

*operating conditions, in evaluating the state and identifying the overhead power line electrical parameters, and to ensure more efficient online control of a power transmission line. The parameters of a real 500 kV power line were used in carrying out the study.*

*Key words: overhead power lines, extra-high voltage, power losses, corona losses, PMU-measurements, simulation*

## REFERENCES

1. **Avtomatizatsiya** *dispatcherskogo upravleniya v elektroenergetike/Pod redaktsiyey Yu.N. Rudenko, V.A. Semenova.* (Automation of dispatching management in electric power industry/Edit. by Yu.N. Rudenko, V.A. Semenov). Moscow. Publ. Moscow Power Engineering Institute, 2000, 686 p.
2. **Sistemnye issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnykh napravlenii.../Orvetstvennyi redactor N.I. Voropai** (System research in the energy sector: Retrospective research directions.../Editor N.I. Voropai. Novosibirsk, Publ. «Nauka», 2010, 686 p.
3. **Phadke A.G.** Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. – IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2002, vol. 1, pp. 476–479.
4. **Schwepe F., Wildes J.** Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. (PAS – 89), January 1970, pp. 120 – 125.
5. **Belyakov Yu.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 6, pp. 18–23.
6. **Gamm A.Z.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1972, No. 9, pp. 12–18.
7. **Gamm A.Z.** *Statisticheskiye metody otsenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskikh sistem* (Statistical methods for estimating the state of electric power systems). Moscow. Publ. «Nauka», 1976, 220 p.
8. **Gamm A.Z., Glazunova A.M., Grishin Ya.A., Kolosok I.N., Korkina Ye.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 6, pp. 2–9.
9. **Kolosok I.N., Korkina Ye.S., Buchinskii Ye.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 3, pp. 4–10.
10. **Balametov A.B., Khalilov E.D., Isayeva T.M.** *Elektronnoye modelirovaniye* (Electronic modeling), 2016, vol. 32, No. 2, pp. 67–81 (Ukraine).
11. **Tamazov A.I.** *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2005, No. 8, pp. 53–57.
12. **Sharov Yu.V., Gadzhiev M.G.** *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2010, No. 3, pp. 19–23.
13. **Idel'chik V.I.** *Elektricheskiye sistemy i seti* (Electrical systems and networks). Moscow, Energoatomizdat, 1989, 592 p.
14. **Balametov A.B.** *Koronirovaniye provodov VL SVN. Modeling ustanovivshikhsya rezhimov.* – Saarbrücken (Deutschland), Lambert Academic Publishing, 2013, 310 p.
15. **Balametov A.B., Khalilov E.D., Nabiyev Kh.I., Ilyasov O.V.** *Elektronnoye modelirovaniye (Electronic modeling)*, 2013, No. 5, pp. 77–91 (Ukraine).
16. **Stepanova A.A., Kononov Yu.G.** *Izvestiya vusov. Electromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2013, No. 1, pp. 56–57.

\* \* \*

*Электричество, 2017, № 3, с. 28–33.*

## Обучение релейной защиты на малом окне наблюдения

ЛЯМЕЦ Ю.Я., ВОРОНОВ П.И., МАРТЫНОВ М.В., МАСЛОВ А.Н.

*Высокое быстродействие обеспечивается согласованными процедурами цифровой обработки входных величин и обучения релейной защиты. Обучающие сигналы поступают от имитационной модели, воспроизводящей контролируемые режимы защищаемого объекта ( $\alpha$ -режимы) и альтернативные им режимы ( $\beta$ -режимы). Результатом обучения становится обнаружение на плоскости замера той области, в которой отображаются  $\alpha$ -режимы и куда не попадают  $\beta$ -режимы. Область срабатывания выбирается в пределах этой собственной области  $\alpha$ -режимов, что гарантирует селективность защиты. Дистанционная защита оперирует комплексными сигналами, а её замер отображается на плоскости комплексного сопротивления. Комплексные сигналы формируются фильтром ортогональных составляющих с нарастающим окном наблюдения. Предварительно выполняется интервальная обработка входных величин для устранения аperiodической составляющей. Характеристики срабатывания модуля сопротивления определяются для разных окон наблюдения, начиная с трёх интервалов дискретизации. Чувствительность защиты к переходному сопротивлению короткого замыкания оценивается объективными характеристиками. Обнаружилось любопытное явление – свободная составляющая процесса короткого замыкания приводит к эффекту повышения чувствительности на малом окне наблюдения.*

