

УДК 621.311.13

НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СПОСОБЫ ЕГО УМЕНЬШЕНИЯ

Ф. Р. Исмагилов¹, Д. В. Максудов², Р. Р. Саттаров³, А. Ш. Гареев⁴

²md77@list.ru, ⁴aivaz1988@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 18 декабря 2013 г.

Аннотация. Обеспечение качества электроэнергии в сетях общего назначения представляет собой важнейшую проблему электроснабжения. Одним из показателей качества электроэнергии является глубина и длительность провалов напряжения. В настоящее время большое внимание уделяется вопросу защиты оборудования от влияния провалов напряжения, однако проблема минимизации самих провалов на уровне причин их возникновения изучена только с точки зрения снижения вероятности возникновения коротких замыканий в электрических сетях. В связи с этим представляется актуальным исследование факторов влияющих на характер провалов напряжения, что позволило бы уменьшить ущерб от провалов и повысить качество электрической энергии, на уровнях как распределительных сетей, так и систем электроснабжения отдельных промышленных предприятий.

Ключевые слова: провалы напряжения; глубина провала напряжения; остаточное напряжение; группа соединения обмоток трансформатора.

В данной статье рассматривается влияние провалов напряжения на режим работы трехфазных асинхронных двигателей (АД) при возникновении коротких замыканий (КЗ) в распределительных сетях, напряжение которых на ступень выше, чем номинальное напряжение АД, т. е. когда между точкой возникновения провала напряжения и АД имеется трансформатор.

Провалы напряжения, как правило, приводят к возникновению несимметричного режима, что усложняет исследования влияния провала напряжения на потребителей при наличии понижающей подстанции между точкой возникновения провала и электроприемником, так как при этом расчеты усложняются переходом провала напряжения через трансформаторы.

В общем случае расчет перехода несимметричной системы напряжений через трансформатор проходит в три этапа:

- расчет напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- учет поворота симметричных составляющих напряжения в зависимости от группы соединения обмоток трансформатора, и так же

учет влияния режима работы нейтрали трансформатора;

- расчет напряжений с учетом изменения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для проведения вышепоставленного анализа приняты два допущения:

- не учитывается влияние фазовых сдвигов напряжений, возникающих при переходе провала напряжения через трансформатор;
- проведен анализ только случая, когда между точкой КЗ и потребителем находится один трансформатор, хотя на практике встречаются случаи двух и более трансформаторов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для выполнения данных расчетов была разработана специальная методика, с использованием матричной формы записи уравнений [1, 2]:

$$|\underline{U}_{HH}| = \frac{1}{3} \times |\underline{T}_P| \times |\underline{U}_{BH}|,$$

где $|\underline{U}_{HH}|$ – вектор-столбец напряжений на расчетной стороне трансформатора; $|\underline{U}_{BH}|$ – век-

тор-столбец напряжений со стороны короткого замыкания; $[Tp]$ – квадратная матрица, учитывающая влияние группы соединения обмоток трансформатора и режима работы нейтрали:

$$[Tp] = \begin{bmatrix} b+b^{-1}+\delta & ab+a^2b^{-1}+\delta & a^2 \cdot b+a \cdot b^{-1}+\delta \\ a^2 \cdot b+a \cdot b^{-1}+\delta & b+b^{-1}+\delta & a \cdot b+a^2 \cdot b^{-1}+\delta \\ a \cdot b+a^2 \cdot b^{-1}+\delta & a^2b+ab^{-1}+\delta & b+b^{-1}+\delta \end{bmatrix},$$

где $a = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – единичный вектор,

умножение на который соответствует повороту вектора фазного напряжения на 120° против часовой стрелки;

$b = e^{-j\frac{\pi}{6}N}$ – величина, зависящая от группы соединения обмоток трансформатора; N – номер группы соединения обмоток трансформатора; δ – величина, зависящая от режима работы нейтрали и принимающая значения 1 (случай заземленной нейтрали) или 0 (случай изолированной нейтрали).

На основании данного матричного метода расчета составлена зарегистрированная программа ЭВМ [3], позволяющая проводить численное моделирование на базе вычислительных мощностей.

Вышеуказанным способом были рассчитаны переходы провалов напряжения через один трансформатор при всех видах КЗ для всех возможных видов трансформаторов и режимов работы нейтрали. Анализируя полученные данные, можно заметить, что некоторые группы соединения обмоток трансформаторов влияют на переход провала напряжения аналогично

друг другу, только на различные фазы напряжений. Исходя из этого, можно сделать вывод, что все группы соединения обмоток трансформаторов можно разделить на три категории по влиянию их на переход провала напряжения через трансформатор: I – 0, 4, 8; II – 1, 3, 5, 7, 9, 11; III – 2, 6, 10. Так же это разделение на три категории для наглядности можно представить в графической форме на циферблате часов (рис. 1).

