

Научная статья  
УДК 621.3

## Влияние несинусоидальности сетевого напряжения на порог срабатывания устройства защиты от асимметрии напряжения

Виктор Гаврилович Петько, Ильмира Агзамовна Рахимжанова, Максим Борисович Фомин, Валерий Валерьевич Кононец, Владислав Викторович Самосюк

Оренбургский государственный аграрный университет

**Аннотация.** Произведено аналитическое обоснование принципа действия устройства защиты асинхронных электродвигателей от асимметрии напряжения, выполненного на базе  $RC$ -фильтров симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей фаз. Изложена методика определения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов, входящих в схемы фильтров, а также произведена оценка влияния несинусоидальности напряжения в питающей электродвигатели электрической сети на порог срабатывания устройства защиты. При оценке ограничивались наличием в кривой фазных напряжений сети величин третьей и пятой гармонических составляющих при различных их начальных фазах. Учитывалась при оценке влияния также величина и начальная фаза симметричной составляющей напряжения нулевой последовательности фаз, не оказывающая влияния на порог срабатывания устройства защиты при синусоидальном напряжении. Предложена методика определения порога срабатывания устройства защиты при любом из возможных сочетаний указанных параметров. В качестве примера для оценки степени отклонения порога срабатывания  $r_c$  при несинусоидальности напряжения от порога срабатывания  $r_y$  данного устройства защиты при синусоидальном напряжении произведён расчёт  $r_c$  по вышеизложенной методике с использованием универсальной системы математических расчётов MathCAD. В результате проведённых теоретических расчётов установлено, что на порог срабатывания рассмотренного УЗ асинхронных электродвигателей на базе  $R$ - $C$  фильтров прямой и обратной последовательностей фаз, реагирующего на величину коэффициента асимметрии сетевого напряжения, нелинейность сетевого напряжения оказывает существенное влияние. Наличие гармоник в спектре напряжения повышает чувствительность защиты к симметричной составляющей напряжения обратной последовательности фаз. Максимальное (хотя и маловероятное) снижение порога срабатывания по этой составляющей достигает 72 % от порога срабатывания при синусоидальном напряжении. Это можно считать вполне целесообразным, так как совместно асимметрия и нелинейность напряжения оказывают более негативное воздействие на защищаемый объект.

**Ключевые слова:** несинусоидальность напряжения, асимметрия, устройство защиты, высшие гармоники, обратная последовательность фаз, порог срабатывания защиты.

**Для цитирования:** Влияние несинусоидальности сетевого напряжения на порог срабатывания устройства защиты от асимметрии напряжения / В.Г. Петько, И.А. Рахимжанова, М.Б. Фомин [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 2 (88). С. 143–148.

Original article

## Influence of non-sinusoidality of the mains voltage on the operation threshold of the voltage unbalance protection device

Victor G. Petko, Ilmira A. Rakhimzhanova, Maxim B. Fomin,

Valery V. Kononets, Vladislav V. Samosyuk

Orenburg State Agrarian University

**Abstract.** An analytical substantiation of the principle of operation of the device for the protection of asynchronous electric motors from voltage asymmetry, made on the basis of RC filters of symmetric components of the positive and negative phase sequences, has been carried out. A technique for determining the resistances of resistors and capacitances of capacitors included in the filter circuits is described, and also an assessment of the influence of non-sinusoidal voltage in the supplying electric motors of the electric network on the threshold of operation of the protection device was made. When assessing, they were limited by the presence in the curve of the phase voltages of the network of the values of the third and fifth harmonic components at their different initial phases. When assessing the effect, the value and the initial phase of the symmetrical component of the zero phase sequence voltage, which does not affect the operation threshold of the protection device with a sinusoidal voltage, were also taken into account. A method for determining the threshold of operation of the protection device for any of the possible combinations of these parameters is proposed. As an example, to assess the degree of deviation of the response threshold  $r_c$  when the voltage is not sinusoidal from the response threshold  $r_y$  of this protection device with sinusoidal voltage,  $r_c$  was calculated according to the above method using the universal system of mathematical calculations MathCAD. As a result of the performed theoretical calculations, it was established that the nonlinearity of the mains voltage has a significant effect on the response threshold of the considered protection device of asynchronous electric motors based on R-C filters of the direct and reverse phase sequences, which responds to the value of the mains voltage asymmetry coefficient. The presence of harmonics in the voltage spectrum increases the sensitivity of the protection to the symmetrical voltage component of the negative phase sequence. The maximum (albeit unlikely) decrease in the response threshold for this component reaches 72% of the response threshold for sinusoidal voltage. This can be considered quite appropriate, since both asymmetry and nonlinearity of voltage have a more negative effect on the protected object.

**Keywords:** non-sinusoidal voltage, asymmetry, protection device, higher harmonics, reverse phase sequence, protection operation threshold.

**For citation:** Influence of non-sinusoidality of the mains voltage on the operation threshold of the voltage unbalance protection device / V.G. Petko, I.A. Rakhimzhanova, M.B. Fomin et al. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 88(2): 143–148. (In Russ.).

