

УДК 621.311

**РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЕРЕГРУЗКОЙ
OVERLOAD OPERATION OF TRANSFORMERS**

С. А. Афанасьев

Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

S. Afanasiev

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: рассматриваются особенности работы силовых трансформаторов в условиях перегрузки, а также влияние перегрузок на ресурс оборудования. Описаны допустимые режимы систематической и аварийной перегрузки, методы оценки длительности перегрузки, а также приведены расчетные зависимости на основе аппроксимации экспериментальных данных. Проанализированы основные причины перегрузок трансформаторов в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Abstract: this paper deals with the peculiarities of power transformers operation under overload conditions, as well as the impact of overloads on the life of the equipment. Permissible modes of systematic and emergency overload, methods of estimation of overload duration are described, and calculation dependencies based on approximation of experimental data are given. The main causes of transformer overloads in power supply systems of industrial enterprises are analyzed.

Ключевые слова: трансформатор, перегрузка, функция, система электроснабжения, срок службы.

Keywords: transformer, overload, function, power supply system, service life.

Введение

Силовые трансформаторы играют ключевую роль в системах электроснабжения, обеспечивая преобразование и распределение электрической энергии.

В процессе эксплуатации трансформаторы часто подвергаются как кратковременным, так и систематическим перегрузкам, особенно в условиях переменного графика потребления электроэнергии. Такие перегрузки могут существенно влиять на надежность, срок службы и безопасность эксплуатации оборудования. В связи с этим, исследование работы трансформаторов при перегрузке и разработка методов оценки их перегрузочной способности является актуальной задачей.

В работе рассматриваются основные режимы перегрузки трансформаторов, методики расчета допустимых значений, а также влияние различных факторов на термическое состояние и долговечность изоляции.

Основная часть

В настоящее время основная категория потребителей электроэнергии работает на напряжении до 1 кВ. Для обеспечения соответствующего напряжения используются силовые распределительные трехфазные трансформаторы 6–10 кВ.

У каждого трансформатора при работе с перегрузкой есть свой срок эксплуатации, при превышении которого не гарантируется безопасная работа и его надежность и требуется его замена, что также может повлиять на безопасность обслуживающего персонала. Поэтому очень важно проверять и рассчитывать перегрузку трансформатора, чтобы он прослужил, по сроку, которому установили на предприятии, в котором его разрабатывали.

Как известно, тепловой режим трансформатора характеризуется тепловой диаграммой (рисунок 1), которая дает наглядное представление об изменении температуры трансформаторного масла и обмотки по высоте трансформатора [1].

