

Устройство защиты электроприводов сельскохозяйственного назначения от асимметрии напряжения

В.Г. Петько, д.т.н., профессор, И.А. Рахимжанова, к.с.-х.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

В условиях сельскохозяйственного производства питание электроприёмников, и в частности асинхронных электродвигателей привода технологических машин и агрегатов, осуществляется от электрических сетей, обладающих повышенной протяжённостью. В связи с их низкой по этой

причине надёжностью, а также с неравномерной нагрузкой по фазам наблюдается значительная асимметрия напряжения на зажимах электродвигателей и её крайний случай – обрыв фазы. В результате выход из строя электродвигателей из-за асимметрии напряжения составляет около 30% от общего числа отказавших электродвигателей [1].

Известно, что несимметричную систему напряжений трёхфазной электрической сети можно

разложить на симметричные составляющие прямой \underline{U}_1 , обратной \underline{U}_2 и нулевой \underline{U}_0 последовательностей фаз [2]:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0, \end{aligned}$$

где $a = e^{j120}$ и $a^2 = e^{j240}$ – фазовращающие операторы, при умножении вектора на которые вектор не изменяется по величине, но поворачивается против часовой стрелки на 120 и 240 градусов соответственно.

При этом составляющие находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C) / 3; \\ \underline{U}_2 &= (\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C) / 3; \\ \underline{U}_0 &= (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) / 3. \end{aligned}$$

Степень несимметрии напряжений оценивается коэффициентами асимметрии $K_A = \underline{U}_2 / \underline{U}_1$ и неуравновешенности $K_H = \underline{U}_0 / \underline{U}_1$. Асимметрия напряжений отрицательно сказывается на работе трёхфазных токоприёмников и в особенности электродвигателей и поэтому лимитируется ГОСТом 32144-2013 на уровне двух – предельно четырёх процентов.

Материал и методы исследования. Для защиты электродвигателей от работы при асимметрии напряжений разработано много устройств различного принципа действия, однако наиболее совершенным из них является устройство защиты (УЗ), изображённое на рисунке 1 [3], реагирующее непосредственно на величину коэффициента асимметрии, однозначно определяющего влияние несимметрии напряжений на режим работы электродвигателя.

Оно содержит первый (A1) и второй (A2) узлы, каждый из которых содержит первый, второй и третий преобразователи напряжения в пропорциональный им ток, включённые соответственно к первому, второму и третьему входам преобразователей и через диоды к нулевому проводу электрической сети. Комплексы проводимостей элементов того и другого узлов согласно их принципиальным схемам выражаются следующим образом: $\underline{Y}_1 = g_1; \underline{Y}_2 = jb_2; \underline{Y}_3 = g_3; \underline{Y}_4 = jb_4; \underline{Y}_5 = g_5; \underline{Y}_6 = jb_6; \underline{Y}_7 = g_7; \underline{Y}_8 = jb_8; \underline{Y}_9 = g_9$. Здесь g и b – активная и реактивная проводимости элементов, равные соответственно $1/R$ и ωC , где R – сопротивления резисторов, C – ёмкости конденсаторов, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота переменного тока. Комплексы выходных токов первого, второго и третьего преобразователей в каждом узле равны соответственно:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{\Sigma 1} \underline{U}_{\text{ВХ1}}; I_2 = Y_{\Sigma 2} \underline{U}_{\text{ВХ2}}; \\ I_3 &= Y_{\Sigma 3} \underline{U}_{\text{ВХ3}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\underline{U}_{\text{ВХ1}}$, $\underline{U}_{\text{ВХ2}}$ и $\underline{U}_{\text{ВХ3}}$ – комплексы напряжений на входах преобразователей; $\underline{Y}_{\Sigma 1}$, $\underline{Y}_{\Sigma 2}$ и $\underline{Y}_{\Sigma 3}$ – комплексы эквивалентных проводимостей соответственно первого, второго и третьего преобразователей.