Для защиты электродвигателей от асимметрии напряжения известны устройства защиты, реагирующие на разность действующих напряжений в фазах электрической сети или на отклонение углов между векторами этих напряжений от  $120^\circ$ . Как правило, выполнены эти защиты или на основе электромагнитных реле, подключённых в каждую из фаз сети [1], или на основе электронных (чаще всего полупроводниковых) элементов [2]. Однако наиболее совершенными являются защиты на базе *RC*-фильтров симметричной составляющей напряжения обратной последовательности фаз [3, 4]. Такие устройства защиты (*УЗ*) реагируют на асимметрию напряжения аналогично защищаемому электродвигателю. Одним из них является разработанная нами защита [5, 6], в качестве пускового органа которой используется *RC*-фильтр симметричной составляющей напряжения обратной последовательности фаз, а в качестве тормозного – *RC*-фильтр симметричной составляющей напряжения прямой последовательности фаз.

**Материал и методы.** Принципиальная схема этого *УЗ* изображена на рисунке 1.

Узел *A'* является тормозным органом устройства, а узел *A''* – пусковым органом. Каждый узел содержит три преобразователя напряжения в пропорциональный ему ток. Они подключены входами *x* к фазам электрической сети, а выходами *y* через один из диодов к нулевому проводу

электрической сети и через другой диод – к низкоомному входу ключа. Ключ устройства [7, 8] обесточивает катушку магнитного пускателя *КМ* и тем самым отключает электродвигатель, когда напряжение на его входе изменяется с отрицательного на положительное.

В каждом из узлов комплексы выходных токов первого, второго и третьего преобразователей равны:

$$I_1 = Y_{E1}U_{x1}; I_2 = Y_{E2}U_{x2}; I_3 = Y_{E3}U_{x3},$$

где  $Y_{E1}$ ,  $Y_{E2}$  и  $Y_{E3}$  – комплексы эквивалентных проводимостей первого, второго и третьего преобразователей, См;

$U_{x1}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x3}$  – комплексы фазных напряжений, В.

При несимметрии фазных напряжений каждая из них равна сумме симметричных составляющих прямой  $U_1$ , обратной  $U_2$  и нулевой  $U_0$  последовательностей фаз [9]:

$$U_A = U_1 + U_2 + U_0; U_B = a^2U_1 + aU_2 + U_0;$$

$$U_C = aU_1 + a^2U_2 + U_0,$$

где  $a = e^{j120}$  и  $a^2 = e^{j240}$  – фазовращающие операторы.

О степени несимметрии напряжений по обратной последовательности фаз судят по коэффициенту асимметрии  $r = U_2/U_1$ , а о несимметрии по нулевой последовательности фаз – коэффициенту неуравновешенности  $n = U_0/U_1$ . Величина коэффициента асимметрии согласно ГОСТу 32144–2013 должна быть не более 2–4 %, так

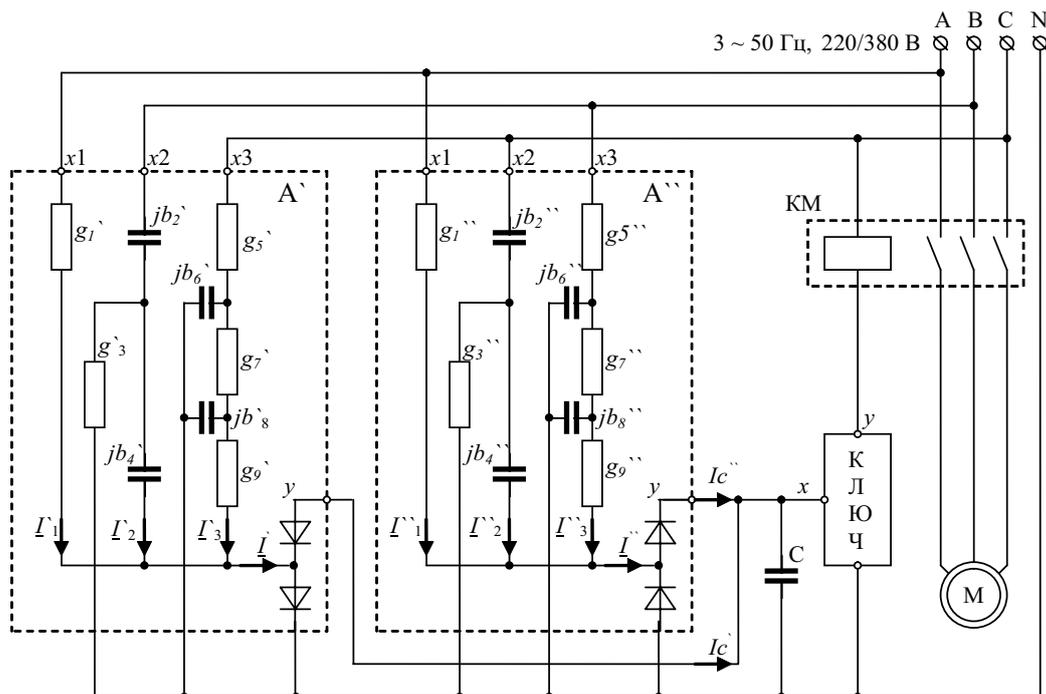


Рис. 1 – Принципиальная схема устройства защиты от асимметрии напряжения

как асимметрия напряжений ухудшает характеристики трёхфазных электродвигателей, вплоть до выхода их из строя [10].