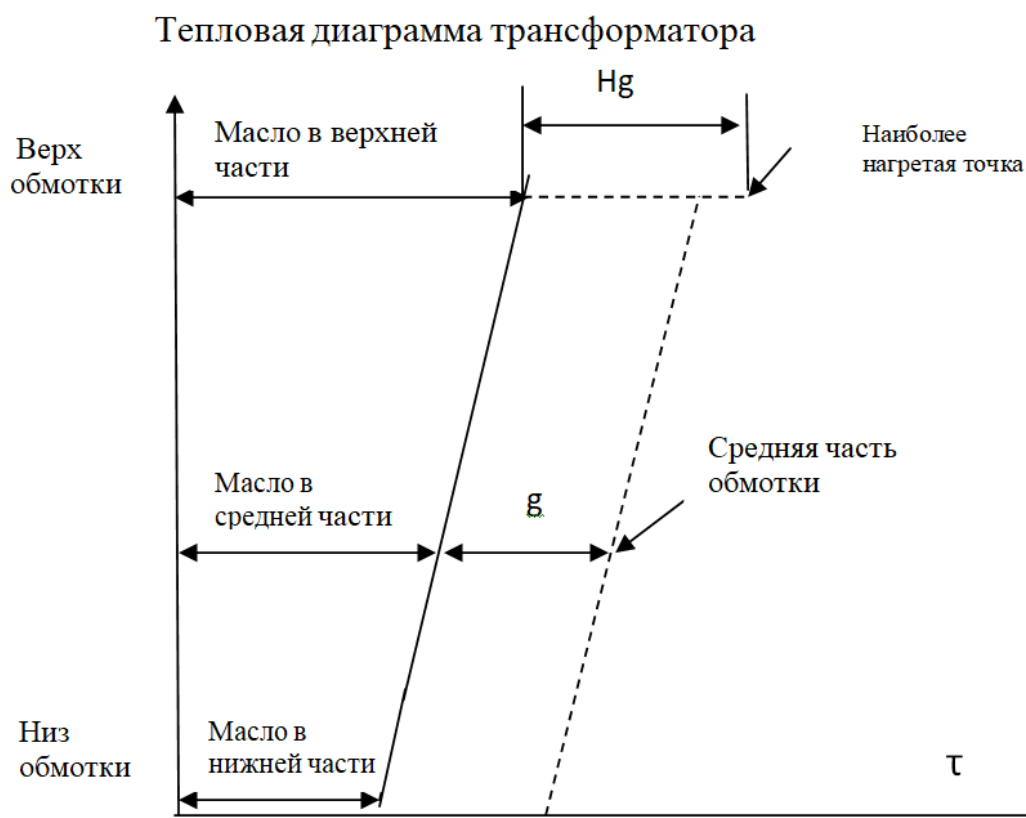


Рисунок 1 – Тепловая диаграмма трансформатора, где τ – превышение температуры

При эксплуатации трансформаторов необходимо, контролировать суточный износ изоляции обмоток от перегрева. Перегрев обмоток за сутки не должен превышать износа, в котором трансформатор работал бы в нормальном режиме. Так как трансформатор обычно работает с коэффициентом загрузки меньше единицы, допустимо на некоторое время в течение суток перегружать трансформатор, таким образом, чтобы компенсировать нагрев обмоток при недогрузке. Как известно, изменение работы трансформатора

зависит так же от температуры изоляции, поскольку ее изменение в 6 °С вызывает изменение срока службы в два раза, по-другому это называют «правило 6 °С».

Важным вопросом является определение длительность допустимой систематической перегрузки трансформатора в зависимости от перегрузки. Для определения приблизительного времени перегрузки существуют диаграммы заводов изготовителей. Один из методов определения приблизительного времени перегрузки основан на определении коэффициента превышения допустимой нагрузки (K_2). K_2 зависит от коэффициента его начальной загрузки (K_1), его номинальной мощности $S_{\text{ном}}$, системой охлаждения и его постоянной времени нагрева.

Коэффициент превышения допустимой нагрузки определяется:

$$K_2 = \frac{S_2}{S_{\text{ном}}} = \frac{I_2}{I_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где S_2, I_2 – полная мощность или ток перегрузки трансформатора;
 $S_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}$ – номинальная мощность или ток нагрузки трансформатора.
 Коэффициент начальной загрузки трансформатора определяется:

$$K_1 = \frac{S_1}{S_{\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где S_1, I_1 полная мощность или ток начальной загрузки трансформатора.

Значения K_1 и K_2 определяются по упрощенному двухступенчатому графику нагрузки трансформатора (рисунок 2). По значению коэффициента начальной загрузки трансформатора K_1 , продолжительности перегрузки, температуре охлаждающей среды воздуха, по таблице норм допустимых систематический нагрузок, определяют значение K_2 для силового трансформатора.

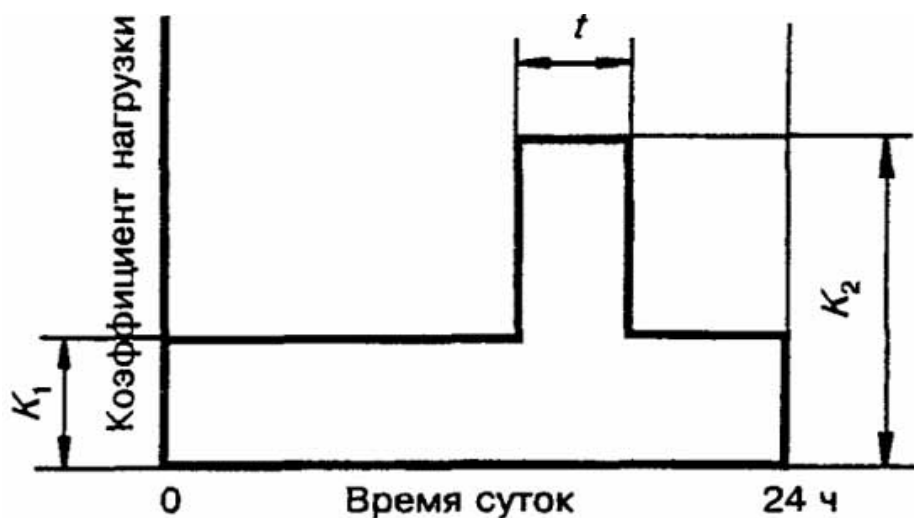


Рисунок 2 – Двухступенчатый график нагрузки трансформатора

По таблицам норм допустимых систематических нагрузок (таблица 1) можно очень точно определить перегрузочную способность трансформатора [2]. Для примера была рассмотрена перегрузочную способность распределительного трансформатора Минского завода им. Козлова (ГОСТ 11677-85).

