 2U_m (1 + B_i X_i + G_i R_i) \cos(\delta_i - \delta_m) - \right.}$$

$$\left. - 2U_m (B_i R_i - G_i X_i) \sin(\delta_i - \delta_m) \right)} =$$

$$= \frac{R_i \cos(\delta_i - \delta_m) - X_i \sin(\delta_i - \delta_m)}{\left(U_i - 2U_m (1 + B_i X_i + G_i R_i) \cos(\delta_i - \delta_m) - \right.}$$

$$\left. - 2U_m (B_i R_i - G_i X_i) \sin(\delta_i - \delta_m) \right)} \quad (13)$$

$$k_Q = \frac{R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m)}{\left(k_{Ti}^I U_i - 2U_m (1 + B_i X_i + G_i R_i) \cos(\delta_i - \delta_m) - \right.}$$

$$\left. - 2U_m (B_i R_i - G_i X_i) \sin(\delta_i - \delta_m) \right)} =$$

$$= \frac{R_i \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cos(\delta_i - \delta_m)}{\left(U_i - 2U_m (1 + B_i X_i + G_i R_i) \cos(\delta_i - \delta_m) - \right.}$$

$$\left. - 2U_m (B_i R_i - G_i X_i) \sin(\delta_i - \delta_m) \right)} \quad (14)$$

Из выражений (13) и (14) следует, что коэффициенты реакции сети зависят от параметров сетевых элементов: k_{Ti} – коэффициента трансформации i -й связи; R_i , X_i – активного и реактивного сопротивлений i -й связи с питающим узлом, приведённых к стороне высокого напряжения; G_i , B_i – замыкающих к узлу нагрузки активной и реактивной проводимостей на землю i -й связи с питающим узлом, а также от режимных параметров: U_i – модуля напряжения i -го питающего узла; U_m – модуля рабочего напряжения узла нагрузки; $\delta_i - \delta_m$ – разности электрических углов напряжения i -го питающего узла и рабочего напряжения узла нагрузки.

Влияние параметров сетевых элементов на величину коэффициентов

При проведении анализа влияния параметров сетевых элементов на величину коэффициентов k_P и k_Q в качестве переменной по оси абсцисс отложим реактивное сопротивление сетевого элемента X . Оценка влияния активного сопротивления R и поперечных проводимостей активной G и реактивной B будет производиться для зависимостей $k_P(X)$ и $k_Q(X)$ при различных значениях указанных параметров.

Режимные параметры: модуль напряжения питающего узла $U=230$ кВ; модуль рабочего напряжения узла нагрузки $U_m=220$ кВ; разность электрических углов комплексного напряжения питающего узла и комплексного рабочего напряжения узла нагрузки $\delta_i - \delta_m = 10^\circ$. Указанные параметры соответствуют передаче мощности от питающего узла к узлу нагрузки.

На рис. 3, а, б представлены графики зависимостей $k_P(X)$ и $k_Q(X)$ при $R=0$, $G=0$ и различных значениях B .

Из графиков следует:

1. При $B < 0$ (ёмкостная проводимость) точки разрыва для коэффициентов k_P и k_Q смещаются в область положительных значений X .
2. При $B > 0$ (индуктивная проводимость) точки разрыва для коэффициентов k_P и k_Q смещаются в область отрицательных значений X . Так как большинство сетевых элементов, питающих узел нагрузки, обладают положительным реактивным сопротивлением [23], далее область значений $X < 0$ исключается из рассмотрения.
3. При $B=0$ значения k_P и k_Q убывают с ростом X .
4. При $X > 0$ до точек разрыва функций $k_P(X)$ и $k_Q(X)$ (точки, в которых значения k_P и k_Q обращаются в бесконечность) при увеличении B наблюдается уменьшение k_P и k_Q .

5. Чем больше значение модуля $|B|$, тем ближе точки разрыва k_P и k_Q к оси ординат. Физически это означает, что с ростом величины реактивной проводимости величина напряжения в узле нагрузки будет значительно меняться при незначительном изменении мощности нагрузки и отсутствии сопротивления, что соответствует протеканию зарядной мощности и токов намагничивания сетевых элементов, питающих узел нагрузки.
6. При изменении X коэффициент k_Q изменяется на величину большую, чем коэффициент k_P . Это обусловлено влиянием реактивной проводимости на протекание перетоков реактивной мощности.

На рис. 4 а, б представлены графики зависимостей $k_P(X)$ и $k_Q(X)$ при $R=0$, $B=0$ и различных значениях G .