Если проводимости резисторов и конденсаторов преобразователей в каждом узле подобраны так, что комплексы эквивалентных проводимостей $\underline{Y}_{\Sigma 1}$, $\underline{Y}_{\Sigma 2}$ и $\underline{Y}_{\Sigma 3}$ первого и второго узлов находятся в соотношении:

$$\underline{Y}_{\Sigma 1} = \underline{Y}_1 = \underline{Y}; \underline{Y}_{\Sigma 2} = a \underline{Y}; \underline{Y}_{\Sigma 3} = a^2 \underline{Y}, \quad (2)$$

то суммарный ток преобразователей первого узла

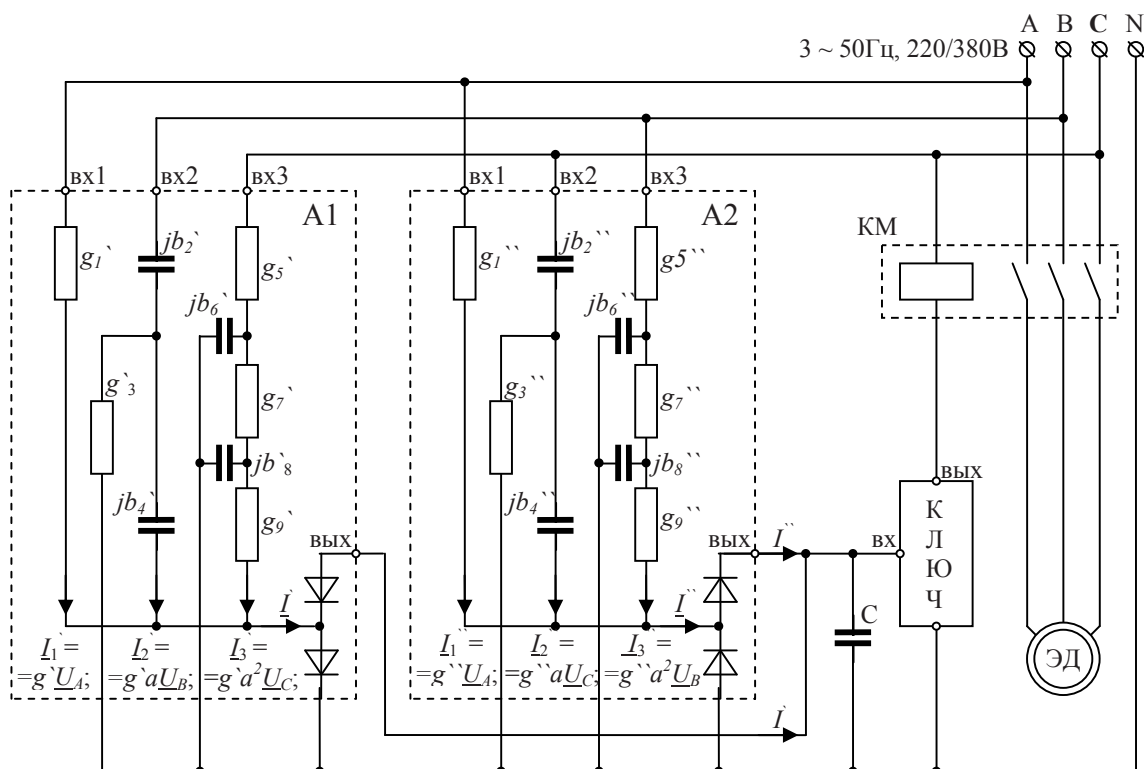


Рис. 1 – Принципиальная схема устройства защиты от асимметрии напряжения

$$\Gamma = 3Y(U_A + aU_B + a^2U_C)/3 = 3YU_1,$$

и суммарный ток преобразователей второго узла

$$\Gamma'' = 3Y''(U_A + a^2U_B + aU_C)/3 = 3Y''U_2$$

пропорциональны соответственно напряжению прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей фаз.

Следовательно, первый узел А1 будет являться фильтром напряжения прямой последовательности фаз (ФНПП), а второй А2 фильтром напряжения обратной последовательности фаз (ФНОП).

