

УДК 621.3.061

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-2/01>**Аракелян В.П.**

Национальный политехнический университет Армении

ОЦЕНКА ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ Z-МАТРИЦЫ НОВОГО ТИПА

Вступне слово про тему дослідження: управління електроенергетичними системами здійснюється зі зміною параметрів режиму і схеми. Режим роботи системи характеризується параметрами, які в процесі ведення режиму можна змінити. Напряга вважається одним з важливих параметрів режиму системи. Під час досліджень режимів системи, необхідно враховувати вплив падіння напруги на якість електроенергії. Мета наукового дослідження – оцінка падіння напруги з застосуванням Z-матриці узагальнених параметрів схеми електроенергетичної системи. Опис наукової та практичної значущості роботи. Наукова цінність роботи: представлено новий підхід, в основі якого лежить застосування Z-матриці узагальнених параметрів. Практична значущість: забезпечує універсальність для оцінки якості електроенергії в живильних і системоутворюючих електричних мережах. Представлений новий підхід, в основі якого лежить застосування Z-матриці узагальнених параметрів.

Опис методології дослідження: з огляду на різні види моделювання ЛЕП сучасних ЕЕС, складність схем електричних мереж, з допомогою Z-матриці отримані нові формули падіння напруги. Основні результати, висновки дослідницької роботи: дослідження проводилося для макромоделі ЕЕС Вірменії. Аналіз показує, що запропоновані формули прийнятним для живильних мереж. У формулах розглядаються синтез компонентів падіння напруги та параметрів схеми. Цінність проведеного дослідження (який внесок даної роботи в відповідну галузь знань): запропонований підхід розширює визначення меж взаємодії узагальнених параметрів і напруги. Практичне значення результатів роботи: отримані компактні формули дозволяють всебічно проаналізувати коефіцієнт падіння напруги.

Висновок з даного дослідження, містить розрахунок напружень із застосуванням Z-матриці в ЕЕС з мережами 110-220 кВ без урахування поперечних пасивних параметрів ЛЕП, не вносить суттєвих змін, а лише ускладнює процес розрахунку. Наведено, значення коефіцієнта падіння напруги відповідає вимогам міждержавного стандарту ГОСТ-13109-97, $K_{Uij} \wedge 220 \leq 1.15$. Зроблено, розрахунок напружень і оцінка падіння напруги із застосуванням Z-матриці в ЕЕС з мережами 110-220 кВ, може здійснюватися без урахування поперечних пасивних параметрів ЛЕП і складена в середовищі Java комп'ютерна програма забезпечує високу точність розрахунків та широкі межі застосування.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на дослідження розрахунку напруг із застосуванням Z-матриці в системоутворюючих електричних мережах з урахуванням поперечних пасивних параметрів ЛЕП і на дослідження розрахунку втрат потужності з застосуванням Z-матриці в електричних мережах з урахуванням поперечних пасивних параметрів ЛЕП.

Ключові слова: електроенергетична система, узагальнений параметр, поперечний параметр, позовжній параметр, падіння напруги.

Постановка проблеми. Развитие современной электроэнергетики сопровождается ростом установленной мощности электростанций и мощности потребителей электроэнергии, усложнением конфигурации электрических сетей. Элементы электроэнергетических систем имеют множество внутренних и наружных связей, которые требуют большого объема информации для расчета и анализа ее режимов. Модель схемы электрической системы характеризует конфигу-

рацию электрической сети. Электрическая схема моделируется с помощью схем замещения элементов системы. Схемы замещения содержат продольные и поперечные пассивные параметры линий электропередач, трансформаторов. Пассивные параметры образуют Z-матрицу обобщенных параметров сети. С этой точки зрения усложняется управление режимов электроэнергетических систем. Один из важных задач управления режимами, является обеспечение в узлах

электроэнергетической (электрической) системы допустимый уровень напряжения в соответствии с ГОСТ-13109-97.

Анализ последних исследований и публикаций. Узловые напряжения системы зависят от падения напряжения в линиях электропередач. Уравнения узловых напряжений в матричной форме будет [3]:

$$\dot{U} = \dot{U}_{0Б} + Z \cdot \dot{I}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{0Б}$ – вектор-столбец, каждый элемент которого равен напряжению базисного узла; \dot{U} и \dot{I} – вектор-столбцы узловых комплексных напряжений и токов; $Z = Y^{-1}$ – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений.

Возможности компьютерных технологий позволяют моделировать режимы электрических систем, учитывая формулы обобщенных параметров [6-8].