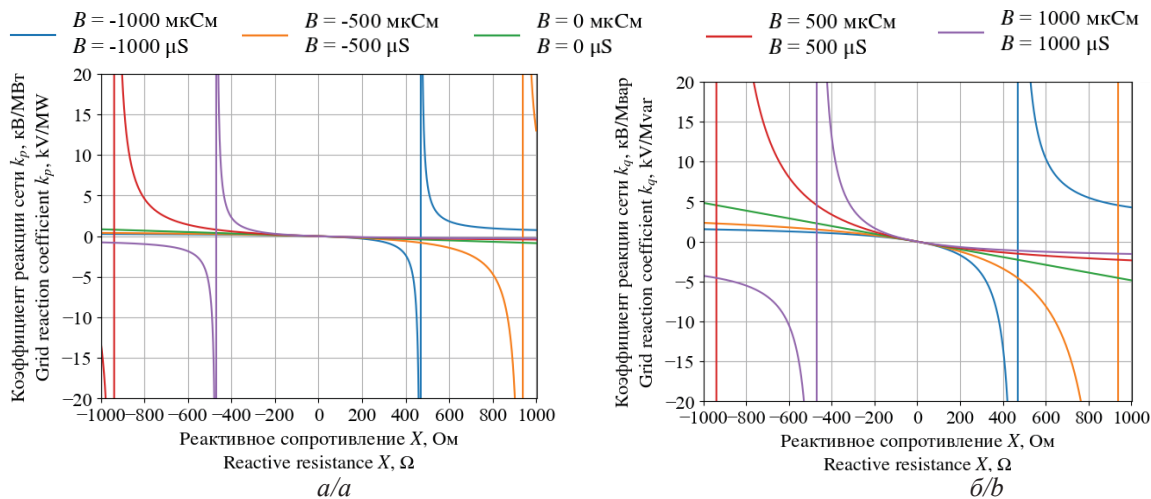


Рис. 3. Графики зависимостей: а) $k_P(X)$; б) $k_Q(X)$ при $R=0$, $G=0$ и $B=\text{var}$

Fig. 3. Dependence graph: а) $k_P(X)$; б) $k_Q(X)$ if $R=0$, $G=0$ and $B=\text{var}$

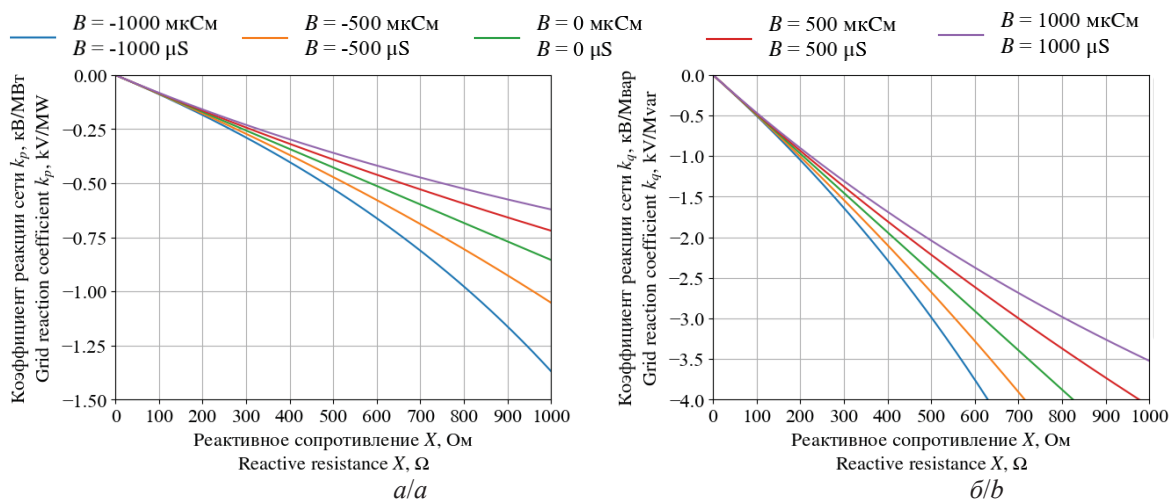


Рис. 4. Графики зависимостей: а) $k_P(X)$; б) $k_Q(X)$ при $R=0$, $B=0$ и $G=\text{var}$

Fig. 4. Dependence graph: а) $k_P(X)$; б) $k_Q(X)$ if $R=0$, $B=0$ and $G=\text{var}$

При любом значении G значения k_P и k_Q убывают с увеличением X . При этом большее значение G соответствует меньшим по модулю значениям k_P и k_Q . Как и в случае с реактивной проводимостью значения k_Q больше по модулю соответствующих значений k_P .

На рис. 5, а, б представлены графики зависимостей $k_P(R)$ и $k_Q(R)$ при $X=0$, $G=0$ и различных значениях B .

С ростом R возрастает значение k_Q , в то же время k_P убывает. Рост B приводит к увеличению по модулю k_P и k_Q . Положительное значение k_Q при заданных режимных параметрах соответствует увеличению напряжения в узле нагрузки при увеличении реактивной мощности нагрузки.

На рис. 6, а, б представлены графики зависимостей $k_P(R)$ и $k_Q(R)$ при $X=0$, $B=0$ и различных значениях G .

С ростом R k_P убывает. Стоит отметить, что поведение графиков на рис. 6 соответствует поведению графиков на рис. 3. Однако из графиков 6, б видно, что рост R приводит к увеличению коэффициента k_Q при заданных режимных параметрах.

Из представленных на рис. 3–6 графиков можно сделать вывод, что основным способом снижения коэффициента реакции сети является уменьшение полного сопротивления связи, осуществляющей питание узла нагрузки. При этом компенсация реактивной мощности (увеличение/уменьшение проводимости в узле нагрузки) не оказывает однозначного влияния на их величину.

