

Влияние отклонения частоты на порог срабатывания фильтровой защиты от асимметрии напряжения

В.Г. Петько, д.т.н., профессор, И.А. Рахимжанова, д.с.-х.н., профессор, М.Б. Фомин, к.т.н., В.В. Кононец, магистрант, В.В. Самосюк, магистрант, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Наиболее частой причиной выхода из строя трёхфазных асинхронных электродвигателей является асимметрия питающего напряжения и её крайний случай «обрыв фазы». В наибольшей степени это относится к сельскохозяйственному производству, где линии электроснабжения имеют большую протяжённость и, как следствие, более низкую надёжность по сравнению с надёжностью сетей промышленных предприятий [1]. Причиной асимметрии напряжения является также и то, что в сельских электрических сетях из-за совместного подключения к ним производственных и бытовых потребителей наблюдается крайне неравномерная нагрузка по фазам [2].

В результате именно в сельском хозяйстве выход из строя асинхронных электродвигателей из-за асимметрии напряжения составляет около 30% от общего числа отказавших электродвигателей [3].

Материал и методы исследования. Для защиты от асимметричного и неполнофазного режима питания электродвигателей в настоящее время используются защитные устройства различных принципов действия [4–6]. Среди них выделяются фильтровые устройства защиты на базе RC-фильтров симметричных составляющих сетевого напряжения. Одним из них является фильтровое устройство защиты, реагирующее на непосредственный показатель асимметрии – симметричную составляющую напряжения обратной последовательности фаз, однозначно определяющую степень асимметрии напряжения по фазам [7]. Устройство адекватно реагирует на аварийный режим электродвигателя, так как именно напряжение обратной последовательности фаз вызывает перегрев электродвигателя и в итоге выход его из строя.

Принципиальная схема такого устройства защиты изображена на рисунке 1.

Устройство содержит узел А' и узел А''. В каждый из узлов входят по три преобразователя напряжения в пропорциональный ему ток. Преобразователи подключены к первому, второму и третьему входам узлов и через диоды к нулевому проводу электрической сети.

В соответствии с приведённой принципиальной схемой устройства защиты комплексы выходных токов первого, второго и третьего преобразователей в каждом из узлов равны:

$$I_1 = Y_{\text{э1}} U_{\text{вх1}}; \quad I_2 = Y_{\text{э2}} U_{\text{вх2}}; \quad I_3 = Y_{\text{э3}} U_{\text{вх3}},$$

где $Y_{\text{э1}}$, $Y_{\text{э2}}$ и $Y_{\text{э3}}$ – комплексы эквивалентных

проводимостей первого, второго и третьего преобразователей, См;

$U_{\text{вх1}}$, $U_{\text{вх2}}$ и $U_{\text{вх3}}$ – комплексы фазных напряжений сети на входах преобразователей, В.

В случае несимметрии этих напряжений каждая из них может быть представлена суммой симметричных составляющих прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой U_0 последовательностей фаз [8]:

$$U_A = U_1 + U_2 + U_0;$$

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

$$U_C = a U_1 + a^2 U_2 + U_0,$$

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

Степень асимметрии напряжений оценивается коэффициентами асимметрии $k = U_2/U_1$, а степень неуравновешенности – коэффициентом неуравновешенности $n = U_0/U_1$. Асимметрия напряжений отрицательно сказывается на работе трёхфазных электродвигателей, поэтому её величина ограничивается согласно ГОСТ 32144–2013 на уровне 2-х...4-х процентов [9].

Проводимости резисторов и конденсаторов преобразователей в каждом узле подобраны так, что комплексы эквивалентных проводимостей $Y_{\text{э1}}$, $Y_{\text{э2}}$ и $Y_{\text{э3}}$ находятся в соотношении:

$$Y_{\text{э1}} = Y_1 = Y; \quad Y_{\text{э2}} = aY; \quad Y_{\text{э3}} = a^2Y \quad (1)$$

Тогда суммарные токи преобразователей первого и второго узлов равны:

$$I = 3Y(U_A + aU_B + a^2U_C)/3;$$

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

А так как симметричные составляющие находятся по выражениям [10]:

$$U_1 = (U_A + aU_B + a^2U_C)/3;$$

$$U_2 = (U_A + a^2U_B + aU_C)/3;$$

$$U_0 = (U_A + U_B + U_C)/3,$$

то $I = 3Y U_1$ и $I' = 3Y U_2$ – пропорциональны соответственно напряжениям прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей фаз.

