

## УЧЁТ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ И НАСЫЩЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

**Груздев Илья Максимович,**

студент, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, e-mail: [gruzdev-ilya@mail.ru](mailto:gruzdev-ilya@mail.ru)

**Шелюг Станислав Николаевич,**

доцент, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: [s.n.shelyug@urfu.ru](mailto:s.n.shelyug@urfu.ru)

## ACCOUNTING MAGNETIC LOSSES AND SATURATIONS IN TRANSFORMERS

**Gruzdev Ilya Maksimovich,**

Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin»,  
Ekaterinburg, e-mail: [gruzdev-ilya@mail.ru](mailto:gruzdev-ilya@mail.ru)

**Shelyug Stanislav Nikolaevich,**

Docent, C.t.s, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin»,  
Ekaterinburg, e-mail: [s.n.shelyug@urfu.ru](mailto:s.n.shelyug@urfu.ru)

**Аннотация.** Наличие искаженных сигналов напряжения и тока может заметно исказить процесс протекания переходного процесса. Как следствие возникнут большие погрешности в определении токов короткого замыкания с последующими ошибками в выборе силового оборудования и расчете уставок релейной защиты.

**Abstract.** The presence of distorted voltage and current signals can significantly distort the process of the transient process. As a result, there were large errors in the determination of short-circuit currents with subsequent errors in the choice of power equipment and calculating the settings of relay protection.

**Ключевые слова.** Трансформатор, несимметрия, несинусоидальность, намагничивание, гистерезис.

**Key words.** Transformer, asymmetry, non-sinusoidal, magnetization, hysteresis.

Классическая теория расчета трансформаторов предполагает, что потребители электроэнергии являются синусоидальными. В классическом подходе так же не учитываются потери на гистерезис и намагничивание, что в реальной ситуации не представляется возможным.

С учетом различных видов несимметрии необходимо учитывать потери на гистерезис, вихревые токи и намагничивание. Как известно, при перемагничивании стальных листов, т.е. при периодических изменениях индукции в промежутке от  $+B_{\max}$  до  $-B_{\min}$ , в листах электротехнической стали возникает процесс гистерезиса, связанный с выделением тепла.

Согласно исследованиям, которые производил профессор Рихтер, потери на гистерезис находятся по формуле (1):

$$p_h = \alpha \cdot \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10000} + \beta \cdot \frac{f}{100} \cdot \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \quad (1)$$

где:  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, которые зависят от свойств материала;

$f$  – частота;

$B$  – максимальное значение индукции;

Как видно из формулы, величина потерь на гистерезис зависит от частоты сети. При несинусоидальной нагрузке функцию можно представить как сумму синусоид

различных частот, кратным 50 Гц. В случае присутствия высших гармоник, частота которых в разы больше частоты основной гармоники, суммарные потери на гистерезис увеличиваются. Дополнительные потери на гистерезис влекут за собой дополнительный нагрев трансформаторов, более быстрое старение.

Аналогично потерям на гистерезис, потери на вихревые токи увеличиваются при наличии высших частот, и аналогично, эти потери влекут за собой прочие неприятные последствия для трансформаторов.

Общая зависимость потерь на гистерезис и вихревые токи (2):

$$p_e = \left[ \sigma_h \cdot \frac{f}{100} + \sigma_f \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{B}{10000} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_h$ ,  $\sigma_f$  - коэффициенты, зависящие от марки электротехнической стали.

В среде Matlab была смоделирована сеть, состоящая из генератора, повышающих трансформаторов, линий электропередач, понижающего трансформатора и нагрузки. Модель в первом случае не учитывала потери на намагничивание и гистерезис, во втором эти потери принимались в расчет. Тогда в первом случае была получена осциллограмма токов изображенная на рисунке 1, во втором – на рисунке 2.

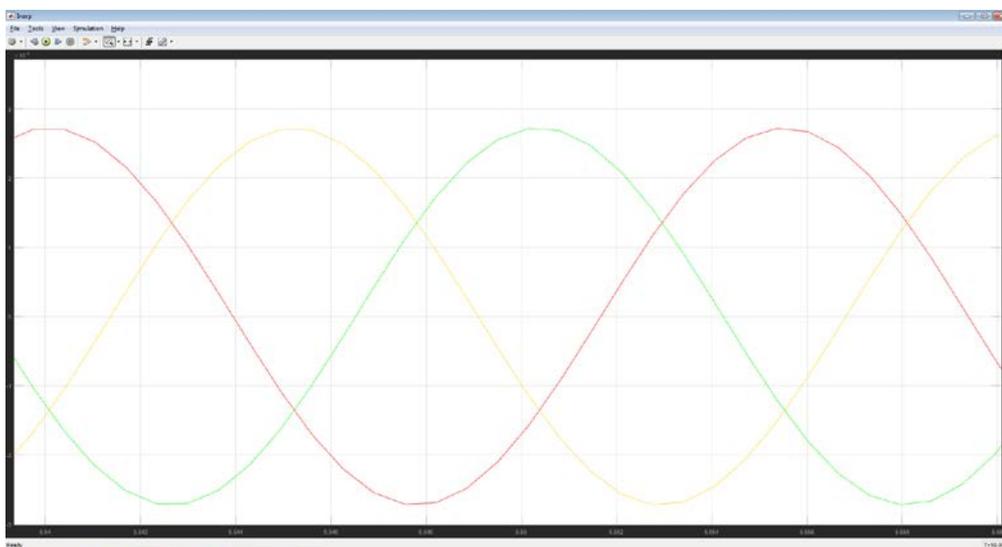


Рисунок 1 – осциллограмма токов при отсутствии учета потерь на намагничивание и гистерезис