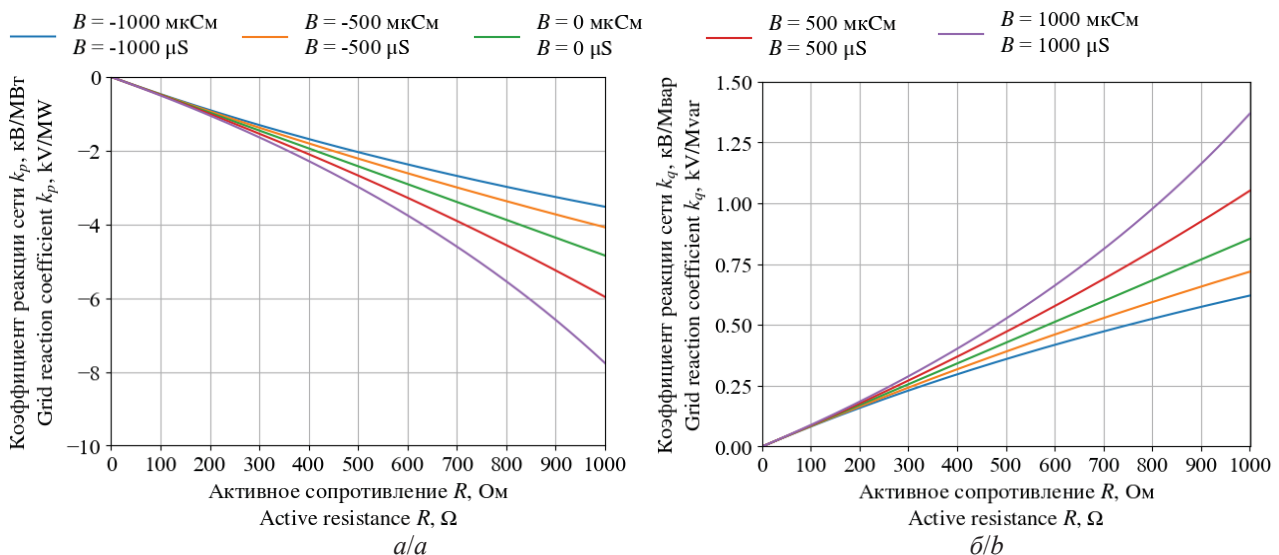


Рис. 5. Графики зависимостей: а) $k_P(R)$; б) $k_Q(R)$ при $X=0$, $G=0$ и $B=var$

Fig. 5. Dependence graph: a) $k_P(R)$; b) $k_Q(R)$ if $X=0$, $G=0$ and $B=var$

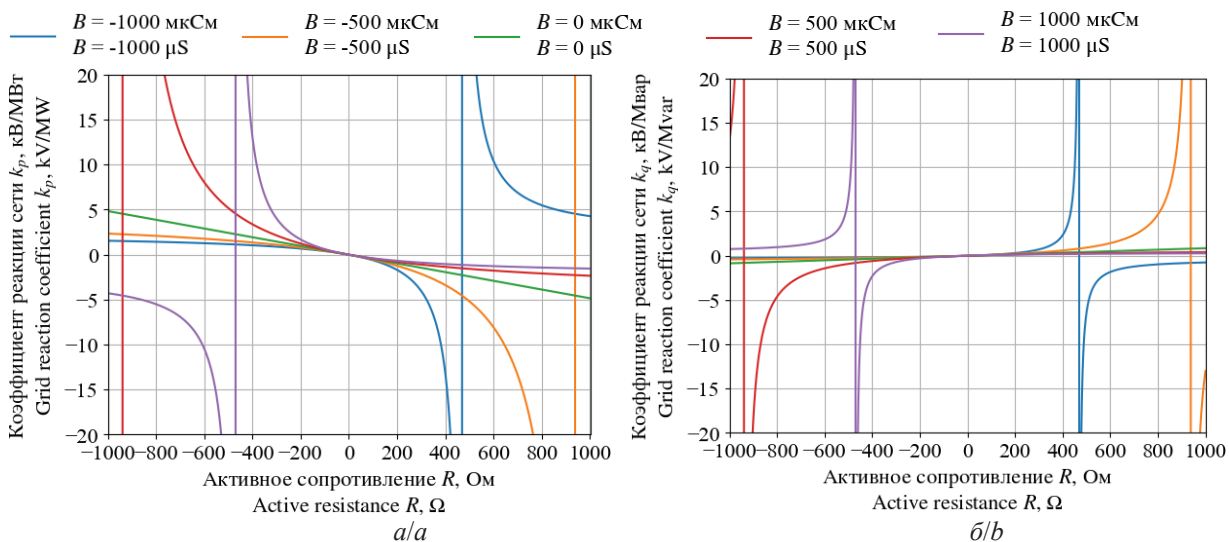


Рис. 6. Графики зависимостей: а) $k_P(R)$; б) $k_Q(R)$ при $X=0$, $B=0$ и $G=var$