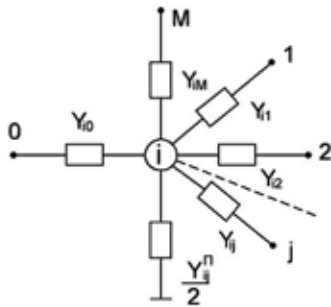


Рис. 1. Схема узла ЭЭС

Представляя линию электропередачи (ЛЭП) моделью Y , для взаимных комплексных проводимостей получим:

$$\begin{aligned} Y_{i0} &= (Z_{i0})^{-1}, Y_{i1} = (Z_{i1})^{-1}, \\ Y_{i2} &= (Z_{i2})^{-1}, \dots, Y_{ij} = (Z_{ij})^{-1}, Y_{iM} = (Z_{iM})^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полные комплексные сопротивления ветвей определяются в виде:

$$\begin{cases} Z_{i0} = \dot{W}_{B,i0} sh \dot{\gamma}_{0,i0} l_{i0}, Z_{i1} = \dot{W}_{B,i1} sh \dot{\gamma}_{0,i1} l_{i1}, \\ Z_{i2} = \dot{W}_{B,i2} sh \dot{\gamma}_{0,i2} l_{i2}, Z_{i3} = \dot{W}_{B,i3} sh \dot{\gamma}_{0,i3} l_{i3}, \\ \dots \\ Z_{ij} = \dot{W}_{B,ij} sh \dot{\gamma}_{0,ij} l_{ij}, Z_{iM} = \dot{W}_{B,iM} sh \dot{\gamma}_{0,iM} l_{iM}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{W}_{B,i0}, \dot{W}_{B,i1}, \dot{W}_{B,i2}, \dots, \dot{W}_{B,ij}, \dot{W}_{B,iM}$ – комплексные величины волновых сопротивлений ЛЭП; $\dot{\gamma}_{B,i0}, \dot{\gamma}_{B,i1}, \dot{\gamma}_{B,i2}, \dots, \dot{\gamma}_{B,ij}, \dot{\gamma}_{B,iM}$ – комплексные коэффициенты распространения волны ЛЭП; $l_{B,i0}, l_{B,i1}, l_{B,i2}, \dots, l_{B,ij}, l_{B,iM}$ – длины ЛЭП.

Учитывая узловую Z -матрицу сопротивлений, обобщенные коэффициенты падения напряжения, модифицированную Z -матрицу, перепад напряжения определяется по формуле [9-11]:

$$K_{U_{ij}}^{0Б} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i}^{0Б})^2 + (K_{\delta i}^{0Б})^2}{(1 + K_{\Delta j}^{0Б})^2 + (K_{\delta j}^{0Б})^2}}, \quad (4)$$

где $K_{\Delta i}^{0Б}, K_{\delta i}^{0Б}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, относительно базисного узла с индексом «0»; $K_{\Delta j}^{0Б}, K_{\delta j}^{0Б}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, относительно базисного узла с индексом «0».

Формула (4) необходимо усовершенствовать при учете продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС.

Постановка задачи. Предлагается оценить падение напряжения с применением Z -матрицы обобщенных параметров схемы электроэнергетической системы (ЭЭС), учитывая:

1. Продольные пассивные параметры линий электропередач: активные и реактивные сопротивления.
2. Продольные и поперечные пассивные параметры линий электропередач: активные и реактивные сопротивления, активные и реактивные проводимости.
3. Пределы применения расчетов напряжения.

Изложение основного материала исследования. Предположим, что электроэнергетическая система (ЭЭС) состоит из $M+1$ узлов (см. рис. 2).