Следовательно, первый узел А' – это фильтр напряжения прямой последовательности фаз (ФНПП), а второй А'' – фильтр напряжения обратной последовательности фаз (ФНОП).

Ключ устройства [11, 12] отключает электродвигатель, когда напряжение на его входе становится несколько больше нуля. Это происходит в данном случае в момент, когда коэффициент асимметрии сетевого напряжения k достигает допустимой для

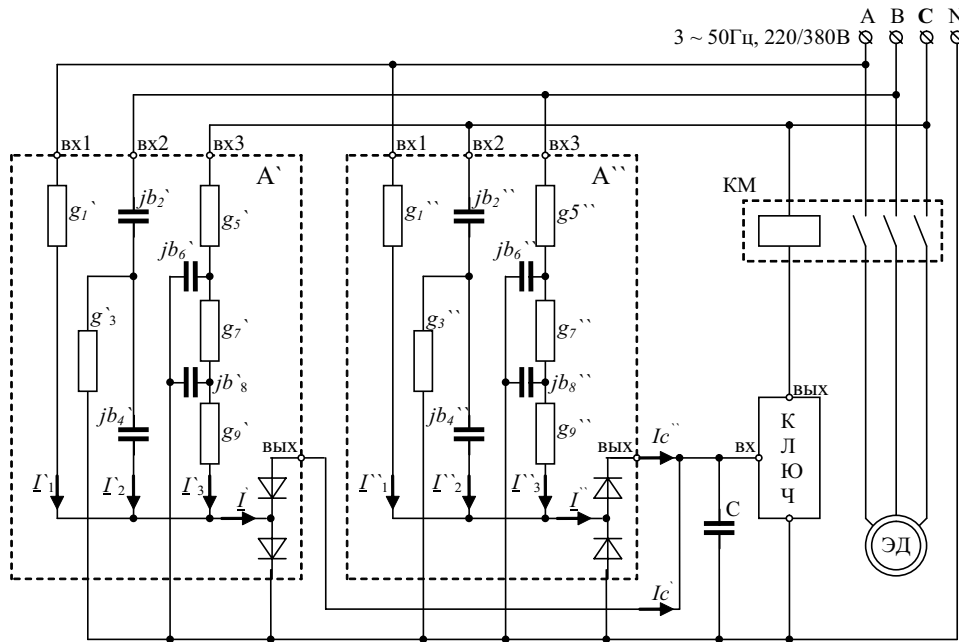


Рис. 1 – Принципиальная схема устройства защиты от асимметрии напряжения

защищаемого устройства величины k_d . При этом ток I' с выхода фильтра обратной последовательности фаз становится равным току I с выхода фильтра прямой последовательности фаз:

$$k_y = k_d \rightarrow I = I' \rightarrow 3Y'U_1 = 3Y''U_2 \rightarrow U_2/U_1 = Y'/Y'' \rightarrow k_y = Y'/Y'' = g'/g''$$

где k_y – уставка срабатывания устройства защиты; $Y' = g'$ и $Y'' = g''$ – модули проводимостей первых преобразователей соответственно фильтров прямой и обратной последовательностей фаз.

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

В ранее опубликованной работе [13] в предположении, что активные и реактивные проводимости в каждом преобразователе с целью облегчения комплектации одинаковы, найдены их значения, при которых выполняются условия (1):

$$g_3 = G_2 = \frac{8}{3}g; \quad b_2 = b_4 = B_2 = \frac{4}{\sqrt{3}}g, \quad (2)$$

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

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

Для стандартной частоты тока f , равной 50 Гц, определены также ёмкости конденсаторов, входящих в схемы фильтров ($C = 2\pi fB$). Результаты этих расчётов приведены в таблице «Параметры

фильтров напряжений прямой и обратной последовательностей фаз».

Так как реактивные проводимости пропорциональны частоте тока, то при отклонении её от стандартной (50 Гц), реактивные проводимости уже не будут соответствовать тем значениям, которые определены по выражениям (2) и (3). Это приведёт и к нарушению соотношения (1) между эквивалентными проводимостями преобразователей $Y_{\alpha 1}$, $Y_{\alpha 2}$ и $Y_{\alpha 3}$.

