

### Выводы

1. При плющении зерна вальцами мощность их вращательного движения в основном затрачивается:

- на деформацию зерновки;
- трение скольжения поверхности вальцов о зерновку;
- трение в опорных подшипниках вальцов.

2. Мощность трения скольжения поверхности вальцов о зерновку зависит от их частоты вращения, диаметров вальцов, коэффициентов трения вальцов о зерновку, дополнительной внешней силы, действующей на зерновку и угла деформации зерновки, который определяется диаметром вальцов, средней толщиной зерновки и зазором между вальцами

3. Мощность деформации зерновки зависит также от диаметров вальцов, коэффициентов трения вальцов о зерновку, угла деформации зерновки и дополнительной внешней силы, действующей на зерновку, и, кроме того, от физико-механических свойств зерновки и окружной скорости образующих поверхностей вальцов.

4. Мощность трения в опорных подшипниках вальцов определяется нагрузкой на подшипники вальцов, их частотой вращения, диаметром цапф вальцов и приведенным коэффициентом трения их подшипников качения.

5. При использовании плющилок с различным диаметром вальцов наибольшая мощность трения скольжения затрачивается на вальце с меньшим диаметром, а наибольшая мощность деформации зерновки – на вальце с большим диаметром.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шило, И.Н. К обоснованию мощности привода вальцов плющилки/ И.Н. Шило, Н.А. Воробьев, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2008. – №3. – С. 25-28.

2. Дайнеко, В.А. Теоретическое обоснование производительности вальцовой плющилки-измельчителя/ В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова// Агропанорама. – 2012. – №2. – С. 14-28.

3. Воробьев, Н.А. Теоретические исследования производительности вальцовой плющилки / Н.А. Воробьев//Агропанорама. – 2008. – №2. – С. 45-48.

4. Горячкин, В.П. Собрание соч.: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3 – 384 с.

5. Андрианов, А.М. Исследование рабочего процесса валковой зерноплющилки: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.20.01/ А.М. Андрианов; Воронежский инст. сельск. хозяйства им. К.Д. Глинки. – Воронеж, 1974. – 19 с.

УДК 631.371: 621.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.03.2012

## НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ЗВЕЗДА-НУЛЬ С СИММЕТРИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ» (Y/Y<sub>n</sub>CSU)

Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, И.В. Протосовицкий, канд. техн. наук, доцент, Н.Г. Королевич, канд. экон. наук, доцент, В.М. Збрядыга, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ)

### Аннотация

*В данной статье на основе схемы замещения, используя метод симметричных составляющих, рассмотрен несимметричный режим работы трансформатора Y/Y<sub>n</sub>CSU.*

*The unbalanced operation of the transformer Y / Y<sub>n</sub>SU was discussed in the article based on the equivalent circuit, using the method of symmetrical components.*

### Введение

На кафедре электроснабжения БГАТУ была разработана новая схема соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда-нуль с симметрирующим устройством» (Y/Y<sub>n</sub>CSU) [1]. Трансформатор с указанной схемой соединения обмоток содержит обмотки высшего и низшего напряжения, а также компенсационную, охватывающую все основные обмотки. Один конец компенсационной обмотки подключен к нейтрали обмоток низшего напряжения, а другой конец выведен на крышку бака. Анализ несимметрич-

ной работы данного трансформатора целесообразно проводить на основе схем замещения.

### Основная часть

На основании схем замещения трансформатора, приведенных на рис. 1, рассмотрим влияние симметрирующего устройства на фазные напряжения вторичной стороны трансформатора.

По закону Киргофа для напряжений прямой и обратной последовательности обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора фазы A без учета действия симметрирующей обмотки схемы замещения (рис. 1, a) справедливо выражение:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A \underline{Z}_1 + \underline{I}'_{a2} \underline{Z}_2 = \underline{U}'_{a2} \quad (1)$$

Первичные и вторичные напряжения прямой и обратной последовательности обмотки высшего напряжения и симметрирующей обмотки (рис. 1, а) связаны следующим уравнением:

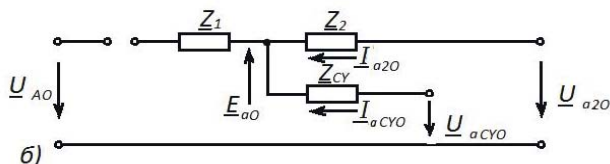
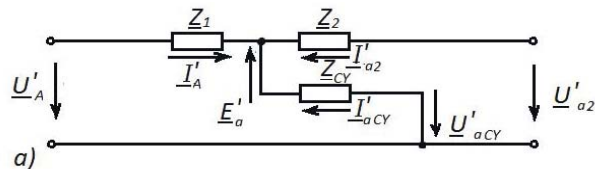


