

УДК 621.3

Определение допустимой потери напряжения в электрических сетях напряжением до 1 кВ промышленных предприятий

Ковалева А. А., Свирида Я.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент РАДКЕВИЧ В. Н.

Потеря напряжения – это алгебраическая разность модулей напряжений между какими-то двумя точками сети. В отличие от падения напряжения, являющегося комплексной величиной, потеря напряжения (продольная составляющая падения напряжения) – величина вещественная, которая в общем случае не равна модулю падения напряжения. Достаточно показательной является величина наибольших допустимых (располагаемых) потерь напряжения в сети одного номинального напряжения. Она является косвенной характеристикой экономичности работы электрической сети и определяет условия обеспечения ее режима напряжения.

Расчет осветительной сети по потере напряжения сводится к определению площади поперечного сечения и материала жил проводов и кабелей, либо при известных параметрах проводников – к расчету потери напряжения при передаче электроэнергии от источника питания к световым приборам.

При выполнении расчета осветительной электрической сети по потере напряжения во всех случаях встает вопрос о ее допустимой величине, которая не может иметь постоянного значения и зависит от параметров линий, трансформаторов и их нагрузок. Допустимая потеря напряжения определяется в предположении, что на выводах высшего напряжения (6 – 10 кВ) силовых трансформаторов напряжение в период максимума нагрузки равно номинальному напряжению $U_{ном}$ и, следовательно, напряжение на стороне 0,4 кВ в режиме холостого хода составляет $1,05U_{ном}$ или 105% номинального. В этом случае потеря напряжения в электрической сети от источника питания (трансформатора) до наиболее удаленного электроприемника, включая потерю напряжения в самом трансформаторе ΔU_T , может быть представлена как

$$\Delta U_{доп} = U_x - U_l - \Delta U_T, \quad (1)$$

где U_x – напряжение холостого хода на шинах низшего напряжения трансформатора, $U_x = 105\%$;

U_l – минимальное допустимое напряжение у наиболее удаленной лампы, $U_l = 95\%$;

ΔU_T – потеря напряжения в силовом трансформаторе, к которому подключена осветительная установка, %.

С учетом значений U_x и U_l выражение (1) может быть представлено в виде [1]

$$\Delta U_{доп} = 10 - \Delta U_T. \quad (2)$$

Формула (2) соответствует действовавшему в Республике Беларусь нормативному документу ГОСТ 13109-97, который определял нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонения напряжения на выводах электроприемников соответственно ± 5 и $\pm 10\%$. Такие нормы качества электроэнергии позволяли с помощью регулировочных ответвлений распределительных трансформаторов изменять напряжение в пределах $\pm 5\%$.

С 01.07.2014 года в Республике Беларусь введен ГОСТ 32144–2013 [2], который устанавливает другие требования к напряжению, подводимому к зажимам электроприемников. Согласно [2] показателями качества электроэнергии, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательные и положительные отклонения напряжения от номинального или согласованного напряжения в точке передачи электроэнергии. Под согласованным напряжением электропитания понимается напряжение, отличающееся от стандартного значения по ГОСТ 29322, согласованное в качестве напряжения электропитания для конкретного пользователя электрической сети при технологическом присоединении. Согласованное напряжение применяется для электрических сетей напряжением выше 1 кВ.

Для указанных выше показателей качества электроэнергии ГОСТ 32144–2013 устанавливает следующие нормы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электроэнергии не должны превышать 10% номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При таких нормах качества электроэнергии энергоснабжающая организация может иметь в точке присоединения распределительных трансформаторов к сетям напряжением выше 1 кВ, напряжение, существенно отличающееся от номинального значения. Следовательно, расчет допустимой потери напряжения в электроустановках до 1 кВ по формуле (2) не может быть корректным, тем более, что выпускаемые производителями распределительные трансформаторы напряжением 10(6)/0,4 кВ не обладают диапазоном регулирования напряжения $\pm 10\%$.

Допустимая потеря напряжения в сети напряжением до 1 кВ может быть определена по выражению

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_2 - U_3, \quad (3)$$

где U_2 – действительное напряжение на шинах напряжением до 1 кВ распределительной трансформаторной подстанции, %;

U_3 – минимально допустимое напряжение, подведенное к зажимам электроприемника, электрически наиболее удаленного от трансформатора, %.

