

УДК 004.942

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА
ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ**

Швылев Александр Викторович

аспирант

Нефедов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент

niefiodov.aliexandr.58@mail.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования трансформатора в режиме короткого замыкания. Представлены зависимости тока и напряжения от времени.

Ключевые слова: переходные процессы, трансформатор, моделирование, короткое замыкание.

При всяком изменении одной или нескольких величин, определяющих работу трансформаторов – напряжения, частоты, нагрузки и т.д., происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот переход длится очень короткое время, но он сопровождается опасными для трансформатора эффектами – большими механическими усилиями между обмотками, неравномерным распределением напряжения между витками трансформатора, нагрев обмоток и т.п.

В зависимости от фактора, определяющего переходный режим, различают две группы явлений [1, 2]:

- 1) явление сверхтоков;
- 2) явление перенапряжений.

Исследование этих явлений имеет весьма важное эксплуатационное значение.

Переходные процессы сверхтоков возникают при включении трансформаторов:

- 1) режим холостого хода;
- 2) режим короткого замыкания:
 - а) включение трансформатора с ненасыщенной сталью;
 - б) включение трансформатора с насыщенной сталью.

Включение трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой представляет собою включение катушки со сталью в цепь синусоидального напряжения [2, 3].

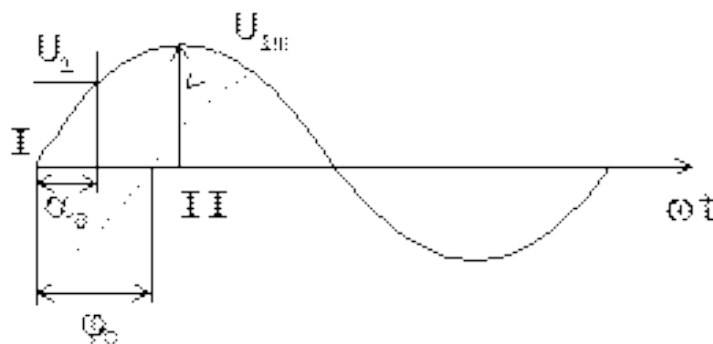


Рисунок 1 - Включение трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой

Предположим, что трансформатор включен в момент, показанный на рисунке 1 (a_0), где

U_1 – мгновенное значение напряжения

U_{1m} – амплитуда напряжения,

$U_1 = U_{1m} \sin(\omega t + a_0)$, тогда уравнение ЭДС первичной обмотки может быть написано в виде

$$U_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = i_0 r_1 + L_1 \frac{di_0}{dt}, \text{ где}$$

i_0 – ток включения холостого хода трансформатора;

$i_0 r_1$ – составляющая напряжения уравновешивающая противодействие ЭДС сопротивления;

$L_1 \frac{di_0}{dt}$ – составляющая напряжения, которая уравновешивает ЭДС самоиндукции, созданную основным потоком и потоком рассеяния.

Ток и поток состоят из двух составляющих:

$i_{уст}$ – установившегося тока, изменяющегося по синусоидальному закону

$i_{пер} = i_{св}$ – переходный, который в момент включения имеет ту же амплитуду что и $i_{уст}$, но представляет собою аperiodическую функцию времени, затухающей по закону аperiodической функции с постоянного времени $T = L_1/r_1$.

Характер протекания переходного процесса определяется моментом включения трансформатора (a_0) [1, 4]:

1) Включение трансформатора в момент, когда $a_0 = 0$, $t = 0$, $U_1 = 0$, тогда

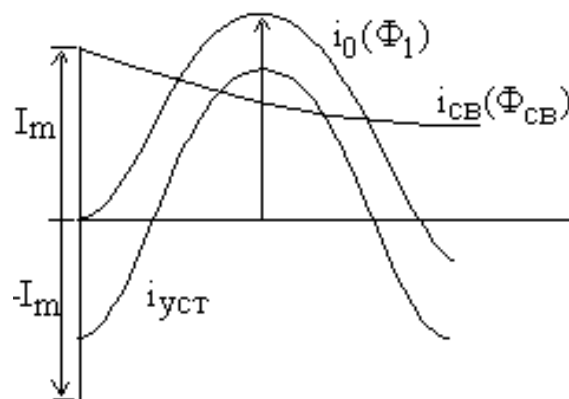


Рисунок 2 - Характер протекания переходного процесса трансформатора ($a_0 = 0$, $t = 0$, $U_1 = 0$)

$$i_0 = -\frac{U_{1m}}{\sqrt{r_1^2 + \omega L_1^2}} + \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_1^2 + \omega L_1^2}} = 0, \text{ т.е. } i_{уст} = -I_m, i_{пер} = I_m$$

В момент включения ток $i_0 = 0$. Роль $i_{пер}$ и состоит в том, чтобы в момент включения катушки со сталью в сеть обеспечить это условие. Видим это при включении в сеть ненасыщенного трансформатора.

В момент, когда $U_1=0$, амплитуда сверхтока холостого хода достигает, в предельном случае, двойного значения амплитуды установившегося тока холостого хода через $p/2$ [1, 5, 6].

Аналогичные кривые для потока.

2) Включение трансформатора на сеть в момент $a_0 = p/2$, $U_1 = U_{1m} \dots$, $i_{св} = 0$, $i_0 = i_{уст} = 0$

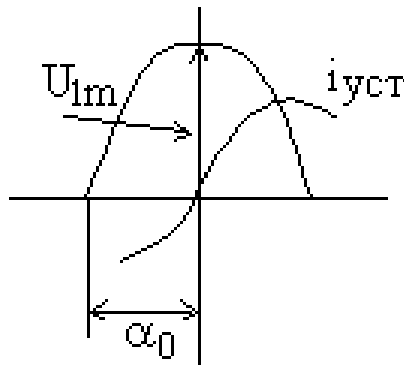


Рисунок 3 - Характер протекания переходного процесса трансформатора ($a_0 = p/2$, $U_1 = U_{1m} \dots$, $i_{св} = 0$, $i_0 = i_{уст} = 0$)

Переходного процесса как такового не будет и процесс в первый же момент времени установится.

б) Включение трансформатора с насыщенной сталью.

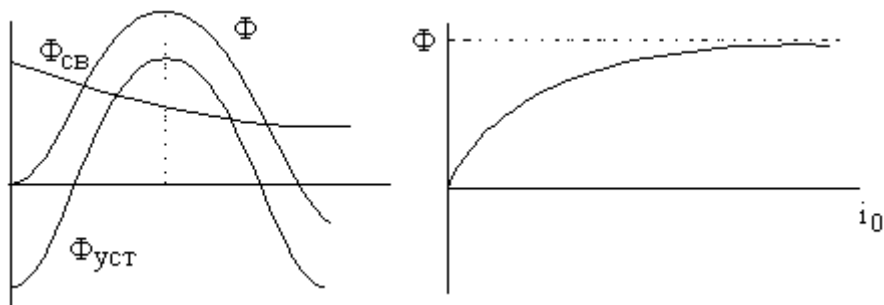


Рисунок 4 - Характер протекания переходного процесса трансформатора с насыщенной сталью

Если сталь трансформатора насыщена, то картина переходного процесса не изменится в отношении потока (Φ), так как из условия равновесия ЭДС значение этого потока определяется для любого момента времени подведенным напряжением – U_1 . Т.к. U_1 уравнивается E , а ЭДС наводится Φ . Но ток включения холостого хода будет другой, так как при насыщении стали он растет значительно быстрее потока [3, 7, 8]. Включение трансформатора при $a_0 = 0, t = 0, U_1 = 0$ является самым неблагоприятным.

Так как через время соответствующего $\pi/2$ поток достигает в пределе двойной амплитуды, то ударный ток холостого хода по отношению к амплитуде возрастает в 50-80 раз.

