

CZU 621.313.33

## АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СОВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ КАК НЕ ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ - ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ

*Вячеслав ШАПОВАЛОВ**Государственный Аграрный Университет Молдовы*

**Abstract.** In this work it is proved analytically that in asynchronous motors of series 4A and 5A, during operation, there is a voltage of the third harmonic with a frequency of 150 Hz as a component of the voltage  $U_{00}$  (voltage between the points “zero network – zero engine”). The nature of the origin of the voltage of the third harmonic in the working engine in a symmetrical mode in the conditions of saturation of its magnetic system has been revealed. The presence of a third harmonic in the voltage of  $U_{00}$  in asynchronous engines, the magnitude and nature of its change, gives a fundamental opportunity to use this voltage as a source of emergency signal of emergency break mode of the phase of the feeding network.

**Key words:** Electrical engine; Asynchronous engine; Harmonic saturation.

**Реферат.** В работе аналитическим путём доказано, что в составе напряжения  $U_{00}$  (напряжение между точками «нуль сети – нуль двигателя»), у асинхронных двигателей серий 4А и 5А, во время работы, присутствует напряжение третьей гармоники с частотой 150 Гц. Раскрыта природа возникновения напряжения третьей гармоники в работающем двигателе в симметричном режиме в условиях насыщения его магнитной системы. Наличие третьей гармоники в составе напряжения  $U_{00}$  у асинхронных двигателей, величина и характер её изменения, даёт принципиальную возможность использовать это напряжение как источник аварийного сигнала аварийного режима обрыва фазы питающей сети.

**Ключевые слова:** Электрический двигатель; Асинхронный двигатель; Гармоники насыщения.

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт развития электромашиностроения, за последние годы, показывает, что основным путём снижения металлоёмкости выпускаемых машин - максимальное использование их ферромагнитного материала, что неизбежно ведет к значительному насыщению магнитопроводов. Это особенно характерно для наиболее распространенных электрических машин – низковольтных трёхфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей последних серий 4А и 5А. Исходя из этого, асинхронные двигатели этих серий уже нельзя рассматривать как линейные системы и, следовательно, известные в литературе математические модели асинхронных машин с линейными электромагнитными связями в определенных случаях уже не могут удовлетворять современным требованиям. Это имеет существенное значение для проектирования защитных устройств использующих напряжение в нулевом проводе как диагностический сигнал аварийного режима обрыва фаз питающей линии.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Общепризнанная классическая теория электрических машин рассматривает асинхронный электродвигатель, как линейную идеализованную систему. Основываясь на этой теории, спроектированы и выполнены, существующие в настоящее время, основные защитные устройства электрического двигателя, такие например, как тепловые реле, токовые реле и т.д., обеспечивающие защиту электродвигателя от аномальных аварийных режимов. Эта теория основывается на целом ряде допущений:

- Электрическая машина не насыщена.
- Потерями в стали пренебрегают.
- Обмотки машин сосредоточены. Для двухфазных – они сдвинуты на 90 электрических градусов, а для трехфазных - на 120 электрических градусов.
- Поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие.
- Намагничивающая сила обмоток и магнитные поля синусоидально распределены вдоль окружности воздушного зазора.
- Воздушный зазор равномерен, отсутствует эксцентриситет расточки статора и ротора
- Ротор симметричен.

- Намагничивающая сила сосредоточенной обмотки равна силе реальной обмотки.  
 - Машина симметрична, т.е. фазы статора и ротора имеют равные электрические параметры (активные сопротивления, полные и взаимные индуктивности) независимо от не симметрии фазных токов и напряжений.

Несмотря на все эти допущения, классическая теория электрических машин позволяет, с достаточной для инженерной практики точностью, рассматривать электромагнитные и электромеханические процессы переходных и в установившихся режимах работы электродвигателей. А также рассчитывать все необходимые параметры электрической машины, используемые для ее проектирования и эксплуатации.