Как следствие, на выходе фильтров появятся сигналы помехи, которые в итоге приведут к срабатыванию устройства защиты при коэффициенте асимметрии, отличном от заданного значения. В этой же работе приведена методика оценки величины вносимой при этом погрешности и произведен её расчёт для различных значений частоты, отличных от стандартной [13]. Но в этой работе в недостаточной мере отражён вопрос влияния на величину отклонения порога срабатывания устройства защиты от установленного симметричной составляющей нулевой последовательности и углов сдвига фаз между векторами напряжений всех трёх симметричных составляющих сетевого напряжения.

Оценить это влияние и найти комбинации указанных параметров, при которых наблюдается максимум вносимой ими погрешности, является целью настоящей работы.

Результаты исследования. Выразим реактивные проводимости вторых преобразователей фильтров прямой и обратной последовательностей фаз в функции частоты сетевого напряжения:

$$B_2'(f) = 2\pi f C_2' \quad \text{и} \quad B_2''(f) = 2\pi f C_2''$$

и соответствующие им комплексы эквивалентных проводимостей этих преобразователей:

Параметры фильтров напряжений прямой и обратной последовательностей фаз

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

$$\underline{Y}_2^{\cdot}(f) = \frac{B_2^{\cdot}(f)^2(-G_2^{\cdot} + j2B_2^{\cdot}(f))}{G_2^{\cdot 2} + 4B_2^{\cdot}(f)^2},$$

$$\underline{Y}_2^{\cdot\cdot}(f) = \frac{B_2^{\cdot\cdot}(f)^2(-G_2^{\cdot\cdot} + j2B_2^{\cdot\cdot}(f))}{G_2^{\cdot\cdot 2} + 4B_2^{\cdot\cdot}(f)^2}.$$

Те же действия произведём для третьих преобразователей фильтров:

$$B_3^{\cdot}(f) = 2\pi f C_3^{\cdot} \text{ и } B_3^{\cdot\cdot}(f) = 2\pi f C_3^{\cdot\cdot};$$

$$\underline{Y}_3^{\cdot}(f) = \frac{G_3^{\cdot 3}(A^{\cdot}(f) - jD^{\cdot}(f))}{A^{\cdot}(f)^2 + D^{\cdot}(f)^2};$$

$$\underline{Y}_3^{\cdot\cdot}(f) = \frac{G_3^{\cdot\cdot 3}(A^{\cdot\cdot}(f) - jD^{\cdot\cdot}(f))}{A^{\cdot\cdot}(f)^2 + D^{\cdot\cdot}(f)^2},$$

где:

$$A^{\cdot}(f) = 3G_3^{\cdot 2} - B_3^{\cdot}(f)^2; \quad D^{\cdot}(f) = 4G_3^{\cdot} B_3^{\cdot}(f);$$

$$A^{\cdot\cdot}(f) = 3G_3^{\cdot\cdot 2} - B_3^{\cdot\cdot}(f)^2; \quad D^{\cdot\cdot}(f) = 4G_3^{\cdot\cdot} B_3^{\cdot\cdot}(f).$$

Примем, что модуль вектора действующего значения составляющей сетевого напряжения прямой последовательности фаз U_1 равен 220 В, а начальная фаза U_{1A} равна нулю. Тогда комплексы напряжений прямой последовательности в фазах А, В, и С будут записаны следующим образом:

$$U_{1A} = U_1 e^{j0} = 220 e^{j0}; \quad U_{1B} = a^2 U_{1A}; \quad U_{1C} = a U_{1A}.$$

При этом модуль и векторы напряжений в комплексной форме составляющей напряжения обратной последовательности фаз в фазах А, В, и С будут иметь следующий вид:

$$U_2(k) = k U_1; \quad U_{2A}(k, \alpha) = U_2(k) e^{j(\alpha \pi^{180})};$$

$$U_{2B}(k, \alpha) = a U_{2A}(k, \alpha); \quad U_{2C}(k, \alpha) = a^2 U_{2A}(k, \alpha),$$

где k и α – соответственно кратность симметричной составляющей напряжения обратной последовательности фаз по отношению к напряжению прямой последовательности фаз (коэффициент асимметрии напряжения) и угол сдвига фаз между векторами этих напряжений в фазе А, град.

