

Анализ режима холостого хода перевозбужденного трансформатора

А. Г. Лавров¹, С. В. Бакланов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹angelavr@mail.ru, ²tiktak_000@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен режим холостого хода силового трансформатора в зависимости от степени насыщения магнитной системы. Проведен гармонический анализ намагничивающего тока и тока холостого хода с помощью графоаналитического метода в режиме перевозбуждения трансформатора от 5 до 15 %.

Ключевые слова: кривая намагничивания трансформатора; намагничивающий ток; ток холостого хода; гармонический анализ

I. ВВЕДЕНИЕ

В [1] проведен анализ режимов регулирования напряжения трансформаторов, показано, что возможен режим регулирования с переменным магнитным потоком. При реализации режима регулирования напряжения с переменным по величине магнитным потоком, после завершения процесса регулирования, трансформатор начинает работать с изменяющимся магнитным потоком, в частности возможен режим перевозбуждения.

Также в [1] сделана попытка приближенно оценить влияние режима перевозбуждения на технико-экономические показатели трансформатора по приближенным формулам [2], применяемым для расчета номинальных параметров трансформатора. Однако не исследована зависимость намагничивающего тока и тока холостого хода от насыщения, не исследован их гармонический состав.

Целью исследований является гармонический анализ намагничивающего тока и тока холостого хода перевозбужденного трансформатора.

II. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ПЕРЕВОЗБУЖДЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Методика получения кривой намагничивающего тока изложена в [3] и представлена на рис. 1.

В левой половине рис. 1 представлена кривая намагничивания магнитной системы трансформатора, в правой части представлены полуволны магнитного потока Φ и напряжения первичной обмотки u_1 .

Объектом исследования выбран трехфазный силовой масляный трансформатор ТДН 40000/110.

С помощью кривой намагничивания трансформатора и методики [3] построены кривые намагничивающего тока для номинального магнитного потока и увеличенного на 5 %, 10 %, 15 %.

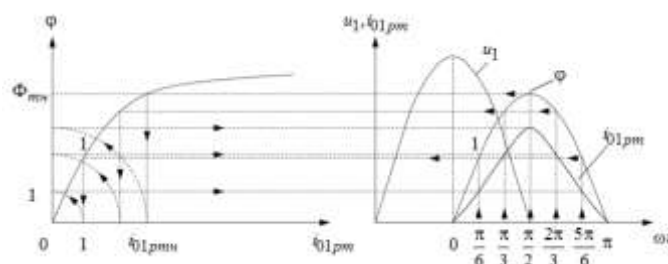


Рис. 1. Процесс построения кривой намагничивающего тока для номинального магнитного потока

На рис. 2 приведены кривые намагничивающего тока при рассмотренных значениях магнитного потока, из которых следует, что амплитудное значение намагничивающего тока с увеличением магнитного потока на 15 % возросло в 7 раз. Данное явление не опасно для силовых трансформаторов, у которых ток холостого хода составляет менее 1 % от номинального значения.

У низковольтных трансформаторов распределительных сетей, комплектных трансформаторных подстанций, передвижных объектов ток холостого хода может составлять 10 % и более. В этом случае в режиме перевозбуждения его увеличение будет критичным, поэтому данное явление необходимо учитывать. Изменение формы намагничивающего тока приводит к изменению гармонического состава.

Если намагничивающий ток, соответственно и сам ток холостого хода трансформатора получены графически в виде несинусоидальных кривых и не имеют аналитического выражения, то в научно-технической литературе предложен графоаналитический метод разложения в ряд Фурье [4].

Графоаналитический метод определения гармоник ряда Фурье основан на замене определенного интеграла суммой конечного числа слагаемых [4].