Для того чтобы найти сопротивления и ёмкости преобразователей, при которых условия (2) выполняются, запишем их в развёрнутом виде:

$$Y_{\Sigma 1} = Y_1 = g_1 = g, \quad (3)$$

$$Y_{\Sigma 2} = -\frac{b_2g_3b_4}{g_3^2 + (b_2 + b_4)^2} + j\frac{b_2b_4(b_2 + b_4)}{g_3^2 + (b_2 + b_4)^2} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)g, \quad (4)$$

$$Y_{\Sigma 3} = g_9g_7g_6\frac{A}{A^2 + B^2} - jg_9g_7g_6\frac{B}{A^2 + B^2} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)g, \quad (5)$$

где $A = g_9g_7 + g_9g_5 + g_7g_5 - b_8b_6$;

$$B = g_9b_6 + g_7b_8 + g_7b_6 + g_5b_8.$$

Комплексные числа считаются равными, если равны между собой их действительные и мнимые части. С учётом этого условия выполнения соотношений (2) между величинами проводимостей для второго преобразователя напряжения в ток, осуществляющего при этом поворот вектора тока на 120° против часовой стрелки относительно вектора напряжения, выражаются двумя уравнениями:

$$\frac{b_2b_4g_3}{g_3^2 + (b_2 + b_4)^2} = \frac{1}{2}g;$$

$$\frac{b_2b_4(b_2 + b_4)}{g_3^2 + (b_2 + b_4)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2}g.$$

А для третьего преобразователя, осуществляющего поворот вектора тока на 240° против часовой стрелки относительно вектора напряжения, — уравнениями:

$$\frac{g_5g_7g_9(g_7g_9 + g_5g_9 + g_5g_7 - b_4b_6)}{(g_7g_9 + g_5g_9 + g_5g_7 - b_4b_6)^2 + (g_9b_6 + g_7b_4 + g_7b_6 + g_5b_4)^2} = -\frac{1}{2}g;$$

$$\frac{g_5g_7g_9(g_9b_6 + g_7b_4 + g_7b_6 + g_5b_4)}{(g_4g_5 + g_3g_5 + g_3g_4 - b_3b_4)^2 + (g_9b_6 + g_7b_4 + g_7b_6 + g_5b_4)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2}g.$$

Уравнения, как в том, так и в другом случае, имеют бесконечное множество решений, так как количество неизвестных превышает количество уравнений. Однако если принять с целью упрощения комплектации активные и реактивные проводимости в преобразователях равными друг другу, то, решив верхнюю пару уравнений, получим:

$$g_3 = G_2 = \frac{8}{3}g; \quad b_2 = b_4 = B_2 = \frac{4}{\sqrt{3}}g, \quad (6)$$

а решив нижнюю пару уравнений, получим:

$$g_5 = g_7 = g_9 = G_3 = \frac{81 + 30(2 + \sqrt{13})^2 + (2 + \sqrt{13})^4}{24(2 + \sqrt{13})}g;$$

$$b_6 = b_8 = B_3 = \frac{2 + \sqrt{13}}{\sqrt{3}}G_3. \quad (7)$$

Ключ устройства работает так, что если на его входах напряжение отрицательное, катушка магнитного пускателя КМ получает питание, электродвигатель — включён [4]. Когда напряжение на любом из входов ключа становится равным нулю и несколько больше нуля, электродвигатель отключается. Это, в частности, происходит в момент, когда коэффициент асимметрии сетевого напряжения K_A достигает допустимой для защищаемого устройства величины $K_{Адоп}$, и приравняемому к нему коэффициенту асимметрии $K_{Асп}$, при котором происходит срабатывание устройства защиты. При этом ток Γ'' с выхода фильтра обратной последовательности фаз становится равным току Γ с выхода фильтра прямой последовательности фаз:

$$K_{Асп} = K_{Адоп} \rightarrow \Gamma = \Gamma'' \rightarrow 3YU_1 = 3Y''U_2 \rightarrow U_2/U_1 = Y'/Y'' \rightarrow K_{Асп} = Y'/Y'' = g'/g'', \quad (8)$$

где $Y' = g'$ и $Y'' = g''$ — модули проводимостей первых преобразователей соответственно фильтров прямой и обратной последовательностей фаз.

