

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-45-50-53>

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ ИХ СТАРЕНИЯ

Плотников С.М.

*Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск,
Россия*

Ключевые слова: трансформатор, старение, потери холостого хода, гистерезисные потери, вихретоковые потери, коэффициент загрузки.

Аннотация. Рассмотрены причины роста потерь холостого хода при старении трансформаторов. Данные потери возрастают на 50% и более для трансформаторов с 30-летним сроком службы. Установлено, что для повышения КПД трансформатора с увеличением срока его службы следует повышать его нагрузку более чем на 24%. При этом номинальный и максимально возможный КПД трансформатора снижаются незначительно.

OPTIMIZATION OF TRANSFORMER LOADING TAKING INTO ACCOUNT THEIR AGING

Plotnikov S.M.

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

Keywords: transformer, aging, no-load losses, hysteresis losses, eddy current losses, load factor.

Abstract. The article considers the reasons for the growth of no-load losses during transformer aging. These losses increase by 50% or more for transformers with a 30-year service life. It has been established that in order to increase the efficiency of a transformer with an increase in its service life, its load should be increased by 24%. In this case, the nominal and maximum possible efficiency of the transformer decrease insignificantly.

По сравнению с номинальной мощностью трансформатора потери холостого хода P_x невелики, однако они имеют важное эксплуатационное значение, поскольку присутствуют независимо от нагрузки. На потери холостого хода в трансформаторах и электрических машинах теряется до 5% производимой в стране электроэнергии.

В процессе эксплуатации потери холостого хода увеличиваются по сравнению с паспортными данными по следующим причинам [1]:

- за счет изменений доменной структуры стали, которые накапливаются в процессе динамических воздействий на магнитопроводы, главным образом во время транспортировки, монтажа и эксплуатации;

- при выделении тепла обмотками, а также при перемагничивании стали сердечников происходит их длительный нагрев, способствующий структурным изменениям в стали и активизирующий процессы старения, в результате которых магнитные свойства стали ухудшаются.

Потери холостого хода состоят из гистерезисных и вихретоковых потерь, которые можно разделить методами, предложенными в [2-4]. Основная причина роста потерь холостого хода связана с искажениями

доменной структуры стали, которая подвергается деформации на заключительных этапах обработки. Внешние динамические воздействия в результате механических, тепловых, магнитных и электрических нагрузок часто превышают предел упругости кристаллической решетки и приводят к остаточным механическим напряжениям и деформациям. Магнитные свойства стали крайне чувствительны к остаточным механическим напряжениям, которые вызывают необратимые изменения и сохраняются в стали после снятия нагрузки, ухудшая ее магнитные свойства. Даже незначительные деформации анизотропной стали приводят к резкому росту потерь холостого хода.

В [5] установлено, что потери холостого хода для всех типов трансформаторов возрастают в среднем по 1,75% в год, что для 30-летнего срока службы составит приблизительно 52,5%. Проведенные в [1] измерения также показали, что за время 30-летнего срока службы трансформаторов потери холостого хода могут возрастать на 50 и более процентов относительно паспортных значений. Очевидно, при этом изменяются КПД трансформатора и коэффициент его оптимальной нагрузки. Данный коэффициент вычисляется по выражению

$$\beta_{onm} = \sqrt{P_x / P_k},$$

где P_x – потери холостого хода; P_k – потери короткого замыкания.

Для подавляющего большинства трансформаторов P_k в пять раз превышают P_x , поэтому в начале строка службы $\beta_{onm.0} = 0,447$, т.е. для работы с максимальным КПД, трансформатор должен быть загружен на 44,7%.

Номинальный КПД трансформатора

$$\eta_n = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 \cdot P_k},$$

где S_n – номинальная мощность трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности на стороне низкого напряжения.

Максимальный КПД трансформатора

$$\eta_{\max} = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2 + 2P_x}.$$

С учетом вышеизложенного, по мере старения трансформатора отношение P_0/P_k возрастает с 0,2 до 0,3.

Процентное увеличение потерь холостого хода ΔP_x , значения коэффициента оптимальной загрузки β_{onm} и его изменение $\Delta \beta_{onm}$, а также значения номинального и максимального КПД для трансформатора ТМН-1000/35 представлены в таблице 1. Значения при $\Delta P_x = 0$ соответствуют паспортным значениям $\beta_{onm.0}$.