Fig. 6. Dependence graph: a) $k_P(R)$; b) $k_Q(R)$ if $X=0$, $B=0$ and $G=var$

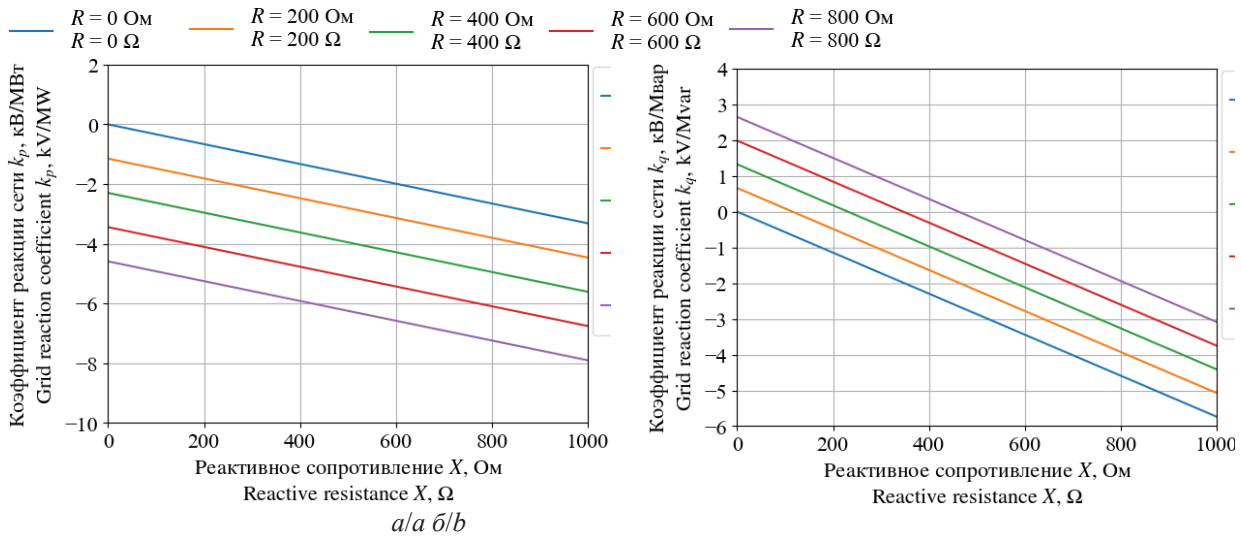


Рис. 7. Графики зависимостей: а) $k_p(X)$; б) $k_q(X)$ при $G=0$, $B=0$ и $R=\text{var}$
Fig. 7. Dependence graph: а) $k_p(X)$; б) $k_q(X)$ if $G=0$, $B=0$ and $R=\text{var}$

На рис. 7, а, б приведены графики зависимостей $k_p(X)$ и $k_q(X)$ при различных значениях R , $G=0$, $B=0$ и режимных параметрах, используемых при построении графиков на рис. 3–6.

С увеличением R значения k_p и k_q возрастают по модулю (без учёта знака). Таким образом, уменьшение активного и реактивного сопротивлений сетевого элемента, осуществляющего питание узла нагрузки, позволяет снизить значения коэффициентов реакции сети.

Влияние режимных параметров на величину коэффициентов

Для анализа влияния режимных параметров на величину k_p и k_q рассмотрим два типа зависимостей:

- 1) $k_p(U)$ и $k_q(U)$ при различных значениях модуля напряжения $U_{\text{вн}}$ питающего узла и $\delta_{\text{вн}}-\delta=0$;
- 2) $k_p(\delta_{\text{вн}}-\delta)$ и $k_q(\delta_{\text{вн}}-\delta)$ при различных значениях модуля рабочего напряжения U узла нагрузки и $U_{\text{вн}}=1$ о. е., приведённого к номинальному напряжению $U_{\text{ном}}=220$ кВ.

Сетевые параметры: активное сопротивление $R=10$ Ом; реактивное сопротивление $X=10$ Ом; поперечная активная проводимость $G=100$ мкСм; поперечная активная проводимость $B=-600$ мкСм. Указанные параметры соответствуют передаче мощности к узлу нагрузки по ЛЭП.

Графики зависимостей $k_p(U)$ и $k_q(U)$ при различных значениях U и $\delta_{\text{вн}}-\delta=0$ приведены на рис. 8.

При некотором граничном значении напряжения узла нагрузки $U_{\text{гр}} \approx 0,5 U_{\text{вн}}$ наблюдается точка разрыва функций $k_p(U)$ и $k_q(U)$. Данное значение напряжения соответствует границе по статической аperiodической устойчивости связи, осуществляющей питание узла нагрузки.

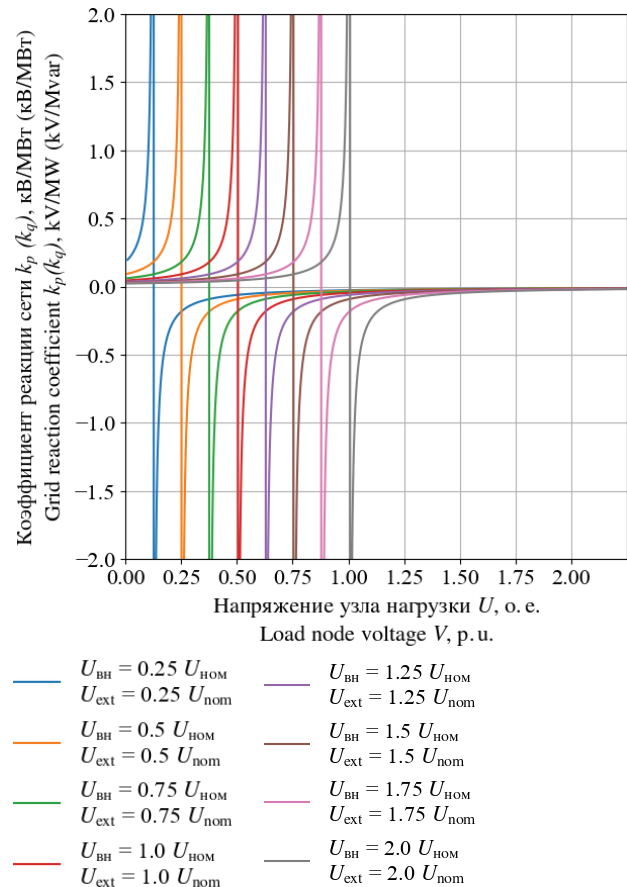


Рис. 8. Графики зависимостей $k_p(U)$ и $k_q(U)$ при $U_{\text{вн}}=\text{var}$ и $\delta_{\text{вн}}-\delta=0$