Таким образом, если проводимости фильтров выбраны в соответствии с равенствами (6) и (7), коэффициент асимметрии, при котором происходит срабатывание устройства $K_{Асп}$ (уставка срабатывания), задаётся изначально соотношением проводимостей $g' = Y'$ и $g'' = Y''$ резисторов первых преобразователей напряжения в ток, включённых в данном случае в фазу А. Однако равенства (6) и (7) могут быть осуществимы только для определённой стандартной частоты переменного тока (50 или 60 Гц). А так как реактивные проводимости пропорциональны частоте тока, то при отклонении её от стандартной величины реактивные проводимости уже не будут соответствовать тем значениям, которые определены по выражениям (6) и (7). Это приведёт и к нарушению соотношения (2) между эквивалентными проводимостями преобразователей $Y_{\Sigma 1}$, $Y_{\Sigma 2}$ и $Y_{\Sigma 3}$. Как следствие, на выходе фильтров появятся сигналы помехи, которые в итоге приведут к срабатыванию устройства защиты при коэффициенте асимметрии, отличном от заданного значения. Поэтому представляет практический интерес оценить это влияние.

Результаты исследования. С этой целью конкретизируем параметры одного из вариантов УЗ. Для этого осуществим следующую последовательность действий:

а) зададимся активной проводимостью первого преобразователя фильтра напряжения прямой последовательности фаз $g' = G' = G_1$;

б) зададимся коэффициентом асимметрии напряжений, при котором устройство защиты должно отключать электродвигатель $K_{\text{Аср}}$;

в) определим активную проводимость первого преобразователя фильтра напряжения обратной последовательности фаз $g'' = G'' = G'/K_{\text{Аср}}$;

г) воспользовавшись выражениями (6) и (7), определим активные и реактивные проводимости вторых и третьих преобразователей обоих фильтров;

д) для стандартной частоты тока f , равной 50 Гц, определим ёмкости конденсаторов, входящих в схемы фильтров ($C = 2\pi f B$);

е) результаты расчётов занесём в таблицу 1.

Далее произведём расчёт действующих значений тока I_f'' на выходе фильтра напряжения обратной последовательности фаз для частот от 47 до 53 Гц при отсутствии в питающем напряжении составляющей обратной последовательности фаз и сравним их с действующим значением тока I_{50}'' на выходе фильтра, при котором происходит срабатывание устройства защиты на частоте 50 Гц. Для этого:

1) определим реактивные проводимости для частот от 47 до 53 Гц ($B_{2/f}'' = 2\pi f C_2''$ и $B_{3/f}'' = 2\pi f C_3''$);

2) с учётом того что в соответствии с (6) и (7): $g'' = g_1'' = G_1''$; $g_3'' = G_2''$; $g_5'' = g_7'' = g_7'' = G_3''$; $b_2'' = b_4'' = B_2''$; $b_6'' = b_8'' = B_3''$, пользуясь выражениями (3), (4) и (5), для каждой из фиксированных частот определим комплексы эквивалентных проводимостей: $Y_{\text{Э1/f}}''$, $Y_{\text{Э2/f}}''$ и $Y_{\text{Э3/f}}''$;

3) по выражениям (1) для 3-фазной системы напряжений на входах фильтра при $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 0$, $U_0 = 22 \text{ В}$ и $\theta_0 = 0^\circ$, где θ° угол между векторами напряжений прямой и нулевой последовательностей фаз, определим комплексы выходных токов преобразователей $I_{1/f}''$; $I_{2/f}''$; и $I_{3/f}''$, а также комплексы выходных токов $I_{1/50}''$; $I_{2/50}''$; и $I_{3/50}''$ при частоте тока 50 Гц и напряжении $U_2 = 22 \text{ В}$, при котором срабатывает устройство защиты;

4) просуммировав найденные токи, получим комплексы выходных токов фильтра I_f'' и I_{50}'' и действующие их значения I_f'' и I_{50}'' (ток I_{50}'' для установленных выше входных и внутренних параметров фильтра получим равным $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ А}$);

5) определим уровень сигнала помехи на выходе фильтра в процентах от сигнала, при котором устройство срабатывает при установленном коэффициенте асимметрии и частоте 50 Гц $\delta I_f'' = 100 I_f'' / I_{50}'' \cdot \%$.