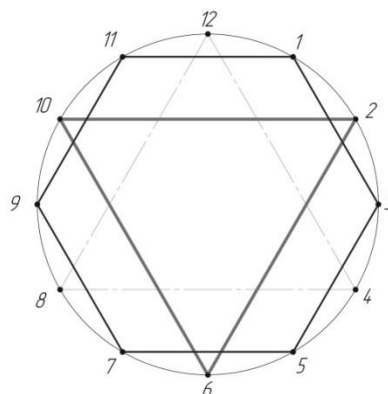


Рис. 1. Графическое отображение на циферблате часов деления трансформаторов на три категории по критерию влияния на переход провалов напряжения

Результаты проведенных расчетов представлены в виде объемных гистограмм отдельно для случая заземленного режима работы нейтрали (рис. 2) и изолированного режима работы нейтрали (рис. 3).

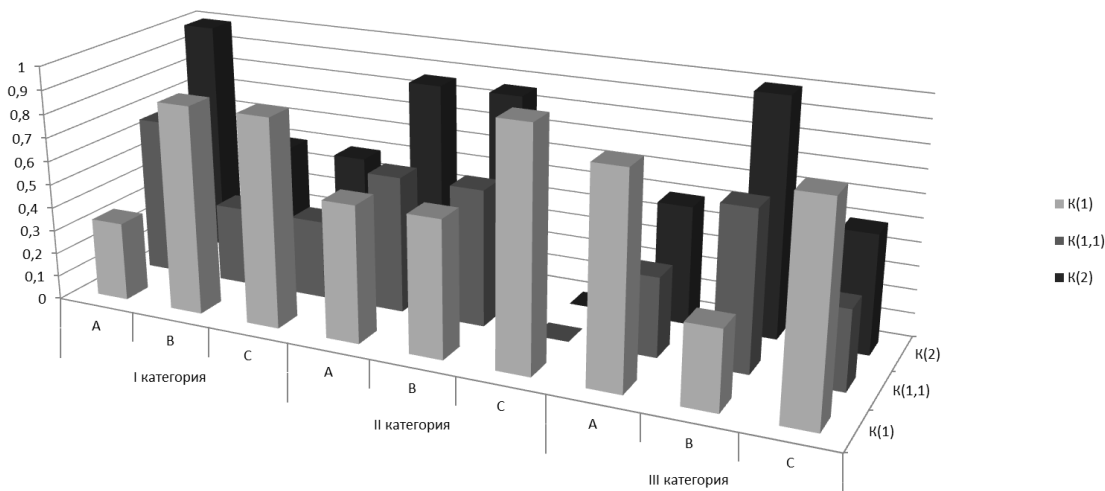


Рис. 2. Результаты расчета перехода провалов напряжения через трансформатор при всех видах КЗ и категориях трансформаторов для заземленного режима работы нейтрали трансформатора

