

## Комбинированная защита токоприёмников от несимметрии напряжения в электрической сети

*В.Г. Петько, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Неравномерная нагрузка по фазам, обрывы и перехлёсты проводов в электрической сети являются причинами повреждения приёмников электрической энергии, и в первую очередь электродвигателей, а также создают опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала. В этой связи остро стоит вопрос защиты электроустановок от несимметричных режимов работы электрической сети. Как известно, несимметрия напряжения оценивается соотношением симметричных составляющих напряжения обратной и нулевой последовательностей фаз и симметричной составляющей прямой последовательности фаз. Причём отношение действующего напряжения обратной последовательности фаз  $U_2$  к действующему значению напряжения прямой последовательности  $U_1$  принято называть коэффициентом асимметрии сетевого напряжения (обозначим его и будем использовать в дальнейшем символом  $k$ ). А отношение симметричной составляющей нулевой последовательности  $U_0$  к действующему значению напряжения прямой последовательности – коэффициентом неуравновешенности напряжения (обозначим его символом  $n$ ).

**Цель и методы исследования.** Для защиты электродвигателей от асимметрии фазных напряжений сети применяются защитные устройства на релейной основе (например, устройство типа Е511, ЕЛ-12 и др. [1]), а также устройства на базе RC-фильтров симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей фаз [2, 3], реагирующие на величину коэффициента асимметрии напряжения, т.е. величину напряжения обратной последовательности фаз. Защиты указанных видов адекватно реагируют на аномальный режим получившего наибольшее распространение ввиду своей простоты в сельском хозяйстве трёхфазного асинхронного электродвигателя, так как именно напряжение обратной последовательности однозначно определяет степень негативного влияния на режим работы этого электродвигателя.

Так как нулевая точка звезды обмоток асинхронного электродвигателя к нулевому проводу сети не присоединяется, симметричная составляющая нулевой последовательности не приводит к протеканию через его обмотки тока нулевой последовательности и на работе электродвигателя не отражается. Однако напряжение нулевой последовательности увеличивает разность потенциалов между обмотками и корпусом электродвигателя, что увеличивает вероятность пробоя изоляции. В этой связи для защиты от составляющей нулевой последовательности

фаз применяются устройства защиты, реагирующие и на эту составляющую. Простейшим вариантом такого устройства является устройство на основе соединённых в звезду резисторов или конденсаторов [4]. Выходным сигналом этого устройства является напряжение между нулевой точкой звезды и нулевым проводом электрической сети. В некоторых случаях оно защищает электродвигатель и от составляющей обратной последовательности фаз, так как при некоторых повреждениях сети появление опасной для электродвигателя составляющей напряжения обратной последовательности сопровождается значительной величиной составляющей нулевой последовательности, на которую и реагирует такое устройство защиты. Однако, например, при обрыве проводов в сети 10 кВ составляющая напряжения нулевой последовательности в сеть 0,4 кВ не проходит и это устройство не сработает, хотя электродвигатель неминуемо выходит из строя под действием прошедшей через трансформатор составляющей обратной последовательности. Поэтому для надёжной защиты электродвигателя требуется установка и защиты от асимметрии и защиты от неуравновешенности напряжения в питающей электрической сети.

Нами предложена комбинированная защита, реагирующая на превышение как составляющей обратной последовательности, так и составляющей нулевой последовательности фаз [5]. Она прошла многолетние испытания в производственных условиях и в настоящее время успешно используется в станциях управления и защиты электродвигателей погружных насосов, работающих в коммунальном хозяйстве, предприятиях нефтедобычи, садовых обществах Оренбургской и других областей РФ.

Принципиальная схема этого устройства защиты изображена на нижеследующем рисунке 1.

Устройство содержит узел А` тормозного и узел А`` пускового сигналов. В узел А` входят три резистора  $R'1$ ,  $R'2$  и  $R'3$  с величинами сопротивлений  $R'1=R'2=R'3=R'$ , выполняющих функцию преобразования напряжения в пропорциональный ему ток. Резисторы подключены к первому, второму и третьему входам узла и через диоды к нулевому проводу электрической сети.