Результаты расчётов занесены в таблицу 2.

Повторим расчёты по пунктам 3–5 для углов сдвига фаз между составляющими прямой и нулевой последовательностей фаз θ_0 , равных 90, 180 и 270 градусов. По результатам расчётов построим графики зависимостей $\delta I_f'' \%$ от частоты (рис. 2).

Аналогичные расчёты сделаем для фиксированного угла сдвига фаз θ_0 , но для различных значений составляющей нулевой последовательности U_0 . Вид зависимостей $\delta I_f'' \%$ от частоты в этом случае представлен на рисунке 3.

Анализ зависимостей показывает, что ток помехи не превышает 5% при отклонении частоты тока 0,5 Гц в ту и другую стороны. Это вполне приемлемо, так как в соответствии с ГОСТом 13109-97 нормальное отклонение частоты при питании приёмников электрической энергии от энергосистемы составляет $\pm 0,2 \text{ Гц}$, т.е. в более узком диапазоне [5]. Но, если токоприёмник питается от автономной электростанции, отклонение частоты может быть значительно больше, ток помехи, а следовательно, и погрешность уставки срабатывания устройства защиты превысят допустимые пределы.

Однако данная ситуация будет иметь место только в том случае, если в качестве опорного тока используется стабилизированный источник тока. В рассматриваемом устройстве защиты опорный ток формируется фильтром напряжения прямой последовательности фаз, на выходе которого в результате отклонения частоты также образуется ток помехи. В результате происходит взаимная компенсация погрешностей выходных токов фильтров и их соотношение, определяющее уставку срабатывания устройства защиты по коэффициенту асимметрии питающего напряжения, будет иметь меньшие отклонения от установленной величины. С целью проверки данного утверждения по изложенной выше методике найдём величину коэффициента асимметрии сетевого напряжения, при которой устройство защиты будет срабатывать. Это будет происходить на каждой из частот выбранного диапазона при равенстве токов на выходах фильтров. Для каждой из частот определим погрешность срабатывания по выражению:

$$\delta K_{\text{Аср}} = (K_{\text{Аср}} - K_{\text{Аср}0}) \cdot 100 / K_{\text{Аср}0}, \%$$

Расчёты произведём для случая, когда симметричная составляющая нулевой последовательности равна нулю ($K_{\text{Н}} = 0$) и равна 22 В ($K_{\text{Н}} = 0,1$). На рисунке 4 даны графики полученных зависимостей погрешности уставки срабатывания от частоты питающего напряжения.

Выводы. Рассмотренная защита асинхронных электродвигателей на базе R-C фильтров прямой и обратной последовательностей фаз реагирует на предельную величину коэффициента асимметрии сетевого напряжения, являющегося прямым показателем перехода электродвигателя в аварийный режим. В связи с этим по сравнению с существующими защитами аналогичного назначения, реаги-

1. Параметры фильтров напряжений прямой и обратной последовательностей фаз

Фильтр	G_1 , См	R_1 , Ом	G_2 , См	R_2 , Ом	$B_{2/50}$, См	C_2 , мкФ	G_3 , См	R_3 , Ом	$B_{3/50}$, См	C_3 , мкФ
ФНПП	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	$2,67 \cdot 10^{-6}$	$3,75 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$7,35 \cdot 10^{-9}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$6,69 \cdot 10^4$	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-7}$
ФНОП	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^5$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^4$	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-8}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$6,69 \cdot 10^3$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$

2. Результаты расчёта уровня помехи, вызванной отклонением частоты тока от номинального её значения

f , Гц	B_{f_2}'' , См	B_{f_3}'' , См	I_f'' , А	$\delta I_f''$, %
47	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	30,67
48	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	20,2
49	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$4,74 \cdot 10^{-4}$	$6,61 \cdot 10^{-5}$	10,0
50	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	0	0
51	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$6,48 \cdot 10^{-5}$	9,82
52	$2,40 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	19,47
53	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$5,13 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	29,0

