

to consider all situations at which characteristics of transition processes exceed admissible values. For example, all situations at which time of transition processes is more than 15 s have to be considered. Necessary situations get out of them.

**К е у w o r d s:** power system, transients, automatic excitation regulator, adjustment

#### REFERENCES

1. **STO 59012820.29.160.20.01–2012.** Standart organizatsii OAO «SO EES». Trebovaniya k sistemam vobuzhdeniya i avtomaticheskim regulyatoram vobuzhdeniya sil'nogo deistviya sinkhronnykh generatorov. Utverzh. 03.04.2013. (Standard institution JSC «System Operator of the Unified Energy System». «Requirement for excitation systems and automatic controllers excitation of strong action synchronous generators». Approved 04.04.2012).

2. **Metodicheskiye ukazaniya po ustoychivosti energosistem.** Prikaz Minenergo Rossii ot 30.06.2003 No. 277 (Guidelines for stability of power systems. Order of the Ministry of Energy of Russia No. 277).

3. **Litkens I.V. and Pugo V.I. Kolebatel'nye svoystva elektricheskikh sistem** (Vibrational properties of electrical systems). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 216 p.

4. **Artsishevskii Ya.L., Klimova T.G., Rassheplyayev A.I. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2011, No. 4, pp. 37–42.

\* \* \*

## Оценивание синусоидальной составляющей кратковременно наблюдаемого процесса короткого замыкания

ЛЯМЕЦ Ю.Я., ШИРОКИН М.Ю., МАРТЫНОВ М.В.

*Рассмотрена задача выделения ортогональных составляющих тока короткого замыкания, наблюдаемого в течение времени, не превышающего четверти периода частоты сети. Скомпонована структура фильтра ортогональных составляющих того же типа, что и фильтр Фурье, но произвольного порядка. Основной акцент сделан на интервальном анализе процесса короткого замыкания. Интервальный фильтр ортогональных составляющих проходит обучение на имитационной модели наблюдаемого объекта. Обучение совершается в дискретном пространстве, координатами которого служат отсчеты наблюдаемой величины. Примеры относятся к частоте дискретизации 1 кГц, число отсчетов не превышает пяти. На комплексной области отображаются установившиеся процессы короткого замыкания, в то время как наблюдается только начальная часть переходных процессов. Отображаются только те состояния имитационной модели, которые в переходном режиме занимают заданную ячейку дискретного пространства наблюдаемых отсчетов. Сравниваются области отображения одного и того же множества режимов короткого замыкания интервальным фильтром и полученным ранее фильтром ортогональных составляющих произвольного порядка. Расхождение областей позволяет судить о смещении оценки, даваемой неинтервальным фильтром. В процессе своего обучения интервальный фильтр способен учесть даже такую трудноуловимую величину, как расхождение между моментом замыкания и последующим моментом считывания значения наблюдаемой величины.*

**Ключевые слова:** короткое замыкание, ток, синусоидальная составляющая, фильтр ортогональных составляющих, интервальная неопределенность

Для релейной защиты актуальна задача оценивания установившегося тока короткого замыкания (КЗ) по малому окну наблюдения переходного процесса [1–3]. Физической причиной ограниченности времени наблюдения чаще всего становится насыщение трансформатора тока. Но может сказаться и быстрое устранение замыкания, самопроизвольное или совершенное быстродействующим выключателем.

Предыдущие публикации на данную тему оставили два пробела. Не был найден столь же простой фильтр, как и хорошо известный фильтр Фурье [1], но действующий на произвольном окне наблюдения. Фильтру Фурье требуется окно, кратное периоду частоты сети. Кроме того, к решению за-

дачи не был привлечен интервальный анализ – раздел математики, призванный давать решение в условиях неопределенности [4] и находящий все более широкое применение в исследовании электрических систем [5, 6]. Что же касается распознавания аварийных ситуаций, то, хотя отдельные вопросы были затронуты [7], цифровая обработка наблюдаемых величин осталась в стороне от них.

**Комплексный фильтр ортогональных составляющих.** Фильтр этого типа преобразует выборку из  $n$  отсчетов сигнала  $i(k)$ ,  $k = 0, n-1$  в амплитудный комплекс  $I_m$ ; здесь  $k$  – дискретное время, связанное с непрерывным временем

$$k = \text{ent}((t - Dt) / T), \quad (1)$$

где  $t = T / N$  – интервал дискретизации;  $T$  – период частоты сети;  $N$  – число отсчетов на периоде;  $Dr(0, t)$  – интервал времени между моментом КЗ и моментом снятия первого после него отсчета.