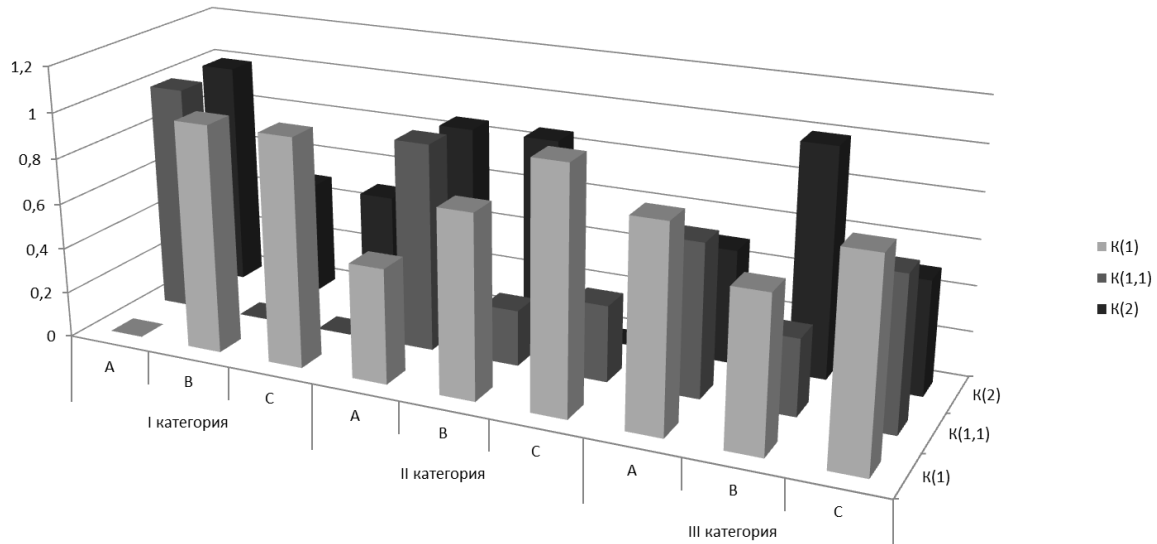


Рис. 3. Результаты расчета перехода провалов напряжения через трансформатор при всех видах КЗ и категориях трансформаторов для изолированного режима работы нейтрали трансформатора

По проведенному выше анализу видно, что даже 100-процентные провалы напряжения на одной или двух фазах при переходе через трансформаторы могут восстановиться до определенной степени. Однако остается вопрос устойчивости работы АД при таких остаточных напряжениях. Известно, что максимальная мощность АД изменяется прямо пропорционально квадрату напряжения на зажимах АД. Однако это справедливо только при одинаковом изменении значения напряжения по всем трем фазам. В связи с этим возникает проблема анализа устойчивости работы АД при различных напряжениях фаз, каковые получились на рис. 1 и 2.

Известно, что мощность АД прямо пропорциональна квадрату напряжения:

$$P \sim U^2,$$

а следовательно, и мощность каждой из обмоток прямо пропорциональна квадрату напряжения фазы на этой обмотке и равна 1/3 полной мощности АД:

$$P_A = \frac{P}{3} \sim U_A^2;$$

$$P_B = \frac{P}{3} \sim U_B^2;$$

$$P_C = \frac{P}{3} \sim U_C^2.$$

Тогда мощность каждой обмотки после провала напряжения (обозначают штрихом) будет иметь следующую зависимость от напряжения:

$$\begin{cases} P'_A \sim U'^2_A = (x \cdot U_A)^2 \\ P'_B \sim U'^2_B = (y \cdot U_B)^2 \\ P'_C \sim U'^2_C = (z \cdot U_C)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P'_A \sim x^2 \cdot U^2_A \\ P'_B \sim y^2 \cdot U^2_B \\ P'_C \sim z^2 \cdot U^2_C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P'_A = x^2 \cdot P_A \\ P'_B = y^2 \cdot P_B \\ P'_C = z^2 \cdot P_C \end{cases},$$

где x, y, z – коэффициенты провалов напряжения в фазе А, В, С соответственно. Они показывают величину остаточного напряжения в относительных единицах по отношению к номинальному значению.

Полная мощность АД после провала напряжения определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} P' &= P'_A + P'_B + P'_C = \\ &= x^2 \cdot P_A + y^2 \cdot P_B + z^2 \cdot P_C = \\ &= x^2 \cdot \frac{P}{3} + y^2 \cdot \frac{P}{3} + z^2 \cdot \frac{P}{3} = \frac{P}{3} \cdot x^2 + y^2 + z^2; \\ P' &= P \cdot \frac{x^2 + y^2 + z^2}{3} = U_{\text{дей.пр.}} \cdot P, \end{aligned}$$

где $U_{\text{дей.пр.}} = \frac{x^2 + y^2 + z^2}{3}$ – действующее значение напряжения при неравномерном провале напряжения в трехфазной сети.

Используя такой параметр как «действующее значение напряжения при неравномерном провале напряжения», можно сравнить провалы напряжения при различных трансформаторах между точкой КЗ и АД.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Так как ранее все группы соединения обмоток трансформаторов были разделены на три категории, то для анализа достаточным является сравнение по одной группе из каждой категории. В результате сравнения и анализа действующих значений напряжения при неравномерном провале напряжения было установлено, что хотя напряжения на отдельных фазах можно увеличить путем подбора различных групп соединения обмоток трансформаторов, однако увеличение действующего значения напряжения

при неравномерном провале напряжения невозможно и его значение одинаково для всех групп соединения обмоток трансформаторов. Так же можно сделать вывод, что происходит снижение действующего значения напряжения при неравномерном провале напряжения в случае изолирования нейтрали трансформатора при однофазном и двухфазном КЗ на землю. Следовательно, изолирование нейтрали трансформатора является нежелательным мероприятием с точки зрения влияния трансформатора на переход провалов напряжения. Эти выводы представлены в графическом виде на рис. 4.

