

УДК 621.31

Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов

**РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ГЕНЕРАЦИИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ – КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет
им Р.Е. Алексеева

Одна из тенденций развития современных электротехнических комплексов связана с расширением использования энергоустановок распределенной генерации, расположенных в непосредственной близости от потребителей. При этом актуальными являются вопросы влияния энергоустановок распределенной генерации на качество электрической энергии. Энергоустановки малой мощности могут стать причиной появления колебаний напряжения и фликера. В статье представлена расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети 10 кВ в составе с энергоустановкой распределенной генерации. Разработанная модель предназначена для определения дозы фликера в электрической сети, вызванной работой резкопеременной нагрузки. Модель позволяет проводить исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электрической энергии при различных параметрах электрической сети. Приведены результаты расчета размаха колебания напряжения с источником распределенной генерации и без него в зависимости от соотношений индуктивных сопротивлений линии и трансформатора. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании электрических сетей для определения оптимальных параметров сети и резкопеременной нагрузки.

Ключевые слова: доза фликера, качество электроэнергии, колебание напряжения, распределенная генерация, моделирование.

I. Введение

В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) активно внедряются установки распределенной генерации (РГ), к которым можно отнести источники электроэнергии (ЭЭ), находящиеся в непосредственной близости от потребителей:

- нетрадиционные источники ЭЭ;
- когенерационные установки малой и средней мощности, работающие на основе газотурбинных и парогазовых технологий;
- мини- и микро ГЭС.

Применение установок РГ позволяет разгрузить электрическую

сеть, снизить потери мощности и энергии, повысить надежность и «живучесть» ЭЭС [1]. Однако распределенная генерация оказывает неоднозначное влияние на качество ЭЭ. С одной стороны, наличие установок РГ позволяет поддерживать уровни напряжений в узлах сети, уменьшать несимметрию и гармонические искажения [1]. С другой стороны, генераторы небольшой мощности могут вызывать колебания напряжения, которые приводят к появлению фликера [1]. Возникновение фликера обычно происходит при резком снижении напряжения в узле подключения установки РГ; при этом применение регуляторов напряжения у генераторов может значительно усложнить ситуацию, особенно если регуляторы не настроены должным образом. При широком использовании установок РГ очень важна точная оценка их воздействия на электрическую сеть, что позволяет избежать ухудшения качества электроэнергии. Поэтому исследование вопросов возникновения и устранения фликера в электрических сетях с установками РГ имеет большую актуальность. Обеспечение качества электрической энергии заключается в степени соответствия ее параметров их установленным значениям [2].

Колебания напряжения являются одним из показателей качества электрической энергии. Они вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резкопеременного характера. Уровень допустимых кондуктивных помех нормируется стандартами. В действующем ранее стандарте и ГОСТ 13109-97 колебания напряжения характеризовались двумя показателями: размахом изменения напряжения и дозой колебаний (дозой фликера). Расчет размахов изменения напряжения проще, чем расчет дозы фликера. С введением в 2014 году в действие введен ГОСТ 32144-2013, в котором колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера. В связи с этим в настоящее время возникла необходимость анализа дозы фликера, вызываемой работой различных потребителей с резкопеременной нагрузкой [3]. По показателю колебания напряжения между новым ГОСТ 32144-2013 и отмененным ГОСТ 13109-97 есть существенные отличия [4], табл. 1. Из табл. 1 видно, что в ГОСТ 32144-2013 колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера [5]. В настоящее время в России именно доза фликера является универсальным показателем электромагнитной совместимости по колебаниям напряжения.

По степени влияния резкопеременных нагрузок на колебания напряжения и распространение этих колебаний можно выделить две группы таких приемников [3]:

- приемники среднего напряжения номинальной мощностью в несколько сот кВт и больше, применяемые в промышленности, например, дуговые печи, сталелитейные и литейные печи, электродвигатели перемен-

ного тока с частыми пусками и другие;

- приемники низкого напряжения номинальной мощностью в несколько сот кВт и меньше, применяемые в промышленности (сварочные машины, станы) и в коммунально-бытовом хозяйстве (лифты, электроприборы и аппараты в домашнем хозяйстве с электромеханическим и электрическим управлением потребления мощности и другие).