Если принять, что замыкание произошло в момент  $t = 0$ , то отсчет  $i(0)$  будет снят в момент  $Dr$ .

Фильтр Фурье реализует следующий алгоритм при  $n = qN / 2$ ,  $q = 1, 2, \dots$  [1]:

$$\underline{I}_m = \frac{1}{2j} \sum_{k=0}^{qN/2-1} \underline{I}_m e^{j2ak} i(k) r(k), \quad (2)$$

где  $r(k) = e^{-jak}$  – опорный сигнал;  $a = 2\pi / N$ .

Синусоидальный сигнал частоты сети

$$i(k) = I_m \sin(ak + y) = \frac{1}{2j} \underline{I}_m e^{jak} - \frac{1}{2j} \overline{\underline{I}_m} e^{-jak} \quad (3)$$

где  $\underline{I}_m = I_m \sin y$ ,  $\overline{\underline{I}_m}$  – сопряженный комплекс, преобразуется фильтром Фурье идеально, так как

$$i(k) r(k) = \frac{1}{2j} \underline{I}_m e^{-j2ak} - \frac{1}{2j} \overline{\underline{I}_m} e^{-j2ak} \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^{qN/2-1} e^{-j2ak} = 0. \quad (5)$$

Если  $n \neq qN / 2$ , то (5) не выполняется, и подобный путь устранения сопряженного слагаемого в (3) не годится. Найден похожий, но все же иной алгоритм:

$$\underline{I}_m(n) = \sum_{k=0}^{n-1} \underline{I}_m e^{j2ak} i(k) r(k) e^{j2bk}; \quad (6)$$

$$\underline{K}(n) = \frac{2j}{e^{j2bn}} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\sin(g(n)/2)}{\sin(g(n)n/2)} e^{-jg(n)(n-1)/2}, \quad (7)$$

где  $b(n) = 2\pi / n$ ;  $g(n) = 2a + b(n) = 2\pi \frac{2}{N} + \frac{1}{n}$

Его действие объясняется формулами, заменяющими (4) и (5):

$$i(k) r(k) = \frac{1}{2j} \underline{I}_m e^{j2ak} - \frac{1}{2j} \overline{\underline{I}_m} e^{-j2ak} \quad (8)$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} e^{-j2ak} = 0.$$

В соответствии с поставленной задачей далее полагается, что окно наблюдения КЗ не превышает четверти периода частоты сети. Отсюда следует, что при частоте дискретизации 1 кГц ( $t = 1$  мс,  $a = 0,1\pi$ ) наблюдатель располагает не более чем пятью отсчетами анализируемой величины ( $n \leq 5$ ). Далее приведены значения коэффициента  $\underline{K}(n)$  для малых выборок:

Число выборок	Значение коэффициента $\underline{K}(n)$ , Re/Im
2	-3,077683537/1,0
3	-0,983535511/-2,209056927
4	0,293114293/1,850650808
5	0,951056516/1,309016994

**Интервальный анализ наблюдаемого процесса.**

Пусть  $F$  – функционал, обозначающий преобразования, совершаемые имитационной моделью наблюдаемого объекта;  $F_{пер}$  – в переходном режиме;  $F_{уст}$  – в установившемся. Вектор  $\underline{x} \in G \rightarrow A$  обозначает варьируемые параметры имитационной модели,  $G$  и  $A$  – область и пространство его определения. Модель  $F_{пер}$  выдает отсчеты наблюдаемых величин, например, отсчеты тока КЗ  $i(k) = F_{пер}[\underline{x}, k]$ . Модель  $F_{уст}$  выдает комплекс  $\underline{I}_m = F_{уст}[\underline{x}, k]$ , изображающий функцию (2). Каждое значение вектора  $\underline{x} \in G$  ассоциируется, таким образом, с двумя конкретными режимами имитационной модели – переходным и установившимся.