*Ключевые слова: релейная защита, обучение, имитационная модель, быстродействие*

В информационном анализе релейной защиты центральное место занимают представления о двух типах режимов защищаемого объекта ( $\alpha$ - и  $\beta$ -режимы) [1, 2]. Релейная защита призвана реагировать на них по-разному, а именно, не срабатывать при

всех  $\beta$ -режимах и, наоборот, срабатывать при максимально возможном числе  $\alpha$ -режимов. Применительно к дистанционной защите линии электропередачи режимы группируются следующим образом: к  $\alpha$ -режимам относятся короткие замыкания в за-

щищаемой зоне, к  $\beta$ -режимам — все прочие. Отношение к  $\beta$ -режимам обеспечивает селективность защиты, к  $\alpha$ -режимам — её чувствительность.

Разработаны процедуры обучения релейной защиты, отображающие множество режимов имитационной модели объекта в виде области на плоскости замера и окаймляющие область граничной линией [3, 4]. Попадание замера в  $\beta$ -область приводит к блокировке защиты. Срабатывание защиты возможно лишь в той части  $\alpha$ -области, которая не пересекается с  $\beta$ -областью. Отсюда следует ограничение чувствительности, для оценивания которой разработан аппарат объектных характеристик [5].

В статье информационный анализ дополняется концепцией максимального быстродействия, которая заключается в обучении релейной защиты на текущем окне наблюдения, начиная с первых отсчётов после возникновения короткого замыкания [6].

На первый взгляд, повышение быстродействия негативно влияет на селективность релейной защиты. Кажущееся бесспорным данное утверждение нуждается, тем не менее, во внимательном рассмотрении. В частности, представляет интерес исследование взаимосвязи быстродействия релейной защиты и её способности распознавать короткие замыкания в защищаемой зоне линии электропередачи. В постановку задачи входит условие сохранения традиционного базиса комплексных величин как основы формирования замеров, по которым защита принимает решение о срабатывании. Замер отображается на своей комплексной плоскости. Преобразование отсчётов на окне наблюдения в текущий комплексный сигнал выполняет специальный фильтр ортогональных составляющих [7]. На коротком окне наблюдения будет ощущаться сильное влияние свободной составляющей процесса короткого замыкания. Как следствие, оно будет распространяться и на результат обучения защиты. Интересно выяснить, всегда ли это влияние приводит к негативным последствиям или, быть может, способно содействовать распознаванию поврежденного наблюдаемого объекта.

**Фильтр ортогональных составляющих с нарастающим окном наблюдения.** Пусть  $\Delta t$  — интервал дискретизации наблюдаемого процесса;  $n$  — порядок нерекурсивного фильтра.

Время его установления  $t_{уст} = (n+1)\Delta t$ . Пусть далее  $T$  — период частоты сети и  $N = T / \Delta t$  — число отсчётов на периоде. У фильтра данного типа порядок возрастает на единицу с приходом каждого нового отсчёта входной величины  $v(k)$ , где  $k=0, n-1$ ;  $k=0$  — момент первого считывания после короткого замыкания;  $n$  — число отсчётов на окне

наблюдения, оно же порядок фильтра;  $(n-1)$  — аргумент выходного комплексного сигнала  $\underline{V}(n-1)$ . Воспользуемся следующей модификацией фильтра ортогональных составляющих, полученной в [7]:

$$\underline{V}(n-1) = \underline{M}(n-1) [\underline{K}^*(n-1) \underline{S}(n-1) - n \underline{S}^*(n-1)], \quad (1)$$

$$\text{где } \underline{M}(n-1) = \frac{2j}{\text{mod}^2 \underline{K}(n-1) - n^2};$$

$$\underline{K}(n-1) = \sum_{k=0}^{n-1} e^{j2\alpha k}; \quad \underline{S}(n-1) = \sum_{k=0}^{n-1} v(k) e^{j\alpha k}; \quad \alpha = 2\pi / N;$$

«\*» отмечены сопряжённые комплексы;  $\text{mod } \underline{K} = K$ .

