

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТРЕХФАЗНЫМ СЕТЯМ

С.Г. Таранов, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **О.Л. Карасинский**, канд. техн. наук, **С.Ю. Пронзелева**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Обоснована необходимость повышения точности средств контроля параметров качества электроэнергии. Предложены пути усовершенствования метрологических характеристик средств фильтрации симметричных составляющих. Рассмотрена структурная схема экстремального фильтра симметричных составляющих. Библ. 4, рис. 5.

Ключевые слова: точность, симметричные составляющие, фильтрация, неопределенность, экстремальное регулирование, симметрирование.

Электрическая энергия (ЭЭ), как и все другие энергоносители, характеризуется не только объемами ее потребления, но и уровнем качества. Режимы электропотребления влияют на характеристики ЭЭ, которые в нормативных документах называются "показателями качества электроэнергии" (ПКЭ). Широкое распространение получили щитовые приборы для измерения ПКЭ. Рассмотрим более детально принципы построения этих приборов.

Удобным инструментом для измерения отдельных ПКЭ являются фильтры симметричных составляющих (ФСС). Известным недостатком их являются мультипликативные и аддитивные погрешности, вызванные частотной, температурной и временной нестабильностью элементов, входящих в их состав [2]. Однако острая необходимость в создании точной и портативной аппаратуры для контроля параметров качества электроэнергии привела к необходимости рассматривать ФСС как первичные измерительные преобразователи трехфазного напряжения. В результате исследований были разработаны ФСС повышенной точности, в которых получил дальнейшее развитие метод прецизионной фильтрации симметричных составляющих. Впервые разработаны устройства на основе ФСС с коррекцией аддитивной, мультипликативной, температурной и временной нестабильностей элементов фильтра, предложены новые схемы ФСС. Одним из результатов этих работ является схема фильтра с периодическим уравниванием [3]. При подключении к входным зажимам настроенного фильтра обратной последовательности (ФОП) трехфазной системы напряжений прямой последовательности его выходной сигнал равен нулю. Это свойство ФОП положено в основу создания цепи автоматической коррекции погрешности экстремального фильтра. Схема этого фильтра изображена на рис. 1 и включает в себя источник опорного напряжения (ИОН), коммутатор (К), регистрирующее устройство (РУ), схему контроля изменения знака (СКИЗ) приращения огибающей выходного напряжения, ключи (K_1), (K_2), исполнительные устройства (ИУ1), (ИУ2), блок управления (БУ), пороговый элемент (ПЭ) и ФСС, который состоит из управляемых резисторов R_1 и R_2 и конденсаторов C_1 и C_2 .

Устройство работает в двух режимах. Основным режимом является выделение симметричных составляющих. Этот режим ничем не отличается от работы обычного ФСС. Во втором режиме происходит самонастройка элементов фильтра по пробному сигналу, которым является трехфазная система напряжения прямой последовательности.

На рис. 2 изображена векторная диаграмма, поясняющая работу устройства в этом режиме. На ней отрезками AB , BC и CA обозначены линейные напряжения симметричной трехфазной системы напряжений, формируемые на выходе ИОН. Полуокружности AMB и AMC представляют собой годографы, описанные векторами U_{BD} , U_{BE} выходных напряжений фильтра. Векторы U_{R1} , U_{R2} являются радиусами этих полуокружностей. Касательные EM , DM проведены к полуокружностям AMB , AMC в точке их пересечения и образуют между собой

$$U_{ED} = \sqrt{U_{DM}^2 + U_{EM}^2 - 2U_{DM}U_{EM} \cos \psi} . \quad (1)$$

Определение модулей векторов U_{DM} , U_{EM} сводится к дифференцированию радиус-векторов U_{r1} , U_{r2} , равных

$$U_{r1} = \frac{1}{2}U_{AB} - U_{AB} \frac{jwR_1C_1}{1+jwR_1C_1} = \frac{1}{2}U_{AB} \frac{1-jwR_1C_1}{1+jwR_1C_1}; \quad (2)$$

$$U_{r2} = \frac{1}{2}U_{BC} - U_{BC} \frac{jwR_2C_2}{1+jwR_2C_2} = \frac{1}{2}U_{BC} \frac{1-jwR_2C_2}{1+jwR_2C_2}. \quad (3)$$