Интервальной обработке подлежат  $n$  отсчетов сигнала  $i(k)$ , объединенных в  $n$ -мерный вектор-строку:

$$\underline{i}_n = [i(0), \dots, i(d), \dots, i(n-1)].$$

Введем  $n$ -мерное дискретное пространство  $D$  вектора  $\underline{i}_n$ . Каждая ось этого пространства  $i(d)$  разделяется на интервалы  $Di_d$ , что определяет на ней интервальную величину  $i(p_d) \in (p_d Di_d, (p_d + 1) Di_d)$ , где  $p_d$  – произвольное целое число. Пространство  $D$  разделяется, как следствие, на прямоугольные ячейки с кодами:

$$\underline{P}_n = [p_0, \dots, p_d, \dots, p_{(n-1)}].$$

Каждая ячейка представляет собой  $n$ -мерный интервальный вектор

$$\underline{i}_{P_n} = [i(p_0), \dots, i(p_d), \dots, i(p_{n-1})].$$

В дискретном пространстве  $D$  отображается выходная величина  $\underline{i}_n$  модели  $F_{пер}$ . Параллельно с этим на комплексной плоскости  $\underline{I}_m$  отображается выходное значение модели  $F_{уст}$  (рис. 1).

Рассматривается следующая задача. В пространстве  $D$  задана ячейка  $\underline{P}_n$ , представляющая интервальный вектор как входной сигнал распознающей структуры. Требуется определить выходной сигнал в виде интервального комплекса – области  $S(\underline{P}_n)$  на плоскости  $\underline{I}_m$ .

Как видно, в анализе задействованы пространство  $A$  и  $D$ , а также комплексная плоскость  $\underline{I}_m$ . Области этих трех пространств:  $\underline{P}_n \in D$ ,  $G(\underline{P}_n) \in A$ ,

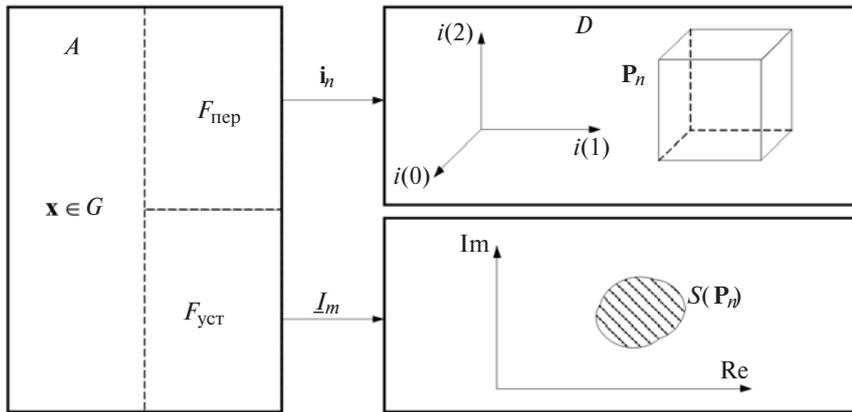


Рис. 1. Система интервальной обработки моделируемого тока короткого замыкания

$S(P_n) \hat{I}_m$  соответствуют друг другу. Поставленная задача решается двумя операциями.

П е р в а я: задана ячейка  $P_n$ , требуется найти область  $G$  параметров  $x$  имитационной модели, переходные процессы которой отображаются в  $P_n$ :

$$i_n(x \hat{I} G(P_n)) \hat{I} P_n. \tag{8}$$

В т о р а я: определена область  $G$ , требуется отобразить установившиеся режимы имитационной модели на комплексной плоскости:

$$\underline{I}_m(x \hat{I} G(P_n)) \textcircled{S}(P_n). \tag{9}$$

Обучаясь непосредственно от имитационной модели объекта, интервальный фильтр приобретает любопытные свойства. Так, только у него имеется возможность учесть вариации времени  $Dt$ . Кроме того, область  $S(P_n)$  его выходного сигнала определяется без методической погрешности, вследствие чего появляется своеобразная возможность оценить погрешность неинтервального фильтра, например фильтра (6). Для этого необходимо определить ту область  $S(P_n)$ , в которую он преобразует множество векторов  $i_n$ , отвечающих условию (8):

$$\underline{I}_m(i_n \hat{I} P_n) \textcircled{S}(P_n), \tag{10}$$

вследствие чего появляется возможность оценить смещение области  $S\phi$  относительно области  $S$ .