Полезным дополнением к алгоритму выделения ортогональных составляющих служит операция предварительной обработки отсчётов наблюдаемой величины  $u(k)$ , устраняющая аperiodическую составляющую, незначительно изменяющуюся в пределах любой тройки соседних отсчётов. На множестве из  $n$  отсчётов можно составить  $n-2$  группы из трёх соседствующих отсчётов. Пусть  $h = \overline{0, n-3}$  — номер группы, совпадающий с моментом снятия первого отсчёта в группе. В пределах каждой группы примем модель наблюдаемого процесса в составе синусоидальной и постоянной слагающих:

$$u(k) = U_m(h) \sin(\alpha k + \psi(r)) + U_0(h), \quad k = h, h+1, h+2. \quad (2)$$

Последняя выделяется следующей операцией с тремя отсчётами:

$$U_0(k) = \frac{1}{4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} [u(k) - 2u(k+1) + u(k+2)], \quad k = h. \quad (3)$$

Входной сигнал фильтра ортогональных составляющих формируется путём устранения составляющей  $U_0(k)$  из каждого отсчёта:

$$v(k) = u(k) - U_0(k), \quad k = \overline{0, n-3}, \quad (4)$$

и лишь для двух последних отсчётов из последней группы с номером  $r = n-3$ , когда  $k = n-3, n-2, n-1$ ,

$$v(k) = u(k) - U_0(n-3). \quad (5)$$

**Обучающая имитационная модель.** Двухпроводная имитационная модель воспроизводит трёхфазные и междуфазные замыкания в симметричной электропередаче. В модели линии с двухсторонним питанием индексы  $s$  и  $r$  принадлежат разным её сторонам, индекс «з» — концу защищаемой зоны,  $l$  — длина линии,  $l_3$  — длина зоны (рис. 1). Индексом  $\alpha$  отмечаются короткие замыкания в защищаемой зоне, индексом  $\beta$  — замыкания вне зоны,  $x_{f\alpha}$  и  $x_{f\beta}$  — координаты мест замыкания того или другого режима:  $0 \leq x_{f\alpha} < l_3$ ;  $l_3 < x_{f\beta} \leq l$ .

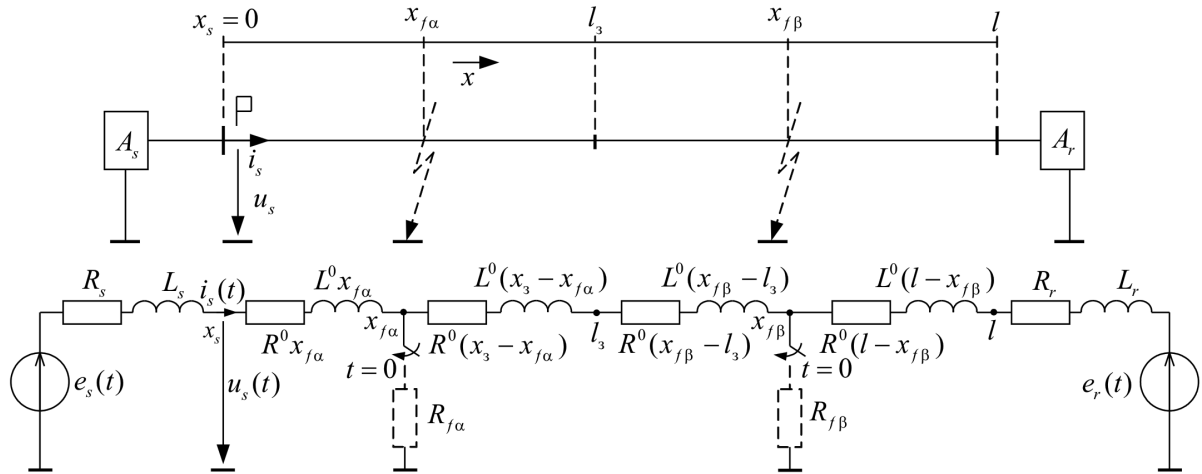


Рис. 1. Имитационная модель линии электропередачи в режиме трёхфазного короткого замыкания

Значения фиксированных параметров модели:  $E_m = 110\sqrt{2/3}$  В;  $R_s = 1,0$  Ом;  $X_s = 10$  Ом;  $R_r = 1,0$  Ом;  $X_r = 10$  Ом;  $R^0 = 0,1$  Ом/км;  $X^0 = 0,4$  Ом/км;  $l = 100$  км;  $l_3 = 85$  км;  $\Delta t = 1$  мс. Диапазоны изменения варьируемых параметров:  $\delta = -30^\circ \div 30^\circ$ ;  $\tau = 0 \div 1$  мс;  $x_{f\alpha} = 0 \div 0,85$  км;  $x_{f\beta} = 85 \div 100$  км;  $R_{f\alpha} = 0 \div 100$  Ом;  $R_{f\beta} = 0 \div \infty$ ;  $\psi = 0 \div 180^\circ$ . Приняты следующие описания ЭДС источников:  $e_s(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$ ,  $e_r(t) = E_m \sin(\omega t + \psi - \delta)$ . Варьируются начальная фаза  $\psi$  и угол передачи  $\delta$ , а также момент  $\tau$  первого считывания входных величин после произошедшего в линии короткого замыкания (рис. 2).