Обозначив $R_1 = \frac{\lambda}{\omega_H C_{1H}} = \lambda x_H$, $R_2 = \frac{1}{\lambda \omega_H C_{2H}} = \frac{x_H}{\lambda}$, $C_1 = C_2 = C$, $x_1 = \frac{1}{\omega C_1} = x_2 = \frac{1}{\omega C_2} = x$, где x, x_H – текущее и номинальные значения сопротивления конденсатора, из выражений (2), (3) после ряда преобразований получим

$$\dot{U}_{r1} = \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \frac{1-j\lambda \frac{x_H}{x}}{1+j\lambda \frac{x_H}{x}} = \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \sqrt{\frac{(\frac{x}{x_H})^4 - 2\lambda^2 (\frac{x}{x_H})^2 + \lambda^4 + 4\lambda^2 (\frac{x}{x_H})^2}{[(\frac{x}{x_H})^2 + \lambda^2]^2}} e^{j\varphi_1} = \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} e^{-j\varphi_7}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{r2} = \frac{1}{2} \dot{U}_{BC} \frac{1-j\frac{x_H}{\lambda x}}{1+j\frac{x_H}{\lambda x}} = \frac{1}{2} \dot{U}_{BC} \sqrt{\frac{(\lambda \frac{x}{x_H})^4 - 2(\lambda \frac{x}{x_H})^2 + 1 + 4(\lambda \frac{x}{x_H})^2}{[(\lambda \frac{x}{x_H})^2 + 1]^2}} e^{j\varphi_2} = \frac{1}{2} \dot{U}_{BC} e^{-j\varphi_8}, \quad (5)$$

где $\varphi_7 = \arctg \frac{2\lambda \frac{x}{x_H}}{(\frac{x}{x_H})^2 - \lambda^2}$, $\varphi_8 = \arctg \frac{2\lambda \frac{x}{x_H}}{(\lambda \frac{x}{x_H})^2 - 1}$.

Дифференцируя выражения (4), (5) и переходя к конечным приращениям, получаем

$$\frac{\partial \dot{U}_{r1}}{\partial x} = -j \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \ell^{-j\varphi_7} \frac{\partial \varphi_7}{\partial x}, \quad \Delta \dot{U}_{r1} = \dot{U}_{DM} = -j \frac{1}{2} \dot{U}_{AB} \ell^{-j\varphi_7} \frac{\partial \varphi_7}{\partial x} \Delta x, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \dot{U}_{r2}}{\partial x} = -j \frac{1}{2} \dot{U}_{BC} \ell^{-j\varphi_8} \frac{\partial \varphi_8}{\partial x}, \quad \Delta \dot{U}_{r2} = \dot{U}_{EM} = -j \frac{1}{2} \dot{U}_{BC} \ell^{-j\varphi_8} \frac{\partial \varphi_8}{\partial x} \Delta x, \quad (7)$$

где Δx – приращения сопротивлений конденсаторов, вызванные изменениями частоты сети или температуры окружающей среды.

Найдем производные углов сдвигов фаз:

$$\frac{\partial \varphi_7}{\partial x} = \frac{1}{1 + \left[\frac{2\lambda \frac{x}{x_H}}{(\frac{x}{x_H})^2 - \lambda^2} \right]^2} \times \frac{2\lambda \left[(\frac{x}{x_H})^2 - \lambda^2 \right] - 4\lambda \frac{x^2}{x_H^3}}{\left[(\frac{x}{x_H})^2 - \lambda^2 \right]^2} = -\frac{2\lambda}{x_H \left[(\frac{x}{x_H})^2 + \lambda^2 \right]}. \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varphi_8}{\partial x} = \frac{1}{1 + \left[\frac{2\lambda \frac{x}{x_H}}{\left(\lambda \frac{x}{x_H}\right)^2 - 1} \right]^2} \times \frac{2\lambda / x_H \left[\lambda \left(\frac{x}{x_H}\right)^2 - 1 \right] - 4\lambda^3 \frac{x^2}{x_H^3}}{\left[\lambda \left(\frac{x}{x_H}\right)^2 - 1 \right]^2} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{\left(\lambda \frac{x}{x_H}\right)^2 + 1}. \quad (9)$$