Если проводимости резисторов и конденсаторов преобразователей в каждом узле подобраны так, что комплексы эквивалентных проводимостей  $Y_{E1}$ ,  $Y_{E2}$  и  $Y_{E3}$  находятся в соотношении:

$$\frac{Y_{E1}}{Y_{E2}} = \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{Y}{Y}; \quad \frac{Y_{E2}}{Y_{E3}} = \frac{aY}{a^2Y}, \quad (1)$$

то суммарные токи преобразователей первого и второго узлов:

$$\begin{aligned} \underline{I} &= 3Y(U_A + aU_B + a^2U_C)/3; \\ \underline{I}'' &= 3Y''(U_A + a^2U_B + aU_C)/3 = 3Y''U_2. \end{aligned}$$

Симметричные составляющие находятся по выражениям:

$$\begin{aligned} U_1 &= (U_A + aU_B + a^2U_C)/3; \\ U_2 &= (U_A + a^2U_B + aU_C)/3; \\ U_0 &= (U_A + U_B + U_C)/3 \quad [11]. \end{aligned}$$

Тогда  $\underline{I} = 3YU_1$ , и  $\underline{I}'' = 3Y''U_2$  – пропорциональны соответственно напряжениям прямой  $U_1$  и обратной  $U_2$  последовательностей фаз.

Это и позволяет считать первый узел А – фильтром напряжения прямой последовательности фаз, а второй А'' – фильтром напряжения обратной последовательности фаз.

Ключ устройства отключает электродвигатель, как было указано выше, при переходе напряжения на его входе с отрицательного на положительное. В данном случае это происходит в момент, когда коэффициент асимметрии сетевого напряжения  $r$  достигает допустимой для защищаемого электродвигателя величины  $r_d$ . При этом ток  $\underline{I}''$  с выхода фильтра обратной последовательности фаз становится равным току  $\underline{I}$  с выхода фильтра прямой последовательности фаз:

$$\begin{aligned} r_y = r_d \rightarrow \underline{I} = \underline{I}'' \rightarrow 3YU_1 = 3Y''U_2 \rightarrow \\ \rightarrow U_2/U_1 = Y/Y'' \rightarrow r_y = Y/Y'' = g'/g'', \end{aligned}$$

где  $r_y$  – уставка срабатывания устройства защиты;  $Y' = g'$  и  $Y'' = g''$  – модули проводимостей первых преобразователей соответственно фильтрам прямой и обратной последовательностей фаз, См.

Следовательно, если проводимости фильтров выбраны в соответствии с условиями (1), коэффициент асимметрии, при котором происходит срабатывание устройства (уставка срабатывания  $r$ ), задаётся изначально соотношением проводимостей  $g' = Y'$  и  $g'' = Y''$  резисторов первых преобразователей напряжения в ток, включённых в данном случае в фазу А.

В предположении, что активные и реактивные проводимости в каждом преобразователе с целью облегчения комплектации одинаковы, в ранее опубликованной работе [12] для синусои-

дальной формы напряжения получены формулы для определения их значений, при которых выполняются условия (1):

$$\begin{aligned} g_1 = G_1 = g; \quad g_3 = G_2 = \frac{8}{3}g; \quad b_2 = b_4 = \frac{4}{\sqrt{3}}g, \\ g_5 = g_7 = g_9 = G_3 = \\ = \frac{81 + 30(2 + \sqrt{13})^2 + (2 + \sqrt{13})^4}{24(2 + \sqrt{13})}g; \\ b_6 = b_8 = B_3 = \frac{2 + \sqrt{13}}{\sqrt{3}}G_3. \end{aligned}$$

По найденным значениям проводимостей определяются сопротивления резисторов фильтров (общая формула –  $R = 1/G$ ) и для стандартной частоты тока  $f$ , равной 50 Гц, – ёмкости конденсаторов (общая формула –  $C = B/2\pi f$ ).

Результаты этих расчётов для фильтров прямой и обратной последовательностей фаз при  $g' = 1 \cdot 10^{-6}$  См и  $g'' = 1 \cdot 10^{-5}$  См приведены в таблице 1.

Таким образом, узлы А' и А'' при приведённых в таблице параметрах, так как они выбраны из условия соблюдения соотношения (1) для синусоидального напряжения частотой 50 Гц, функционально будут являться соответственно фильтрами симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей фаз.

Однако на практике напряжение в питающей сети в той или иной степени несинусоидально. В этом случае оно может быть представлено в виде суммы постоянной составляющей и бесконечного ряда синусоидальных напряжений (гармоник) с частотами, кратными частоте напряжения сети [13]. А так как кривая сетевого напряжения симметрична относительно оси времени, в спектре этого напряжения отсутствуют постоянная составляющая и гармоники с чётными кратностями частот [14].

$$U = U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) + U_{m3} \cdot \sin(3\omega t + \alpha_3) + \\ + U_{m5} \cdot \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots$$

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m3}$  и  $U_{m5}$  – амплитуды напряжений первой (основной), третьей и пятой гармоник, В;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  и  $\alpha_5$  – начальные фазы гармоник;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота переменного напряжения (тока), 1/с;

$t$  – текущее время, с.