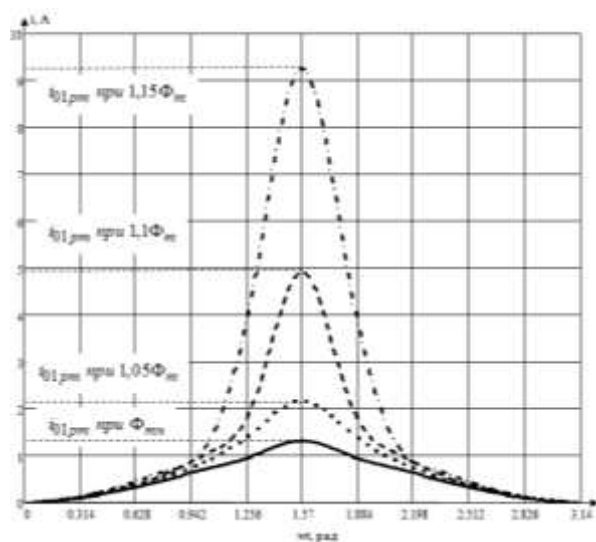


Рис. 2. Кривые намагничивающего тока при различных значениях амплитуды магнитного потока

Гармонический анализ намагничивающего тока проводится при номинальном магнитном потоке и в режиме перевозбуждения на 5 %, 10 % и 15 %. Все графические построения выполнены в программной среде AutoCAD Electrical. Значения намагничивающего тока, которые получены в процессе графического построения в характерных точках ($\pi/6$, $\pi/3$, $\pi/2$ и т. д.), были перенесены в MathCAD, где производится разложение в ряд Фурье. Для нахождения значений графической функции в промежуточных точках используется метод интерполяции кубической кусочно-заданной функцией. Далее осуществляется трассировка кривой, полученной с помощью интерполяции. Разложение кривых в ряд Фурье представлено на рис. 3–6.

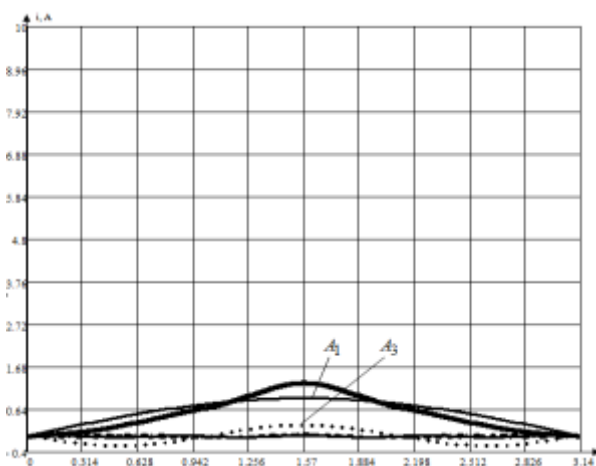


Рис. 3. Кривая намагничивающего тока и ее разложение в ряд Фурье при номинальном значении магнитного потока

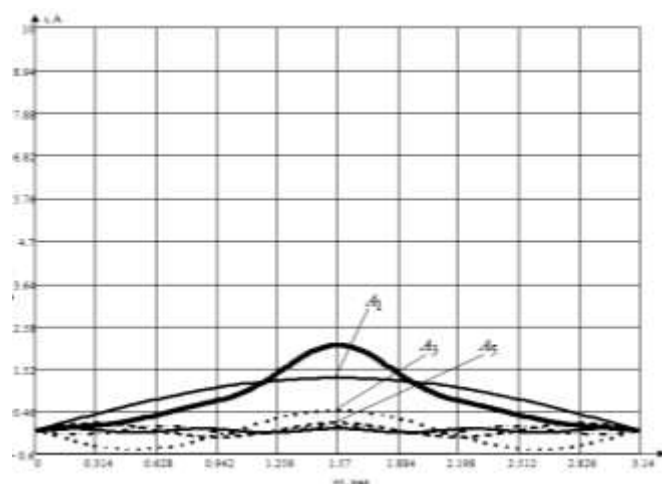


Рис. 4. Кривая намагничивающего тока и ее разложение в ряд Фурье при увеличении магнитного потока на 5 %