Значение U_3 обычно принимается 95%, при котором электроприемники имеют лучшие технико-экономические показатели. В тоже время отметим, что современные световые приборы могут работать при гораздо меньших значениях U_3 .

Для определения U_2 необходимо выбрать добавку напряжения распределительного трансформатора по формуле

$$E_T = U_{2ж} + \sum_{i=1}^n \Delta U_{ли} + \Delta U_T - U_{ип}, \quad (4)$$

где $U_{2ж}$ - желаемое напряжение на шинах до 1 кВ подстанции, %;

$U_{ип}$ - напряжение на шинах источника питания (ИП), %;

$\Delta U_{ли}$ - потеря напряжения в i -й линии на пути от ИП до рассматриваемого трансформатора, %;

ΔU_T - потеря напряжения в распределительном трансформаторе, %;

n - количество линий напряжением 10 (6) кВ, входящих в данный путь.

Добавка напряжения трансформатора E_T – это приращение напряжения, возникающее в сети напряжением до 1 кВ при переключении его регулировочных ответвлений. Для распределительных трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ количество регулировочных витков ω первичной обмотки лежит в пределах $\pm 5\%$. Тогда добавочное напряжение, выраженное в %, определяется как [3]

$$E_T = 5 \cdot \omega \%. \quad (5)$$

С учетом того, что $\omega = \pm 5\%$, значение добавки напряжения находится в диапазоне

$E_T = 0 - 10\%$. Если к основному выводу обмотки добавить 5% витков, то добавочное напряжение $E_T = 0$, а при $\omega = -5\%$ значение $E_T = 10\%$.

После выбора стандартной величины E_T и соответствующего ей количества дополнительных витков определяется фактическое значение величины вторичного напряжения в %:

$$U_2 = U_{ип} + E_T - \sum_{i=1}^n \Delta U_{ли} - \Delta U_T. \quad (6)$$

Значения $U_{ип}$ и потерь напряжения в линиях электропередачи зависят от исходных данных конкретной электрической сети. В то же время расчет допустимой потери напряжения

можно упростить, если иметь таблицы со значениями ΔU_T силовых трансформаторов, наиболее распространенных в системах электроснабжения производственных объектов.

В общем случае потери напряжения в трансформаторах определяются по выражению [4]:

$$\Delta U_T = \beta_T (U_{ка} \cdot \cos \varphi + U_{кр} \cdot \sin \varphi) + \frac{\beta_T^2}{200} \cdot (U_{кр} \cos \varphi - U_{ка} \cdot \sin \varphi)^2, \quad (7)$$

где β_T - коэффициент загрузки трансформатора;

$U_{ка}$ и $U_{кр}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %;
 $\cos \varphi$ - коэффициент мощности нагрузки трансформатора.

Значение $U_{ка}$, которое представляет собой активное сопротивление обмоток трансформатора в процентах, определяется по формуле

$$U_{ка} = \Delta P_k \cdot 100 / S_{ном}, \quad (8)$$

где ΔP_k – потери короткого замыкания, кВт;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Реактивное сопротивление обмоток трансформатора находится из треугольника сопротивлений

$$U_{кр} = \sqrt{U_k^2 - U_{ка}^2}, \quad (9)$$

где U_k - напряжения короткого замыкания, %.

В формуле (7) второе слагаемое по сравнению с первым обычно невелико и им для трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А можно пренебречь. Тогда

$$\Delta U_T = \beta_T \cdot (U_{ка} \cdot \cos \varphi + U_{кр} \cdot \sin \varphi). \quad (10)$$

В таблице 1 приведены результаты расчета потерь напряжения ΔU_1 по формуле (7) и ΔU_2 - по (10) в масляных трансформаторах типа ТМГ12, а также в сухих трансформаторах типа ТСЗГЛ при коэффициентах загрузки $\beta_T = 0,7$ и мощности $\cos \varphi = 0,9$. Так же определена погрешность расчета ΔU_T при использовании упрощенной формулы (10) по следующему выражению:

$$\Delta U = \left(1 - \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \right) \cdot 100\%. \quad (11)$$