Однако опыт развития электромашиностроения, за последние годы, показывает, что основным путем снижения металлоемкости выпускаемых машин - максимальное использование их ферромагнитного материала, что неизбежно ведет к значительному насыщению их магнитопроводов. Это особенно характерно для наиболее распространенных электрических машин – трёхфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей последних серий 4А и 5А. Исходя из этого, предложено асинхронные двигатели этих серий рассматривать как насыщенные нелинейные магнитные системы.

Как следует из курса ТОЭ (Демирчян, К.С. 2007), между нулевой точкой трехфазной сети и нулевой точкой трёхфазного потребителя, соединенного в звезду, в несимметричном режиме появляется напряжение. На этом явлении может быть основана защита трехфазных потребителей от не симметричных режимов и в частности от обрыва питающей фазы асинхронных двигателей.

Напряжения между нулевыми точками двигателя ( $O^1$ ) и источника питания ( $O$ ) определяется формулой:

$$U_{O^1} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (1)$$

Где:  $U_{O^1}$  - напряжение между нулевой точкой двигателя и питающей сети

$U_A; U_B; U_C$  - напряжение фаз источника;

$Y_A; Y_B; Y_C$  - полные проводимости фаз двигателей.

При отсутствии нулевого провода и обрыве фазы напряжение  $U_{O^1}$  достигает величины  $\frac{U_{\delta}}{2}$ .

При этом напряжение на двух остальных фазах нагрузки равно значению  $\frac{U_B}{2}$ .

В рассмотренных схемах защиты электродвигателей Сырых Н.Н. (2001,2002) напряжение  $U_{O^1}$  фиксируется исполнительным элементом (реле), установленным в нулевом проводе. и действующем на отключение электродвигателя через схему управления.

Практика эксплуатации таких защит показала, что во многих случаях происходит их ложное срабатывание. В работах А.С. Галюк (1970) и А.О. Грундулис (1973) приводится анализ работы устройств защиты электродвигателей по напряжению нулевой последовательности и причин их ложного срабатывания. По мнению этих авторов, ложное срабатывание таких устройств, происходит из-за наличия между нейтральными точками сети и двигателя, даже в режиме симметричного питания, напряжения  $U_{O^1}$  обусловленного некоторой асимметрией электрической системы самого двигателя. Причем величина этого напряжения и её фазовый сдвиг носит случайный характер и зависит от конструкции самого двигателя. Кроме этого если в трёхфазной сети напряжение не симметрично (в сельских электрических сетях это явление неизбежно), тогда между указанными точками появляется еще напряжение асимметрии  $U_{O''}$ , величина и фазовый угол которого зависят от структуры асимметрии сети и скольжения двигателя. При наличии переменной асимметрии самой сети фазовые углы этих напряжений ( $U_{O^1}$  и  $U_{O''}$ ) могут совпасть. В этом случае суммирующее напряжение становится максимальным ( $U_{O_{max}} = U_{O^1} + U_{O''}$ ) и защита срабатывает, хотя обрыва фазы нет.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проведенные исследования (Шаповалов, В.И., Черней, М. 2006; Волконович, Л.Ф. и др. 2006) показали, что даже при абсолютной симметрии фазных напряжений между нейтральными точками двигателя и сети имеется напряжение  $U_0$ . Поэтому нами было высказано предположение о том, природой его появления является не конструктивная асимметрия двигателя или питающей сети, а насыщение магнитной системы двигателя. Таким образом, асинхронные двигатели последних серий являются в магнитном плане не линейными элементами, генерирующими в фазных напряжениях высшие гармоники, появляющиеся в нулевом проводе и наличие которых необходимо обязательно учитывать при разработке защит, основанных на использовании напряжения нулевой последовательности в качестве сигнала аварийного режима обрыва фазы.

Покажем это математически.