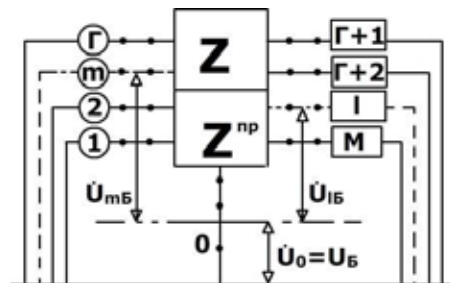


Рис. 2. Схема замещения ЭЭС Z-формой

В качестве базисного (балансного) выбирается узел с индексом «0». Принимается, что мощности узлов станций (1,2,...,Г) и нагрузки (Г+1, Г+2,..., Г+Н=М) приведены на шины повышающих и понижающих трансформаторных подстанций [6]. При этом уравнении состояния электрической системы в Z -форме принимает следующий вид [10]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{0Б} + Z_{11} \cdot \dot{I}_1 + Z_{12} \cdot \dot{I}_2 + \dots + Z_{1M} \cdot \dot{I}_M, \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_{0Б} + Z_{21} \cdot \dot{I}_1 + Z_{22} \cdot \dot{I}_2 + \dots + Z_{2M} \cdot \dot{I}_M, \\ \dots \\ \dot{U}_M &= \dot{U}_{0Б} + Z_{M1} \cdot \dot{I}_1 + Z_{M2} \cdot \dot{I}_2 + \dots + Z_{MM} \cdot \dot{I}_M. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\dot{U}_{0Б}, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_M$ – комплексные напряжения узлов 0,1,...,М электрической системы; $\dot{I}_1,$

$\dot{I}_2, \dots, \dot{I}_M$ – комплексные токи узлов $1, 2, \dots, M$ электрической системы; $Z_{12}, \dots, Z_{1M}, Z_{21}, \dots, Z_{2M}, \dots, Z_{M1}, \dots, Z_{MM}$ – взаимные комплексные сопротивления независимых узлов электрической системы; $Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{MM}$ – собственные комплексные сопротивления независимых узлов $1, 2, \dots, M$ электрической системы.

Система алгебраических уравнений установившегося режима электрической системы (5) в компактной форме, принимает вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_{0Б} + Z \cdot \dot{I}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_{0Б}$ – вектор-столбец, каждый элемент которого равен напряжению базисного узла, \dot{U} и \dot{I} – вектор-столбцы узловых комплексных напряжений и токов, Z – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений, обусловленный продольными и поперечными пассивными параметрами линий электропередач.

В электрической системе, учитывая только продольные пассивные параметры линии электропередачи, получаем:

$$\dot{U}^{np} = \dot{U}_{0Б} + Z^{np} \cdot \dot{I}, \quad (7)$$

где \dot{U}^{np} – вектор-столбец узловых комплексных напряжений, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач; Z^{np} – узловая комплексная матрица собственных и взаимных сопротивлений, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач.

Матричные компактные уравнения (6) и (7) представляем с падением напряжения, получаем:

$$\dot{U} = U_{0Б} + d\dot{U}, \quad (8)$$

$$\dot{U}^{np} = U_{0Б} + d\dot{U}^{np}, \quad (9)$$

где $d\dot{U}$ – матрица узлового падения напряжения, обусловленный продольными и поперечными пассивными параметрами линий электропередач; $d\dot{U}^{np}$ – матрица узлового падения напряжения, обусловленный продольными пассивными параметрами линий электропередач.

Учитывая продольные и поперечные составляющие падения напряжения, уравнения (8) и (9) принимают следующие виды:

$$\dot{U} = U_{0Б} + \Delta U + \delta \dot{U}, \quad (10)$$

$$\dot{U}^{np} = U_{0Б} + \Delta U^{np} + \delta \dot{U}^{np}, \quad (11)$$

где \emptyset – матрица продольной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными и поперечными параметрами; $\delta \dot{U}$ – матрица поперечной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными и поперечными

параметрами; $\emptyset U^{np}$ – матрица продольной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными параметрами; $\delta \dot{U}^{np}$ – матрица поперечной составляющей узлового падения напряжения схемы ЭЭС, обусловленный продольными параметрами.

Падение напряжения определяется по следующей формуле:

$$K_{Uij} = \frac{U_i}{U_j}, \quad (12)$$

где U_i – модуль напряжения i -го узла, U_j – модуль напряжения j -го узла.

Применяя формулу (12), используя матричные уравнения (10) и (11), после соответствующих преобразований, получаем [5]:

$$K_{Uij} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i})^2 + (K_{\delta i})^2}{(1 + K_{\Delta j})^2 + (K_{\delta j})^2}}, \quad (13)$$

$$K_{Uij}^{np} = \sqrt{\frac{(1 + K_{\Delta i}^{np})^2 + (K_{\delta i}^{np})^2}{(1 + K_{\Delta j}^{np})^2 + (K_{\delta j}^{np})^2}}, \quad (14)$$

где $K_{\Delta i}$, $K_{\Delta j}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС; $K_{\delta i}$, $K_{\delta j}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС; $K_{\Delta i}^{np}$, $K_{\Delta j}^{np}$ – коэффициенты продольной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных элементов схемы ЭЭС; $K_{\delta i}^{np}$, $K_{\delta j}^{np}$ – коэффициенты поперечной составляющей падения напряжения i -го и j -го узла соответственно, при наличии продольных элементов схемы ЭЭС.