При температуре окружающей среды 20 °С, если трансформатор будет загружен на 80 % в продолжительном режиме работы, то проработать с перегрузкой $K_2 = 1,45$ он сможет всего лишь 2 часа.

Работа при 100 % загрузки недопустима при температуре окружающей среды свыше 20 °С. Если же загрузка будет в пределах от 80 % до 90 %, то точную перегрузку придется узнавать с помощью линейной интерполяции, что не всегда удобно на практике.

Таблица 1 – Таблица норм допустимых систематических нагрузок трансформатора

h, ч	K_2 при значении $K_1 = 0,25 - 1,0$							
	0,25	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\theta_{\text{охл}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$								
0,5	+	+	+	+	+	1,98	1,81	1,00
1	+	1,97	1,92	1,87	1,80	1,71	1,57	1,00
2	1,66	1,63	1,60	1,56	1,51	1,45	1,35	1,00
4	1,37	1,35	1,34	1,32	1,29	1,25	1,19	1,00
6	1,25	1,24	1,23	1,21	1,20	1,17	1,13	1,00
8	1,18	1,17	1,17	1,16	1,15	1,13	1,09	1,00
12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09	1,08	1,06	1,00
24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Кратковременная перегрузка трансформаторов сверх номинального тока допускается в аварийных режимах (таблица 2) [2].

Таблица 2 – Таблица зависимости допустимой длительной перегрузки от сверхноминального тока

Трансформаторы			
Маслянные		Сухие	
Перегрузка сверхноминального тока, %	Длительность перегрузки трансформатора, мин.	Перегрузка сверхноминального тока, %	Длительность перегрузки трансформатора, мин.
30	120	20	60
45	80	30	45
60	45	40	32
75	20	50	18
100	10	60	5

Кратковременная перегрузка трансформаторов сверх номинального тока устанавливается по току (ΔI) и ее длительности ($h_{\text{п}}$). Кратковременная

перегрузка не зависит от температуры окружающей среды. Величина предшествующей нагрузки трансформатора не учитывается.

Причины, вызывающие перегрузку трансформаторов, указаны на рисунке 3.