В узел А`` входят три комбинированных фильтра, одинаковых по схеме и номиналам составляющих каждого из них двух резисторов и конденсатора:

$$C_1'' = C_2'' = C_3'' = C'';$$

$$R_{1,1}'' = R_{2,1}'' = R_{3,1}'' = R_1'';$$

$$R_{1,2}'' = R_{2,2}'' = R_{3,2}'' = R_2'';$$

с отношением сопротивлений:

$$X'' : R''_1 : R''_2 = \sqrt{3} : 1 : 2,$$

где  $X''=1/\omega''C''$  и  $R''$  – соответственно реактивное (ёмкостное) сопротивление конденсаторов и активное сопротивление резисторов, Ом.

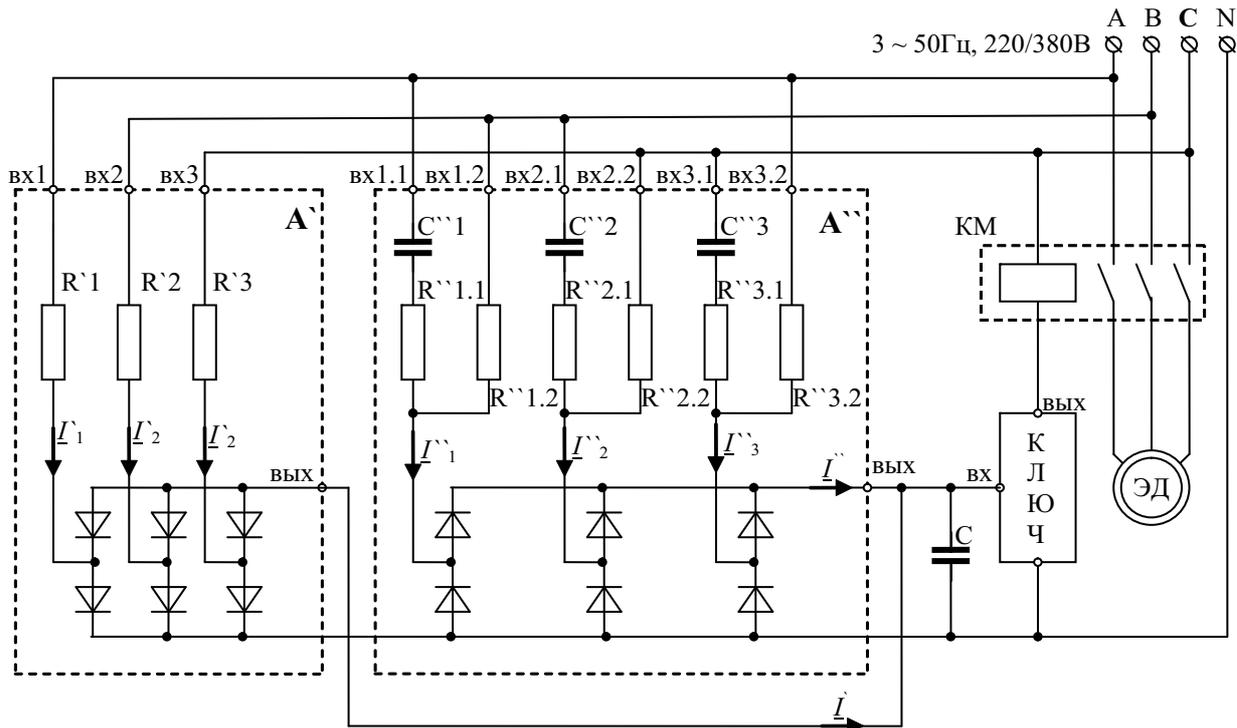


Рис. 1 – Принципиальная схема комбинированного устройства защиты от асимметрии напряжения

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота переменного тока, 1/с;  
 $f$  – циклическая частота переменного тока, Гц.

В ранее опубликованной работе [6] было показано, что вектор выходного тока каждого из входящих в узел А'' фильтров (ток замыкания через диоды на нулевую шину) является величиной, пропорциональной сумме векторов напряжения обратной и нулевой последовательностей фаз. Следовательно, модуль этого тока, а значит и порог срабатывания устройства защиты, выполненной на базе только одного такого фильтра, будет зависеть от фазового соотношения векторов симметричных составляющих сетевого напряжения. Кроме того, такое устройство защиты подключается только к двум фазам и совершенно не реагирует на напряжение в третьей фазе. В результате оно имеет различную чувствительность к повреждениям в различных фазах. Именно поэтому для устранения указанного недостатка узел А'' в рассматриваемом устройстве выполнен с использованием трёх фильтров, подключённых к напряжениям всех трёх фаз электрической сети.