Из курса «Электрические машины» (Петров, Г.Н. 1973) известно, что при включении в сеть с синусоидальным напряжением, частотой ( $\nu$ ) трехфазного асинхронного электродвигателя с числом пар полюсов ( $P$ ) в его магнитопроводе создается вращающееся со скоростью ( $\omega=2\pi\nu/P$ ) магнитное поле. При этом дискретное распределение обмотки статора по пазам приводит к созданию несинусоидальной по форме пространственной волны магнитодвижущей силы (м.д.с.), которую можно разложить на ряд нечетных пространственных гармоник (Мишин, В.И. 1981). Особенностью этих гармоник является то, что они перемещаются вдоль воздушного зазора с разными скоростями и в различных направлениях. Имея скорость вращения в  $\nu$  меньше скорости вращения основного поля и число пар полюсов в  $\nu$  раз больше числа пар полюсов основного поля, эти высшие пространственные гармоники пересекают неподвижную статорную обмотку и создают в ней электродвижущую силу (э.д.с.).

Ряд приёмов, применяемых при выполнении обмоток электродвигателей, таких как укорочение шага, распределение проводников по пазам и соединение фаз в звезду полностью исключают в токе наличие гармоник кратных трем и значительно ослабляют пятую и седьмую гармоники. Это даёт основание считать, что токи во времени и м.д.с. вдоль пространственной линии окружности статора изменяются практически по синусоидальному закону. Однако, учитывая нелинейность ферромагнитной среды в условиях магнитного насыщения магнитопровода, даже синусоидальному закону распределения кривой м.д.с. в воздушном зазоре двигателя соответствует не синусоидальная волна распределения магнитной индукции  $B(t, \gamma)$  (Вольдек, А.М. 1974). Такую волну магнитной индукции можно разложить в ряд нечетных гармоник (метод Фурье), при этом наиболее сильно будут выражены первая и третья. (девятая гармоники будет выражена слабо). Эти гармоники в отличие от пространственных гармоник, обусловленных не синусоидальностью м.д.с., являются следствием насыщения магнитной системы двигателя (Шаповалов, В.И. 1988).

Вращаясь со скоростью основного магнитного поля, пространственная не синусоидальная волна магнитной индукции  $B(t, \gamma)$ , определяемая формулой (2), индуцирует в каждой фазе электродвигателя ЭДС, содержащие нечетные гармоники (в основном первую и третью), определяемые формулами (2.3).

$$B(t, \gamma) = B_{M1} \sin(\omega_1 \cdot t - p\gamma_1) + B_{M3} \sin 3(\omega_1 \cdot t - p_1 \cdot \gamma) \quad (2)$$

где:  $B_{M1}, B_{M3}$  - соответственно амплитуда индукции первой и третьей гармоник

$\omega_1$  - угловая частота,

$p_1$  - число пар полюсов статора,

$\gamma$  - пространственный угол.

$$e_{ad} = E_{m1} \cos \omega_1 \cdot t + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t$$

$$e_{d} = E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t + 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t$$

$$e_{\bar{a}} = E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t - 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \quad (3)$$

Учитывая это, найдем напряжение между нулём двигателя и нулём сети (точки  $O$  и  $O'$ ) по методу двух узлов (Рис.1) по формуле (4).

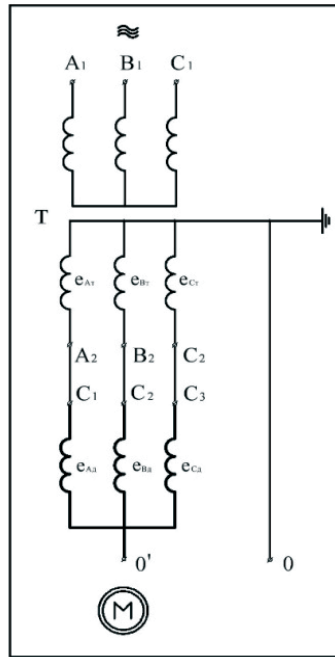


Рисунок 1. Схема расчета напряжения между точками  $O$  и  $O'$  по методу двух узлов

$$U_0 = \frac{(e_a + e_d)g_a + (e_b + e_H)g_b + (e_c + e_d)g_c + (i_a + i_b + i_c)}{g_a + g_b + g_c} \quad (4)$$

где:  $e_a, e_b, e_c$  - Э.Д.С. вторичных обмоток трансформатора Т системы электроснабжения,

$e_d, e_H, e_d$  - Э.Д.С. обмоток статора двигателя М,

$g$  - проводимости ветвей по фазам,

$i$  - токи по фазам.