Fig. 8. Dependence graph $k_p(U)$ and $k_q(U)$ if $U_{\text{вн}}=\text{var}$ and $\delta_{\text{вн}}-\delta=0$

Значения k_p и k_q , полученные для значений напряжения в узле нагрузки меньше $U_{\text{гр}}$, не будут отражать реального поведения нагрузки в узле, так

как установившийся режим в данной области напряжений существовать не будет [24]. При рассмотрении областей $U > U_{гр}$ видно, что с увеличением рабочего напряжения в узле нагрузки k_P и k_Q уменьшаются по абсолютной величине, причём их зависимость от модуля напряжения U питающего узла энергосистемы проявляется сильнее при малых значениях рабочего напряжения, близких к $U_{гр}$. При возрастании $U_{вн}$ и постоянстве напряжения U в узле нагрузки модули k_P и k_Q увеличиваются.

Таким образом, из графиков рис. 8 следуют два способа уменьшения коэффициентов реакции сети: увеличение модуля напряжения в узле нагрузки; уменьшение модуля напряжения в питающем узле.

Выполнение указанных способов возможно с помощью подключения шунтирующих реакторов в питающем узле и батарей статических конденсаторов в узле нагрузки.

На рис. 9, а, б приведены графики зависимостей $k_P(\delta_{вн}-\delta)$ и $k_Q(\delta_{вн}-\delta)$ при различных значениях модуля рабочего напряжения U узла нагрузки и $U_{вн}=1$ о. е.

С увеличением модуля рабочего напряжения U узла нагрузки абсолютные значения k_P и k_Q вне точек разрыва уменьшаются, причём при одних и тех же значениях разности $\delta_{вн}-\delta$ модуль k_Q уменьшается сильнее, чем k_P . Стоит отметить, что с ростом разности $\delta_{вн}-\delta$ модули k_P и k_Q уменьшаются. Точки разрыва соответствуют углам по связи между питающим и нагрузочным узлом, больше которых (меньше в случае $\delta_{вн}-\delta < 0$) передача мощности невозможна. По этой причине рабочим диапазоном

при $\delta_{вн}-\delta$ и при заданном значении U является диапазон между точками разрыва. Видно, что с увеличением напряжения в узле нагрузки рабочий диапазон между точками разрыва увеличивается. При $U < 0,5 U_{вн}$ точки разрыва не возникают, а значит, рабочий диапазон по разности $\delta_{вн}-\delta$ не ограничен.

Таким образом, для уменьшения k_P и k_Q требуется уменьшать разность углов по связи между питающим и нагрузочным узлами. Добиться этого можно путём уменьшения перетока активной мощности по связи, что может быть достигнуто за счёт подключения собственной генерации в узле нагрузки.

Стоит отметить, что, как и в случае зависимостей k_P и k_Q от сетевых параметров, их зависимости от режимных параметров подчиняются текущей конфигурации сети [4, 16].

Направления дальнейших исследований

Приведённые преобразования справедливы только в случае малых отклонений режимных параметров, наблюдаемых при проведении пассивного эксперимента, что позволило учесть СХН по напряжению и влияние реакции сети с помощью линейных функций. В случае значительных изменений параметров режима, при которых начинает проявляться их нелинейность, реакция сети, учитываемая коэффициентами k_P и k_Q , внесет погрешность при определении параметров, соответствующих системе случайных величин (U', P', Q') [16, 25–27].