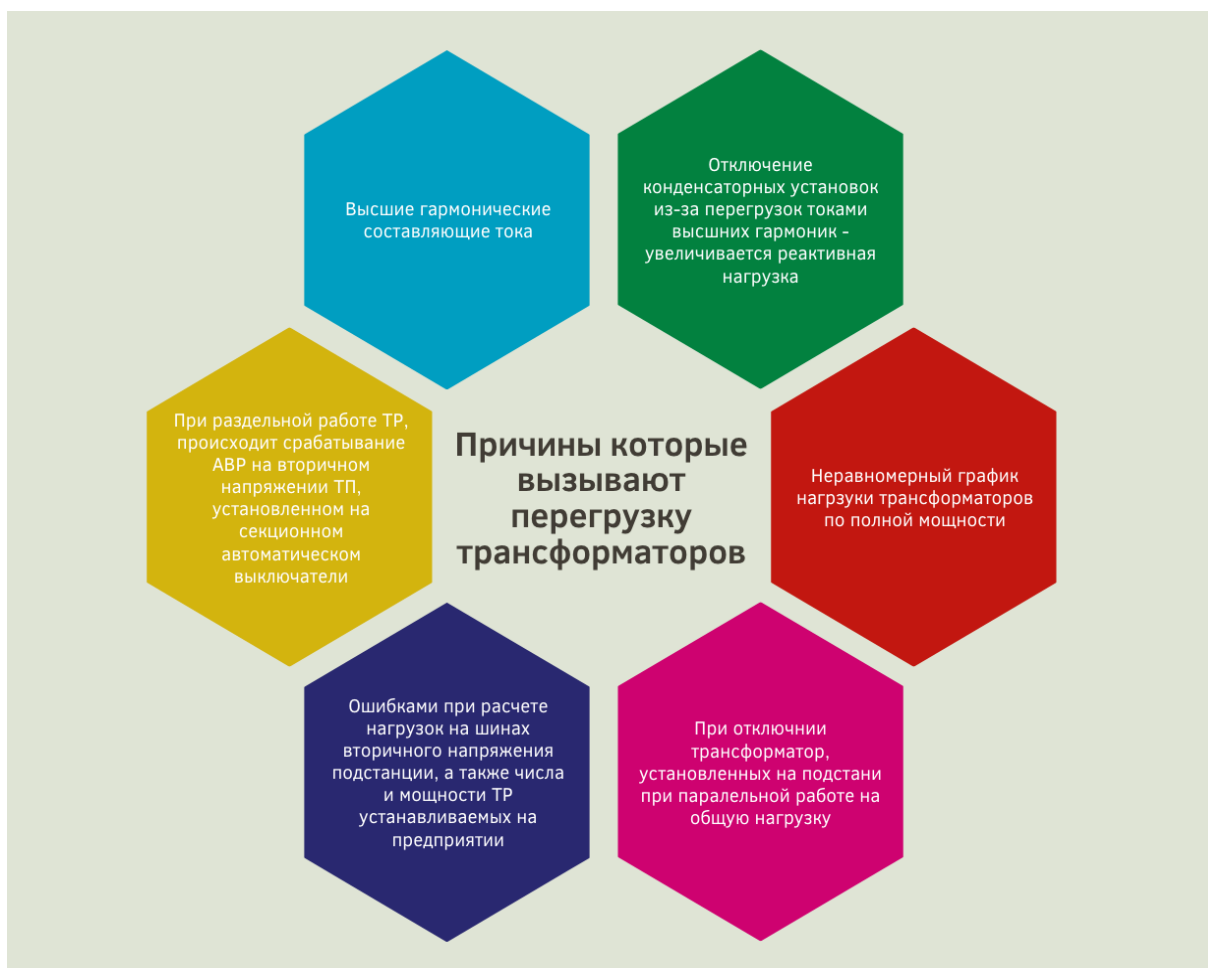


Рисунок 3 – Причины, вызывающие перегрузку трансформаторов

В основном кратковременная перегрузка сопровождается повышенным износом изоляции обмоток, что снижает срок службы трансформатора. Такие перегрузки допустимы при всех системах охлаждения независимо от предшествующего режима.

С помощью аппроксимирующих функций при определяют приближенную оценку h_{π} для любого значения ΔI . Для масляных трансформаторов в диапазоне 30–100 % и для сухих в диапазоне 20–60 %.

В 2016 году на кафедре «Электроснабжения» (БНТУ) разработана компьютерная программа для сглаживания экспериментальных зависимостей функции с двумя неизвестными параметрами. Эта программа позволяет выявлять связь между зависимой (h_{π}) и независимой (ΔI) значениями для разного вида функций [3].

Наилучший вид зависимости выбирается по критерию минимума среднего квадрата ошибки (σ^2). Проведенные расчеты показывают, что наиболее точное приближение дает аппроксимация квадратичным полиномом.

Для масляных трансформаторов функция при значении ошибки $\sigma = 1,672$ мин. имеет вид [2]:

$$h_{\pi} = 241,41 - 4,72\Delta I + 0,023\Delta I^2. \quad (3)$$

Для сухих трансформаторов полиномом второй степени является сглаживающая функция, при ошибке $\sigma = 0,31$ мин.:

$$h_{\pi} = 89,8 - 1,54\Delta I + 0,002\Delta I^2. \quad (4)$$

Такие полученные функции позволяют с достаточной вероятностью оценивать длительность допустимых перегрузок трансформаторов в зависимости от их токовых перегрузок.

Заключение

Трансформаторы обладают ограниченной перегрузочной способностью, зависящей от начальной загрузки, температуры окружающей среды, системы охлаждения и других эксплуатационных факторов. Использование аппроксимирующих функций позволяет получать достаточно точные оценки допустимой длительности перегрузки, что может быть полезно при проектировании и эксплуатации СЭС. Перегрузки, вызванные неравномерностью нагрузки, ошибками в расчетах или аварийными режимами, требуют особого внимания, так как могут привести к ускоренному старению изоляции и выходу оборудования из строя. Правильное управление нагрузкой и использование нормативных данных позволяют обеспечить надежную и безопасную работу трансформаторов в реальных условиях эксплуатации.

Литература

1. Перегрузочная способность масляных силовых трансформаторов: [сайт]. – URL: <https://220blog.ru/proektirovanie/peregruzochnaya-sposobnost-maslyanyx-silovyx-transformatorov.html> (дата обращения: 08.04.2025).
2. Допустимые перегрузки трансформаторов: [сайт]. – URL: <https://electricalschool.info/main/ekspluat/584-dopustimye-peregruzki-transformatorov.html> (дата обращения: 08.04.2025).
3. Контроль нагрузки силовых распределительных трансформаторов / Ф. Х. Самиев; науч. рук. В. Н. Радкевич // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 159–162.