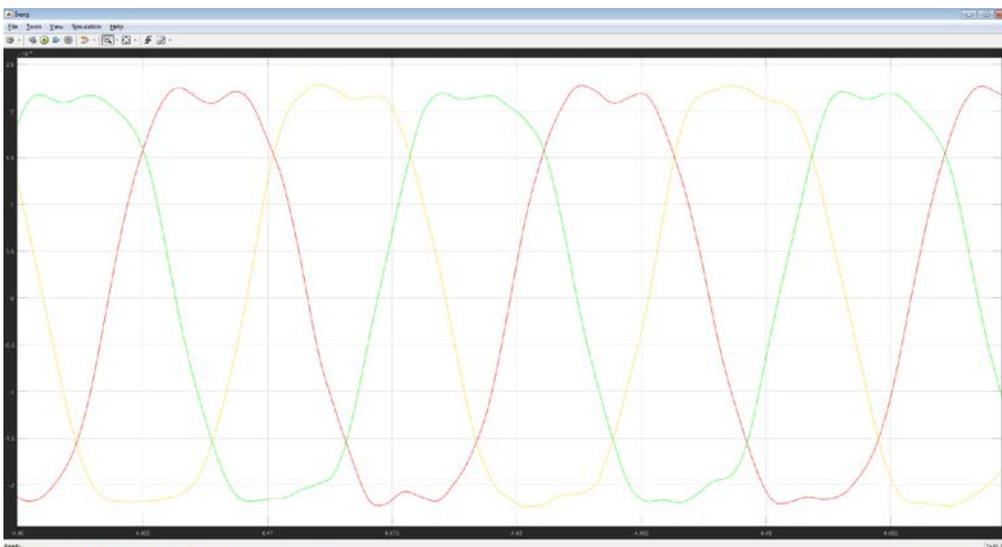


Рисунок 2 – осциллограмма токов при учете потерь на намагничивание и гистерезис

Как видно, кривая тока становится сильно искаженной., в связи с чем появляются дополнительные потери и уменьшается КПД, что видно из формулы (3)

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_k} \quad (3)$$

Где  $P_2$  - мощность, отдаваемая трансформатором,

$P_0$  - потери холостого хода,

$P_k$  - потери короткого замыкания.

При учете искажения формы тока получаем, что нагрузка на трансформаторы увеличивается, срок службы изменяется в сторону уменьшения.

В ГОСТ задан состав процентный состав несинусоидальной нагрузки. Исходя из этого и формулы (2), получим следующие результаты расчета, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

№ гар- моники	%	$\sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_f \left(\frac{f}{100}\right)^2$	$\left(\sigma_h \frac{f}{100} + \sigma_f \left(\frac{f}{100}\right)^2\right)^* = p_i$	$\frac{p_i}{p_1} 100\%$
1	100	3,3	3,3	100
3	5,0	9,9	0,495	15
5	6,0	16,5	0,99	30
7	5,0	23,1	1,155	35
9	1,5	29,7	0,4455	13,5
11	3,5	36,3	1,2705	38,5
13	3,0	42,9	1,287	39
15	0,3	49,5	0,1485	4,5
17	2,0	56,1	1,122	34
19	1,5	62,7	0,9405	28,5
21	0,2	69,3	0,1386	4,2
23	1,5	75,9	1,1385	34,5
25	1,5	82,5	1,2375	37,5
27	0,2	89,1	0,1782	5,4
29	1,5	95,7	1,4355	43,5
31	1,5	102,3	1,5345	46,5
33	0,2	108,9	0,2178	6,6
35	1,5	115,5	1,7325	52,5
37	1,5	122,1	1,8315	55,5
39	0,2	128,7	0,2574	7,8
41	1,5	135,3	2,0295	61,5

При учете гармоник до 41 включительно, как видно из расчета, потери на гистерезис и вихревые токи увеличиваются в 6-7 раз.

КПД трансформатора при синусоидальной нагрузке доходит до 98%, а при увеличении потерь, которые связаны с несинусоидальным сигналом, КПД может уменьшится до 88%. Такое снижение КПД является недопустимым при таком массовом использовании трансформаторов.

Исходя из этого, вопрос требует более точного исследования нагрузки, чтобы полностью представлять форму кривой тока, которую потребляет данный прибор.

Необходимо учитывать, что любое отклонение от нормы влечет за собой дополнительные последствия.

#### Список использованных источников

1. Фокеев, А.Е. Исследование силовых трансформаторов при несинусоидальных режимах: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.09.03) / Фокеев Александр Евгеньевич; ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» – Москва, 2012. – 20 с.

2. Исследование работы силового трансформатора при несинусоидальной форме тока нагрузки / Фокеев А.Е. Барсуков В.К. // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов / Сборник трудов международной научно-технической конференции. – Тольятти, 2009г.

3. Аксенов, В.В. Компенсация реактивной мощности с фильтрацией токов высших гармоник – реальный путь повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии / В.В. Аксенов, Д.В. Быстров, В.Э. Воротницкий [и др.]// Электрические станции. – 2012. - №3 – С. 53-60.

4. Герасименко, Т.С. Улучшение эксплуатационных характеристик сельских трансформаторов 10/0.4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нейтральным проводом» с помощью симметричного устройства // Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Республика Казахстан, Алматы, 2008. – 20 с.

5. Груздев И.М., Шелюг С.Н. Работа силовых трансформаторов под несинусоидальной нагрузкой // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2016. - С.118-121.