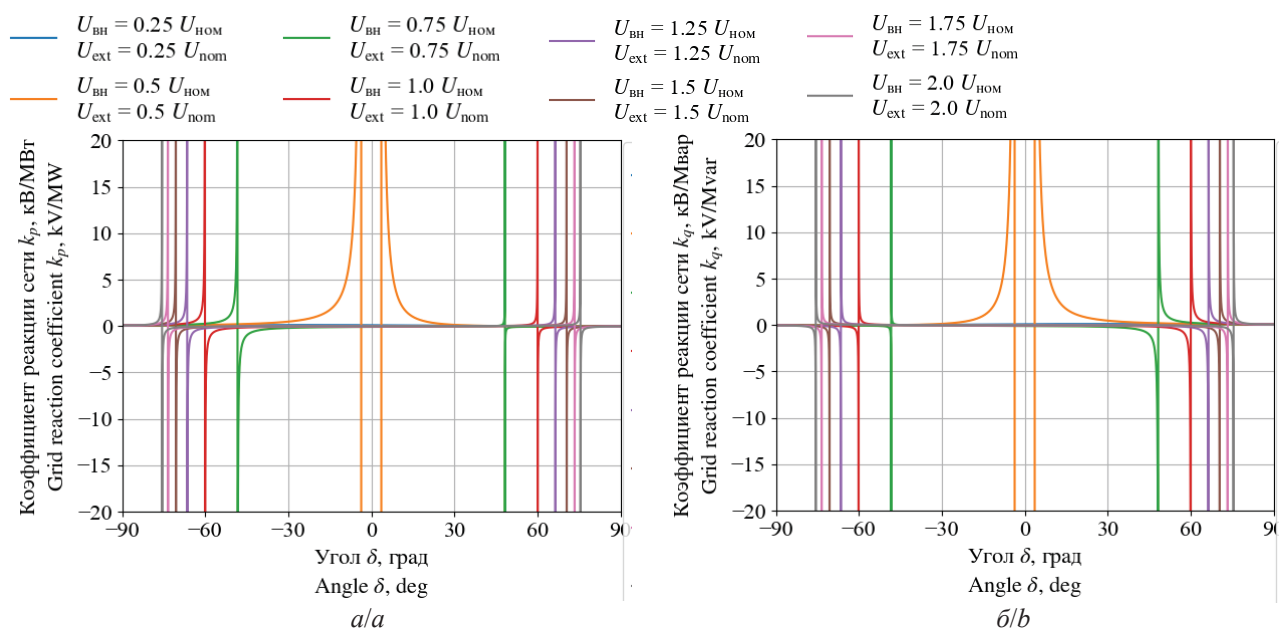


Рис. 9. Графики зависимостей: а) $k_P(\delta_{вн}-\delta)$; б) $k_Q(\delta_{вн}-\delta)$ при $U_{вн}=var$ и $U_{вн}=1$ о. е.

Fig. 9. Dependence graph: а) $k_P(\delta_{вн}-\delta)$; б) $k_Q(\delta_{вн}-\delta)$ if $U_{вн}=var$ and $U_{вн}=1$ о. е.

Стоит отметить, что допущение о постоянстве значений k_p и k_Q в общем случае справедливо только для одномодального распределения случайных величин. Каждому выделенному состоянию нагрузки соответствует своё значение k_p или k_Q . Однако чаще всего при проведении пассивного эксперимента условия электроснабжения не претерпевают значительных изменений, поэтому на первом этапе можно принять одно значение k_p или k_Q для всех состояний. Это допущение позволяет вычислить коэффициенты один раз с помощью расчёта обратной матрицы Якоби, используя расчётную модель в программном комплексе для расчёта режимов.

Согласно этому, следует выделить четыре наиболее перспективных направления:

1. Вычисление коэффициентов реакции сети для каждого состояния нагрузки. Как показал анализ, коэффициенты реакции сети в значительной степени зависят не только от параметров электрической сети, которые можно принять условно постоянными, но и от условно переменных параметров электрического режима.
2. Вычисление коэффициентов реакции сети по телеизмерениям. Данное направление исследований является наиболее трудоёмким, так как отсутствует возможность определения влияния на одно измерение СХН и реакции сети [28]. В связи с этим для вычисления коэффициентов реакции сети по телеизмерениям также требуется некоторая статистическая обработка, как и для получения СХН.
3. Вычисление коэффициентов реакции сети через обратную матрицу Якоби, несмотря на высокую точность, обладает сравнительно низкой производительностью, что может ограничить вычисление коэффициентов реакции сети при определении СХН в режиме *online*, поэтому наиболее практически значимым представляется способ расчёта электрических режимов при малыхращениях мощности в узле нагрузки [29].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fundamental study on the influence of dynamic load and distributed energy resources on power system short-term voltage stability / A. Boričić, J. Luis, R. Torres, M. Popov // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2021. – Vol. 131 (2). – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107141.
2. Dmitriev S.A., Semenenko S.I., Suvorov A.A. Complex load bus static load characteristics determination using passive experiment method // 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED 2018). – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, April 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341711.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Об определении характеристик нагрузки по напряжению методом пассивного эксперимента // Электричество. – 1972. – № 2. – С. 21–24.
4. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 246 с.
5. Uncertainties in modern power systems / Eds. A.F. Zobaa, S.H.E. Abdel Aleem. – London: Elsevier Inc., 2022. – 686 p. DOI: 10.1016/C2019-0-01693-7.
6. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
7. Singh V., Moger T., Jena D. Uncertainty handling techniques in power systems: a critical review // Electric Power Systems Research. – 2022. – Vol. 203. – P. 1–20. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107633.

4. Сравнение результатов, полученных при обработке данных активного и пассивного экспериментов для одного и того же узла нагрузки, проведённых при учёте мероприятий, снижающих влияние внешней электрической сети. При совпадении или минимальной погрешности полученных результатов в будущем проведение активных экспериментов для тех нагрузочных узлов, у которых предусмотрена передача телеметрии, будет сведено к минимуму.

Выводы

1. Степень влияния внешней электрической сети на параметры электрического режима в узле нагрузки зависит от сетевых и режимных параметров. Характеристикой влияния внешней электрической сети являются коэффициенты реакции сети по активной k_p и реактивной k_Q мощностям.
2. Отсутствие влияния реакции сети соответствует тому, что при изменении мощности нагрузки в узле напряжение в этом узле не изменяется.
3. С ростом величины сопротивлений связей, по которым выполняется электроснабжение узла нагрузки, абсолютная величина коэффициентов реакции сети увеличивается.
4. Увеличение проводимостей связей, по которым осуществляется электроснабжение узла нагрузки, приводит к уменьшению абсолютной величины коэффициентов реакции сети.
5. Снижение влияния реакции сети достигается за счёт уменьшения абсолютной величины коэффициентов k_p и k_Q . Достижение такого эффекта возможно в случае: компенсации реактивного сопротивления связей, по которым выполняется электроснабжение узла нагрузки; включения шунтирующих реакторов и отключения конденсаторных батарей в узле нагрузки; увеличения модуля напряжения в узле нагрузки; уменьшения модуля напряжения в питающем узле.