$$\left. \begin{aligned} K_{\Delta i} &= \frac{\Delta U_i}{U_{0Б}} \\ K_{\Delta j} &= \frac{\Delta U_j}{U_{0Б}} \\ K_{\delta i} &= \frac{\delta U_i}{U_{0Б}} \\ K_{\delta j} &= \frac{\delta U_j}{U_{0Б}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{\Delta i}^{np} &= \frac{\Delta U_i^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\Delta j}^{np} &= \frac{\Delta U_j^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\delta i}^{np} &= \frac{\delta U_i^{np}}{U_{0Б}} \\ K_{\delta j}^{np} &= \frac{\delta U_j^{np}}{U_{0Б}} \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Исследование проводилось для макромодели ЭЭС Армении. Для решений уравнения установившегося режима применяется метод простой итерации. Результаты исследований представлены в таблицах 1-4.

Таблица 4

Коэффициенты падения напряжения при наличии продольных элементов схемы ЭЭС

K_{ij}	K_{ϱ}^{np}	$K_{\delta i}^{np}$	$K_{\varrho j}^{np}$	$K_{\delta j}^{np}$	K_{Uij}^{np}
01	0	0	-0.0367	-0.0281	1.0376
03	0	0	-0.0437	-0.0376	1.0449
12	-0.0367	-0.0281	-0.024	-0.0135	0.9873
14	-0.0367	-0.0281	-0.0431	-0.0355	1.0064
24	-0.024	-0.0135	-0.0431	-0.0355	1.0193
34	-0.0437	-0.0376	-0.0431	-0.0355	0.9994

Таблица 1

Падение напряжения при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС

Узел	\dot{U}_i , кВ	$ U_i $, кВ	$d\dot{U}$, кВ
1	211.8832 – j6.2059	211.974	-8.1168 – j6.2059
2	214.6686 – 2.9924	214.6895	-5.3314 – j2.9924
3	210.353 – j8.3088	210.517	-9.647 – j8.3088
4	210.4592 – j7.8454	210.6054	-9.5408 – j7.8454

Таблица 2

Падение напряжения при наличии продольных элементов схемы ЭЭС

Узел	\dot{U}_i^{np} , кВ	$ U_i^{np} $, кВ	$d\dot{U}_i^{np}$, кВ
1	211.9235 – j6.1845	212.0137	-8.0765 – j6.1845
2	214.7136 – 2.9704	214.7341	-5.2864 – j2.9704
3	210.3859 – j8.2911	210.5492	-9.6141 – j8.2911
4	210.4991 – j7.8234	210.6444	-9.5009 – j7.8234

Таблица 3

Коэффициенты падения напряжения при наличии продольных и поперечных элементов схемы ЭЭС

K_{ij}	K_{ϱ}	$K_{\delta i}$	$K_{\varrho j}$	$K_{\delta j}$	K_{Uij}
01	0	0	-0.0368	-0.0282	1.0377
03	0	0	-0.0438	-0.0377	1.045
12	-0.0368	-0.0282	-0.0242	-0.0136	0.9874
14	-0.0368	-0.0282	-0.0433	-0.0356	1.0065
24	-0.0242	-0.0136	-0.0433	-0.0356	1.0193
34	-0.0438	-0.0377	-0.0433	-0.0356	0.9995

Выводы. Таким образом, получены такие выводы:

1. расчет напряжений с применением Z-матрицы в ЭЭС с сетями 110-220 кВ без учета поперечных пассивных параметров ЛЭП, не вносит существенные изменения, а лишь усложняет процесс расчета;

2. значение коэффициента падения напряжения соответствует требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ-13109-97, K_{Uij}^{220} " 1.15;

3. расчет напряжений и оценка падения напряжения с применением Z-матрицы в ЭЭС с сетями 110-220 кВ, может осуществляться без учета поперечных пассивных параметров ЛЭП;

4. составленная в среде Java компьютерная программа обеспечивает высокую точность расчетов и широкие границы применения.

Перспективы дальнейших исследований:

1. исследование расчета напряжений с применением Z-матрицы в системообразующих электрических сетях с учетом поперечных пассивных параметров ЛЭП;

2. исследование расчета потерь мощности с применением Z-матрицы в электрических сетях с учетом поперечных пассивных параметров ЛЭП.