**Целью** настоящего теоретического исследования является количественная оценка взаимного влияния симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей на пороги срабатывания предложенного устройства защиты, как от асимметрии, так и от неуравновешенности напряжения в фазах электрической сети.

При несимметрии этих напряжений каждая из них, как было указано выше, может быть пред-

ставлена суммой симметричных составляющих прямой  $\underline{U}_1$ , обратной  $\underline{U}_2$  и нулевой  $\underline{U}_0$  последовательностей фаз [7].

Примем начальную фазу симметричной составляющей прямой последовательности фаз равной нулю. Тогда:

$$\underline{U}_1A = \underline{U}_1 \cdot e^{j0} = \underline{U}_1; \quad \underline{U}_1B = a^2 \cdot \underline{U}_1; \quad \underline{U}_1C = a \cdot \underline{U}_1,$$

где  $e$  – основание натурального логарифма;

$a = e^{j2\pi/3}$  и  $a^2 = e^{j4\pi/3}$  – фазовращающие операторы, при умножении вектора на которые он поворачивается против часовой стрелки на 120 и 240 градусов соответственно, не изменяясь по величине.

Представим составляющие обратной и нулевой последовательностей фаз в функциях соответственно коэффициента асимметрии  $k$  и неуравновешенности  $n$ :  $\underline{U}_2(k) = k\underline{U}_1$ ;  $\underline{U}_0(n) = n\underline{U}_1$ . Получим:

$$\underline{U}_{2A}(k, \alpha) = \underline{U}_2(k) \cdot e^{j\alpha\pi/180} = \underline{U}_2(k, \alpha);$$

$$\underline{U}_{2B}(k, \alpha) = a \cdot \underline{U}_2(k, \alpha);$$

$$\underline{U}_{2C}(k, \alpha) = a^2 \cdot \underline{U}_2(k, \alpha);$$

$$\underline{U}_0(k, \alpha, \beta) = \underline{U}_0(n) \cdot e^{j(\alpha+\beta)\pi/180};$$

где  $\alpha$  – угол между вектором симметричной составляющей прямой последовательности фаз и вектором симметричной составляющей обратной последовательности фаз, град.;

$\beta$  – угол между вектором симметричной составляющей обратной последовательности фаз и вектором симметричной составляющей нулевой последовательности фаз, град.

Тогда:

$$\underline{U}_A(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_{IA} + \underline{U}_{2A}(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta) = \underline{U}_I + \underline{U}_2(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta);$$

$$\underline{U}_B(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_{IB} + \underline{U}_{2B}(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta) = a^2 \cdot \underline{U}_I + a \cdot \underline{U}_2(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta);$$

$$\underline{U}_C(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_{IC} + \underline{U}_{2C}(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta) = a \cdot \underline{U}_I + a^2 \cdot \underline{U}_2(k, \alpha) + \underline{U}_0(n, \alpha, \beta),$$

где  $\underline{U}_A(k, n, \alpha, \beta)$ ,  $\underline{U}_B(k, n, \alpha, \beta)$  и  $\underline{U}_C(k, n, \alpha, \beta)$  – комплексы фазных напряжений сети в фазах А, В и С на входах преобразователей, В.

В соответствии с приведённой принципиальной схемой устройства защиты комплексы выходных токов первого, второго и третьего резисторов в узле А` будут равны:

$$\underline{I}_A(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_A(k, n, \alpha, \beta) / R`;$$

$$\underline{I}_B(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_B(k, n, \alpha, \beta) / R`;$$

$$\underline{I}_C(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_C(k, n, \alpha, \beta) / R`.$$

Мгновенные значения этих токов равны:

$$i_A(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_A(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_A(k, n, \alpha, \beta)));$$

$$i_B(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_B(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_B(k, n, \alpha, \beta)));$$

$$i_C(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_C(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_C(k, n, \alpha, \beta))),$$

а средние значения отрицательной полуволны этих токов, поступающих на обкладку конденсатора С, равны:

$$I_{cB}(k, n, \alpha, \beta) = f \int_0^{T(\theta)} |i_B(k, n, \alpha, \beta, t)| dt;$$

$$I_{cC}(k, n, \alpha, \beta) = f \int_0^{T(\theta)} |i_C(k, n, \alpha, \beta, t)| dt,$$

где  $T = 1/f$  – период колебаний тока, с;

$t$  – текущая координата времени, с.