Таблица 1 – Погрешность расчета потерь напряжения ΔU_T по упрощенной формуле

| Наименование трансформатора | ΔU_1 , % (по точной формуле) | ΔU_2 , % (по упрощенной формуле) | Погрешность ΔU , % |
|-----------------------------|---|---|----------------------------|
| ТМГ12-630 | 2,37 | 2,32 | 2,11 |
| ТМГ12-1000 | 2,36 | 2,31 | 2,12 |
| ТСЗГЛ-630 | 2,28 | 2,23 | 2,19 |
| ТСЗГЛ-1000 | 2,40 | 2,34 | 2,50 |

Из таблицы 1 следует, что для рассмотренных типоразмеров силовых трансформаторов погрешность расчета потери напряжения по упрощенной формуле (10) не превышает 5%, что вполне допустимо при определении потерь напряжения в системах электроснабжения. В то же время значение погрешности ΔU для сухих трансформаторов несколько больше, чем для маслонаполненных.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета потерь напряжения в силовых трансформаторах по выражению (7) при значениях коэффициента загрузки $\beta_T = 0,5-1$ и коэффициента мощности $\cos \varphi = 0,5-1$. Таблица 2 составлена для масляных трансформаторов типа ТМГ12 и ТМГ11 со схемой соединения обмоток Δ/Y_n , а таблица 3 – для сухих трансформаторов типа ТСЗГЛ.

Таблица 2 – Потери напряжения в масляных трансформаторах

| Мощность трансформатора, кВ·А | Коэффициент загрузки трансформатора | Потери напряжения, %, при коэффициенте мощности нагрузки трансформатора, равном | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | | 1,0 | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 630 (ТМГ12) | 1,0 | 1,22 | 2,82 | 5,42 | 4,16 | 4,65 | 4,99 | 5,22 |
| | 0,95 | 1,15 | 2,67 | 3,24 | 3,95 | 4,41 | 4,74 | 4,96 |
| | 0,9 | 1,07 | 2,53 | 3,06 | 3,74 | 4,18 | 4,49 | 4,70 |
| | 0,8 | 0,94 | 2,24 | 2,71 | 3,32 | 3,71 | 3,98 | 4,18 |
| | 0,7 | 0,75 | 1,95 | 2,37 | 2,90 | 3,24 | 3,48 | 3,65 |
| | 0,6 | 0,70 | 1,66 | 2,02 | 2,48 | 2,78 | 2,98 | 3,13 |
| | 0,5 | 0,57 | 1,38 | 1,68 | 2,06 | 2,31 | 2,49 | 2,61 |
| 1000 (ТМГ12) | 1,0 | 1,20 | 2,80 | 3,40 | 4,15 | 4,64 | 4,98 | 5,22 |
| | 0,95 | 1,13 | 2,65 | 3,22 | 3,94 | 4,40 | 4,73 | 4,95 |
| | 0,9 | 1,06 | 2,51 | 3,05 | 3,73 | 4,17 | 4,48 | 4,69 |
| | 0,8 | 0,93 | 2,22 | 2,70 | 3,31 | 3,70 | 3,98 | 4,17 |
| | 0,7 | 0,74 | 1,94 | 2,36 | 2,89 | 3,24 | 3,48 | 3,65 |
| | 0,6 | 0,68 | 1,65 | 2,01 | 2,47 | 2,77 | 2,98 | 3,13 |
| | 0,5 | 0,56 | 1,37 | 1,67 | 2,06 | 2,31 | 2,48 | 2,60 |
| 1600 ТМГ12 | 1,0 | 1,21 | 2,97 | 3,62 | 4,46 | 5,00 | 5,38 | 5,66 |
| | 0,95 | 1,14 | 2,81 | 3,44 | 4,23 | 4,75 | 5,11 | 5,37 |
| | 0,9 | 1,07 | 2,66 | 3,25 | 4,00 | 4,50 | 4,84 | 5,09 |
| | 0,8 | 0,94 | 2,35 | 2,88 | 3,55 | 3,99 | 4,30 | 4,52 |
| | 0,7 | 0,72 | 2,05 | 2,51 | 3,10 | 3,49 | 3,76 | 3,95 |
| | 0,6 | 0,68 | 1,75 | 2,15 | 2,65 | 2,99 | 3,22 | 3,39 |
| | 0,5 | 0,56 | 1,45 | 1,78 | 2,21 | 2,49 | 2,68 | 2,82 |