**Иллюстрация метода.** Рассмотрим в качестве примера КЗ в двухпроводной линии (рис. 2), полагая, что в момент  $t=0$  напряжение предшествующего режима в месте замыкания  $x_f$  проходит через максимум:  $u_{\text{фид}}(t) = U_m \cos \omega t$ , где  $\omega$  - частота сети. Фиксированные параметры модели – амплитуды источников  $E_m = 115\sqrt{2}/3$  кВ и пассивные параметры:  $R_s = R_r = 1$  Ом;  $L_s = L_r = 31,8$  мГн;  $R^0 = 0,118$  Ом/км;  $L^0 = 1,34$  мГн/км. Варьируемые параметры – координата места замыкания  $x_f \hat{I} (0, l)$ ,  $l = 80$  км; переходное сопротивление

$R_f \hat{I} (0,50)$  Ом; время  $Dt$  и угол передачи  $d = y_s - y_r \hat{I} (-30^\circ, 30^\circ)$ . В принятых обозначениях  $x \hat{I} [x_f, R_f, Dt, d]$ . Наблюдается ток в начале линии  $i(t)$ .

Имитационная модель функционирует в непрерывном времени  $t$  и рассматривается отдельно в установившемся и переходном режимах. В установившемся режиме модель определяет комплекс  $\underline{I}_{mt}$ , изображающий синусоидальную функцию времени  $t$ . Выходной комплекс  $\underline{I}_m = \underline{I}_{mt} \exp j(aDt/t)$  изображает ту же синусоидальную

величину, но в дискретном времени  $k$ . Смещение фазы сигнала на угол  $aDt/t$  следует из соотношения (1).

В переходном режиме имитационная модель определяет ток КЗ как функцию непрерывного времени, которая далее операцией (1) переводится в функцию дискретного времени.

Выберем конкретную ячейку  $P_n$  (рис. 3) с одинаковыми сторонами  $D_i d = 100$  А и нижней вершиной (при  $n=5$ ):

$$i_5 = [0; 0,6; 1,1; 1,3; 1,4] \text{ кА.}$$

Соответственно, код ячейки размерности  $n=5$ :

$$P_5 = [0, 6, 11, 13, 14].$$

На рис. 4 выходной интервальный сигнал  $\underline{I}_m$  показан для выходного интервального сигнала, представленного ячейкой  $P_n$ . Обращает на себя внимание резкое сжатие области отображения вы-

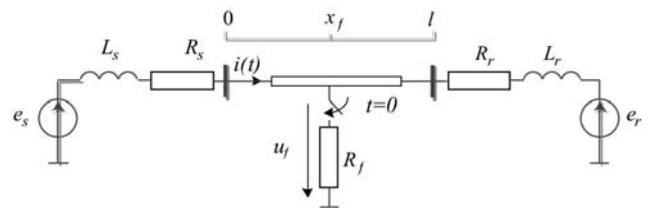


Рис. 2. Имитационная модель линии с двусторонним питанием в режиме короткого замыкания

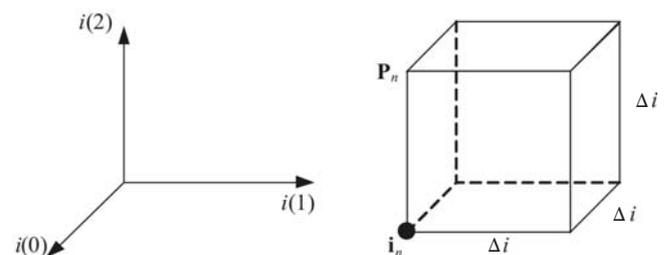


Рис. 3. Ячейка дискретного пространства при  $n=3$

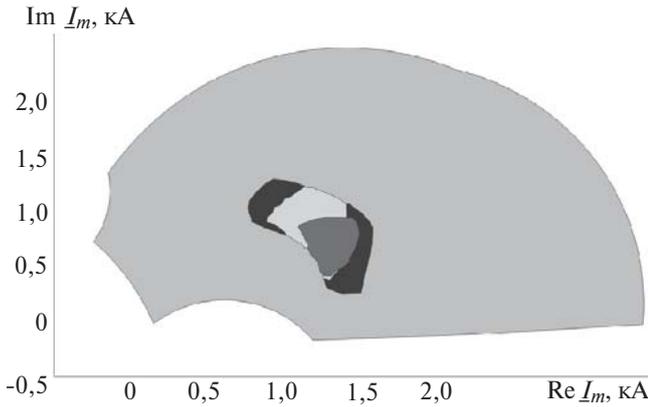


Рис. 4. Интервальный выходной сигнал  $I_m$  (серый фон – отображение всех режимов короткого замыкания в модели рис. 2, другие оттенки – отображение режимов, отбираемых одной ячейкой: черный фон –  $n = 3$ , светлый –  $n = 4$ , темный –  $n = 5$ )