Таблица 1.
Нормы и требования ГОСТ по показателю качества
«колебание напряжения»

ГОСТ 13109-97	ГОСТ 32144-2013
– размах изменения напряжения	
Рис. 1 в ГОСТ, кривые 1 и 2. Нормируется допустимое значение в точке общего присоединения к электрическим сетям.	данный показатель отсутствует
– доза фликера	
кратковременная – 1,38 и 1,0 (при лампах накаливания и высоких требованиях к освещенности) длительная – 1,0 и 0,74 (нормируются в точке общего присоединения)	кратковременная – не более 1,38 в течении 100 % времени в неделю; длительная – 1,0 в течении 100 % времени в неделю.
Время интеграции: – кратковременный фликер – 10 минут; – длительный фликер – 2 часа.	

При резкопеременных нагрузках низкого напряжения на величину колебаний напряжения влияют амплитуды изменений активных и реактивных составляющих токов приемников. При резкопеременных нагрузках среднего напряжения в основном влияние оказывают только амплитуды изменений реактивных составляющих этих приемников [6, 7]. Колебания напряжения, возникающие при резкопеременной нагрузке, распространяются по всей сети, вызывая колебания напряжения на зажимах всех, в том числе, потребителей со спокойной нагрузкой.

При колебаниях напряжения наблюдается погасание газоразрядных ламп, отпадают контакты магнитных пускателей, выходят из строя батареи конденсаторов, статические компенсирующие устройства и вентили преобразовательных агрегатов [8]. Также отрицательное влияние испытывают большинство потребителей электроэнергии: индукционные печи; двигатели высокочастотных преобразовательных агрегатов; асинхронные двигатели малой мощности; сварочные установки; системы автоматического регулирования; радиоприборы и ЭВМ.

Неоднозначно и влияние распределенной генерации на качество электроэнергии по уровням напряжений. С одной стороны, наличие распределенной генерации в распределительной сети позволяет более стабильно поддерживать уровни напряжений в узлах за счет возможностей этих генераторов по генерированию, в отличие от традиционных распределительных сетей, в которых потери напряжения тем больше, чем дальше от питающей подстанции высокого напряжения. С другой стороны, появляется фликер. Характерно, что фликер развивается при резком снижении напряжения в узле присоединения малого генератора, особенно если генератор асинхронный [9, 10].

Согласно ГОСТ 32144-2013 – Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера. Колебания напряжения характеризуются амплитудой (размахом изменения напряжения) δU_t ; частотой f и интервалами между следующими друг за другом изменениями напряжения Δt_k ; интенсивностью мигания ламп накаливания, оказывающих раздражающее влияние на зрение человека – (интенсивностью фликера (ИФ) или иначе фликером напряжения (ФН)).

II. Цели и задачи исследования

Целью разработки расчетно-аналитической модели участка электрической сети с распределенной генерацией является оценка влияния резкопеременной нагрузки на колебания напряжения в электрической сети при различных параметрах электрической сети. При разработке модели поставлены следующие задачи: анализ колебания напряжения в узле нагрузки с распределенной генерацией; анализ влияния дозы фликера на качество напряжения в узле нагрузки.

III. Описание расчетно-аналитической модели

Схема модели состоит из следующих элементов: шины 10 кВ питающей подстанции как источник бесконечной мощности, линия электропередач 10 кВ, трансформатор ТП 10/0,4 кВ, нагрузка 0,4 кВ, генератор подключенный к шинам 0,4 кВ ТП.

Параметры модели сети следующие.

- Мощность трансформатора принимаем 630 кВА.
- Мощность общей нагрузки – $0,8 S$ трансформатора.
- Мощность нагрузки, работающей в длительном режиме – $0,5 S$ общей нагрузки.
- Мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме – $0,5 S$ общей нагрузки.
- Мощность генератора – $0,5 S$ нагрузки.

Характеристики элементов модели приведены в табл. 2. В основу

модели заложены математические выражения, описывающие параметры электрической сети. В модели рассматривается схема участка распределительной электрической сети с установкой генерации электрической энергии, показанная на рис. 1. На рис. 2 приведена схема замещения данного участка сети. Источником питания на напряжении 10 кВ является энергосистема и генератор, подключенный на шины ТП 10/0,4 кВ. В качестве нагрузок используются нагрузки, работающие в длительном режиме и в режиме кратковременном.