Представим сопротивление конденсатора в виде $x = x_H + \Delta x$. Тогда из (8), (9) будем иметь

$$\frac{\partial \varphi_7}{\partial x} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{\left(1 + \frac{\Delta x}{x_H}\right)^2 + \lambda^2} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} + \left(\frac{\Delta x}{x_H}\right)^2 + \lambda^2}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_8}{\partial x} = - \frac{2 \frac{\lambda}{x_H}}{\lambda^2 \left(1 + \frac{\Delta x}{x_H}\right)^2 + 1} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{\lambda^2 \left[1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} + \left(\frac{\Delta x}{x_H}\right)^2\right] + 1}. \quad (11)$$

Учитывая, что $\Delta x \ll x_H$, и пренебрегая на этом основании в знаменателях выражений (10), (11) слагаемым $\left(\frac{\Delta x}{x_H}\right)^2$, получаем

$$\frac{\partial \varphi_7}{\partial x} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2}; \quad (12) \quad \frac{\partial \varphi_8}{\partial x} = - \frac{\frac{2\lambda}{x_H}}{1 + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2}. \quad (13)$$

После подстановки значений $\frac{\partial \varphi_7}{\partial x}$, $\frac{\partial \varphi_8}{\partial x}$ из (12), (13) в выражения (6), (7), последние преобразуются к виду

$$\dot{U}_{DM} = j \dot{U}_{AB} \ell^{-j\varphi_7} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2}; \quad (14) \quad \dot{U}_{EM} = j \dot{U}_{BC} \ell^{-j\varphi_8} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{1 + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2}. \quad (15)$$

Тогда модули векторов \dot{U}_{DM} , \dot{U}_{EM} равны

$$U_{DM} = U_{AB} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2} = U_{AB} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{F + 2 \frac{\Delta x}{x_H}}; \quad (16)$$

$$U_{EM} = U_{BC} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{1 + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} + \lambda^2} = U_{BC} \frac{\frac{\lambda \Delta x}{x_H}}{F + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H}}, \quad (17)$$

где $F = 1 + \lambda^2$.

Подставляя значения U_{DM} , U_{EM} из (16), (17) в (1) и учитывая, что при строгой симметрии трехфазной системы напряжений $U_{AB} = U_{BC} = U_+$, а $\psi = \frac{\pi}{3}$, получаем

$$U_{DE} = U_+ \lambda \frac{\Delta x}{x_H} \frac{\sqrt{F^2 + 4F\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} + 4 \left(\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} \right)^2 + F^2 + 4F \frac{\Delta x}{x_H} + 4 \left(\frac{\Delta x}{x_H} \right)^2 - F^2 - 2F \frac{\Delta x}{x_H} - 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} F - 4\lambda^2 \left(\frac{\Delta x}{x_H} \right)^2}}{F^2 + 2F \frac{\Delta x}{x_H} + 2F\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H} + 4\lambda^2 \left(\frac{\Delta x}{x_H} \right)^2}. \quad (18)$$

Пренебрегая в числителе и знаменателе выражения (18) слагаемыми второго порядка малости, содержащими множитель $\left(\frac{\Delta x}{x_H}\right)^2$, будем иметь

$$U_{DE} = U_+ \lambda \frac{\Delta x}{x_H} \frac{\sqrt{F^2 \left[1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} \frac{(1+\lambda^2)}{F} \right]}}{F^2 \left[1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} \frac{(1+\lambda^2)}{F} \right]} = U_+ \frac{\lambda \Delta x}{F x_H \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} \frac{(1+\lambda^2)}{F}}}. \quad (19)$$