Расчёт тока в цепи ведётся в этом случае отдельно для каждой гармонической составляющей с последующим их наложением.

Однако выбранные выше параметры фильтров удовлетворяют условие (1) только для основной

### 1. Параметры фильтров напряжений прямой и обратной последовательностей фаз

ФНПП	$G_1'$ , См	$R_1'$ , Ом	$G_2'$ , См	$R_2'$ , Ом	$B_2'$ , См	$C_2'$ , Ф	$G_3'$ , См	$R_3'$ , Ом	$B_3'$ , См	$C_3'$ , Ф
	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	$2,67 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$7,35 \cdot 10^{-9}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$6,69 \cdot 10^4$	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-7}$
ФНОП	$G_1''$ , См	$R_1''$ , Ом	$G_2''$ , См	$R_2''$ , Ом	$B_2''$ , См	$C_2''$ , Ф	$G_3''$ , См	$R_3''$ , Ом	$B_3''$ , См	$C_3''$ , Ф
	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^5$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^4$	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-8}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$6,69 \cdot 10^3$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$

гармоники. Для высших гармоник соотношения (1) между эквивалентными проводимостями преобразователей  $Y_{E1}$ ,  $Y_{E2}$  и  $Y_{E3}$  не будут выполняться, следовательно, узлы  $A'$  и  $A''$  для этих гармоник не будут являться фильтрами симметричных составляющих в чистом виде. Как следствие, на их выходе появятся сигналы помехи, которые в итоге приведут к срабатыванию УЗ при коэффициенте асимметрии  $r_c$ , отличающемся от заданного значения  $r_y$ .

Оценить уровень этой помехи и найти комбинации амплитуд высших гармоник и их начальных фаз, при которых наблюдается максимум вносимой ими погрешности, является целью настоящей работы.

Для конденсаторов проводимости пропорциональны частоте напряжения, на которое они подключены. Поэтому проводимости конденсаторов, заложенных в схемы фильтров, для высших гармоник могут быть найдены по общим для того и другого фильтров формулам, включающим проводимости этих конденсаторов для основной гармоники:

$$B_{2k} = kB_2 \text{ и } B_{3k} = kB_3,$$

где  $k$  – номер гармоники.

С учётом этого комплексы эквивалентных проводимостей для  $k$ -х гармоник первого, второго и третьего преобразователей в фильтрах могут быть найдены по выражениям [15]:

$$Y_{1k} = G_1;$$

$$Y_{2k} = \frac{B_{2k}^2(-G_2 + j2B_{2k})}{G_2^2 + 4B_{2k}^2};$$

$$Y_{3k} = \frac{G_3^3(3G_3^2 - B_{3k}^2 - j4G_3B_{3k})}{(3G_3^2 - B_{3k}^2)^2 + (4G_3B_{3k})^2}.$$

Комплексы напряжений  $k$ -х гармоник прямой, обратной и нулевой последовательностей в фазах А, В и С сети – по выражениям:

$$\underline{U}_{1Ak} = U_{1k}e^{j\alpha k}; \quad \underline{U}_{1Bk} = a^2 \underline{U}_{1Ak}; \quad \underline{U}_{1Ck} = a \underline{U}_{1Ak};$$

$$\underline{U}_{2Ak} = U_{2k}e^{j(\beta + \alpha k)}; \quad \underline{U}_{2Bk} = a \underline{U}_{2Ak}; \quad \underline{U}_{2Ck} = a^2 \underline{U}_{1Ak};$$

$$\underline{U}_{0k} = U_{0k}e^{j(\gamma + \alpha k)},$$

где  $U_{1k} = m_k U_{11}$ ,  $U_{2k} = m_k U_{21} = m_k r U_{11} U_{0k} = m_k U_{01} = m_k n U_{11}$  – модули напряжений  $k$ -х гармоник прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$m_k$  – кратности напряжений  $k$ -х гармоник к напряжению первой гармоники ( $m_k = U_k/U_1$ );  $U_{11}$  – модуль напряжения прямой последовательности первой гармоники;

$\alpha_k$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – начальные фазы напряжений  $k$ -х гармоник прямых последовательностей фаз, а также напряжений обратной и нулевой последовательностей в фазе А сети.

Тогда напряжения  $k$ -х гармоник в фазах А, В и С сети примут вид:

$$\underline{U}_{Ak} = \underline{U}_{1Ak} + \underline{U}_{2Ak} + \underline{U}_{0k};$$

$$\underline{U}_{Bk} = \underline{U}_{1Bk} + \underline{U}_{2Bk} + \underline{U}_{0k};$$

$$\underline{U}_{Ck} = \underline{U}_{1Ck} + \underline{U}_{2Ck} + \underline{U}_{0k};$$

а комплексы выходных токов  $k$ -х гармоник фильтров прямой  $A'$  и обратной  $A''$  последовательностей фаз, равные сумме комплексов тока первого, второго и третьего преобразователей в каждом из фильтров:

$$\underline{I}_k = \underline{I}_{1k} + \underline{I}_{2k} + \underline{I}_{3k} =$$

$$= \underline{U}_{Ak} \underline{Y}_{1k} + \underline{U}_{Bk} \underline{Y}_{2k} + \underline{U}_{Ck} \underline{Y}_{3k};$$