Таблица 2.
Характеристики элементов схемы модели

№ п/п	Наименование	Единицы измерения	Величина
1	Напряжение источника питания	кВ	10
2	Марка провода ЛЭП и сечение	-	АС – 25
3	Марка и мощность трансформатора	-	ТМ – 630
4	Напряжения трансформатора В/Н	кВ	10/0,4
5	Суммарная мощность нагрузки	кВА	504
6	Мощность нагрузки работающей в длительном режиме	кВА	250
7	Мощность кратковременной нагрузки	кВА	254
8	Тип генератора	-	СГДМ – 11 – 40 – 6У2
9	Мощность генератора	кВА	325

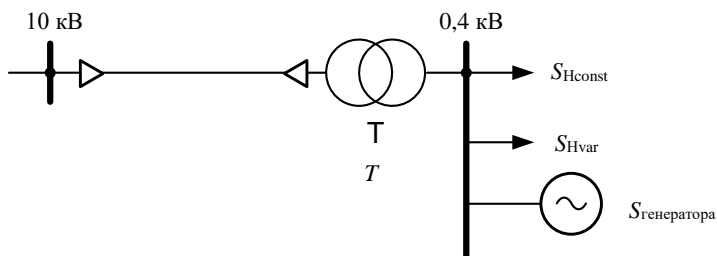


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной электрической сети

Исследования проводились для системы электроснабжения (СЭС) с установкой РГ применительно к схеме, показанной на рис. 2.

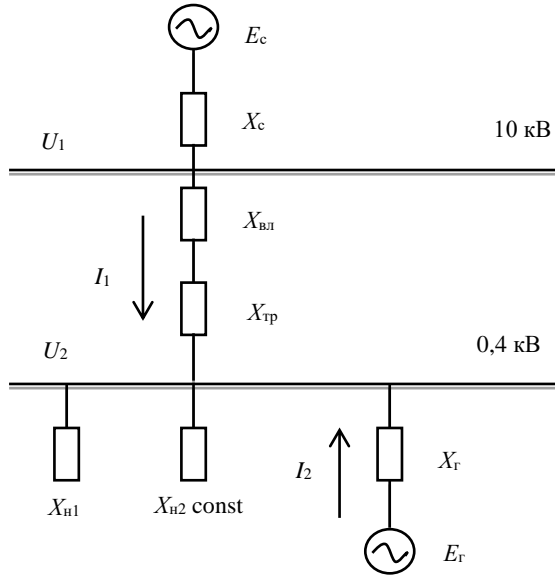


Рис. 2. Схема замещения распределительной электрической сети

Если имеет место повторяющиеся возмущения, расчет кратковременной дозы фликера P_{st} производится с использованием зависимости [3]:

$$P_{st} = 0,365 \cdot \delta U_t \cdot F_3 \cdot r^{0,31} \cdot R, \quad (1)$$

где δU_t – колебания напряжения, определяемые по формуле (11), %; F_3 – коэффициента эквивалентности (равен 1 при прямоугольных колебаниях), о.е.; r – частота изменения напряжения, 1/мин; R – коэффициент, зависящий от частоты изменения напряжения, который определяется по кривой, рис. 3 [8].

Длительную дозу фликера P_{Lt} в относительных единицах, на интервале времени T_L , равном 2 ч, определяют по формуле:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\sum_{k=1}^{12} (P_{stk})^3}, \quad (2)$$

где P_{stk} – кратковременная доза фликера на k – м интервале времени.

При расчете схемы замещения использовались следующие условия $S_0 = 10000$ МВА, $S_K = 1000$ МВА.

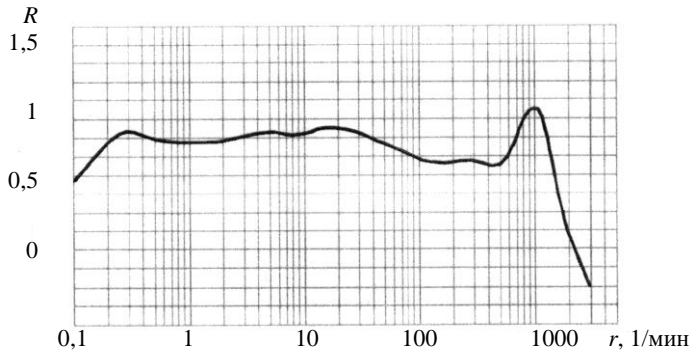


Рис. 3. Зависимость коэффициента R от частоты изменения напряжения

Определяем напряжение \check{U}_2 в зависимости от мощности генератора подключенного к шинам РУ – 0,4 кВ потребителя:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{I} \cdot \dot{x}_\Sigma, \quad (3)$$

где \check{U}_1 – напряжение на шинах питающей подстанции; \dot{x}_Σ – суммарное сопротивление схемы замещения модели, включающее в себя сопротивление системы, ЛЭП, трансформатора и генератора.