После разложения дроби $\frac{1}{\sqrt{1 + 2 \frac{\Delta x}{x_H} \frac{(1+\lambda^2)}{F}}}$ в ряд выражение (19) преобразуется к виду

$$U_{DE} = U_+ \frac{\lambda \Delta x}{F x_H} \left[1 - \frac{\Delta x (1 + \lambda^2)}{x_H F} \right]. \quad (20)$$

Относительное значение погрешности γ фильтра, вызванное напряжением разбаланса U_{DE} , получается путем деления выражения (20) на информативный параметр U_+ :

$$\gamma = \frac{\lambda \Delta x}{F x_H} \left[1 - \frac{\Delta x (1 + \lambda^2)}{x_H F} \right]. \quad (21)$$

Как уже отмечалось, первый минимум напряжения разбаланса ФСС получим путем регулирования резистора R_1 до совмещения точки D на дуге AMB с точкой D' , где вектор $\dot{U}_{D'E'}$ становится перпендикулярным вектору $\dot{U}_{D'M}$. Модуль вектора $\dot{U}_{D'E'}$ можно определить, умножив значение модуля вектора $\dot{U}_{E'M}$ на $\sin \psi$. Умножая выражения U_{EM} из (17) на $\sin \psi$ и учитывая равенство $U_{BC} = U_+$, получаем

$$U_{D'E'} = U_+ \frac{\lambda \frac{\Delta x}{x_H}}{F + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H}} \sin \psi. \quad (22)$$

После второго такта регулирования напряжение разбаланса будет соответствовать модулю вектора $U_{D''E''}$ и т.д. Учитывая, что отрезки $E'D'$, $E''D'' \perp DM$, а $D'E'' \perp EM$, углы $LE'D'M$, $LE''D''M$ и $LE''D''M$ равны углу $\psi' = \frac{\pi}{2} - \psi$. Поэтому модуль выражения на выходе ФСС после n -го такта регулирования равен

$$U_{D''E''} = U_+ \frac{\lambda \frac{\Delta x}{x_H}}{F + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H}} \cos^{(n-1)} \psi \sin \psi. \quad (23)$$

Относительная погрешность фильтра определяется по формуле

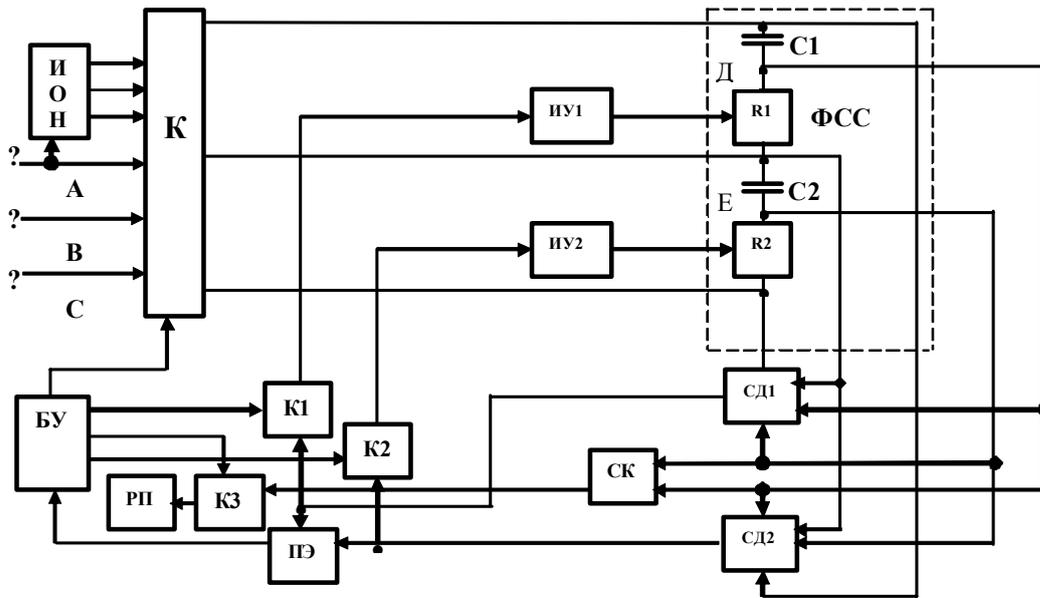


Рис. 3

$$\gamma'_n = \frac{\lambda \frac{\Delta x}{x_H}}{F + 2\lambda^2 \frac{\Delta x}{x_H}} \cos^{(n-1)} \psi' \sin \psi'. \quad (24)$$