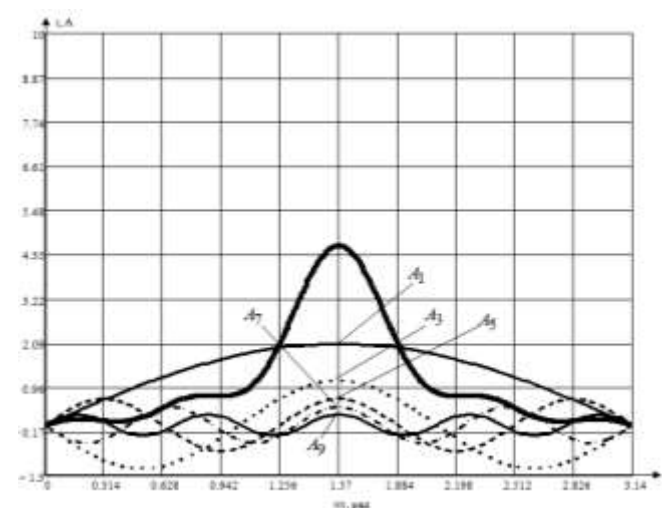


Рис. 5. Кривая намагничивающего тока и ее разложение в ряд Фурье при увеличении магнитного потока на 10 %

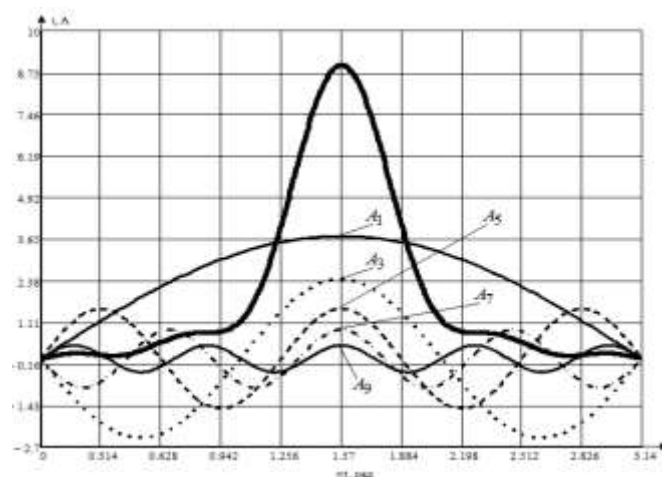


Рис. 6. Кривая намагничивающего тока и ее разложение в ряд Фурье при увеличении магнитного потока на 15 %

По результатам разложения можно сделать вывод о неравномерности увеличения амплитуд гармоник намагничивающего тока с возрастанием магнитного потока. На рис. 7 представлена диаграмма амплитуд гармоник намагничивающего тока в зависимости от степени насыщения магнитной системы.

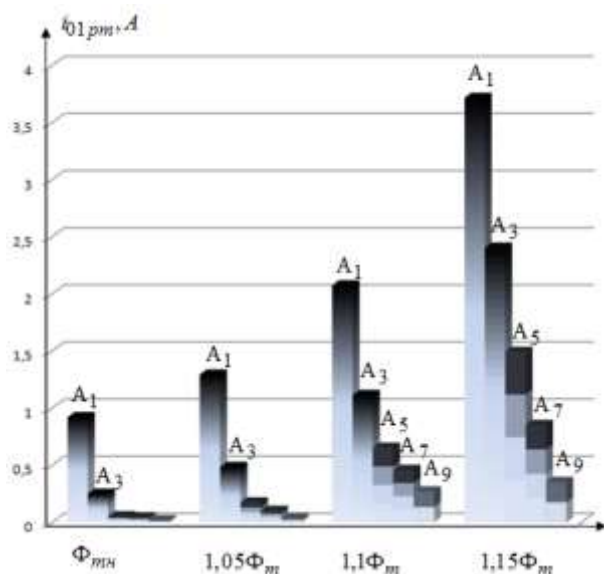


Рис. 7. Диаграмма гармоник намагничивающего тока

При номинальном магнитном потоке коэффициент k_ϕ , учитывающий относительное содержание высших гармоник намагничивающего тока, мал, и его можно не учитывать. С увеличением магнитного потока коэффициент k_ϕ возрастает (таблица), что необходимо учитывать при анализе параметров и характеристик трансформатора, работающего в режиме перевозбуждения.