Модуль и вектор симметричной составляющей напряжения нулевой последовательности фаз в комплексной форме одинаковый во всех фазах:

$$U_0(n) = n U_1; \quad U_0(n, \beta) = U_0(n) e^{j(\beta \pi^{180})},$$

здесь n и β – соответственно кратность симметричной составляющей напряжения нулевой последовательности фаз по отношению к напряжению прямой последовательности фаз (коэффициент неуравновешенности) и угол сдвига фаз между векторами этих напряжений в фазе А, град.

В итоге комплексы фазных напряжений в функции кратностей симметричных составляющих и углов сдвига фаз могут быть найдены по выражениям:

$$U_A(k, n, \alpha, \beta) = U_{1A} + U_{2A}(k, \alpha) + U_0(n, \beta);$$

$$U_B(k, n, \alpha, \beta) = U_{1B} + U_{2B}(k, \alpha) + U_0(n, \beta);$$

$$U_C(k, n, \alpha, \beta) = U_{1C} + U_{2C}(k, \alpha) + U_0(n, \beta).$$

А комплексы суммарных токов всех трёх преобразователей фильтров прямой А и обратной А'' последовательностей фаз – по выражениям:

$$\Gamma(k, n, \alpha, \beta, f) = U_A(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_1^{\cdot\cdot} + U_B(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_2^{\cdot}(f) + U_C(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_3^{\cdot}(f);$$

$$\Gamma^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f) = U_A^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_1^{\cdot} + U_B^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_2^{\cdot\cdot}(f) + U_C^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta) \cdot Y_3^{\cdot\cdot}(f).$$

Мгновенные значения этих токов:

$$i^{\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f, t) = 2^{0,5} \text{abs}(\Gamma(k, n, \alpha, \beta, f)) \cdot \sin(2\pi f t + \arg(\Gamma(k, n, \alpha, \beta, f)));$$

$$i^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f, t) = 2^{0,5} \text{abs}(\Gamma^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f)) \cdot \sin(2\pi f t + \arg(\Gamma^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f))).$$

Через диоды на обкладку конденсатора С поступает отрицательная полуволна тока $i^{\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f, t)$ с выхода фильтра напряжения прямой последовательности фаз и положительная полуволна тока $i^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f)$ с фильтра напряжения обратной последовательности фаз. Их средние значения:

$$I_c^{\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f) = - \frac{f}{2} \int_0^{1/f} i^{\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f, t) dt;$$

$$I_c^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f) = \frac{f}{2} \int_0^{1/f} i^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f, t) dt.$$

Срабатывание устройства защиты по мере увеличения напряжения обратной последовательности фаз происходит в момент перехода напряжения на конденсаторе по отношению к нулевой шине с отрицательного на положительное, т.е. в момент, когда сумма средних величин токов, поступающих на конденсатор, становится равной нулю

$$I_c^{\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f) + I_c^{\cdot\cdot}(k, n, \alpha, \beta, f) = 0.$$

Решение данного уравнения относительно k (например, с помощью функции *root* математической системы Mathcad [14]) позволяет определить фактический коэффициент асимметрии k_f , при котором устройство защиты срабатывает при заданных n , α , β и f .

На рисунке 2 построены графики зависимости найденного таким образом фактического коэффи-

циента срабатывания рассматриваемого устройства защиты от частоты тока в диапазоне частот от 48 до 52 герц.

Анализ полученных графиков показывает, что отклонение фактического коэффициента асимметрии, при котором устройство защиты срабатывает, от установленного (в данном случае $k_y=0,1$) тем больше, чем больше частота сетевого напряжения отличается от 50 Гц. При этом величина отклонения зависит не только от коэффициента неуравновешенности n , но и от углов сдвига фаз между напряжением прямой последовательности и напряжениями обратной и нулевой последовательностей фаз. В то же время при частоте 50 Гц отклонение равно нулю при любых значениях указанных величин.

