

Выводы

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

- на деформацию зерновки;
- сдвиг зерновки;
- трение проскальзывания образующей поверхности вальца с большей линейной скоростью о зерновку;
- 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, 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, затрачиваемая на сдвиг зерновки в межвальцовом пространстве, равна разности мощностей, создаваемых силами трения на образующих поверхностях каждого из вальцов в отдельности, вращающихся с соответствующей скоростью.

5. Для начала процесса измельчения зерна в межвальцовом пространстве необходимо, чтобы в

нем создавалась сила сдвига, достаточная для создания механического напряжения, превышающего предел прочности зерновки, а также смещение в зерновке, определяемое механическим напряжением предела прочности зерновки, модулем упругости, коэффициентом Пуассона и межвальцовым зазором.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Шило, И.Н. К обоснованию мощности привода вальцовой плющилки/ И.Н. Шило, Н.А. Воробьев, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2008. – №3. – С. 25-28.
2. Дайнеко, В.А. Теоретическое обоснование мощности электропривода вальцовой плющилки/ В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова, Н.А. Воробьев// Агропанорама. – 2012. – №4. – С. 18-29.
3. Дайнеко, В.А. Теоретическое обоснование производительности вальцовой плющилки-измельчителя/ В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова// Агропанорама. – 2012. – №2. – С. 14-28.
4. Воробьев, Н.А. Теоретические исследования производительности вальцовой плющилки / Н.А. Воробьев//Агропанорама. – 2008. – №2. – С. 45-48.
5. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3 – 384 с.

УДК 631.371:621.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.12.2012

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ЗВЕЗДА-РАЗОМКНУТЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК С НУЛЕМ» И $Y/Y_n/СУ$ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ

Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, В.М. Збродыга, канд. техн. наук, доцент, Н.Г. Королевич, канд. эконом. наук, доцент (БГАТУ)

Аннотация

В статье показано, что трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/СУ$ компенсируют третью и кратные трем высшие гармоники тока и напряжения, имеющие нулевую последовательность, что улучшает форму кривой напряжения.

It is shown in the article that transformers with schemes of connection winding $Y/Y_n/СУ$ and $Y/Y_n/СУ$ compensate the third and multiple by three the highest harmonic components of current and voltage having zero chain that improves form of curved voltage.

Введение

Трансформаторы со схемами соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/СУ$ имеют конструктивные отличия. Однако физические условия их работы одинаковы. При работе этих трансформаторов на несимметричную нагрузку проис-

ходит компенсация потоков нулевой последовательности, и напряжение с низкой стороны трансформаторов будет симметричное [1, 2]. При питании от этих трансформаторов потребителей с нелинейной нагрузкой на стороне высшего и низшего напряжения возникнет широкий спектр гармоник тока и напряжения. Токи и напряжения первой, четвертой, седьмой и так далее

гармоник являются токами и напряжениями прямой последовательности и сдвиг между фазами у них равен 120° . Токи и напряжения второй, пятой, восьмой и так далее гармоник будут токами и напряжениями обратной последовательности. Сдвиг между фазами у них составляет 240° . Третья и кратные трем гармоники относятся к нулевой последовательности, так как угол сдвига по фазам у них равен 360° .

Гармоники тока и напряжения прямой и обратной последовательностей трех фаз образуют симметричную трехфазную систему, поэтому сумма их равна нулю. Третья и кратные трем высшие гармоники тока и напряжения во всех трех фазах в каждый момент времени имеют одинаковое направление. Они суммируются и создают утроенный ток, который через нагрузку поступает в компенсирующую обмотку. Так как компенсирующая обмотка намотана встречно обмоткам низшего напряжения трансформатора, то в ней создается магнитный поток, который направлен встречно потокам, создаваемым аналогичными токами, протекающими в обмотках низшего напряжения. В результате происходит компенсация данных гармоник, что ведет к улучшению несинусоидальности формы кривой напряжения.

Основная часть

Первичные обмотки обоих трансформаторов соединены в звезду без нулевого провода. Поэтому в них отсутствуют токи третьей и кратных трем гармоник. Фазные токи равны сумме основных гармоник и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности. Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Их сумма в обмотке высшего напряжения равна нулю:

$$\begin{aligned} & \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где I_{mA}, I_{mB}, I_{mC} – амплитуды гармоник тока фаз A, B, C соответственно;

ω_1 – угловая частота основной гармоники;

ϕ – угол смещения гармоники по отношению к началу отсчета;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Фазные напряжения первичной обмотки трансформатора могут содержать все гармоники, включая третью и кратные трем [3]:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_B &= \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \\ u_C &= \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J, \end{aligned} \quad (2)$$

где U_{mA}, U_{mB}, U_{mC} – амплитудные значения гармоник напряжения фаз A, B, C соответственно.

Обмотки низшего напряжения трансформаторов соединены в звезду с нулевым проводом. В этом случае в фазных токах и напряжениях могут присутствовать все гармоники:

$$\begin{aligned} i_a &= \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \\ i_b &= \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_c &= \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_a &= \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_b &= \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_c &= \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J. \end{aligned}$$

Постоянные составляющие тока и напряжения в приведенных формулах не показаны.