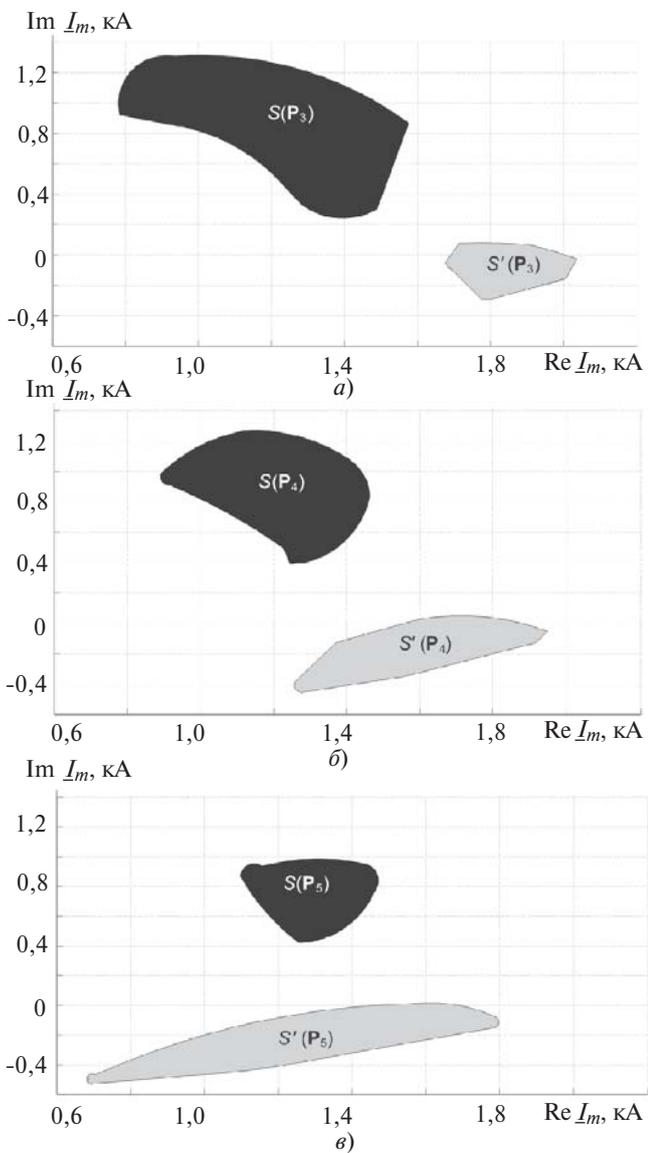


Рис. 5. Результаты преобразования одного и того же множества входных величин разными фильтрами ортогональных составляющих: а – при  $n = 3$ ; б – 4; в – 5

ходного сигнала при переходе от  $n = 4$  к  $n = 5$ . Можно высказать предположение о существовании критической размерности дискретного пространства  $n_{кр}$ , своей для каждого типа имитационной модели. При  $n \geq n_{кр}$  выходной интервальный сигнал локализуется в несравненно меньшей области, чем это происходило при  $n < n_{кр}$ . Интересно заметить, что сокращение размера ячейки не оказывает столь же явственного влияния на размеры области  $S$ , как увеличение порядка до значения  $n_{кр}$ .

На рис. 5 показан результат применения процедуры (10) к фильтру (6). Область  $S(P_n)$  отображена совместно с областью  $S'(P_n)$  выходной величины интервального фильтра. При всех рассматриваемых значениях  $n$  области  $S$  и  $S'$  не пересекаются, их сближение по мере увеличения времени наблюдения процесса КЗ ощущается слабо.

**Выводы.** 1. Интервальный фильтр ортогональных составляющих характеризуется некоторыми чертами, не свойственными фильтрам иного рода. Сюда относится применение дискретного пространства отсчетов обрабатываемой величины и обучение фильтра в этом пространстве от имитационной модели наблюдаемого объекта. В результате приобретаются новые свойства – получение несмещенной интервальной оценки выходной величины, возможность учесть в процессе обучения вариацию интервала между моментом короткого замыкания и моментом считывания последующего отсчета.