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{1k} + \underline{I}''_{2k} + \underline{I}''_{3k} =$$

$$= \underline{U}_{Ak} \underline{Y}''_{1k} + \underline{U}_{Ck} \underline{Y}''_{2k} + \underline{U}_{Bk} \underline{Y}''_{3k}.$$

Мгновенные значения этих токов будут равны:

$$i'_k = \text{abs}(\underline{I}_k) \text{Sin}(k\omega t + \arg(\underline{I}_k)) \text{ и}$$

$$i''_k = \text{abs}(\underline{I}''_k) \text{Sin}(k\omega t + \arg(\underline{I}''_k)),$$

где  $\text{abs}(\underline{I}_k)$  и  $\text{abs}(\underline{I}''_k)$  – абсолютные (максимальные) значения токов  $\underline{I}_k$  и  $\underline{I}''_k$ , А;

$\arg(\underline{I}_k)$  и  $\arg(\underline{I}''_k)$  – начальные фазы этих токов.

Тогда мгновенные значения суммы токов всех гармонических составляющих на выходе фильтров  $A'$  и  $A''$ :

$$i' = i'_1 + i'_3 + i'_5 + \dots \text{ и}$$

$$i'' = i''_1 + i''_3 + i''_5 + \dots$$

Через диоды на обкладку конденсатора С будет поступать положительная полуволна тока  $i''$  с выхода фильтра  $A''$  и стекать отрицательная полуволна тока  $i'$  с выхода фильтра  $A'$ . Если асимметрия напряжения сети – ниже допустимой ( $r < (r_d = r_y)$ ), средняя величина тока с выхода фильтра напряжения прямой последовательности  $A'$

$$I'_c = f \int_0^T |i'| dt$$

значительно больше средней величины тока с выхода фильтра напряжения обратной последовательности  $A''$

$$I''_c = f \int_0^T |i''| dt.$$

Конденсатор С при этом по отношению к общей нулевой шине заряжен отрицательно. Ключ устройства при отрицательном напряжении на его входе открыт, катушка магнитного пускателя КМ – запитана, электродвигатель – включён.

По мере увеличения асимметрии сетевого напряжения (увеличения коэффициента  $r$ ) увеличивается и ток  $I''_c$  с выхода фильтра  $A''$ . Когда он станет равным или несколько больше тормозного тока  $I'_c$  с выхода фильтра  $A'$

$$I''_c - I'_c \geq 0,$$

конденсатор С поменяет знак заряда. Ключ при этом отключит электродвигатель. Так как средние токи того и другого фильтров являются функциями:

- коэффициента асимметрии  $r$ ;
- начальной фазы напряжения обратной последовательности фаз  $\beta$ ;
- коэффициента неуравновешенности  $n$ ;
- начальной фазы напряжения нулевой последовательности фаз  $\gamma$ ;
- кратностей  $m_k$  напряжений высших гармоник по отношению к напряжению основной гармоники;
- начальных фаз этих гармоник  $\alpha_k$ ,

вышеприведённое уравнение запишется в следующем виде

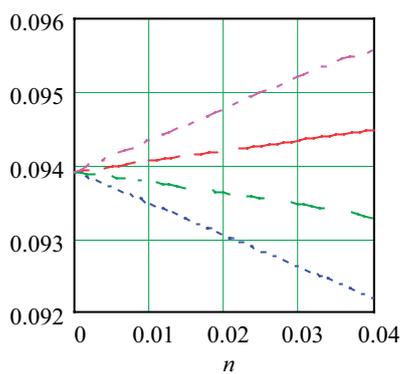
$$\Gamma_c(r, \beta, n, \gamma, m_3, \alpha_3, m_5, \alpha_5, \dots) - \\ - \Gamma_c(r, \beta, n, \gamma, m_3, \alpha_3, m_5, \alpha_5, \dots) \geq 0.$$

Результатом решения этого уравнения относительно  $r$  является коэффициент асимметрии напряжения  $r_c$ , при котором устройство защиты срабатывает при несинусоидальности напряжения сети. Величина его отклонения от заданного параметрами фильтров коэффициента  $r_y$ , при котором устройство защиты срабатывает при отсутствии гармоник в сетевом напряжении, позволит оценить влияние несинусоидальности напряжения на порог срабатывания рассматриваемого УЗ.

**Результаты исследования.** В качестве примера для оценки степени отклонения порога срабатывания  $r_c$  при несинусоидальности напряжения от порога срабатывания  $r_y$  при синусоидальном напряжении данного устройства защиты с параметрами, приведёнными в таблице 1 ( $r_y = 0,1$ ), произведён расчёт  $r_c$  по вышеизложенной методике с использованием универсальной системы математических расчётов MathCAD. При этом принято, что начальная фаза напряжения прямой последовательности фаз первой гармоники  $\alpha_1$  равна нулю, а гармонический состав напряжения ограничен третьей и пятой гармониками.