Рисунок 1. Схемы замещения трансформатора Y/Y<sub>n</sub>/CУ:

а – для токов прямой и обратной последовательности; б – для токов нулевой последовательности

$$\underline{U}'_A - \underline{I}'_A \underline{Z}_1 + \underline{I}'_{aCY} \underline{Z}_{CY} = \underline{U}'_{aCY} \quad (2)$$

где  $\underline{I}'_{aCY}$  – суммарный ток прямой и обратной последовательности фазы *a*, протекающий в витках симметрирующей обмотки;

$\underline{U}'_{aCY}$  – суммарное фазное напряжение прямой и обратной последовательности симметрирующей обмотки фазы *a*.

Так как по симметрирующей обмотке протекает только ток нулевой последовательности, то

$$\underline{I}'_{aCY} = 0 \text{ и } \underline{U}'_{aCY} = 0.$$

Принимая во внимание, что  $\underline{I}'_A = \underline{I}'_{a2} = \underline{I}_A$  и

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = \underline{Z}_K,$$

уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$\underline{U}'_A - \underline{I}_A \underline{Z}_K = \underline{U}'_{a2} \quad (3)$$

Аналогично для фаз *B* и *C*:

$$\underline{U}'_B - \underline{I}_B \underline{Z}_K = \underline{U}'_{a2} \quad (4)$$

$$\underline{U}'_C - \underline{I}_C \underline{Z}_K = \underline{U}'_{a2} \quad (5)$$

где  $\underline{U}'_{a2}$ ,  $\underline{U}'_{c2}$  – сумма фазных напряжений прямой и обратной последовательности обмоток низшего напряжения трансформатора соответственно фазы *b* и *c*.

На основании схемы замещения (рис. 1, б) запишем следующие выражения:

для обмоток трансформатора без учета действия симметрирующей обмотки:

$$\underline{U}_{AO} + \underline{I}_{a20} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{a20}; \quad (6)$$

для обмотки высшего напряжения и симметрирующей обмотки:

$$\underline{U}_{AO} + \underline{I}_{aCY0} \underline{Z}_{CY} = \underline{U}_{aCY0}. \quad (7)$$

Аналогично уравнениям (6) и (7) имеем для фазы *B*:

$$\underline{U}_{BO} + \underline{I}_{b20} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{b20}; \quad (8)$$

$$\underline{U}_{BO} + \underline{I}_{bCY0} \underline{Z}_{CY} = \underline{U}_{bCY0}, \quad (9)$$

для фазы *C*:

$$\underline{U}_{CO} + \underline{I}_{c20} \underline{Z}_2 = \underline{U}_{c20}; \quad (10)$$

$$\underline{U}_{CO} + \underline{I}_{cCY0} \underline{Z}_{CY} = \underline{U}_{cCY0}, \quad (11)$$

где  $\underline{U}_{a20}$ ,  $\underline{U}_{c20}$  – напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения без учета действия компенсирующих витков соответственно фазы *b* и *c*;

$\underline{U}_{aCY0}$ ,  $\underline{U}_{cCY0}$  – напряжение нулевой последовательности симметрирующей обмотки без учета влияния обмотки высшего напряжения соответственно фазы *b* и *c*;

$\underline{I}_{aCY0}$ ,  $\underline{I}_{cCY0}$  – ток нулевой последовательности, протекающий по виткам симметрирующей обмотки соответственно от фазы *b* и *c*.

Из формулы (6) следует, что напряжение нулевой последовательности трансформатора фазы *a*

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{AO} - \underline{U}_{a20} = -\underline{I}_{a20} \underline{Z}_2,$$

или

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_{a20} \underline{Z}_2.$$

Обозначим ток нулевой последовательности каждой из фаз следующим образом:

$$\underline{I}_{a20} = \underline{I}_{b20} = \underline{I}_{c20} = \underline{I}_0.$$

Тогда

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_2.$$

Сумма этих токов протекает по обмотке симметрирующего устройства:

$$\underline{I}_{a20} + \underline{I}_{b20} + \underline{I}_{c20} = 3 \underline{I}_0.$$