Колебания напряжения определяются по формуле:

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где U_i и U_{i+1} – значения следующих один за другим экстремумов напряжения; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение в узле нагрузки.

Потери напряжения определяются по выражению:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_\Sigma + Q \cdot x_\Sigma}{U_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где P – активная мощность; Q – реактивная мощность; r_Σ – суммарное активное сопротивление; x_Σ – суммарное реактивное сопротивление.

Если $x_{\Sigma} \gg r_{\Sigma}$, то

$$\Delta U = \frac{Q \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \quad (6)$$

Для нагрузки, работающей в длительном режиме падение напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U = \frac{(Q' - Q_r) \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} = \frac{(P' \cdot \tan \varphi' - P_r \cdot \tan \varphi_r) \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}}, \quad (7)$$

где P' – активная мощность нагрузки работающей в длительном режиме; P_r – активная мощность генератора; $\tan \varphi'$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки работающей в длительном режиме; $\tan \varphi_r$ – коэффициент реактивной мощности генератора.

Введем обозначение $\alpha = P_r / (P' + P'')$ и $\beta = P'' / P'$, где P'' – активная мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме. При расчете ΔU нагрузка, работающая в кратковременном режиме не подключена, соответственно $P'' = 0$.

Выражение (7) примет вид:

$$\Delta U' = \frac{P' \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (\tan \varphi' - \alpha \cdot \tan \varphi_r). \quad (8)$$

Потери напряжение при работе нагрузки, работающей в длительном режиме и нагрузки, работающей в кратковременном режиме, рассчитываются:

$$\Delta U'' = \frac{x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (Q' + Q'' - Q_r) = \frac{x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (P' \cdot \tan \varphi' + P'' \cdot \tan \varphi'' - P_r \cdot \tan \varphi_r), \quad (9)$$

где P'' – активная мощность нагрузки, работающей в кратковременном режиме; $\tan \varphi''$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, работающей в кратковременном режиме.

Подставив в выражение (9) α и β , получим потери напряжения при работе нагрузки, работающей в длительном режиме и нагрузки, работающей в кратковременном режиме:

$$\Delta U'' = \frac{p' \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot (\tan \varphi' + \beta \cdot \tan \varphi'' - \alpha \cdot \tan \varphi_{\Gamma} \cdot (1 + \beta)). \quad (10)$$

Колебания напряжения для модели сети, приведенной на рис. 1, определяются по формуле:

$$\delta U_i = \frac{|(P_{\Gamma} - p'' \cdot \alpha) \cdot x_{\Sigma} \cdot \beta \cdot \tan \varphi''|}{U_{\text{ном}}^2} \cdot 100. \quad (11)$$

Описанная модель позволяет проводить исследования кратковременной и длительной дозы фликера при различных параметрах работы сети. При анализе колебания напряжения в схеме, показанной на рис. 4, был проведен расчет размаха колебания напряжения с РГ и без РГ в зависимости от отношения $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$.

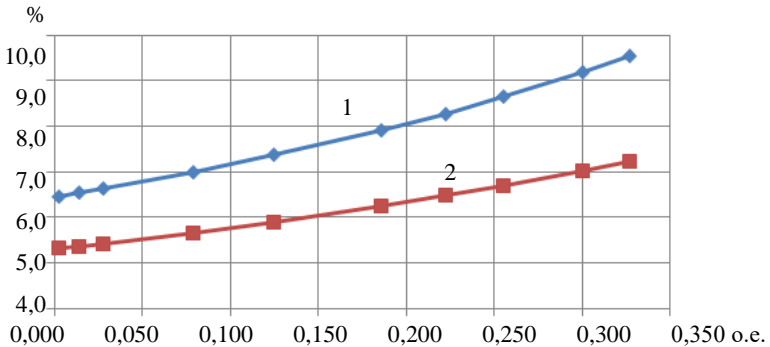


Рис. 4. Размах колебания напряжения с РГ и без РГ в зависимости от отношения $x_{\text{вл}} / (x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})$:
 1 – δU^* размах колебания напряжения без СГ;
 2 – δU^* размах колебания напряжения с СГ

Из рис. 4 видно, что размах колебания напряжения уменьшается при подключении РГ на шины 0,4 кВ.