В результате получены приведённые на рисунках 2 и 3 графики зависимостей порога срабатывания рассматриваемого УЗ по коэффициенту асимметрии напряжения  $r_c$ , являющегося функцией:

$$\beta, n, \gamma, m_3, \alpha_3, m_5 \text{ и} \\ \alpha_5 [r_c = f(\beta, n, \gamma, m_3, \alpha_3, m_5, \alpha_5) = \\ = r_c(\beta, n, \gamma, m_3, \alpha_3, m_5, \alpha_5)].$$



$$\underline{r_c(135, n, 0, 0,025, 90, 0,04, 135)}$$

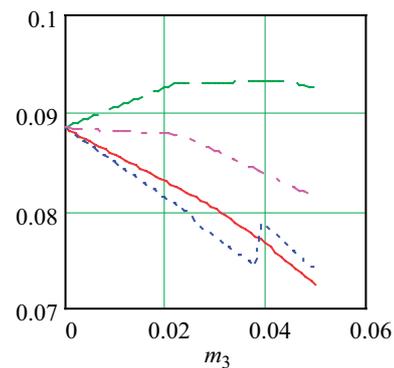
$$\underline{r_c(135, n, 90, 0,025, 90, 0,04, 135)}$$

$$\underline{r_c(135, n, 180, 0,025, 90, 0,04, 135)}$$

$$\underline{r_c(135, n, 270, 0,025, 90, 0,04, 135)}$$

Рис. 2 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от коэффициента неуровновешенности  $n$  при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $m_5$ ,  $\alpha_5$

На основе анализа зависимостей, приведённых на рисунках 2 и 3, сделан вывод, что отклонение порога срабатывания  $r_c$  от порога срабатывания при синусоидальном напряжении  $r_y$  тем больше, чем больше коэффициент неуровновешенности  $n$  напряжения и кратность  $m_3$  напряжения третьей гармоники по отношению к напряжению основной гармоники. Причём величина отклонения в значительной степени зависит от начальных фаз этих напряжений. В то же время величина отклонения  $r_c$  от  $r_y$  слабо зависит от начальной фазы напряжения пятой гармоники (рис. 4) и от кратности этой



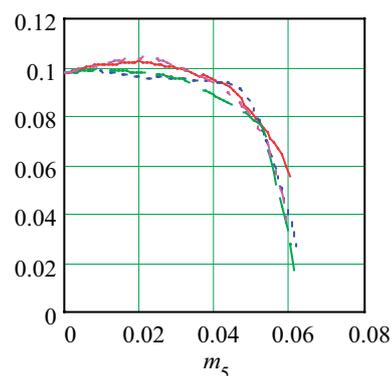
$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, m_3, 0, 0,04, 135)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, m_3, 45, 0,04, 135)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, m_3, 90, 0,04, 135)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, m_3, 135, 0,04, 135)}$$

Рис. 3 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от коэффициента  $m_3$  кратности напряжения третьей гармоники при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_3$ ,  $m_5$ ,  $\alpha_5$



$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, 0,025, 90, m_5, 0)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, 0,025, 90, m_5, 45)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, 0,025, 90, m_5, 90)}$$

$$\underline{r_c(135, 0,02, 90, 0,025, 90, m_5, 135)}$$

Рис. 4 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от коэффициента  $m_5$  кратности напряжения пятой гармоники при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_5$

гармоники  $m_5$  в пределах её изменения от 0 до 0,04. При  $m_5$  больше 0,04 происходит резкое уменьшение  $r_c$ .

Поэтому для последующего определения максимально возможного отклонения порога срабатывания при несинусоидальном напряжении от установленного параметрами фильтра  $r_y$  для синусоидального напряжения примем допустимые по ГОСТу 32144–2013 коэффициент неуравновешенности  $n$  равным 0,02 и кратность напряжения третьей гармоники по отношению к первой равным 0,025. Кратность напряжения пятой гармоники примем по условию допустимого её влияния на отклонение (рис. 4) равным 0,04.

При этих значениях коэффициента неуравновешенности и кратностей гармоник будет на-

блюдаться максимум отклонения  $r_c$  по сравнению с параметрами напряжения, не выходящими за рамки, установленные выше, при всех возможных сочетаниях начальных фаз  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_3$  и  $\alpha_5$ . Остаётся определить наиболее неблагоприятное их сочетание, при котором указанный максимум отклонения будет наибольшим.

Вид графиков, изображённых на рисунках 5 и 6, показывает, что зависимости порога срабатывания УЗ от начальных фаз третьей и пятой гармоник периодические с периодом, равным половине периода основной гармоники.