Он создает в этой обмотке напряжение нулевой последовательности

$$\underline{U}_{CY0} = -3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CY}.$$

Для того чтобы симметричная составляющая нулевой последовательности фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора была компенсиро-

вана обмоткой симметрирующего устройства, необходимо выполнить условие:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{CV0},$$

или

$$\underline{I}_0 \underline{Z}_2 = 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CV}.$$

Отсюда условием полной компенсации будет:

$$\underline{Z}_{CV} = \frac{\underline{Z}_2}{3}. \quad (12)$$

Таким образом, из формулы (12) следует, чтобы компенсировать напряжение нулевой последовательности обмотки низшего напряжения необходимо, чтобы сопротивление витков симметрирующего устройства было втрое меньше сопротивления одной из фаз обмотки низшего напряжения.

Сложив выражения (3) и (6), (4) и (8), (5) и (10), получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия симметрирующего устройства:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_A + \underline{U}_{AO} - \underline{I}_A \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}'_{a2} + \underline{U}_{a2o}; \\ \underline{U}'_B + \underline{U}_{BO} - \underline{I}_B \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}'_{\beta 2} + \underline{U}_{\beta 2o}; \\ \underline{U}'_C + \underline{U}_{CO} - \underline{I}_C \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}'_{\gamma 2} + \underline{U}_{\gamma 2o}. \end{aligned} \right\} (13)$$

Учитывая уравнения (2.3) и (2.5) [2], получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}_{a2}; \\ \underline{U}_B - \underline{I}_B \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}_{\beta 2}; \\ \underline{U}_C - \underline{I}_C \underline{Z}_K + \underline{I}_0 \underline{Z}_2 &= \underline{U}_{\gamma 2}, \end{aligned} \right\} (14)$$

где  $\underline{U}_{a2}, \underline{U}_{\beta 2}, \underline{U}_{\gamma 2}$  – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора без учета действия компенсирующих витков.

Вычтя из правой и левой частей уравнений (14) одну и ту же величину

$$\underline{U}_{CV0} = -3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CV},$$

получим фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия компенсирующих витков:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{a2} - \underline{U}_{CV0} &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_2 + 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CV} = \underline{U}_a; \\ \underline{U}_{\beta 2} - \underline{U}_{CV0} &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_2 + 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CV} = \underline{U}_\beta; \\ \underline{U}_{\gamma 2} - \underline{U}_{CV0} &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_2 + 3 \underline{I}_0 \underline{Z}_{CV} = \underline{U}_\gamma, \end{aligned} \right\} (15)$$

где  $\underline{U}_a, \underline{U}_\beta, \underline{U}_\gamma$  – фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом компенсирующего воздействия витков симметрирующего устройства.

Вынесем ток  $\underline{I}_0$  за скобку и уравнения (15) получим в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_K - \underline{I}_0 (\underline{Z}_2 - 3 \underline{Z}_{CV}); \\ \underline{U}_\beta &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B \underline{Z}_K - \underline{I}_0 (\underline{Z}_2 - 3 \underline{Z}_{CV}); \\ \underline{U}_\gamma &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C \underline{Z}_K - \underline{I}_0 (\underline{Z}_2 - 3 \underline{Z}_{CV}). \end{aligned} \right\} (16)$$

В уравнениях (16) обозначим  $\underline{Z}_2 - 3 \underline{Z}_{CV} = \underline{Z}_o$ .

Тогда фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора с учетом действия обмотки симметрирующего устройства будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_o; \\ \underline{U}_\beta &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_o; \\ \underline{U}_\gamma &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C \underline{Z}_K - \underline{I}_0 \underline{Z}_o, \end{aligned} \right\} (17)$$

где  $\underline{Z}_o$  – полное сопротивление нулевой последовательности рассматриваемого трансформатора.

Выполняя условие полной компенсации (12) и пренебрегая активной составляющей сопротивления нулевой последовательности, ввиду его незначительной величины, можно считать:  $\underline{Z}_o = 0$ .

В этом случае уравнения (17) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= -\underline{U}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_K; \\ \underline{U}_\beta &= -\underline{U}_B + \underline{I}_B \underline{Z}_K; \\ \underline{U}_\gamma &= -\underline{U}_C + \underline{I}_C \underline{Z}_K. \end{aligned} \right\} (18)$$

Из последних уравнений следует, что, применяя у трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  симметрирующее устройство, будет иметь место полная компенсация потоков нулевой последовательности и система напряжений будет симметричной.