Для случая симметричного трансформатора Т, симметричного электродвигателя М и симметричного питающего кабеля, Э.Д.С. трансформатора -  $e_a, e_b, e_c$  синусоидальны по форме имеют одинаковые амплитуды и, поэтому сумма их произведений:  $e_a \cdot g_a + e_b \cdot g_b + e_c \cdot g_c$  - равна нулю. Так же равна нулю и сумма токов по фазам  $i_a + i_b + i_c$ . Тогда уравнение (2.4) принимает вид:

$$U_{.0} = \frac{e_d \cdot g_a + e_H \cdot g_b + e_d \cdot g_c}{3g} \quad (5)$$

Подставив в формулу значения э.д.с.  $e_d, e_H, e_d$  из (3) получим выражение:

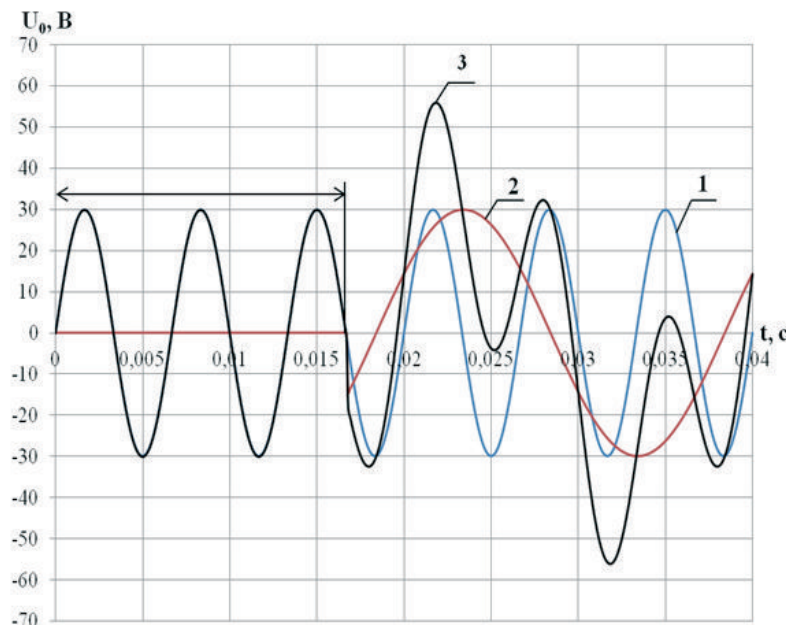
$$U_0 = E_{m3} \cos \cdot 3\omega_1 \cdot t \quad (6)$$

Таким образом, как показали математические расчёты, в трехфазных асинхронных короткозамкнутых электрических двигателях с насыщенной магнитной системой даже при абсолютной конструктивной симметрии двигателя и абсолютно симметричном питании между нейтральной точкой обмотки статора и нейтральной точкой сети возникает синусоидальное напряжение утроенной частоты.

При обрыве одной из фаз между указанными выше точками ( $00'$ ) дополнительно появляется напряжение нулевой последовательности основной гармоники с частотой

50 Гц, которое суммируется с напряжением третьей гармоники. Об этом свидетель-

ствует и форма напряжения  $U_{00'}$ , полученного при осциллографировании напряжения между нулевой точкой двигателя и нулевой точкой сети (рис. 2).



**Рисунок 2.** Характер изменения напряжения  $U_0$  для двигателя 4А80В4УЗ при обрыве фазы в режиме ХХ (холостого хода) (стрелкой показан момент обрыва фазы сети):  
1 – составляющая напряжения  $U_0$ ,  $f = 150$  Гц, 2 – составляющая напряжения  $U_0$ ,  $f = 50$  Гц,  
3 – суммарное напряжение составляющих

Было установлено, что абсолютная величина напряжения третьей гармоники в нулевом проводе зависит от таких факторов как: мощности двигателя, числа пар полюсов, скольжения двигателя, величины питающего напряжения и полностью определяется степенью насыщения магнитной системы двигателя.