В результате получили суммарную величину отрицательного (тормозного) тока, стекающего с обкладки конденсатора С:

$$I_C(k, n, \alpha, \beta) = I_{cA}(k, n, \alpha, \beta) + I_{cB}(k, n, \alpha, \beta) + I_{cC}(k, n, \alpha, \beta). \quad (1)$$

С другой стороны, комплексы токов в плечах фильтров обратной и нулевой последовательностей фаз рассчитываются как:

$$\underline{I}_{1A}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_A(k, n, \alpha, \beta) / (R_1^{\prime\prime} - jX^{\prime\prime});$$

$$\underline{I}_{2B}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_B(k, n, \alpha, \beta) / R_2^{\prime\prime};$$

$$\underline{I}_{1B}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_B(k, n, \alpha, \beta) / (R_1^{\prime\prime} - jX^{\prime\prime});$$

$$\underline{I}_{2C}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_C(k, n, \alpha, \beta) / R_2^{\prime\prime};$$

$$\underline{I}_{1C}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_C(k, n, \alpha, \beta) / (R_1^{\prime\prime} - jX^{\prime\prime});$$

$$\underline{I}_{2A}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{U}_A(k, n, \alpha, \beta) / R_2^{\prime\prime},$$

а комплексы тока на выходах фильтров:

$$\underline{I}_{AB}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{I}_{1A}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) + \underline{I}_{2B}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta);$$

$$\underline{I}_{BC}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{I}_{1B}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) + \underline{I}_{2C}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta);$$

$$\underline{I}_{CA}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = \underline{I}_{1C}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) + \underline{I}_{2A}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta).$$

Выражения значений этих токов в функции времени примут вид:

$$i_{AB}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_{AB}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_{AB}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta)));$$

$$i_{BC}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_{BC}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_{BC}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta)));$$

$$i_{CA}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t) = \sqrt{2} \text{abs}(\underline{I}_{CA}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta)) \cdot \text{Sin}(\omega t + \arg(\underline{I}_{CA}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta))),$$

и средние значения их положительной полуволны тока, поступающего на обкладку конденсатора С:

$$I_{cAB}(k, n, \alpha, \beta) = f \int_0^{T(\theta)} |i_{AB}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t)| dt;$$

$$I_{cBC}(k, n, \alpha, \beta) = f \int_0^{T(\theta)} |i_{BC}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t)| dt;$$

$$I_{cCA}(k, n, \alpha, \beta) = f \int_0^{T(\theta)} |i_{CA}^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta, t)| dt.$$

В результате суммарная величина положительных токов, поступающих на зарядку конденсатора С (величина пускового тока), будет равна:

$$I_C^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) = I_{cAB}(k, n, \alpha, \beta) + I_{cBC}(k, n, \alpha, \beta) + I_{cCA}(k, n, \alpha, \beta). \quad (2)$$

Ключ устройства [8, 9] отключает электродвигатель, т. е. устройство защиты срабатывает, когда напряжение на конденсаторе по отношению к нулевой шине изменяется с отрицательного на положительное. Это происходит в момент, как только сумма средних величин токов, поступающих на конденсатор (уравнения (1) и (2)), становится равной нулю:

$$I_C^{\prime\prime}(k, n, \alpha, \beta) - I_C(k, n, \alpha, \beta) = 0.$$

**Результаты исследования.** В рамках поставленной выше цели научного исследования было произведено решение данного нелинейного уравнения относительно  $k$  с помощью функции root математической системы Mathcad [10]. В результате для устройства защиты с параметрами  $R^{\prime\prime} = 1,6 \cdot 10^6$  Ом и  $R_1^{\prime\prime} = 0,5 R_2^{\prime\prime} = \sqrt{3} X^{\prime\prime} = 1,8 \cdot 10^5$  Ом определён коэффициент асимметрии  $k_C(n, \alpha, \beta)$ , при котором данное конкретное устройство защиты срабатывает при заданных  $n$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ . Аналогично, решение уравнения относительно  $n$  позволило получить величину коэффициента неуравновешенности  $n_C(k, \alpha, \beta)$ , при котором это устройство защиты срабатывает при заданных  $k$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ .

Одним из результатов проведённых расчётов явилось то, что величины порогов срабатывания  $k_C$  при  $n$ , равном нулю ( $k_{C0}$ ), и  $n_C$  при  $k$ , равном нулю ( $n_{C0}$ ), одинаковы. Для принятых выше параметров узлов А` и А` они равны:

$$k_{C0} = k_C(0, 0, 0) = 0,131 \text{ и } n_{C0} = n_C(0, 0, 0) = 0,131.$$

Как следует из приведённых ниже графиков (рис. 2–7), пороги не зависят ни от  $\alpha$ , ни от  $\beta$ .

Кроме того, кривые зависимостей, представленные на рисунках 2–5 как  $n_C = f(k)$ , так и  $k_C = f(n)$  при фиксированных значениях угла  $\beta$  ( $90^\circ$  – рис. 2;  $180^\circ$  – рис. 3 и 4;  $270^\circ$  – рис. 5) полностью накладываются друг на друга. Расчёты показывают, что это же самое наблюдается не только при значениях угла  $\alpha$ , равных 0; 90; 180 и 270 град., но и при любых промежуточных его значениях, а также при любых промежуточных значениях угла  $\beta$ . Это говорит о том, что угол  $\alpha$  не влияет на пороги срабатывания данного устройства защиты как по коэффициенту асимметрии напряжения, так и по коэффициенту неуравновешенности.

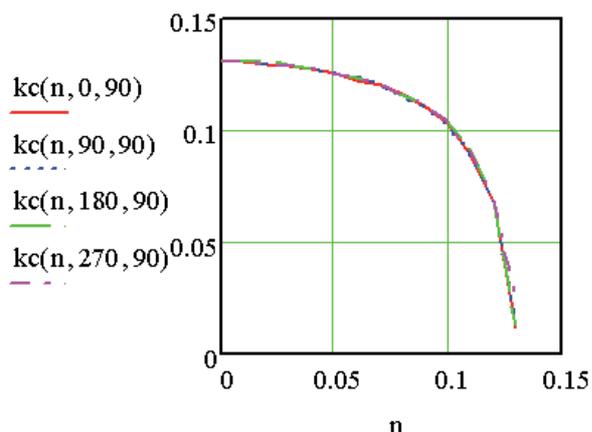


Рис. 2 – Графики зависимости  $k_c$  в функции  $n$  при  $\alpha$ , равном 0; 90; 180 и 270 град., и  $\beta$ , равном 90 град.

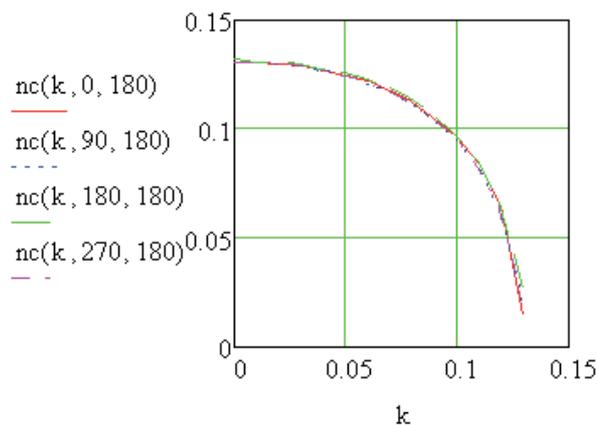


Рис. 4 – Графики зависимости  $n_c$  в функции  $k$  при  $\alpha$ , равном 0; 90; 180 и 270 град., и  $\beta$ , равном 180 град.

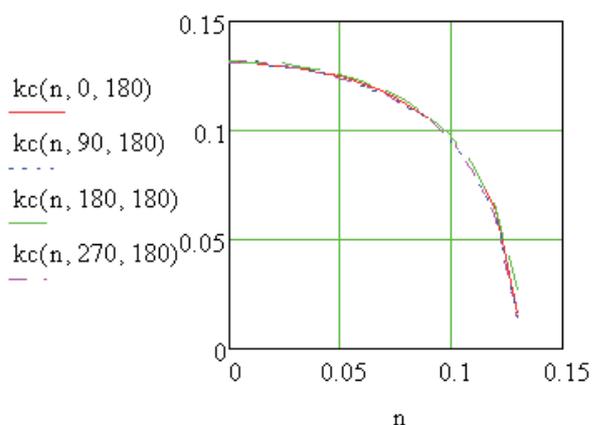


Рис. 3 – Графики зависимости  $k_c$  в функции  $n$  при  $\alpha$ , равном 0; 90; 180 и 270 град., и  $\beta$ , равном 180 град.