С учётом этого определение наиболее неблагоприятного сочетания начальных фаз этих гармоник осуществим путём построения зависимостей  $r_c = f(\alpha_3)$  для четырёх дискретных

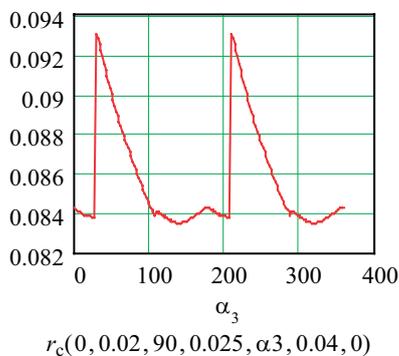


Рис. 5 – График зависимости порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\alpha_3$  третьей гармоники при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $m_5$ ,  $\alpha_5$

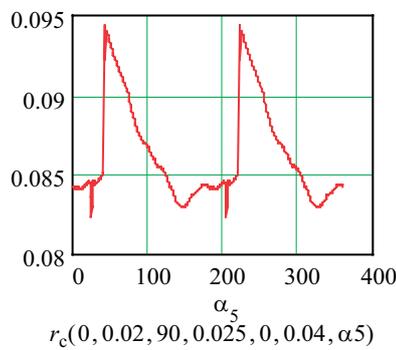


Рис. 6 – График зависимости порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\alpha_5$  пятой гармоники при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $m_5$

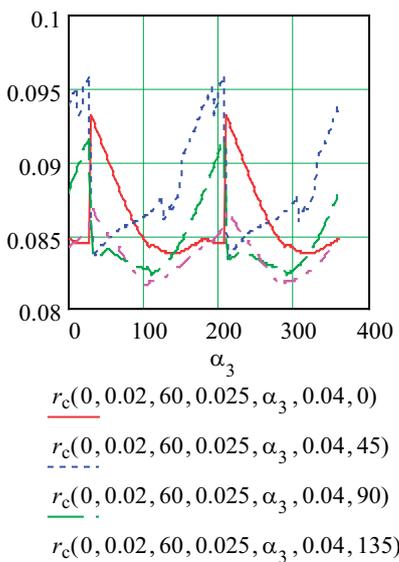


Рис. 7 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\alpha_3$  напряжения третьей гармоники при начальных фазах  $\alpha_5$  пятой гармоники, равных 0; 45; 90 и 135 градусам, и при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $m_5$

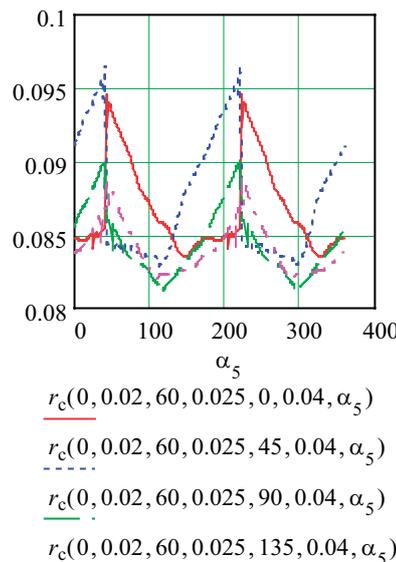
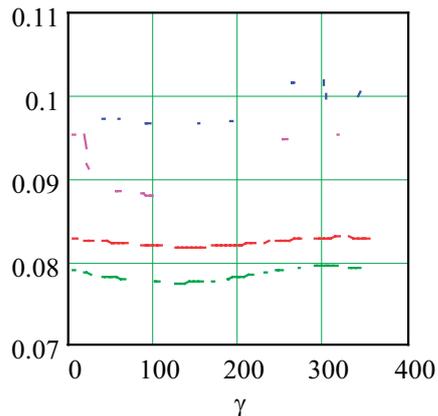


Рис. 8 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\alpha_5$  напряжения пятой гармоники при начальных фазах  $\alpha_3$  напряжения третьей гармоники, равных 0; 45; 90 и 135 градусам, и при фиксированных значениях  $\beta$ ,  $n$ ,  $\gamma$ ,  $m_3$ ,  $m_5$



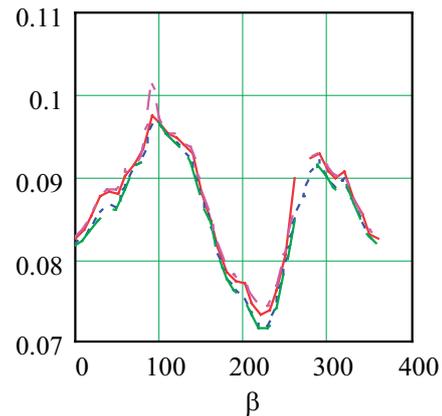
$$r_c(0, 0.02, \gamma, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(90, 0.02, \gamma, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(180, 0.02, \gamma, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(270, 0.02, \gamma, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

Рис. 9 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\gamma$  напряжения нулевой последовательности фаз при начальных фазах  $\beta$  напряжения обратной последовательности фаз, равных 0; 90; 180 и 270 градусов, и при фиксированных значениях  $n$ ,  $m_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $m_5$ ,  $\alpha_5$



$$r_c(\beta, 0.02, 30, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(\beta, 0.02, 90, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(\beta, 0.02, 135, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

$$r_c(\beta, 0.02, 270, 0.025, 90, 0.04, 135)$$

Рис. 10 – Графики зависимостей порога срабатывания  $r_c$  от начальной фазы  $\beta$  напряжения обратной последовательности фаз при начальных фазах  $\gamma$  напряжения нулевой последовательности фаз, равных 0; 90; 180 и 270 градусов, и при фиксированных значениях  $n$ ,  $m_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $m_5$ ,  $\alpha_5$

значений  $\alpha_5$  в диапазоне от 0 до 180° (рис. 7) и зависимостей  $r_c = f(\alpha_5)$  для четырёх дискретных значений  $\alpha_3$  в диапазоне от 0 до 180° (рис. 8).