Сигналами имитационной модели являются отсчёты тока и напряжения  $i_s(k)$ ,  $u_s(k)$ ,  $k = 0, n$ ,  $n \geq 3$ . Число  $n$  должно быть больше двух ввиду применения операции (3) над тремя отсчётами. Выполняемые вслед за ней операции (4), (5) и затем (1) формируют комплексы  $\underline{I}(n-1)$  и  $\underline{U}(n-1)$ , по которым определяется замер сопротивления:

$$\underline{Z}(n-1) = \frac{\underline{U}(n-1)}{\underline{I}(n-1)}$$

Обучение модуля сопротивления совершается на комплексной плоскости  $\underline{Z}(n-1)$  и заключается в отображении замеров  $\underline{Z}_\alpha$  и  $\underline{Z}_\beta$  соответственно  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов. Если  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  – области отображения множеств этих режимов, то область срабатывания дистанционной защиты  $S_{\alpha\alpha}$  ассоциируется с раз-

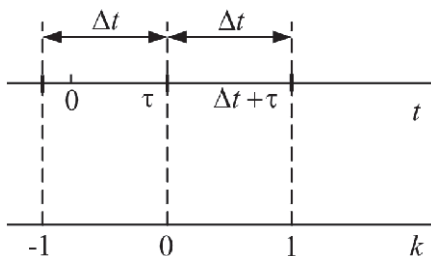


Рис. 2. Взаимосвязь осей непрерывного и дискретного времени

ностью двух областей:  $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_\beta$ . Остальная часть области  $S_\alpha$ , а именно её пересечение с областью  $S_\beta$ , не может быть включена в область срабатывания защиты. Как следствие, все короткие замыкания в зоне защиты, отображения которых попадают в область пересечения  $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$ , не поддаются распознаванию. Распознающая способность модуля сопротивления оценивается объектной характеристикой – зависимостью предела переходного сопротивления  $R_{f\alpha}$  в условиях срабатывания от координаты места короткого замыкания  $x_{f\alpha}$ . Условие срабатывания, в свою очередь, определяется попаданием замера в область  $S_{\alpha\alpha}$ :

$$\underline{Z}(n-1, x_{f\alpha}, R_{f\alpha}, \psi, \delta, \tau) \in S_{\alpha\alpha}, \tag{6}$$

где в аргументе замера указаны все варьируемые параметры – аварийные  $x_{f\alpha}$  и  $R_{f\alpha}$  и нормальные  $\psi$ ,  $\delta$  и  $\tau$ .

Оптимизационный поиск в пределах области  $S_{\alpha\alpha}$  максимума переходного сопротивления  $R_{f\alpha \max}$ , минимизированного по нормальным параметрам, определит искомую объектную характеристику:

$$R_{f\alpha \max \min}(n-1, x_{f\alpha}) = \max_{R_f} \min_{\psi, \delta, \tau} \arg[\underline{Z}(n-1, x_{f\alpha}, R_{f\alpha}, \psi, \delta, \tau) \in S_{\alpha\alpha}] \tag{7}$$

где  $\arg[\underline{Z}(x) \in S]$  есть множество значений вектора  $x$ , при которых выполняется условие принадлежности замера  $\underline{Z}$  области  $S$ .

**Результаты обучения.** Области  $S_{\alpha\alpha}$ , приведённые на рис. 3, получены при дискретизации тока  $i_s(t)$  и напряжения  $u_s(t)$  имитационной модели по рис. 1 с частотой 1 кГц ( $N=20$ ). Замеры сопротивления  $\underline{Z}(n-1)$  при  $N=3, 5, 10$  (рис. 3, а–в) сформированы с участием операций (3)–(5) и фильтра ортогональных составляющих (1). Замер сопротив-