8. Горбунова Л.М., Портной М.Г., Рабинович Р.С. Экспериментальные исследования режимов энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.
9. A composite load model aggregation method and its equivalent error analysis / P. Wu, X. Zhang, C. Lu, Y. Wang, H. Ye, X. Ling // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2023. – Vol. 150 (5). – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109098.
10. A data-driven approach for online aggregated load modeling through intelligent terminals / Y. Tang, L. Zhu, J. Ning, Q. Wang // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2019. – Vol. 15 (1). – P. 1–14. DOI: 10.1177/1550147719825996.
11. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 20 с.
12. Effect of load modeling on power system stability studies / I.D. Pasiopoulou, E.O. Kontis, T.A. Papadopoulos, G.K. Papagiannis // Electric Power Systems Research. – 2022. – Vol. 207. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.eprsr.2022.107846.
13. Коновалов Ю.С., Кугелевичус И.Б. О возможности определения статических характеристик нагрузки методами математической статистики // Электричество. – 1968. – № 3. – С. 11–13.
14. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects / A.E. Ezugwu, A.M. Ikotun, O.O. Oyelade, L. Abualigah, J.O. Agushaka, C.I. Eke, A.A. Akinyelu // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 110. – P. 1–25. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104743.
15. Application of expectation maximization algorithm for measurement-based power system load modeling / A. Pankratov, N. Batseva, E. Polyakova, A. Tavlintsev, I. Lapatin, I. Lipnitskiy // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, 18–20 April 2019. – Tomsk: Tomsk IEEE Chapter. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729610.
16. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети / А.В. Панкратов, А.К. Жуйков, А.А. Шувалова, В.И. Полищук // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 2 (51). – С. 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11.
17. Бацева Н.Л., Жуйков А.К. Метод обработки измерений в задаче идентификации полиномиальных статических характеристик нагрузки по напряжению // SCM-2023: сборник докладов Междунаро. конф. по мягким вычислениям и измерениям. – СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2023. – С. 20–24.
18. Бацева Н.Л., Панкратов А.В., Жуйков А.К. Программное обеспечение для определения модели нагрузки по массивам измерений пассивного эксперимента // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – № 3 (59). – С. 51–56. DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0008.
19. Шувалова А.А. Разработка автоматизированной системы управления перетоком активной мощности по линии электропередач в вынужденном режиме работы: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск, 2022. – 153 с.
20. Power flow studies for assessment the security of steady states in zone inside the large interconnected power system / T. Kuznecovs, A. Mahnitko, A. Sauhats, V. Oboskalov // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 104. – P. 421–428. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.155.
21. Kamran M. Fundamentals of smart grid systems. Power grids. – Boston: Academic Press, 2023. – 131 p. DOI: 10.1016/B978-0-323-99560-3.00005-3.
22. Исследование возможности применения числового значения определителя матрицы Якоби для анализа статической устойчивости энергосистем / О.М. Гук, М.В. Одинцов, А.В. Севастьянова, С.В. Смоловик // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 3–4. – С. 55–59.
23. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высш. шк., 2003. – 612 с.
24. Cao S., Dong Y., Liu X. Electromechanical transient modeling analysis of large-scale new energy grid connection // Energy Engineering. – 2024. – Vol. 121 (4). – P. 1–14. DOI: 10.32604/ee.2023.043004.
25. Понарин Я.П. Аффинная и проективная геометрия. – М.: МЦНМО, 2009. – 288 с.
26. Affine arithmetic-based dynamic operating reserve quantification considering correlated load and renewable uncertainties / S. Garg, S. Yamujala, P. Mathuria, R. Bhakar, H. Tiwari // Electric Power Systems Research. – 2024. – Vol. 233. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.eprsr.2024.110513.
27. Vaccaro A., Pepicciello A. Affine arithmetic-based methods for uncertain power system analyses. – Amsterdam, Netherland; Kidlington, Oxford, England; Cambridge, Massachusetts: Elsevier Inc., 2022. – 149 p. DOI: 10.1016/C2020-0-3442-0.
28. Pavella M., Ernst D., Ruiz-Vega D. Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control. – New York: Springer Science and Business Media Inc., 2012. – 254 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-4319-0.
29. Белов Е.И. Исследование влияния параметров узлов и ветвей на сенсорность элементов электроэнергетической системы // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2018. – № 2 (79). – С. 88–95.

Информация об авторах

Наталья Ленмировна Бацева, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1808-4700>

Александр Константинович Жуйков, аспирант Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; akz3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1216-0653>