Из условия (24) видно, что с увеличением количества шагов итераций n погрешность γ'_n стремится к нулю. Однако при выводе формулы (24) было сделано допущение, что трехфазная система напряжений, формируемая ИОН, является симметричной. Очевидно, что при несимметрии трехфазной системы напряжений ИОН настройка фильтра будет производиться с погрешностью, равной величине этой несимметрии. На рис. 2 эта погрешность показана в виде окружности с центром в точке M и радиусом U_- , равным величине напряжения обратной последовательности трехфазной системы напряжений ИОН.

Из выражения (24) следует, что для улучшения сходимости системы необходимо выбирать ФСС, у которого угол ψ между касательными к полуокружностям в точке их пересечения близок к $\pi/2$ или равен нулю. Для снижения числа итераций авторами предложена схема ЭФСС [4], которая изображена на рис. 3.

В отличие от описанной ранее эта схема вместо СКИЗ содержит два синхронных детектора СД1 и СД2, уровни выходных сигналов которых зависят от углов сдвигов фаз между векторами напряжений, поступающих на их сигнальные и управляющие входы. Если эти углы равны $\pi/2$, то выходные сигналы синхронных детекторов равны нулю. Кроме того, в

устройстве имеется согласующий каскад СК и дополнительный ключ K_3 .

На рис. 4 изображена векторная диаграмма для описания работы схемы этого фильтра в режиме самонастройки. Обозначения, принятые на векторной диаграмме, соответствуют обозначениям на рис. 2. В первом такте выходные сигналы с БУ подключают ИОН через коммутатор к входам ФСС, замыкают ключи K_1 , K_2 и размыкают ключ K_3 . При этом сигналы с выходов СД1 и СД2 через ключи K_1 и K_2 поступают на исполнительные элементы ИУ1 ИУ2, которые регулируют управляемые резисторы R_1 , R_2 до достижения равенства нулю угла сдвига между векторами U_{BD} , U_{BE} выходных напряжений

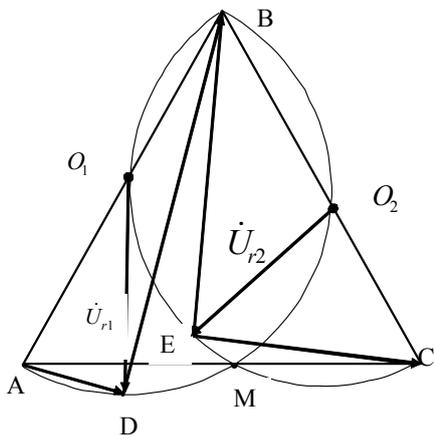


Рис. 4

четырёхполюсников ФСС. Этот момент, как следует из векторной диаграммы на рис. 4, совпадает с совмещением точек D и E , лежащих на полуокружностях ADB и BEC , с точкой M пересечения последних. Управление СД1 осуществляется напряжением U_{BE} , а СД2 – напряжением U_{BD} . При совмещении точек D , E и M фазовые сдвиги между векторами \dot{U}_{BE} , \dot{U}_{AM} и \dot{U}_{BD} , \dot{U}_{CM} становятся равными $\pi/2$. Поэтому выходные сигналы СД1 и СД2 равны нулю. Это приводит к срабатыванию ПЭ и формированию команды БУ на замыкание ключа K_3 , размыкание K_1 и K_2 и подключение ФСС к исследуемой сети. При этом выходной сигнал фильтра через согласующий каскад и ключ K_3 поступает на регистрирующий прибор. Благодаря инерционности РП и снижению времени регулирования параметров, этот ЭФСС позволяет осуществить непрерывный отсчет напряжений, пропорциональных симметричным составляющим сети.