Представляет практический интерес определить максимальную погрешность уставки срабатывания устройства защиты в заданном диапазоне изменения частоты сетевого напряжения, наблюдаемую при определённых значениях n , α и β . В процентах погрешность (её абсолютное значение) определяется по уравнению

$$\delta k\%(n, \alpha, \beta, f) = \text{abs}((k_y - kf(n, \alpha, \beta, f))/k_y) \cdot 100\%.$$

Рассчитанные по данному уравнению погрешности в функции n , α , и f в системе MathCAD позволяют построить следующие графики (рис. 3–5).

Анализ графиков, представленных на рисунке 3, показывает, что максимум погрешности наблюдается при α , равном 90 и 270 градусов, как во всём приемлемом диапазоне изменения n (рис. 3а), так и во всём диапазоне изменения угла β (рис. 3б). Поэтому для определения значения угла β , при котором наблюдается максимальная погрешность, построим графики зависимости относительной погрешности от угла β при α , равном 90° (рис. 4а), и α , изменяющемся в диапазоне 360° (рис. 4б).

И эти графики показывают, что максимум погрешности тем больше, чем больше n (рис. 3а) и наблюдается максимум, как следует и из предыдущих графиков, при α , равном 90 и 270 градусов (рис. 3б). В обоих случаях максимальная погрешность наблюдается при угле β , равном 180°.

С учётом этого графики зависимости погрешности срабатывания устройства защиты от частоты сетевого напряжения построим для наиболее неблагоприятных случаев, а именно для $\alpha=90^\circ$ и $\beta=180^\circ$.

Выводы. На основе анализа построенных на рисунке 5 зависимостей можно отметить следующее.

1. При отклонении частоты сетевого напряжения от 50 Гц максимальная погрешность срабатывания рассматриваемого устройства защиты увеличивается с увеличением кратности симметричной составляющей нулевой последовательности по отношению к составляющей прямой последовательности.

2. В случаях, когда величина этой составляющей становится сопоставимой с составляющей прямой последовательности фаз (например, при обрыве одной из фаз или перехлёстывании про-

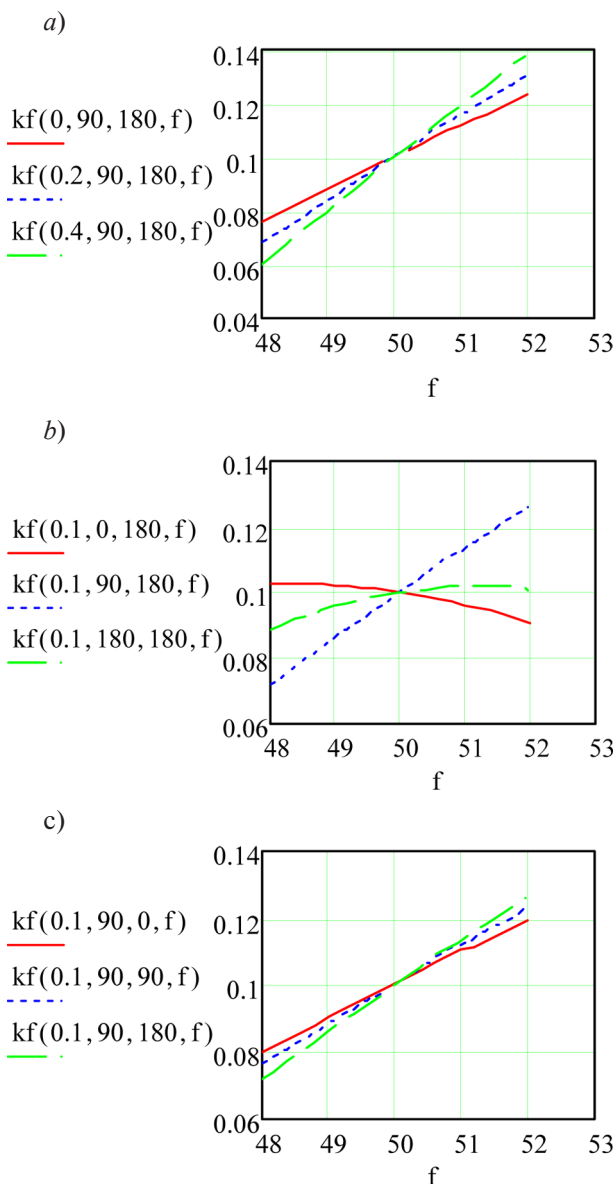


Рис. 2 – Графики зависимости фактического коэффициента асимметрии в функции n , α , β и f ($kf(n, \alpha, \beta, f)$) от частоты сетевого напряжения при: а) n , равном 0, 0.2 и 0.4; $\alpha=90^\circ$; $\beta=180^\circ$; б) $n=0.1$, α равном 0, 90 и 180 градусов, $\beta=180^\circ$; в) $n=0.1$, $\alpha=90^\circ$, β , равном 0, 90 и 180 градусов.