Таблица 3 – Потери напряжения в сухих трансформаторах

| Мощность трансформатора, кВ·А | Коэффициент загрузки трансформатора | Потери напряжения, %, при коэффициенте мощности нагрузки трансформатора, равном | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | | 1,0 | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 630 (ТСЗГЛ) | 1,0 | 1,06 | 2,68 | 3,36 | 4,05 | 4,56 | 4,92 | 5,17 |
| | 0,95 | 1,00 | 2,54 | 3,11 | 3,85 | 4,33 | 4,67 | 4,91 |
| | 0,9 | 0,94 | 2,40 | 2,94 | 3,64 | 4,10 | 4,42 | 4,65 |
| | 0,8 | 0,82 | 2,11 | 2,61 | 3,23 | 3,64 | 3,93 | 4,13 |
| | 0,7 | 0,71 | 1,85 | 2,27 | 2,82 | 3,18 | 3,44 | 3,62 |
| | 0,6 | 0,60 | 1,58 | 1,94 | 2,42 | 2,73 | 2,94 | 3,10 |
| | 0,5 | 0,49 | 1,31 | 1,61 | 2,01 | 2,27 | 2,45 | 2,58 |

Продолжение таблицы

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1000 (ТСЗГЛ) | 1,0 | 1,02 | 2,80 | 3,47 | 4,33 | 4,89 | 5,30 | 5,59 |
| | 0,95 | 0,96 | 2,65 | 3,29 | 4,11 | 4,65 | 5,03 | 5,31 |

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,9 | 0,90 | 2,50 | 3,11 | 3,89 | 4,40 | 4,77 | 5,03 |
| | 0,8 | 0,78 | 2,21 | 2,75 | 3,45 | 3,90 | 4,23 | 4,47 |
| | 0,7 | 0,67 | 1,93 | 2,40 | 3,01 | 3,41 | 3,70 | 3,91 |
| | 0,6 | 0,57 | 1,64 | 2,05 | 2,57 | 2,92 | 3,17 | 3,35 |
| | 0,5 | 0,46 | 1,36 | 1,70 | 2,14 | 2,43 | 2,64 | 2,79 |
| 1600 (ТСЗГЛ) | 1,0 | 0,88 | 2,68 | 3,36 | 4,23 | 4,82 | 5,24 | 5,54 |
| | 0,95 | 0,83 | 2,54 | 3,18 | 4,02 | 4,57 | 4,97 | 5,26 |
| | 0,9 | 0,78 | 2,40 | 3,01 | 3,80 | 4,33 | 4,71 | 4,98 |
| | 0,8 | 0,68 | 2,12 | 2,66 | 3,37 | 3,84 | 4,18 | 4,43 |
| | 0,7 | 0,58 | 1,84 | 2,32 | 2,94 | 3,36 | 3,66 | 3,87 |
| | 0,6 | 0,49 | 1,57 | 1,98 | 2,52 | 2,87 | 3,13 | 3,32 |
| | 0,5 | 0,40 | 1,30 | 1,65 | 2,09 | 2,39 | 2,61 | 2,76 |

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости $\Delta U_T = f(\beta_T; \cos \varphi)$ для наиболее распространенных типоразмеров трансформаторов ТМГ12 – 1000, ТМГ12 – 1600.