Поступила в редакцию: 26.08.2024

Поступила после рецензирования: 23.09.2024

Принята к публикации: 21.10.2024

REFERENCES

1. Boričić A., Luis J., Torres R., Popov M. Fundamental study on the influence of dynamic load and distributed energy resources on power system short-term voltage stability. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, vol. 131 (2), pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107141.
2. Dmitriev S.A., Semenenko S.I., Suvorov A.A. Complex load bus static load characteristics determination using passive experiment method. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED 2018)*. April, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2018. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341711.
3. Gurevich Yu.E., Libova L.E. On the determination of voltage load characteristics by the method of a passive experiment. *Electricity*, 1972, no. 2, pp. 21–24. (In Russ.)
4. Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Application of electrical load mathematical models in calculation of power system stability and an industrial consumer power supply reliability*. Moscow, ELEKS-KM Publ., 2008. 246 p. (In Russ.)
5. *Uncertainties in Modern Power Systems*. Eds. A.F. Zobaa, S.H.E. Abdel Aleem. London, Elsevier Inc., 2022. 686 p. DOI: 10.1016/C2019-0-01693-7.
6. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Calculations of stability and emergency automations in power systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p. (In Russ.)
7. Singh V., Moger T., Jena D. Uncertainty handling techniques in power systems: a critical review. *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 203, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.eprsr.2021.107633.
8. Gorbunova L.M., Tailor M.G., Rabinovich R.S. *Experimental studies of power system modes*. Ed. by S.A. Sovalov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 448 p. (In Russ.)
9. Wu P., Zhang X., Lu C., Wang Y., Ye H., Ling X. A composite load model aggregation method and its equivalent error analysis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2023, vol. 150 (5), pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109098.
10. Tang Y., Zhu L., Ning J., Wang Q. A data-driven approach for online aggregated load modeling through intelligent terminals. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1177/1550147719825996.
11. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Stability of the load of power systems*. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 209 p. (In Russ.)
12. Pasiopoulou I.D., Kontis E.O., Papadopoulos T.A., Papagiannis G.K. Effect of load modeling on power system stability studies. *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 207, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.eprsr.2022.107846.
13. Konovalov Yu.S., Kugelevich I.B. On the possibility of determining the static characteristics of the load by mathematical statistics methods. *Elektrichestvo*, 1968, no. 3, pp. 11–13. (In Russ.)
14. Ezugwu A.E., Ikotun A.M., Oyelade O.O., Abualigah L., Agushaka J.O., Eke C.I., Akinyelu A.A. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, vol. 110, pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104743.
15. Pankratov A., Batseva N., Polyakova E., Tavlintsev A., Lapatin I., Lipnitskiy I. Application of expectation maximization algorithm for measurement-based power system load modeling. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 18–20 April 2019. Tomsk, Tomsk IEEE Chapter, 2019. pp. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729610.
16. Pankratov A.V., Zhuykov A.K., Shuvalova A.A., Polishchuk V.I. Determination of static load model by voltage using steady-state measurements taking into account the network response. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2021, no. 2 (51), pp. 4–11. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11.
17. Batseva N.L., Zhuykov A.K. Processing technique of the passive experiment data sets for the identification of the polynomial static load characteristics. *International Conference on soft Computing and Measurements (SCM-2023)*. St-Petersburg, 24–26 May 2023. St-Petersburg, SPETU “LETI”, 2023. pp. 20–24. (In Russ.)
18. Batseva N.L., Pankratov A.V., Zhuykov A.K. Software for the identification of a load model by arrays, measured by passive experiment. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*, 2022, vol. 11, no. 3 (59), pp. 51–56. (In Russ.) DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0008.
19. Shuvalova A.A. *Development of an automated control system for the active power flow through power lines in forced operation*. Cand. Dis. Omsk, 2022. 153 p. (In Russ.)
20. Kuznecovs T., Mahnitko A., Sauhats A., Oboskalov V. Power flow studies for assessment the security of steady states in zone inside the large interconnected power system. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 104, pp. 421–428. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.155.
21. Kamran M. *Fundamentals of smart grid systems. Power grids*. Boston, Academic Press, 2023. 131 p. DOI: 10.1016/B978-0-323-99560-3.00005-3.
22. Guk O.M., Odintsov M.V., Sevastyanova A.V., Smolovik S.V. Research of the numerical value application of the Jacobian determinant for a power system static stability analysis. *Bulletin of the Higher Education Institution. Energy problems*, 2012, no. 3–4, pp. 55–59. (In Russ.)
23. Bessonov L.A. *Theory of electrical engineering*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 612 p. (In Russ.)
24. Cao S., Dong Y., Liu X. Electromechanical transient modeling analysis of large-scale new energy grid connection. *Energy Engineering*, 2024, vol. 121 (4), pp. 1–14. DOI: 10.32604/ee.2023.043004.
25. Ponarin Ya.P. *Affine and projective geometry*. Moscow, MTsNMO Publ., 2009. 288 p. (In Russ.)
26. Garg S., Yamujala S., Mathuria P., Bhakar R., Tiwari H. Affine arithmetic-based dynamic operating reserve quantification considering correlated load and renewable uncertainties. *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 233, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.eprsr.2024.110513.
27. Vaccaro A., Pepicciello A. *Affine arithmetic-based methods for uncertain power system analyses*. Amsterdam, Netherland; Kidlington, Oxford, England; Cambridge, Massachusetts, Elsevier Inc., 2022. 149 p. DOI: 10.1016/C2020-0-3442-0.
28. Pavella M., Ernst D., Ruiz-Vega D. *Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control*. New York, Springer Science and Business Media Inc., 2012. 254 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-4319-0.

29. Belov E.I. Influence of nodes and branches parameters on a sensitivity of power system elements. *Bulletin of the STC of the Unified Power System*, 2018, no. 2 (79), pp. 88–95. (In Russ.)

Information about the authors

Natalia L. Batseva, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; batsevan@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1808-4700>

Aleksandr K. Zhuykov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; akz3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>

Received: 26.08.2024

Revised: 23.09.2024

Accepted: 21.10.2024