водов) в пределах изменения частоты ± 1 герца, что маловероятно даже при питании защищаемого электродвигателя от автономной электростанции, погрешность может достигать до 30%.

3. При указанных повреждениях в сети составляющая обратной последовательности фаз становится в несколько раз больше заданной уставки срабатывания устройства защиты, поэтому, несмотря на увеличение её порога срабатывания, и в этом случае произойдёт надёжное отключение электродвигателя.

4. В централизованной электрической сети в соответствии с ГОСТ 13109–97 нормальное отклонение частоты при питании приёмников электрической энергии от энергосистемы состав-

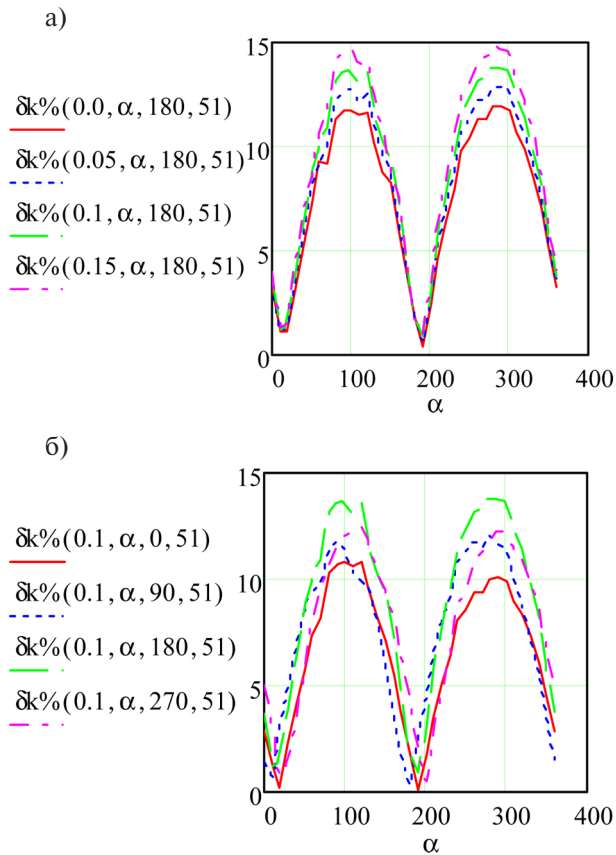


Рис. 3 – Графики зависимостей $\delta k\%(n, \alpha, \beta, f)$ от угла сдвига фаз α между векторами напряжений прямой и обратной последовательностей фаз:
 а) для $n=0; 0,05; 0,1$ и $0,15$ при $\beta=180^\circ$ и $f=51$ Гц;
 б) для угла β , равного $0; 90; 180$ и 270 градусов при $n=0,1$ и $f=51$ Гц

ляет $\pm 0,2$ Гц [15]. При этом, как следует из вышеприведённых графиков (рис. 5), максимальная погрешность порога срабатывания при любой величине составляющей нулевой последовательности не превысит 2%.

5. Максимально возможная погрешность порога срабатывания устройства защиты не превышает приемлемый 5%-ный предел даже при изменении частоты в диапазоне $\pm 0,5$ герца.

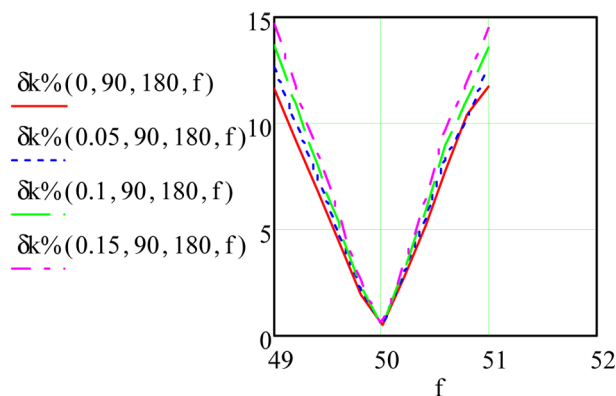


Рис. 5 – Графики зависимостей $\delta k\%(n, \alpha, \beta, f)$ от частоты сетевого напряжения для $n=0; 0,05; 0,1$ и $0,15$ при $\alpha=90^\circ$ и $\beta=180^\circ$.