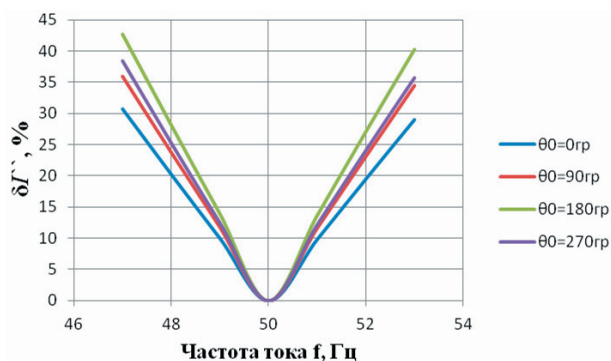


Рис. 2 – Зависимости сигнала помехи в процентах от расчётного тока срабатывания от частоты при $U_1 = 220$ В; $U_2 = 0$; $U_0 = 22$ В

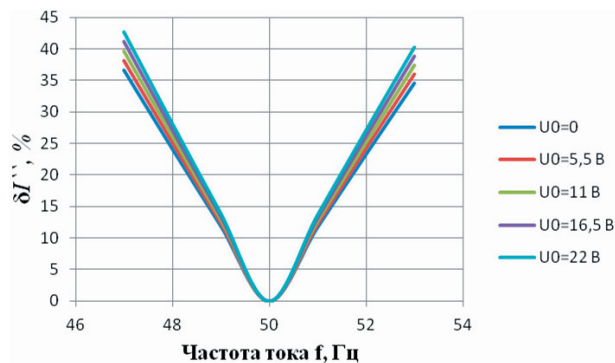


Рис. 3 – Зависимости сигнала помехи в процентах от расчётного тока срабатывания от частоты при $U_1 = 220$ В, $U_2 = 0$, $\theta_0 = 180^\circ$

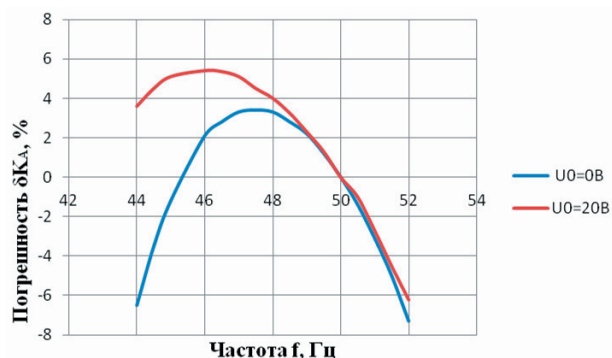


Рис. 4 – Погрешности срабатывания устройства защиты при $U_1 = 220$ В, $\theta_0 = 0^\circ$ и $U_2 = 22$ В

рующими на косвенные показатели асимметрии, она обладает большей эффективностью. В работе предложена методика оценки влияния на величину уставки данной защиты отклонения частоты питающего напряжения от стандартной величины. Произведённые по этой методике расчёты показали, что погрешность уставки защиты при отклонении частоты в пределах 44–52 герца не превышает 6%. В реальных же условиях, когда электроснабжение осуществляется от энергосистемы, отклонение частоты от стандартной больше чем $\pm 0,4$ Гц исключается. В этом, наиболее распространённом случае отклонение коэффициента асимметрии, при котором происходит срабатывание устройства защиты, от установленного значения (рис. 4) не превышает $\pm 1\%$.

Литература

1. Петько В.Г. Повышение эффективности функционирования электронасосных агрегатов в системах водоснабжения сельского хозяйства: дисс. ... докт. техн. наук. Оренбург, 1995. С. 174.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Ч. 1. М.: Энергия, 1970. С. 391–394.
3. Пат. 2220488 С2 Российская Федерация, Устройство для защиты трёхфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения / Петько В.Г., Садчиков А.В.; Заяв. ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 27.06.2003. 4 с.
4. 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.
5. Шарапов Ю.В. Электроэнергетика: учебное пособие / Ю.В. Шарапов, В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, В.Н. Шемякин. Ставрополь: АГРУС, 2011. С. 335.