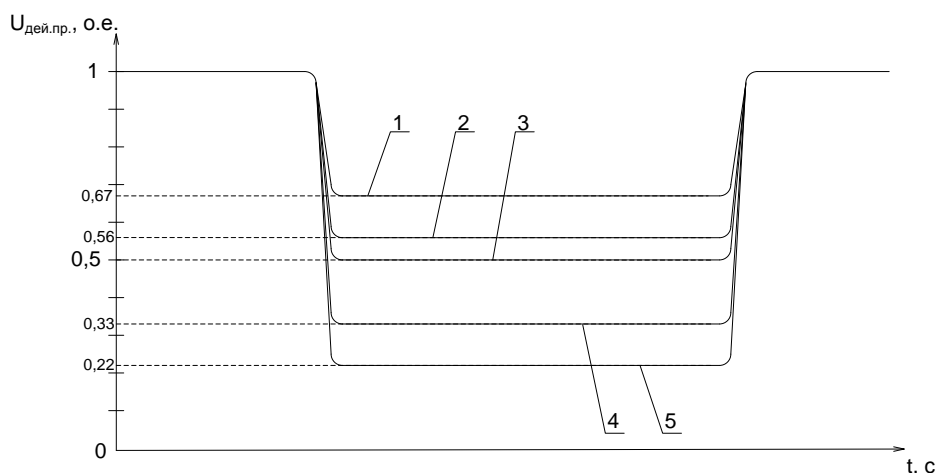


Рис. 4. Характер провала напряжения при его переходе через трансформаторы всех видов и режимов работы нейтрали, вызванных различными видами КЗ: 1 – однофазное КЗ и заземленная работа нейтрали; 2 – однофазное КЗ и изолированная работа нейтрали; 3 – двухфазное металлическое КЗ и заземленная/изолированная работа нейтрали; 4 – двухфазное КЗ на землю и заземленная работа нейтрали; 5 – двухфазное КЗ на землю и изолированная работа нейтрали

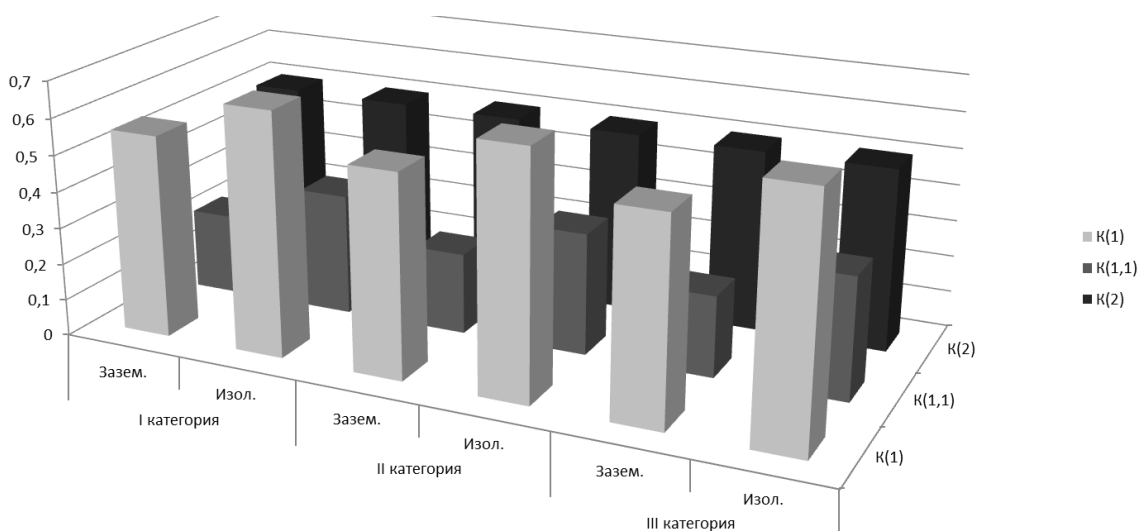


Рис. 5. Результаты расчета перехода провалов напряжения через трансформатор при всех видах КЗ, трансформаторов и режима работы нейтрали, приведенные к «действующему значению напряжения при неравномерном провале напряжения»

Анализ устойчивости работы АД показывает, что данная устойчивость зависит от величины критического напряжения $U_{кр}$ АД, которое меняется в соответствии с изменениями нагрузки двигателя. На рис. 5 в графическом виде представлен результат анализа перехода провалов напряжения через трансформатор. Используя этот график можно оценить какие трансформаторы и при каких видах КЗ позволят сохранить устойчивую работу АД при определенном значении $U_{кр}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и математическое моделирование с применением ЭВМ позволяют сделать следующие выводы:

- наличие одного трансформатора с заземленной нейтралью между точкой возникновения провала напряжения и электроприемником не влияет на режим работы трехфазного асинхронного двигателя;
- изолированность нейтрали негативно влияет на переход провала напряжения через трансформатор и является нежелательным фактором с точки зрения влияния провала напряжения на работу АД.