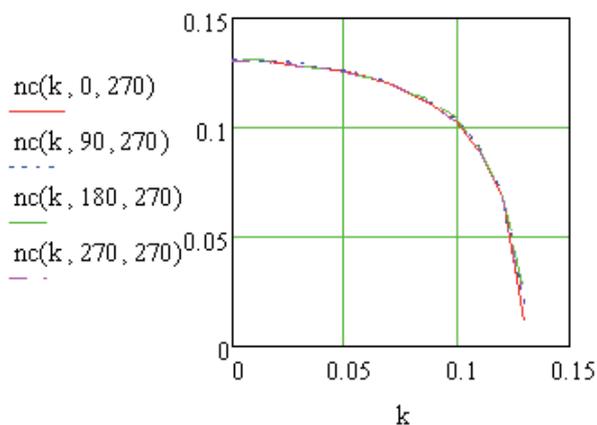


Рис. 5 – Графики зависимости  $n_c$  в функции  $k$  при  $\alpha$ , равном 0; 90; 180 и 270 град., и  $\beta$ , равном 270 град.

В то же время на характер взаимозависимостей порогов срабатывания угол между векторами составляющих обратной и нулевой последовательностей фаз ( $\beta$ ) оказывает заметное влияние, причём тем большее, чем больше как та, так и другая приближаются к пороговым значениям (рис. 6, 7).

Характерно, что степень этого влияния повторяется (рис. 8, 9) через каждые 120 град. изменения  $\beta$ . При этом наибольшее уменьшение порогов срабатывания как по асимметрии, так и по неуровненности наблюдается при  $\beta$ , равном 60; 180 и 300 град., а наименьшее – при углах  $\beta$ , равных 0; 120 и 240 град.

В целом же при любых значениях  $\alpha$  и  $\beta$  просматривается равноценное взаимовлияние неуровненности составляющей нулевой последовательности фаз на уменьшение порога срабатывания устройства защиты по составляющей обратной последовательности фаз ( $k_c$ ) и наоборот – составляющей напряжения обратной последовательности фаз на уменьшение порога срабатывания по составляющей нулевой последовательности ( $n_c$ ).

**Выводы.** На основе проведённого теоретического анализа можно сделать заключение, что рассматриваемое комбинированное устройство защиты имеет фиксированные заранее заданные пороги срабатывания по симметричным составляющим напряжения прямой и напряжения обратной последовательностей фаз в случае их отдельного влияния на асимметрию сетевого напряжения. В случае же их совместного наличия в системе симметричных составляющих напряжения сети пороги срабатывания уменьшаются (как следует из приведённых графиков, примерно на 30%) и по составляющей обратной последовательности, и по составляющей нулевой последовательности фаз. Следовательно, устройство защиты работает, несмотря на то, что та и другая симметричные составляющие в отдельности не достигнут предельных значений. Это, однако, можно считать вполне допустимым для устройства защиты, так как совместное воздействие асимметрии и неуровненности напряжения в сети чаще всего более опасно для защищаемого объекта, чем их раздельное воздействие.

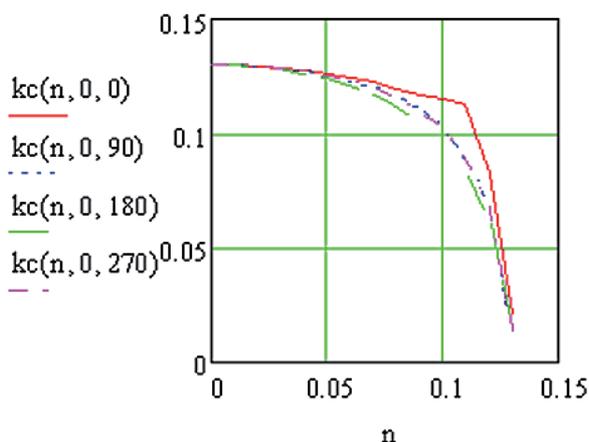


Рис. 6 – Графики зависимости  $k_c$  в функции  $n$  при  $\alpha$ , равном 0, и  $\beta$ , равном 0; 90; 180 и 270 град.