ТАБЛИЦА I Действующее значение намагничивающего тока и коэффициента учета высших гармоник

$\Phi_m, \%$	100	105	110	115
I_{01p}, A	0,675	0,988	1,770	3,367
k_ϕ	1,04	1,08	1,21	1,28

Для исследования гармонического состава тока холостого хода необходимо графически сложить намагничивающий ток и активную составляющую тока холостого хода. Активная составляющая тока холостого хода трансформатора находится в фазе с напряжением первичной обмотки u_1 . Следовательно, активная составляющая тока холостого хода отстает от намагничивающего тока на угол $\pi/2$. Также при гармоническом анализе тока холостого хода перевозбужденного трансформатора необходимо учитывать увеличение его активной составляющей. Методика построения кривой тока холостого изображена на рис. 8.

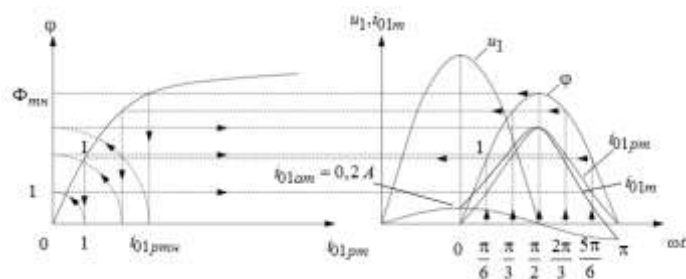


Рис. 8. Ток холостого хода при номинальном значении магнитного потока

Результаты разложения кривых тока холостого хода в ряд Фурье при номинальном значении магнитного потока и его увеличении на 5 %, 10 %, и 15 % представлены на рис. 9–12.

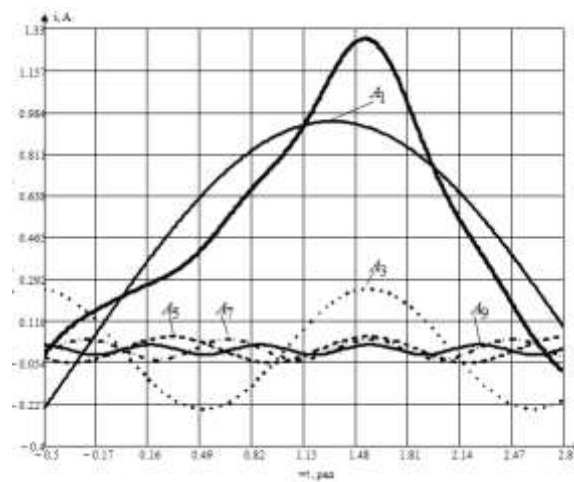


Рис. 9. Разложение тока холостого хода при номинальном магнитном потоке

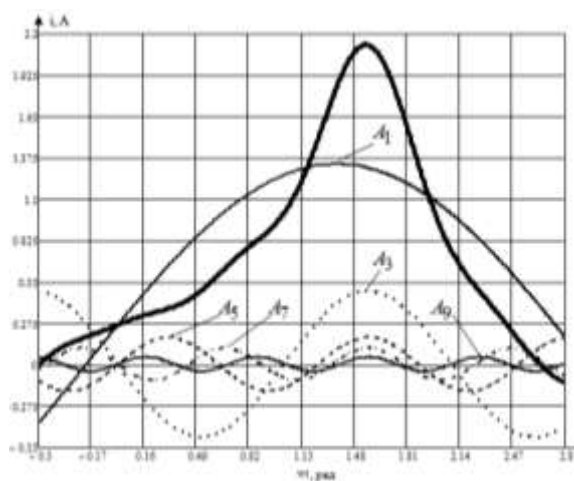


Рис. 10. Разложение тока холостого хода при увеличении магнитного потока на 5 %

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гармонический анализ тока холостого хода в режиме перевозбуждения трансформатора от 5 % до 15 % показал, что:

- с увеличением насыщения магнитной системы трансформатора амплитуда намагничивающего тока увеличивается до 7 раз при увеличении магнитного потока на 15 %, что необходимо учитывать в трансформаторах со значительным значением тока холостого хода;
- амплитуды гармоник тока холостого хода увеличиваются неравномерно: наибольший рост наблюдается у 5-ой и 7-ой гармоник;
- первая гармоника тока холостого хода находится не в фазе с кривой магнитного потока из-за наличия активной составляющей тока холостого хода, что приводит к появлению в разложении в ряд Фурье кроме синусных составляющих еще и косинусных составляющих высших нечетных гармоник тока холостого хода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лавров А.Г., Попов Е.Н. Анализ технико-экономических показателей трансформатора при регулировании его напряжения с переменным по величине магнитным потоком // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», №1, 2019 С. 73-78.
- [2] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
- [3] Ваганов М.А. Трансформаторы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 112 с.
- [4] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: «Высшая школа», 1996. 638 с.

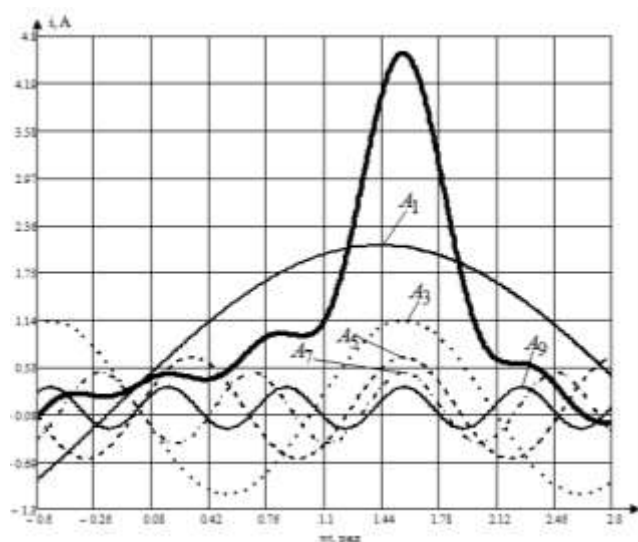


Рис. 11. Разложение тока холостого хода при увеличении магнитного потока на 10 %

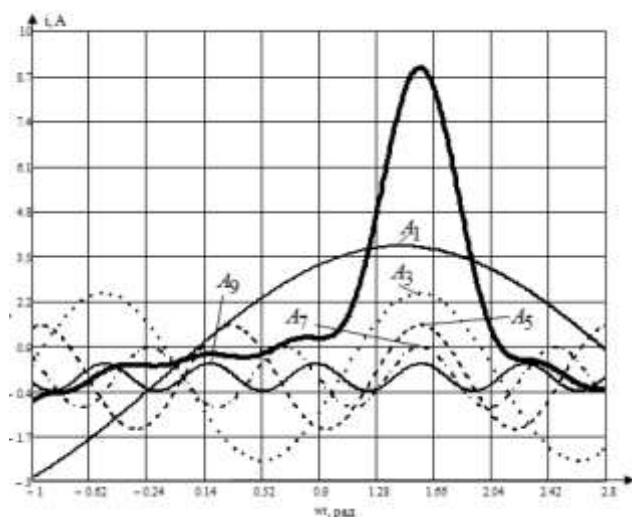


Рис. 12. Разложение тока холостого хода при увеличении магнитного потока на 15 %