Первые гармоники и все высшие гармоники тока трех фаз вторичной обмотки, кроме третьей и кратных трем, образуют симметричную трехфазную систему. Поэтому их сумма будет равна нулю:

$$\begin{aligned} & \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & + \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + 120^\circ + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & + \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - 120^\circ + \phi_{(3n+2)}] J = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Фазные токи третьей и кратных трем гармоник во всех трех фазах равны и имеют одинаковое направление в каждый момент времени. Поэтому они суммируются и протекают по компенсирующей обмотке:

$$\begin{aligned} & \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J + \\ & + \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J + \\ & + \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J = \\ & = 3 \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J. \end{aligned} \quad (6)$$

В этом случае напряжение обмотки низшего напряжения фазы «а» с учетом действия компенсирующей обмотки будет равно

$$\begin{aligned} u_a = & - \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J + \\ & \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J + \\ & \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J - \\ & \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \phi_{(3n+1)}] J \cdot Z_{н(3n+1)} - \\ & \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \phi_{(3n+2)}] J \cdot Z_{н(3n+2)} - \\ & \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J \cdot Z_{н(3n+3)} + \\ & \sum 3 I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J \cdot Z_{к(3n+3)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Z_{н(3n+1)}$, $Z_{к(3n+3)}$ – эквивалентные сопротивления обмоток низшего напряжения и компенсирующей для каждой из гармоник.

Эквивалентные сопротивления обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующей для каждой из гармоник определяются по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} Z_{в(n3+e)} &= r_{в(3n+e)} + jx_{в(3n+e)} = r_{в(3n+e)} + \\ & + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{в} - M_{вн} - M_{вк} + M_{нк}); \\ Z_{н(3n+e)} &= r_{н(3n+e)} + jx_{н(3n+e)} = r_{н(3n+e)} + \\ & + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{н} - M_{вн} - M_{нк} + M_{вк}); \\ Z_{к(3n+e)} &= r_{к(3n+e)} + jx_{к(3n+e)} = r_{к(3n+e)} + \\ & + j2\pi f_{(3n+e)} (L_{к} - M_{вк} - M_{нк} + M_{вн}). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $e = 1, 2, 3$ – соответственно для гармоник прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$r_{в}$, $r_{н}$, $r_{к}$ – активное сопротивление обмоток высшего, низшего напряжения и компенсирующей обмотки;

$L_{в}$, $L_{н}$, $L_{к}$ – индуктивность обмоток;

$M_{вн}$, $M_{вк}$, $M_{нк}$ – взаимная индукция пары обмоток.

Из выражения (7) следует, что для того, чтобы третья и кратные трем высшие гармонические напряжения были компенсированы дополнительной компенсирующей обмоткой необходимо, чтобы напряжение этих гармоник в обмотке низшего напряжения было равно напряжению в компенсирующей обмотке:

$$\begin{aligned} \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J \cdot Z_{н(3n+3)} = \\ \sum 3 I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \phi_{(3n+3)}] J \cdot Z_{к(3n+3)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Это условие будет выполнено, если

$$Z_{к(3n+3)} = \frac{Z_{н(3n+3)}}{3}. \quad (10)$$

Выполнение условия (10) достигается конструктивным исполнением компенсирующих обмоток трансформаторов «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/\Delta$.

В лабораторных условиях были проведены экспериментальные исследования способности трансформаторов «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/\Delta$ улучшать форму кривой напряжения. Для этих целей был использован трансформатор типа ТС – 1,5/ 0,38 с различными схемами соединения обмоток. Источником высших гармоник служил электропривод, работающий по схеме асинхронного вентильного каскада со статическим преобразователем частоты на тиристорах (АВК). Он является потребителем электроэнергии данных трансформаторов. Мощность электропривода и трансформатора были соизмеримы. Состав искажающих высших гармоник напряжения и их величина определялись анализатором качества напряжения типа УК-1. Осциллографирование выполнялось шлейфовым осциллографом типа Н 102.

Исследование проводилось методом сравнения результатов измерений для схем соединения обмоток исследуемых трансформаторов с трансформатором Y/Y_n при одном и том же угле управления тиристора β .

На рис. 1, б приведена осциллограмма вторичного напряжения в трансформаторе Y/Y_n при питании тиристорного электропривода с трехфазно-нулевой схемой зависимого инвертора.

Как показали исследования, тиристорный электропривод генерирует в сеть широкий спектр гармоник, в том числе и четные. При соединении обмоток трансформатора Y/Y_n наибольшее значение имеют гармоники напряжения, кратные трем, имеющие нулевую последовательность. Так, значение напряжения третьей гармоники по отношению к первой составляет 27,8%, шестой – 5,2%, девятой – 8,7%, двенадцатой – 3,5%. Нечетные гармоники: пятая, седьмая, одиннадцатая и тринадцатая имеют незначительную величину, порядка

0,4-1,1%. Примерно такую же величину имеют гармоники четные не кратные трем.