В лабораторных условиях была проверена симметрирующая способность трансформатора  $Y/Y_n/3U$ . Исследования проводились на трансформаторах типа ТСЗ-2,5/0,38, изготовленных на заводе с различными схемами соединения обмоток. Значения фазных напряжений трансформатора  $Y/Y_n/3U$  в зависимости от тока в нулевом проводе сравнивались с соответствующими напряжениями трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Z_n, Y/\Delta_n$ , и  $Y/Y_n$  для двух режимов:

( $I_a = I_n \div 0, I_\beta = I_c = I_n$ ) и ( $I_a = I_\beta = I_n \div 0, I_c = I_n$ ) [3].

По данным измерений построены зависимости. В качестве примера на рис. 2 они представлены для второго режима ( $I_a = I_\beta = I_n \div 0, I_c = I_n$ ) в совмещенном виде для различных схем соединения трансформаторов.

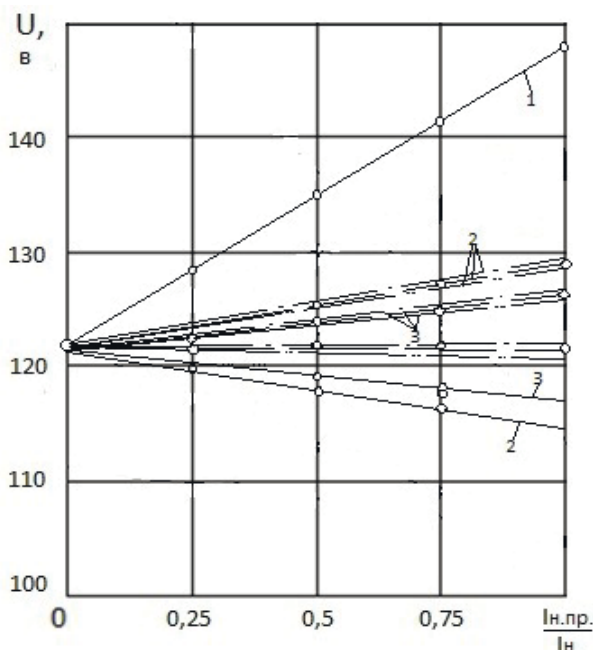


Рисунок 2. Зависимость фазных напряжений на выводах с нижней стороны трансформаторов типа ТСЗ-2,5/0,38 от тока в нулевом проводе (режим  $I_a=I_b=I_n \div 0, I_c=I_n$ )

$\frac{Y/Y_n, \quad Y/Z_n, \quad Y/Y_n C Y, \quad Y/Y_n C Y}{Y/Y_n, \quad Y/Z_n, \quad Y/Y_n C Y, \quad Y/Y_n C Y}$   
 1 – фаза «а», 2 – фаза «в», 3 – фаза «с»

Как видно из кривых, расхождение между фазными напряжениями при глубокой несимметрии для схемы  $Y/Y_n$  составляет 31 В, для трансформаторов со схемой  $Y/Z_n, Y/Y_n C Y, Y/Y_n C Y$  – 5 В. При этом

отклонение напряжений от номинального в процентном выражении составляет соответственно по фазам «а», «б», «с» для трансформаторов со схемой соединения обмоток  $Y/Y_n$ : 20,5 %; -5,7 %; -4,9 %; для трансформаторов  $Y/Y_n C Y, Y/Y_n C Y, Y/Z_n$  – 3,3 %; 4,9-3,3 %; 4,9 %; 0 %.

**Выводы**

Теоретические исследования показали, что трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/Y_n C Y$  обладает симметрирующей способностью, экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы и показали, что он равноценен трансформаторам  $Y/Y_n C Y, Y/Z_n$ .

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Трехфазный трансформатор: а. с. 1099328/ А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Н.Е. Шевчик и др.; БИМСХ. – 1984.
2. Янукович, Г.И. Исследование трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Y$ -разомкнутый треугольник с целью использования его в сельских электрических сетях 380/220 В для повышения качества напряжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ Г.И. Янукович; ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1975. – 20 с.
3. Протосовицкий, И.В. Использование трансформаторов  $Y/Y_n$  с общестержневой симметрирующей обмоткой в сельских электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02/ И.В. Протосовицкий. – Минск, 1995. – 156 с.

**“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.**

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на второе полугодие 2012 года: для индивидуальных подписчиков - 71550 руб., ведомственная подписка - 141750 руб.