Список литературы:

1. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новый подход к определению Y-матрицы электроэнергетической системы. Известия НАН РА и ННУА. Сер. технических наук. 2012. Т. LXV, № 2. С. 184–189.
2. Xi-Fan Wang, Yonghau Song, Malcolm Irving Modern Power Systems Analysis. Springer Science + Business Media. New York, 2008. 569 p.
3. Аракелян В.П. Применение нового Z-матрицы для расчета потерь напряжения электроэнергетической системы. ВИАА. 2012.Т.9, № 3. С. 530–531.
4. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новая характеристика перепада напряжения линии электропередач. ВИАА. 2010. Т.7, № 3. С. 464–465.
5. Аракелян В.П. Модифицированные формулы перепада напряжений электроэнергетической системы при замене базисной электростанций. ВИАА 2016.Т.13, № 1. С. 54–58.
6. Аракелян В.П., Акопян Л. А. Новый подход к определению Y-матрицы электроэнергетической системы. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2012. Т. LXV, № 2. С. 184–189.

7. Xi-Fan Wang, Yonghau Song, Malcolm Irving Modern Power Systems Analysis.-Springer Science + Business Media. New York, 2008. 569 p.
8. Duncan Glover J., Mulukutla Sarma S., Overbye Thomas J. Power system analysis and design. 4th. ed. Thomson Australia. Brazil. Canada. Mexico. Singapore. United Kingdom. United States. 2008. 767 p.
9. Аракелян В.П., Акопян Л.А. Новая характеристика перепада напряжения линии электропередач. ВИАА. 2010. Т.7, № 3. С. 464–465.
10. Аракелян В.П. Модифицированные формулы перепада напряжений электроэнергетической системы при замене базисной электростанций. ВИАА. 2016. Т.13, № 1. С. 54–58.
11. Ramana N. V. Power System Analysis. Chennai. Delhi. Chandigarh. Pearson. 2011. 445 p.

Arakelyan P.A. ESTIMATION OF THE VOLTAGE DROP IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM USING A Z-MATRIX OF A NEW TYPE

Introductory speech on the research topic: management of electrical power systems is carried out with a change in the parameters of the regime and scheme. The regime of the system is characterized by parameters that can be changed in the process of maintaining the regime. Voltage is considered one of the important parameters of the system regime. During studies of the system regimes, it is necessary to consider the effect of the voltage drop on the quality of electricity.

The electrical system circuit model characterizes the electrical network configuration. The electrical circuit is modeled using replacement schemes for system elements. The equivalent circuits contain longitudinal and transverse passive parameters of power lines, transformers. Passive parameters form a Z-matrix of generalized network parameters.

The purpose of scientific research – estimation of the voltage drop using the Z-matrix of generalized parameters of the scheme of the electric power system. Description of scientific and practical significance of the work: the scientific value of the work: a new approach is presented, the basis of which is the use of the Z-matrix of generalized parameters. Practical significance: provides versatility for assessing the quality of electricity in the supply and system-forming electrical networks.

Description of the research methodology: taking into account the different types of modeling of power transmission lines of modern power systems, the complexity of the schemes of electrical networks, using the Z-matrix, new formulae for voltage drops were obtained. Main results, conclusions of the research work: the study was conducted for the macromodel of electric power system of Armenia. The analysis shows that the proposed formulae are acceptable for supply networks. The formulae consider the synthesis of voltage drop components and circuit parameters.

The value of the conducted research (what contribution of this work to the relevant branch of knowledge): the proposed approach extends the definition of the boundaries of the interaction of generalized parameters and voltage. Practical significance of the results of work: the obtained compact formulae allow for a comprehensive analysis coefficient voltage drop.

The conclusion from this study is that the calculation of voltages using Z-matrix in electric power grids with networks of 110-220 kV without taking into account the transverse passive parameters of the transmission lines, does not make significant changes, but only complicates the calculation process. The value of the voltage drop ratio meets the requirements of the interstate standard GOST-13109-97, $K_{Uij}^{220} \leq 1.15$. The calculation of voltages and the estimation of voltage drop with the use of a Z-matrix in electric power grids with 110-220 kV networks can be carried out without taking into account the transverse passive parameters of the transmission lines, and Java software ensures high accuracy of calculations and wide application scope.

Prospects of further research shall be directed to studying the calculation of voltages using Z-matrix in the backbone electrical networks, taking into account the transverse passive parameters of power lines and to studying of calculating power losses using the Z-matrix in electric networks, taking into account the transverse passive parameters of power lines.

Key words: electric power system, generalized parameter, transverse parameter, longitudinal parameter, voltage drop.