Здесь процентное увеличение коэффициента оптимальной нагрузки

$$\Delta \beta_{onm} = \frac{\beta_{onm.50} - \beta_{onm.0}}{\beta_{onm.0}},$$

где $\beta_{onm.0}$ – коэффициент оптимальной нагрузки в начале эксплуатации; $\beta_{onm.50}$ – коэффициент оптимальной нагрузки на 50-м году эксплуатации.

Зависимость коэффициента оптимальной нагрузки при изменении потерь холостого хода и времени эксплуатации трансформатора $T_э$ представлена на рисунке 1.

Табл. 1. Изменение потерь холостого хода, коэффициента загрузки и КПД трансформатора по мере его старения

$\Delta P_x, \%$	0	10	20	30	40	50
β_{onm}	0,447	0,469	0,490	0,510	0,529	0,548
$\Delta\beta_{onm}$	0	4,9	9,6	14,0	18,3	24,1
η_n	0,973	0,973	0,972	0,972	0,971	0,971
η_{max}	0,980	0,979	0,978	0,978	0,977	0,976

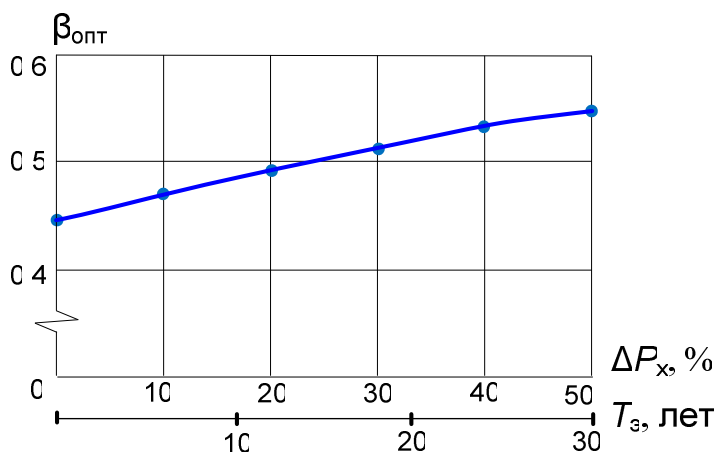


Рис. 1. Коэффициент оптимальной загрузки в зависимости от увеличения потерь холостого хода и времени эксплуатации

Таким образом, для того, чтобы трансформатор по мере старения работал с наименьшими потерями, его следует нагружать на большую величину: с ростом потерь холостого хода ΔP_x на 50% нагрузку следует увеличивать на 24,1%. При этом номинальный КПД трансформатора ТМН-1000/35 снижается с 97,3% до 97,1%, а максимально возможный КПД – с 98,0% до 97,6%.

Список литературы

1. Кобылин В.П., Давыдов Г.И., Афанасьев Д.Е., Ли-Фир-Су Р.П., Седалищев В.А., Васильев П.В. Анализ причин увеличения потерь мощности в силовых трансформаторах // Электричество. – 2015. – №3. – С. 13-20.
2. Плотников С.М. Анализ методов определения потерь в магнитопроводе трансформатора // Измерительная техника. – 2022. – №1. – С. 52-57. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57.

3. Плотников С.М., Иксиль Н. Определение составляющих потерь в стали магнитопроводов электрических машин // Измерительная техника. – 2023. – №9. – С. 53-58. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-53-58.
4. Плотников С.М. Методика определения степени магнитной индукции трансформаторов с синусоидальным магнитным потоком // Измерительная техника. – 2024. – № 1. – С. 35-39. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-1-35-39.
5. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2016. – №1-2. – С. 53-63.

References

1. Kobilin V.P., Davydov G.I., Afanasyev D.E., Li-Fir-Su R.P., Sedalishchev V.A., Vasiliev P.V. Analysis of the causes of increase in power losses in power transformers // Electricity. 2015, no. 3, pp. 13-20.
2. Plotnikov S.M. Analysis of methods for determining losses in the magnetic circuit of a transformer // Measurement Techniques. 2022. no. 1, pp. 52-57. doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57.
3. Plotnikov S.M., Iksil N. Determination of loss components in the steel of magnetic circuits of electrical machines // Measurement Techniques. 2023, no. 9, pp. 53-58. doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-53-58.
4. Plotnikov S.M. Methodology for determining the degree of magnetic induction of transformers with sinusoidal magnetic flux // Measurement Techniques. 2024, no. 1, pp. 35-39. doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-1-35-39.
5. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Accounting for idle running of transformers during operation when calculating electricity losses in distribution networks // News of universities. Problems of energy. 2016, no. 1-2, pp. 53-63.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы обеспечения движения»	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of "Traffic support systems"
smplonikov@rambler.ru	

Received 05.12.2024