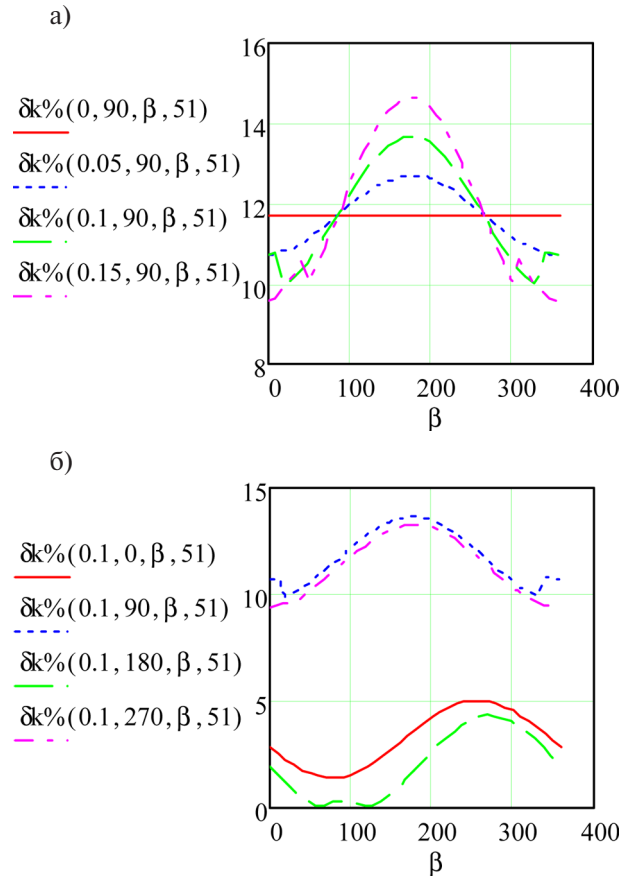


Рис. 4 – Графики зависимостей $\delta k\%(n, \alpha, \beta, f)$ от угла сдвига фаз β между векторами напряжений прямой и нулевой последовательностей фаз:
 а) для $n=0; 0,05; 0,1$ и $0,15$ при $\alpha=90^\circ$ и $f=51$ Гц;
 б) для угла α , равного $0; 90; 180$ и 270 градусов при $n=0,1$ и $f=51$ Гц

Таким образом, проведённые в данной работе теоретические исследования доказывают возможность использования рассматриваемого устройства на базе RC-фильтров для адекватной защиты электродвигателей от асимметрии напряжения не только при строго стабильной частоте напряжения в электрической сети, равной 50 Гц, но и при существующих в практической электроэнергетике отклонениях частоты от стандартной.

Литература

1. Александров Н. В. Особенности эксплуатации сельских электрических сетей // Символ науки. 2016. № 12 – 2. С. 27.
2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 227.
3. Петько В. Г. Повышение эффективности функционирования электронасосных агрегатов в системах водоснабжения сельского хозяйства: дис. ... докт. техн. наук. Оренбург, 1995. С. 174.
4. Электроэнергетика: учебное пособие / Ю. В. Шарпов, В. Я. Хорольский, М. А. Таранов [и др.]. Ставрополь: АГРУС, 2011. С. 289 – 293.
5. А.с. 1069056 Устройство для защиты электроустановки от неправильного чередования фаз и асимметрии фазных напряжений / Петько В. Г.; опубл. 23.01.84. Бюл. № 3.
6. Соловьев Д. Б., Низовцев В. В. Защита электропривода с асинхронным двигателем // Электрика. 2011. № 10. С. 40 – 41.
7. Пат. 2220488 С2 Российской Федерации. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения / Петько В. Г., Садчиков А. В.; Заяв. ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 27.06.2003. 4 с.