2. Сравнение выходных сигналов интервального и неинтервальных фильтров ортогональных составляющих позволяет оценить методическую погрешность последнего. Обнаружена структура фильтра ортогональных составляющих произвольного порядка того же типа, что и фильтр Фурье. Её выходные сигналы образуют область, компактную, но ощутимо смещенную относительно области выходных сигналов интервального фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М: Энергоатомиздат, 2007, 549 с.
2. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Зиновьев Д.В. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч.1. Преобразование, селекция и фильтрация. Ч. 2. Цифровая обработка осциллограмм токов короткого замыкания. – Электричество, 2006, № 10, с. 2–10; № 11, с. 2–10.
3. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания. – Электричество, 2012, № 4, с. 9–13.
4. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. – Новосибирск, Изд-во «XYZ», 2014, 606 с.
5. Киншт Н.В., Кац М.А. Интервальный анализ в задачах теории электрических цепей. – Электричество, 1999, № 10, с. 45–57.
6. Воропай Н.И., Бат-Ундрал Б. Расчеты режимов радиальной электрической сети интервальным методом. – Электричество, 2008, № 10, с. 64–67.
7. Лямец Ю.Я., Подшивалин А.Н. Интервальные фильтры. – Труды АЭН ЧР, 2004, № 3, с. 47–49.

[31.08.15]

*А в т о р ы:* **Лямец Юрий Яковлевич** окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1962 г. В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». Председатель НТС Исследовательского центра (ИЦ) «Бреслер».

**Широкин Максим Юрьевич** окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета (ЧГУ) в 2010 г. Заведующий сектором ИЦ «Бреслер».

**Мартынов Михаил Владимирович** окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ в 2011 г. В 2014 г в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка обучаемых модулей мик-

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 5, pp. 8–12.*

## The Estimation of Sinusoidal Component of Short Time Observing Process of Short-Circuit

**LYAMETS Yuriy Yakovlevich** (*Research Centre (RC) «Bresler», Cheboksary (Chuvash Republic, Russia)*)  
– *Chairman of the Scientific and Technical Council, Dr. Sci. (Eng.)*

**SHIROKIN Maksim Yur'yevich** (*RC «Bresler», Cheboksary, Russia*) – *Head of the Department*

**MARTYNOV Mikhail Vladimirovich** (*RC «Bresler», Cheboksary, Russia*) – *Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)*

*The article deals with the problem of orthogonal component extraction from short-circuit current observed for a time not exceeding a quarter of a period of network frequency. The structure of orthogonal component filter was composed of the same as Fourier filter but of arbitrary order. The main emphasis is put on the interval analysis of short-circuit process. The interval filter of orthogonal component is trained by simulation model. The training is made in discrete space which coordinates are samples of observing value. Examples relate to sample rate of 1 kHz and the number of samples doesn't exceed five. The steady process of short-circuit process are reflecting onto the complex plane, but there is under observation of that initial part of them. Only those conditions of simulation model which occupy special cell of discrete space of observing samples in transient process are reflected. The reflections areas of the same set of short-circuit modes are compared by interval filter and previously considered orthogonal component filter of arbitrary order. The discrepancy of areas allows of estimating the validation shift given by non-interval filter. During its training the interval filter can consider even such a hard-to-detect value as a discrepancy between time of short-circuit and the further moment of observing value sample.*

**Key words:** *short-circuit, sine component, filter of orthogonal component, interval indeterminacy*

### REFERENCES

1. **Shneyerson E.M.** *Tsifrovaya releinaya zashchita* (Digital protective relay). Moscow, Publ. Ebergoatomizdat, 2007, 549 p.
2. **Lyamets Yu.Ya., Romanov Yu.V., Zinov'yev D.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*. Parts 1, 2, 2006, No. 10, pp. 2–10; No. 11, pp. 2–10.
3. **Lyamets Yu.Ya., Romanov Yu.V., Широкин M.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 4, pp. 9–13.
4. **Sharyi S.P.** *Konechnomernyi interval'nyi analiz* (The finite interval analysis). Novosibirsk, Publ. «XYZ», 2014, 606 p.
5. **Kinsht N.V., Kats M.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1999, No. 10, pp. 45–57.
6. **Voropai Yu.Ya., Bat-Undral B.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 10, pp. 64–67.
7. **Lyamets Yu.Ya., Podshivalin A.N.** *Trudy Akademii energeticheskikh nauk Chuvashskoi Respubliki – in Russ. (Proc. of the Academy of electrotechnical sciences of Chuvash Republic)*, 2004, No. 3, pp. 47–49.

---

*ропроцессорных защит линий электропередачи». Инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».*