Наиболее неблагоприятное сочетание начальных фаз напряжений высших гармоник, при которых происходит наибольшее снижение порога срабатывания  $r_c$ , как следует из вышеприведённых графиков, наблюдается при  $\alpha_3 = 90^\circ$  и  $\alpha_5 = 135^\circ$ . Именно эти значения начальных фаз использованы далее при определении сочетания начальных фаз напряжений обратной и нулевой последовательностей фаз, при которых происходит наибольшее снижение порога срабатывания УЗ.

Ниже построены графики зависимостей  $r_c = f(\gamma)$  при начальных фазах  $\beta$  напряжения обратной последовательности, равных 0; 90; 180 и 270 градусов (рис. 9), и – графики зависимостей  $r_c = f(\beta)$  при начальных фазах  $\gamma$  напряжения нулевой последовательности, равных 0; 90; 180 и 270 градусов (рис. 10).

Вид кривых указанных зависимостей указывает на то, что наибольшее снижение порога срабатывания происходит при  $\beta = 225^\circ$  и  $\gamma = 135^\circ$ .

**Выводы.** На порог срабатывания рассмотренного УЗ асинхронных электродвигателей на базе R-C фильтров прямой и обратной последовательностей фаз, реагирующего на величину коэффициента асимметрии сетевого напряжения, являющегося прямым показателем перехода элек-

тродвигателей в аварийный режим, существенное влияние оказывает нелинейность сетевого напряжения. Наличие гармоник в спектре напряжения повышает чувствительность защиты к симметричной составляющей напряжения обратной последовательности фаз. Максимальное (хотя и маловероятное) снижение порога срабатывания по этой составляющей достигает 72 % от порога срабатывания при синусоидальном напряжении. Это можно считать вполне целесообразным, так как совместно асимметрия и нелинейность напряжения оказывают более негативное воздействие на защищаемый объект.

#### Литература

1. Электроэнергетика: учебное пособие / Ю.В. Шаропов, В.Я. Хорольский, М.А. Таранов [и др.]. Ставрополь: АГРУС, 2011. С. 289–293.
2. Соловьев Д.Б., Низовцев В.В. Защита электропривода с асинхронным двигателем [Электронный ресурс] // Электрика. 2011. С. 40–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17241723>
3. Авт. свидет. 1069056. Устройство для защиты электроустановки от неправильного чередования фаз и асимметрии фазных напряжений / Петько В.Г., опубл. 23.01.84. Бюл. № 3.
4. Реле обрыва фаз типа E511 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.retro-rzia.ru/down/o-120.html>.
5. Пат. 2220488 С2. Российская Федерация. Устройство для защиты трёхфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения / Петько В.Г., Садчиков А.В.; Заявит. и патентооблад. ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 27.06.2003.4 с.

6. Петько В.Г., Садчиков А.В. Устройство для защиты трёхфазных электродвигателей от асимметрии напряжения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2002. № 6. С. 23–24.

7. Петько В.Г., Рахимжанова И.А., Старожуков А.М. Ключ для коммутации входных цепей контакторов и магнитных пускателей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (58). С. 68–70.

8. Петько В.Г., Рахимжанова И.А., Старожуков А.М. Ключ на базе симистора для коммутации нагрузок переменного тока // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (71). С. 165–167.

9. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1, Линейные электрические цепи. Изд. 4-е. М.: Энергия, 1970. С. 391–394.

10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах

электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301>

11. Сукманов В.И. Электрические машины и аппараты. М.: Колос, 2001. С. 104.

12. Петько В.Г., Рахимжанова И.А. Устройство для защиты электроприводов сельскохозяйственного назначения от асимметрии напряжения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (64). С. 86–88.

13. Татур Т. А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие): учебное пособие. М.: Высшая школа, 1980. С. 51

14. Мансуров Н.Н., Попов В.С. Теоретическая электротехника. Изд. 9-е, испр. М. – Л.: Энергия, 1965.

15. Петько В.Г. Повышение эффективности функционирования электронасосных агрегатов в системах водоснабжения сельского хозяйства: дис. ... д-ра техн. наук. Оренбург, 1995. С. 174.

**Виктор Гаврилович Петько**, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, VGPetko@mail.ru

**Ильмира Агзамовна Рахимжанова**, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, ahmetova\_i@mail.ru

**Максим Борисович Фомин**, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, mbfom@mail.ru

**Валерий Валерьевич Кононец**, аспирант. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, kaf36@orensau.ru

**Владислав Викторович Самосюк**, аспирант. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, kaf36@orensau.ru

**Victor G. Petko**, Doctor of Technical Sciences, Professor. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, VGPetko@mail.ru

**Ilmira A. Rakhimzhanova**, Doctor of Agriculture, Professor. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, ahmetova\_i@mail.ru

**Maxim B. Fomin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, mbfom@mail.ru

**Valery V. Kanonets**, postgraduate. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, kaf36@orensau.ru

**Vladislav V. Samosyuk**, postgraduate. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, kaf36@orensau.ru