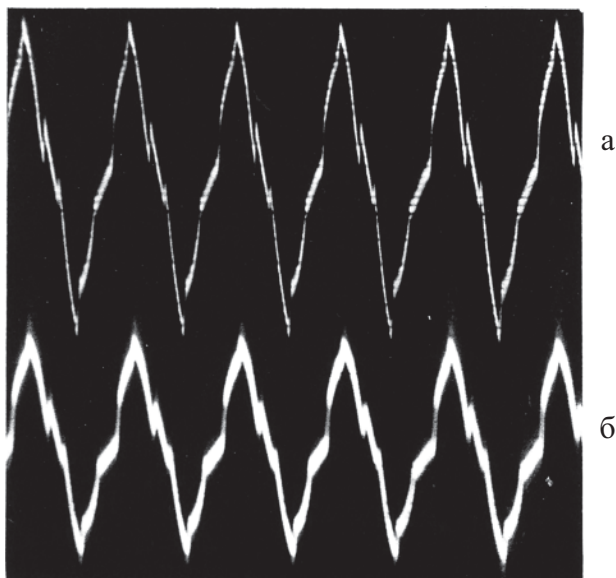


Рисунок 1. Осциллограммы фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n при питании АВК:

а – высшая сторона; б – низшая сторона

При питании тиристорного электропривода от трансформаторов «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» или $Y/Y_n/СУ$ гармоники напряжения кратные трем практически отсутствуют, что значительно улучшает форму кривой напряжения (рис. 2, б).

Другие гармоники имеют некоторое увеличение по амплитуде. Но значение их по абсолютной вели-

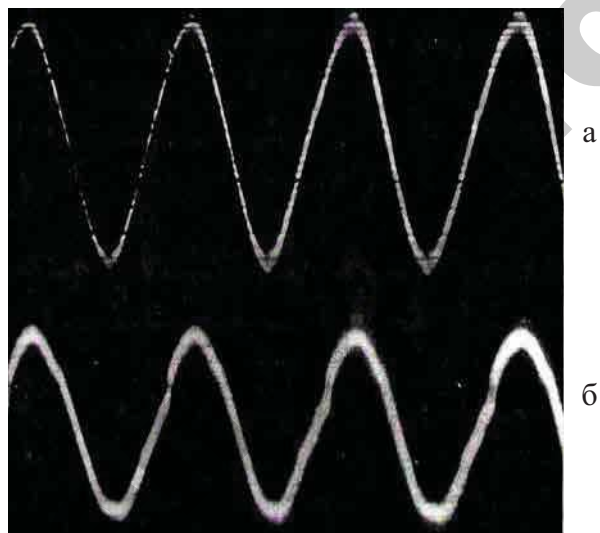


Рисунок 2. Осциллограммы фазных напряжений трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» или $Y/Y_n/СУ$ при питании АВК:

а – высшая сторона; б – низшая сторона

чине не велико, около 2 %. Тем не менее, коэффициент несинусоидальности напряжения, рассчитанный по выражению, приведенному по ГОСТ [3], значительно уменьшается. Если при соединении обмоток Y/Y_n он составлял 30%, то при соединении обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» или $Y/Y_n/СУ$ он уменьшился в 3,5 раза [4] .

Наличие высших гармоник напряжения и их величина определялись и с высшей стороны трансформаторов.

Как показывают результаты измерений, при схеме соединения обмоток Y/Y_n спектр гармоник с высшей стороны трансформатора практически примерно такой же, как и с низшей (рис. 1, а). Наибольшее значение имеют гармоники напряжений: третья и девятая – 26,4% и 7,6% соответственно. Значение остальных гармоник не большое, порядка 0,5%, за исключением пятой, которая составляет по отношению к первой 4,6%.

При соединении обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» или $Y/Y_n/СУ$ значение всех высших гармоник напряжения с высшей стороны трансформатора ослабляется в 2-3 раза. Так, при использовании таких схем коэффициент несинусоидальности с высшей стороны по сравнению со схемой Y/Y_n уменьшается с 28,1% до 1,45%, т. е. в 19,4 раза (рис. 2, а).

Выводы

Таким образом, трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем» и $Y/Y_n/СУ$ целесообразно использовать в сельских электрических сетях, как с несимметричной, так и нелинейной нагрузкой, так как они не только симметрируют напряжение, но и улучшают форму кривой напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янукович, Г.И. Несимметричная работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда-разомкнутый треугольник с нулем»: в сб.: Пути совершенствования сельскохозяйственной техники; вып. 26/ Г.И. Янукович. – Минск: Ураджай, 1974.
2. Янукович, Г.И. Несимметричная работа трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Y_n/СУ$ / Г.И. Янукович// Агропанорама. – № 6. – 2012.
3. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97.
4. Янукович, Г.И. Влияние тиристорной нагрузки на форму кривой напряжения в сельских низковольтных сетях/ Г.И. Янукович, В.П. Счастливый, А.П. Сердешнов// Повышение надежности электроустановок в сельском хозяйстве. – Челябинск, 1986. – С. 41-45.