Описанные схемы фильтров позволяют достичь высокой точности измерений симметричных составляющих трехфазного напряжения при условии медленного изменения величин, влияющих на параметры их элементов. Колебания частоты, имеющие место в реальной сети, не обрабатываются данными схемами в силу их инерционности. Поэтому экстремальные ФСС целесообразно применять для создания измерительных устройств повышенной точности, которые могут быть использованы для проверки серийной аппаратуры, анализирующей качество электроэнергии.

Разделив выражения (21) на (24), получим значение коэффициента K повышения точности выделения выходного напряжения экстремального фильтра после n -го такта регулирования:

$$K = \frac{\left[1 - \frac{\Delta x(1 + \lambda^2)}{x_n F}\right] \left(1 + \frac{2\lambda^2 \Delta x}{x_n F}\right)}{\cos^{(n-1)} \psi \sin \psi}. \quad (25)$$



Рис. 5

Точность самонастройки фильтра определяется степенью симметрирования трехфазного напряжения на входе ИОН, реальная погрешность симметрирования которого может быть снижена до

0,005 %. При $\frac{\Delta x}{x_n} = 0,3$ и $\psi = \pi/3$ указанная погреш-

ность симметрирования исходя из (25) достигается после пяти тактов регулирования.

Рассмотренные принципы построения ЭФСС легли в основу макета щитового прибора (рис. 5) контроля отдельных показателей качества электроэнергии: коэффициентов напряжения по обратной и нулевой последовательностям и уста-

новившегося отклонения напряжения прямой последовательности трехфазной сети.

Стоимость таких приборов составит при их серийном выпуске 30 % от цены завозимых аналогов из-за рубежа.

1. *Брайко В.В., Карасинский О.Л., Таранов С.Г., Тесик Ю.Ф.* Принципы построения фильтров симметричных составляющих экстремального регулирования // Тез. докл. Всесоюз. конф. по измерительным информационным системам ИИС-83. – Куйбышев. – 1983. – С. 49–50.
2. *Дубровский В.П.* Компенсация напряжения небаланса в фильтрах симметричных составляющих // Тр. Омского ин-та инженеров железнодорожного транспорта. – 1967. – Т. 83. – С. 31–38.
3. *А.с. 765759 СССР, МКИ G 01 R 29/16.* Измеритель напряжения прямой и обратной последовательности трехфазной сети / В.В. Брайко, О.Л. Карасинский, С.Г. Таранов, Ю.Ф. Тесик; Оpubл. 23.09.80, Бюл. № 35.
4. *А.с. 828126 СССР, МКИ G 01 R 29/16.* Измеритель напряжения прямой и обратной последовательностей трехфазной сети / В.В. Брайко, О.Л. Карасинский, С.Г. Таранов, Ю.Ф. Тесик; Оpubл. 07.05.81, Бюл. № 17.

УДК 621.317

С.Г. Таранов, чл.-кор. НАН Украины, **Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **О.Л. Карасинский**, канд. техн. наук, **С.Ю. Пронзельва**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розвиток методів екстремального регулювання стосовно трифазних мереж

Обґрунтовано необхідність підвищення точності засобів контролю параметрів якості електроенергії. Запропоновано шляхи удосконалення метрологічних характеристик засобів фільтрації симетричних складових. Розглянуто структурну схему екстремального фільтра симетричних складових. Бібл. 4, рис. 5.

Ключові слова: точність, симетричні складові, фільтрація, невизначеність, екстремальне регулювання, симетрування.

S.G. Taranov, Yu. F. Tesyk, O.L. Karasynskyi, S.Yu. Pronzeleva

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Development of methods of the extreme adjusting as it applies to three-phase networks

The necessity of increase of exactness of controls of parameters of quality of electric power is based. The ways of improvement of metrological characteristics of facilities of filtration of symmetric components is offered. The flow diagrams of extreme philters of symmetric components is considered. References 4, figures 5.

Key words: accuracy, symmetrical components, filtration, uncertainty, extreme adjusting, symmetrize.

Надійшла 26.05.2014

Received 26.05.2014