Максимальное значение этого напряжения, соответствует режиму холостого хода двигателя. При увеличении скольжения от нуля ( $S_0$ ) до номинального значения ( $S_{ном}$ ) величина указанного напряжения несколько уменьшается из-за размагничивающего действия тока ротора. Дальнейшее увеличение скольжения (величины нагрузки) практически не приводит к изменению напряжения третьей гармоники и при  $S=1$  оно достигает значения примерно 70% от соответствующего значения в режиме холостого хода.

С увеличением напряжения питающей сети напряжение третьей гармоники резко возрастает, что объясняется резким увеличением магнитного насыщения стали двигателя.

С ростом мощности и с уменьшением числа пар полюсов напряжение третьей гармоники уменьшается.

## ВЫВОДЫ

Выполненные расчёты и проведенные экспериментальные исследования подтвердили гипотезу о том, что в работающем трёхфазном асинхронном короткозамкнутом двигателе даже при абсолютно симметричном режиме питания в нулевом проводе двигателя генерируется синусоидальное по форме напряжение утроенной частоты ( $f=150$  Гц) природа которого – магнитное насыщение стали двигателя.

Результаты проведенных исследования дают возможность выполнить правильную настройку устройств защиты, в которых в качестве диагностического сигнала используется напряжение между нейтральными точками сети и двигателя и, следовательно, добиться их надежного срабатывания.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф., ШАПОВАЛОВ, В.И. (2006). Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал обрыва фазы асинхронного электродвигателя. М: ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, Часть 1. Москва, 2006.
2. ВОЛЬДЕК, А.М. (1974). Электрические машины. Ленинград: Энергия. 840 с.
3. ГАЛЮК, А.С. (1970). Исследования неполнофазных режимов работы сельскохозяйственных электроустановок и защиты от них: Дис. ... канд. техн. наук. Киев. 174 с.
4. ГРУНДУЛИС, А.О., ЗЕЙБОТ, В.В. (1973). Использование напряжения нулевой последовательности для защиты электродвигателей В: Падомью Латвияс лауксайдмиециба, № 8, с. 43-44.
5. ДЕМИРЧЯН, К.С., НЕЙМАН, Л.Р., КОРОВКИН, Н.В., ЧЕЧУРИН, В.Л (2006). Теоретические основы электротехники. В 3 т. Санкт-Петербург: Питер. ISBN 5947234793.
6. МИШИН, В.И, СОБОР, И.В., ЗАБУДСКИЙ, Е.И. (1981). Математическое моделирование статических ферромагнитных устройств. Кишинев: Штиинца, 130 с.
7. ПЕТРОВ, Г.Н. (1974). Электрические машины. В трех частях. Ч.1: Введение. Трансформаторы. Москва: Энергия. 240 с.
8. СЫРЫХ, Н.Н., НЕКРАСОВ, А.И., КАБДИН, Н.Е. (2001). Определение параметров электродвигателя при обрыве фазы. В: Техника в сельском хозяйстве, №2, с. 20-23.
9. СЫРЫХ, Н.Н., НЕКРАСОВ, А.И., МАКАРЕНКОВА, О.М. (2002). Анализ неполнофазного режима работы асинхронного электродвигателя. В: Техника в сельском хозяйстве, №2, с. 8-13.
10. ШАПОВАЛОВ, В.И., ЧЕРНЕЙ, М., ШАПОВАЛОВ, В., СЛИПЕНКИ, В., ВОЛКОНОВИЧ, А., ДРУЦЭ, Т. (2006). Некоторые результаты исследований параметров системы нуль сети – нуль обмотки асинхронного электродвигателя. В: Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 5-й Международной научно-технической конференции. М.: ГНУВИЭСХ, с. 266-273. ISSN 0131-5277.
11. ШАПОВАЛОВ, В.И., ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В. (1988). Гармоники насыщения асинхронных двигателей в динамических и аварийных режимах. В: Динамические режимы работы асинхронной машины: Тезисы доклада 5-й Всесоюзной научно-технической конф., Каунас, 1988, с. 101.

Data prezentării articolului: 03.04.2019

Data acceptării articolului: 06.05.2019