

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  $\Delta U_T$ , 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,  $U_l = 95\%$ ;

$\Delta U_T$  – 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  $\pm 5$  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, %;

$\Delta U_T$  - 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  $\omega$  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  $\Delta U_T$  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  $\beta_T$  - 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  $\Delta P_k$  – 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  $\Delta U_1$  по формуле (7) и  $\Delta U_2$  - 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  $\Delta U_T$  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  $\Delta U_T$  по упрощенной формуле

Наименование трансформатора	$\Delta U_1$ , % (по точной формуле)	$\Delta U_2$ , % (по упрощенной формуле)	Погрешность $\Delta U$ , %
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  $\Delta U$  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  $\Delta/Y_n$ , 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.

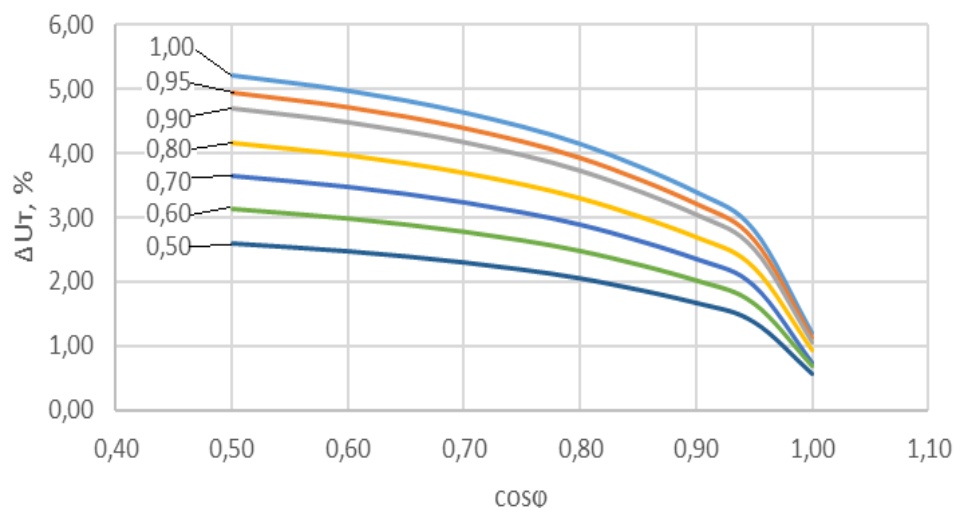


Рисунок 1 – Зависимость  $\Delta U_T = f(\beta_T; \cos \varphi)$  для ТМГ12-1000

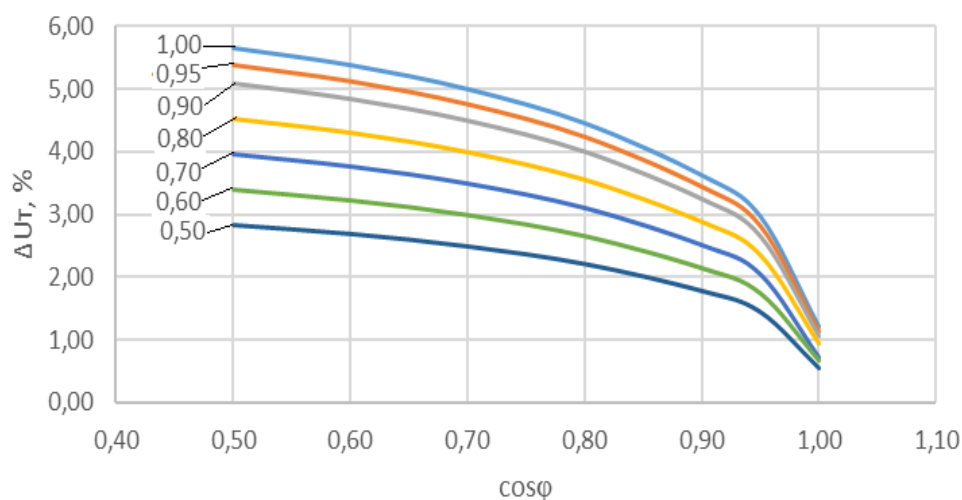


Рисунок 2 – Зависимость  $\Delta U_T = f(\beta_T; \cos \varphi)$  для ТМГ12-1600

Как следует из графиков, приведенных на рисунках 1 и 2, значения  $\Delta U_T$  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.