Учитывая наличие в сети однофазных электроприемников, оптимальной является установка трансформаторов II и III категорий с заземлением нейтрали, т. к. в этом случае при любом виде КЗ на всех фазах исключается 100-процентный провал напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гареев А.Ш.** Матричный метод расчета преобразований провалов напряжения электрической сети // Тинчуринские чтения: матер. докл. V Междунар. молодежн. науч. конф. / Под общ. ред. Ю. Я. Петрушенко. В 4 т. Казань: КГЭУ, 2010. Т. 1. С. 25–26. [А. С. Gareev, "The matrix method of calculation the conversion of voltage sags in electric networks," in *Proc. 5th Int. Youth Sci. Conf. «Tinchurinskiye chteniya»*, vol. 1, pp. 25-26, Kazan: KGEU, 2010.]

2. **Гареев А. Ш.** Упрощенный метод расчета провалов напряжений в распределительных сетях // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 248–252. [А. С. Gareev, "The simplified method of calculation the voltage sags in distribution networks," in *Interuniversity scientific collection "Electrician, electrical complexes and systems*, pp. 248-252, Ufa: UGATU, 2010.]

3. **Свид.** о гос. рег. программы для ЭВМ 2011611789. Расчет преобразования несимметрии напряжений в распределительной сети / А. Ш. Гареев, Т. А. Тимербулатов, Р. Ф. Ахметзянов. М.: Роспатент, 2011. [А. С. Gareev, Т. А. Timerbulatov, Р. Ф. Ahmetzyanov, *The calculation of volt-*

age unbalance in distributing networks: The certificate of state registration of computer programs no. 2011611789.]

ОБ АВТОРАХ

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, зав. каф. ЭМ. Дипл. инж.-э/мех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук (УГАТУ, 1998), проф. Иссл. в обл. специальные электромеханические преобразовательные энергии.

МАКСУДОВ Денис Вильевич, доц. каф. ЭМ. Дипл. спец. в обл. физики (БГУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2002), доц. Иссл. в обл. взаим. эл. полей и диэлектриков.

САТТАРОВ Роберт Радикович, проф. каф. ЭМ. Дипл. физик-геофизик (БГУ, 1996). Д-р. техн. наук (УГАТУ, 2011), проф. Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.

ГАРЕЕВ Айваз Шамилевич, асп. каф. ЭМ. Дипл. инж.-э/мех. (УГАТУ, 2011). Готовит дис. о провалах напряжения в эл. сетях.

METADATA

Title: The methods of reducing of a negative impact of voltage sags on consumers.

Authors: F. R. Ismagilov¹, D. V. Maksudov², A. S. Gareev³

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ³ aivaz1988@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (63), pp. 127-131, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The essential problem of of the electric power supply is to provide quality of electric power in the networks of general purpose. The depth and the duration of a voltage sag is one of the significations of the quality of electric power. At the present time the question of equipment protection from the impact of voltage sags has a considerable attention, however the problem of reducing the sags on the level of the cause of their uprising is studied only from the point of view of decreasing the probability of occurrence of short circuits in electric networks. Thereby the analysis of factors influencing the nature of voltage sags pretends to be up-to-date, this would reduce the damage caused by sags and improve the quality of electricity, on the level of distribution networks as well as power systems of individual industrial enterprises.

Key words: voltage sags; depth of a voltage sag; residual voltage; transformer winding group.

About authors:

ISMAGILOV, Flur Rashitovich, rector's advisor for organizational and legal issues, doctor of technical sciences, professor, head of department of EM FAI USATU.

MAKSUDOV, Denis Vil'evich, cand. of Tech. Sci., associate professor, department of EM FAI USATU.

SATTAROV, Robert Radilovich, doctor of Tech. Sci., professor, department of EM FAI USATU.

GAREEV, Aivaz Shamilevich, Graduate student EM FAI USATU. Dipl. Engineer (USATU, 2011). Preparing a thesis about brownouts in electrical networks.