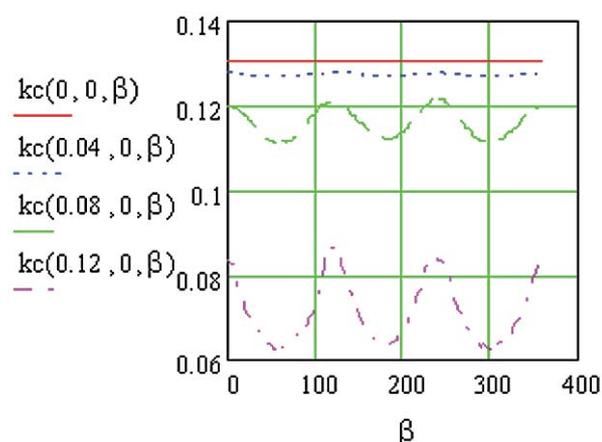


Рис. 8 – Графики зависимости  $k_c$  в функции  $\beta$  при  $\alpha$ , равном 0, и  $n$ , равном 0; 0,04; 0,08 и 0,12

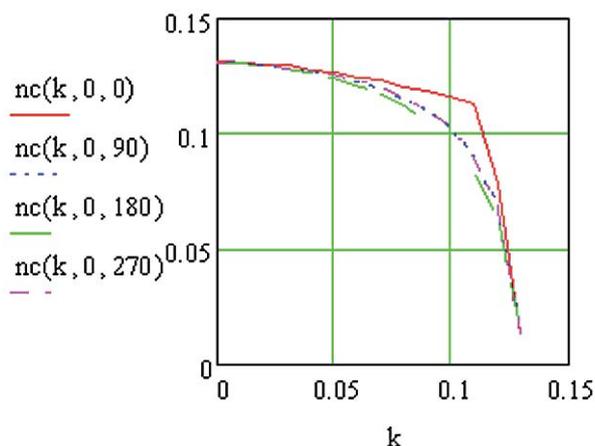


Рис. 7 – Графики зависимости  $n_c$  в функции  $k$  при  $\alpha$ , равном 0 и  $\beta$ , равном 0; 90; 180 и 270 град.

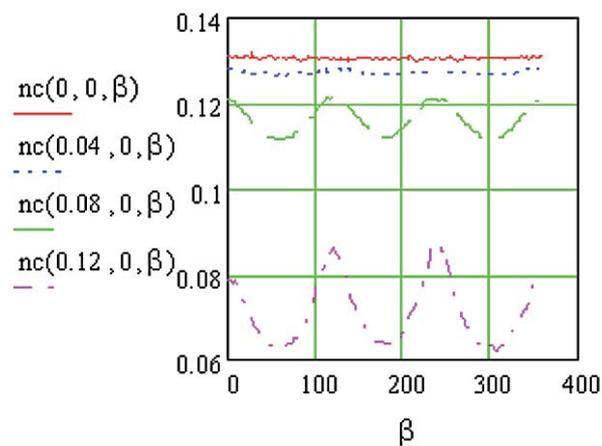


Рис. 9 – Графики зависимости  $n_c$  в функции  $\beta$  при  $\alpha$ , равном 0, и  $k$ , равном 0; 0,04; 0,08 и 0,12

### Литература

1. Справочник реле-РЗА. [Электронный ресурс]. URL: [http://gza.org.ua/rele/view/Rele-kontrolya-faz\\_14.html](http://gza.org.ua/rele/view/Rele-kontrolya-faz_14.html).
2. 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.
3. Пат. 2220488 С2 Российская Федерация. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от асимметрии питающего напряжения / Петько В.Г., Садчиков А.В. Заявл. ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 27.06.2003. 4 с.
4. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие): учебное пособие. М.: Высшая школа, 1980. 271 с. SU 1069056 А1. Устройство для защиты электроустановки от неправильного чередования фаз и асимметрии фазных напряжений / Петько В.Г. Опубл. 23.01.84. Бюл. № 3.
5. Петько В.Г. Повышение эффективности функционирования электронасосных агрегатов в системах водоснабжения сельского хозяйства: дис.... докт. техн. наук. Оренбург, 1995. С. 193–198.
6. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. Изд. 4-е. М.: «Энергия», 1970. С. 391–394.
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. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLU<sub>s</sub> 7.0 PRO. М.: Издательство «СК Пресс», 1998. С. 242–243.