На рис. 5 приведен пример расчета кратковременной дозы фликера для однолинейной схемы распределительной электрической сети, изображенной на рис. 1 в зависимости от отношения $x_{вл} / (x_{вл} + x_{гр})$.

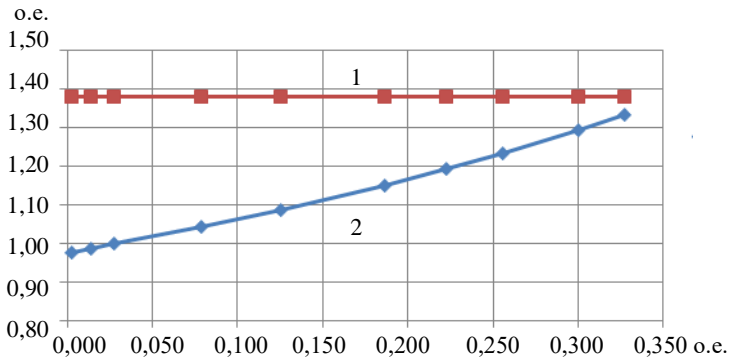


Рис. 5. Кратковременная доза фликера P_{st} в зависимости от отношения $x_{вл} / (x_{вл} + x_{гр})$:
1 – норма; 2 – расчетная

На рис. 6 приведен расчет кратковременной дозы фликера в зависимости от соотношения нагрузок. По оси абсцисс указана доля нагрузки, работающей в кратковременном режиме от нагрузки, работающей в длительном режиме при длине линии 17 км.

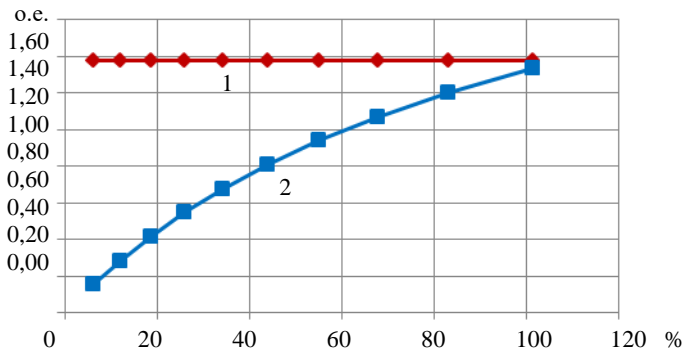


Рис. 6. Кратковременная доза фликера P_{st} в зависимости от соотношения нагрузок:
1 – норма; 2 – расчетная

На рис. 7 показана кратковременная доза фликера в зависимости от частоты изменения кратковременной нагрузки при длине линии 1 км и соотношении нагрузок, равном 1.

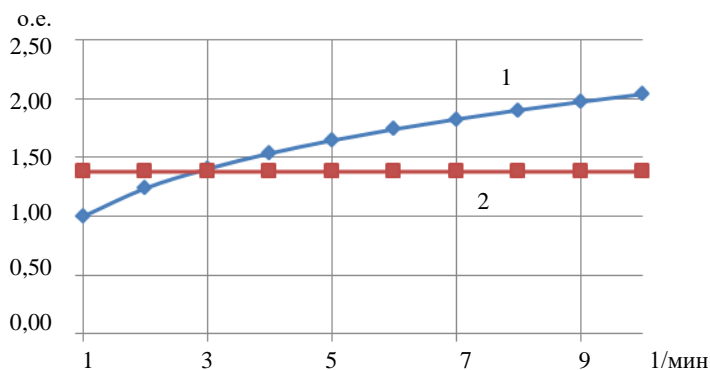


Рис. 7. Кратковременная доза фликера P_{st} в зависимости от частоты изменения кратковременной нагрузки: 1 – расчетная; 2 – норма

IV. Заключение

1. Разработана расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети с распределенной генерацией, позволяющая оценить влияния резкопеременной нагрузки на колебания напряжения в электрической сети при различных параметрах электрической сети.

2. Модель обеспечивает многовариантность расчетов с различными параметрами сети и нагрузки, что позволяет определять оптимальные параметры распределительной сети и резкопеременной нагрузки при проектировании электрических сетей.