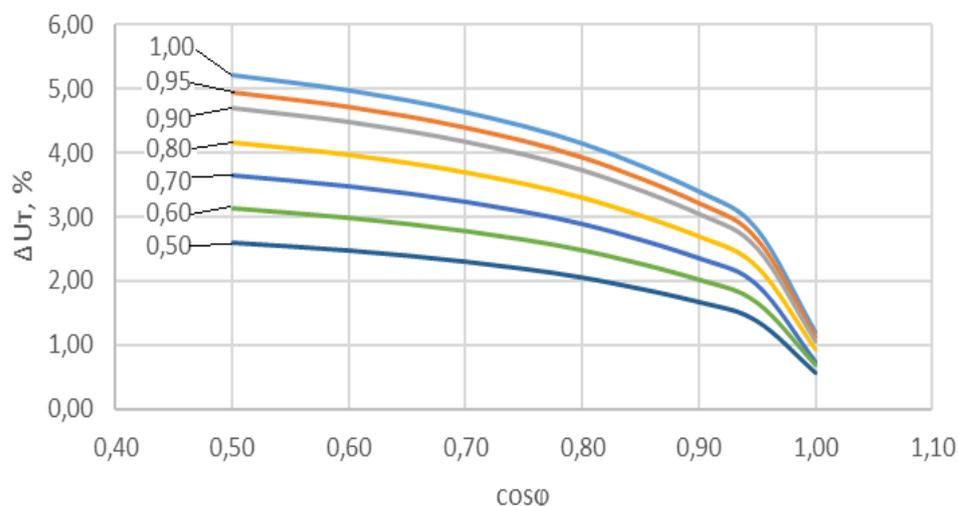


Рисунок 1 – Зависимость $\Delta U_T = f(\beta_T; \cos \varphi)$ для ТМГ12-1000

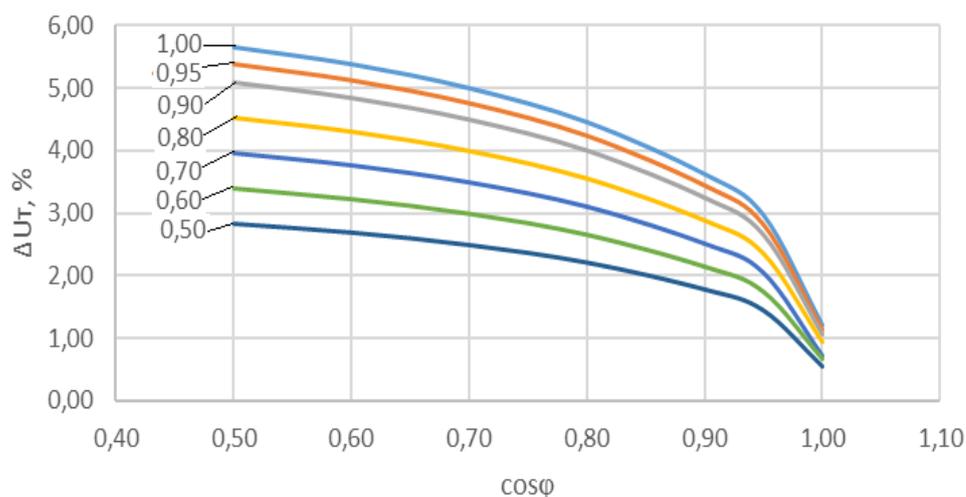


Рисунок 2 – Зависимость $\Delta U_T = f(\beta_T; \cos \varphi)$ для ТМГ12-1600

Как следует из графиков, приведенных на рисунках 1 и 2, значения ΔU_T в значительной степени зависят от загрузки трансформатора и коэффициента мощности $\cos \varphi$. Применение

устройств компенсации реактивной мощности позволяет снизить потери напряжения в трансформаторах и, следовательно, повысить напряжение в электрической сети.

При проектировании систем электроснабжения следует стремиться к выбору электрических схем, обеспечивающих близкие к оптимальным значениям допустимые потери напряжения.

Заключение

В связи с введением в Республике Беларусь ГОСТ 32144–2013 расчет допустимых потерь напряжения в электрических сетях напряжением до 1 кВ следует осуществлять с учетом конкретных данных источников питания и электрических сетей напряжением 6-10 кВ, а также допустимых уровней напряжения, подводимого к зажимам электроприемников. Приведенные в работе таблицы потерь напряжения в силовых трансформаторах, наиболее часто применяемых на промышленных предприятиях, позволяют упростить расчеты допустимых потерь напряжения.

Так как в точке передачи электроэнергии ГОСТ 32144–2013 устанавливает предельные положительные и отрицательные отклонения напряжения величиной 10% от номинального или согласованного значения, то производителям распределительных трансформаторов целесообразно выпускать их с диапазоном регулирования напряжения $\pm 10\%$.

Литература

1. Козловская, В.Б. Электрическое освещение / В.Б.Козловская, В.Н.Радкевич, В.Н.Сацукевич.-Минск: «Техноперспектива», 2011.-543 с.
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, 2013. — 10 с.
3. Радкевич, В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий / В.Н.Радкевич, В.Б.Козловская, И.В.Колосова.- Минск: ИВЦ Минфина, 2015.-589 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.