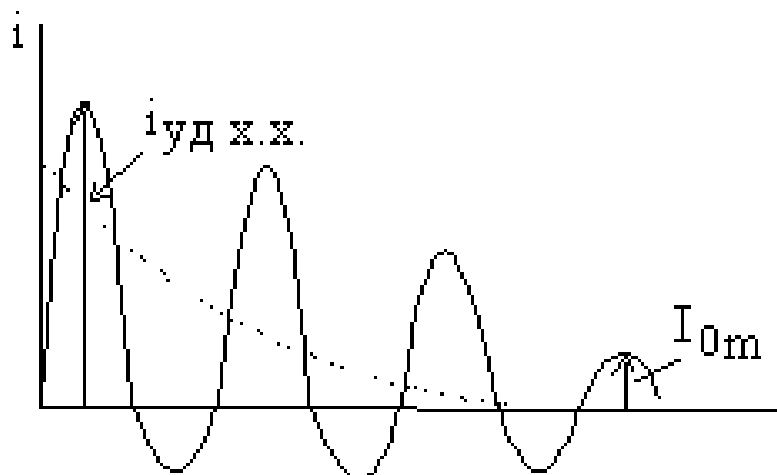


Рисунок 5 – График ударного тока холостого хода.

$$\frac{i_{\text{уд х.х.}}}{I_{0m}} = 50 \div 80 \text{ раз}$$

Данный ток не опасен с точки зрения нагрева, но может привести к ложному срабатыванию защиты.

В результате моделирования модели трансформатора в режиме короткого замыкания получили зависимости тока и напряжения от времени [9, 10, 11].