© Солнцев Е.Б., 2018
 © Мамонов А.М., 2018
 © Фитасов А.Н., 2018

Библиографический список

- [1] Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации на основе согласованно настроенных регуляторов // Системы Методы Технологии. 2017. № 4 (36). С. 108-114.
- [2] ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

- [3] Калинина Е.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Вятский государственный университет, Киров, 2017.
- [4] Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. К вопросу о стандартах на качество электрической энергии // Омский научный Вестник. 2015. № 1 (137). С. 145-147.
- [5] Дед А.В., Паршукова А.В. О показателях качества электрической энергии. Нормы ГОСТ 32144-2013 // Омский научный Вестник. 2015. № 1 (137). С. 148-150.
- [6] Войнов С.Л., Гамм А.З., Голуб И.И., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Нейман В.В., Саенко Ю.Л. Нормирование показателей качества электрической энергии и их оптимизация: монография. Иркутск: Гливице, 1988. – С. 249.
- [7] Вагин Г.Я., Котельников О.И. Исследование качества электрической энергии на машиностроительных предприятиях и мероприятия по его улучшению в кн.: Качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. М.: МДНТП, 1977. – С. 74-80.
- [8] Савина Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2014. – С. 182.
- [9] Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London: IEE, 2000. – P. 273.
- [10] Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000. P. 222-233.
- [11] Лоскутов А.Б. Решение проблем при переходе электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-25.
- [12] Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25-28.

E.B. Solncev, A.M. Mamonov, A.N. Fitasov

ANALYTICAL MODEL FOR INVESTIGATION OF EFFECT OF DISTRIBUTED GENERATION ON QUALITY OF ELECTRIC ENERGY-VOLTAGE FLUCTUATION

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One of the trends in the development of modern electrical systems is associated with the increased use of distributed generation power plants located in close proximity to consumers. At the same time, the issues of the influence of distributed generation on the quality of electric energy are relevant. Small power plants can cause voltage fluctuation and flicker. The article presents an analytical model of a 10 kV distribution electric network section with a distributed generation power plant. The developed

model is designed to determine the flicker dose in the electrical network caused by the operation of an abruptly variable load. The model allows studies of the influence of a abruptly variable load on the power quality for various parameters of the electrical network. The results of calculating the magnitude of voltage fluctuations depending on the ratio of the inductive impedance of the line and transformer are given for two situation: with a source of distributed generation and without it, The simulation results can be used in the design of electrical networks to determine the optimal parameters of the network and abruptly variable load.

Keywords: distributed generation, flicker dose, power quality, simulation, voltage fluctuation.

References

- [1] Yu.N. Bulatov and A.V. Kryukov, «Elimination of flicker in networks with distributed generation installations based on consistently configured controllers», *Systems Methods Technology*, vol. 4, no. 36, pp. 108-114, 2017.
- [2] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks, EN 50160 – 2010 ed 3.0*, July 2010.
- [3] E.A. Kalinina, «Thesis for the degree of candidate of technical sciences», Vyatka State University, Kirov, Russia, 2017.
- [4] A.V. Ded, S.V. Biryukov and A.V. Parshukova, «On the issue of standards for the quality of electrical energy», *Omsk Scientific Herald*, vol. 1, no. 137, pp. 145-147, 2015.
- [5] A.V. Ded and A.V. Parshukova, «On the indicators of the quality of electrical energy. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks», *Omsk Scientific Herald* vol. 1, no. 137, pp. 148-150, 2015.
- [6] S.L. Voinov, A.Z. Gamm, I.I. Golub, I.V. Zhezhenko, Yu.S. Zhelezko, V.V. Neiman and Yu.L. Saenko, *Rationing of quality indicators of electric energy and their optimization: monograph*. Irkutsk: Gliwice, 1988, P. 249.
- [7] G.Ya. Vagin and O.I. Kotelnikov, «Investigation of the quality of electrical energy in machine – building enterprises and measures for its improvement» in the book *The quality of electricity in the networks of industrial enterprises*. Moscow: MDNTP, 1977, pp. 74-80.
- [8] N.V. Savina, *Electricity quality: study guide*. Blagoveshchensk: Amur State University, 2014, P. 182.
- [9] N. Jenkins, R. Allan, P. Grossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded Generation*. London: IEE, 2000, P. 273.
- [10] Ph. P. Barker and R.W. De Mello, «Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems», 2000 IEEE PES Summer Meeting, July 11-15, 2000, Seattle, WA, USA, pp. 222-233.
- [11] A.B. Loskutov, «Problem solving in the transition of electric power industry to digital technologies», *Intellectual electrical engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 9-25, 2018.
- [12] E.N. Sosnina and R.Sh. Bedretdinov, «The main directions of development of intelligent electric networks based on adaptive control», *Electrical equipment: operation and repair*, no. 5, pp. 25-28, 2012.