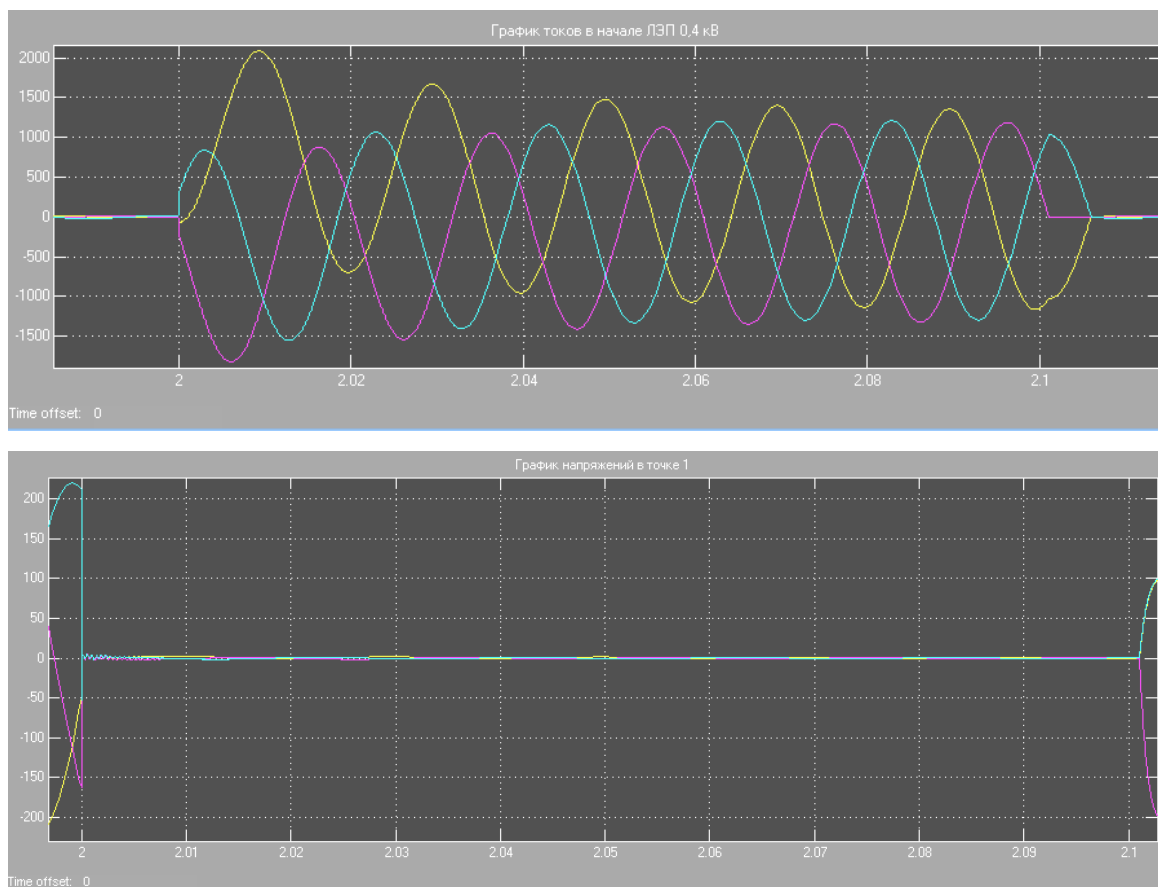


Рисунок 6 – Зависимости тока и напряжения от времени в режиме короткого замыкания трансформатора.

Список литературы:

1. Петров Г.Н. Трансформаторы, том.1, Основы теории, ГЭИ, 1934, 445 стр.
2. Гурьянов, Д.В. Моделируемая система вентиляции в системах CoDeSys и DesigoInsight / Д.В. Гурьянов, В.И. Шведко, А.Ю. Астапов //В сб.: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 25-27 октября 2017 года. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2017. – С. 274-280
3. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М., «Энергия», 1974, 240 стр.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978, 832 с.
5. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л., Энергия, 1970, 432 стр.

6. Гурьянов, Д.В. Исследование работы частотно-регулируемого электропривода в программе CoDeSys / Д.В. Гурьянов, В.И. Шведко // В сб.: Интеллектуальные технологии и техника в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 18-20 октября 2016 года. – Мичуринск: Общество с ограниченной ответственностью «БИС», 2016. – С. 402-409.
7. Сергеевков Б.Н. Электрические машины. Трансформаторы. Под редакцией Копылова И.П., М. Высшая школа, 1989, 352 стр.
8. Андреев, М.А. Управление электрическим освещением сельскохозяйственного помещения на основе контроллера ARDUINO UNO / М.А. Андреев, А.Ю. Астапов, Д.В. Гурьянов // В сб.: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 25-27 октября 2017 года. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2017. – С. 187-193
9. Кобзев, В.А. Модернизация уличного освещения площадки ПУ Шпикулово Жердевского района / В.А. Кобзев, Д.В. Гурьянов // В сб.: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 25-27 октября 2017 года. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2017. – С. 246-249
10. Некрасова, Т.А. Исследование трехфазной асинхронной машины с короткозамкнутым ротором на основе виртуальной лабораторной установки / Т.А. Некрасова, Д.В. Гурьянов, Ю.К. Зайцев // В сб.: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 25-27 октября 2017 года. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2017. – С. 259-269
11. Дмитриев, Д.О. Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей / Д.О., Дмитриев Д.В. Гурьянов // В сб.: Интеллектуальные технологии и техника в АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – Мичуринск: Общество с ограниченной ответственностью «БИС», 2016. – С. 358-363.

UDC 004.942

**SIMULATION OF THE TRANSFORMER OPERATION
AT TRANSITION PROCESSES**

Chvyrev Alexander Viktorovich

graduate student

shvylev@mail.ru

Nefedov Alexander Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, associate Professor

niefiodov.aliexandr.58@mail.ru

Michurinsk state agrarian University

Michurinsk, Russia

Annotation. The article presents the results of modeling a transformer in the short-circuit mode. The dependence of current and voltage from time to time.

Key words: transients, transformer, simulation, short circuit.