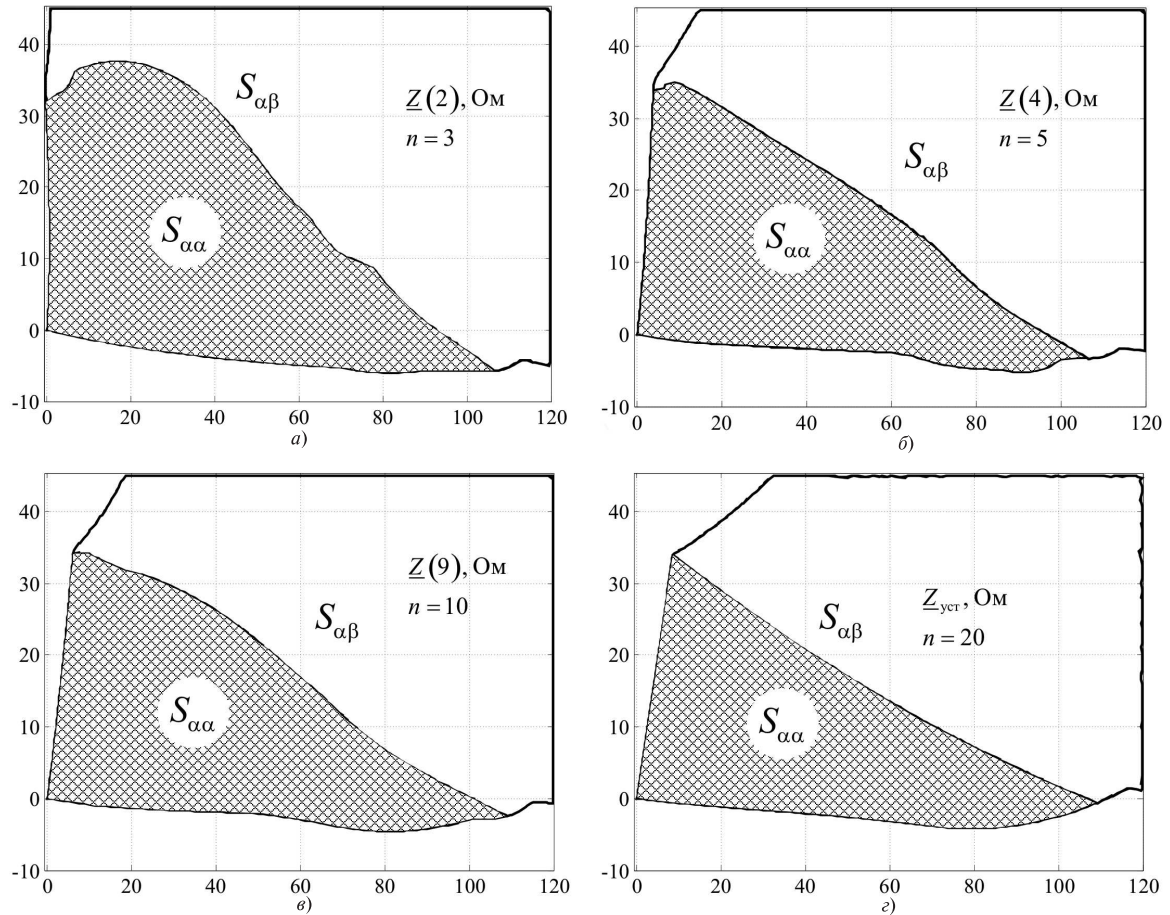


Рис. 3. Области срабатывания модуля сопротивления при расширяющемся окне наблюдения

ления  $Z_{уст}$  (рис. 3,г) иного происхождения. Он получен в установившемся режиме короткого замыкания после затухания свободного процесса на окне наблюдения, равном периоду частоты сети ( $n=N=20$ ). В аргументе  $Z_{уст}$  из пяти варьируемых параметров модели сохраняются только три –  $x_f$ ,  $R_f$  и  $\delta$ .

Объектные характеристики (7), полученные для каждой из четырёх областей  $S_{\alpha\alpha}$  (рис. 3), приведены на рис. 4. Распознающие свойства модуля сопротивления при замыкании вблизи места её установки характеризуются значением  $R_{f\alpha \max \min}^{(0)}$  при  $x_{f\alpha} = 0$ :

Значение $n$	$R_{f\alpha \max \min}^{(0)}, \text{ Ом}$
3	42
4	41
5	41
6	40
7	41
8	40
9	39
10	38

Любопытная закономерность, обнаружившаяся в решении поставленной задачи, не укладывается в привычные представления. Оказалось, что с увели-

чением окна наблюдения распознающие свойства защиты изменяются не совсем так, как ожидалось. На минимальном окне наблюдения ( $n=3$ ) имеет место небольшое укорочение защищаемой зоны, но в остальном распознающая способность защиты оказывается более высокой, чем в синусоидальном установившемся режиме короткого замыкания (объектные характеристики 1 и 3 на рис. 4). Явление, которое на первый взгляд выглядит странным, имеет простое объяснение. Дело в том, что в процедуре обучения релейной защиты фильтр ортогональных составляющих формирует комплексные сигналы из величин переходного процесса вместе с

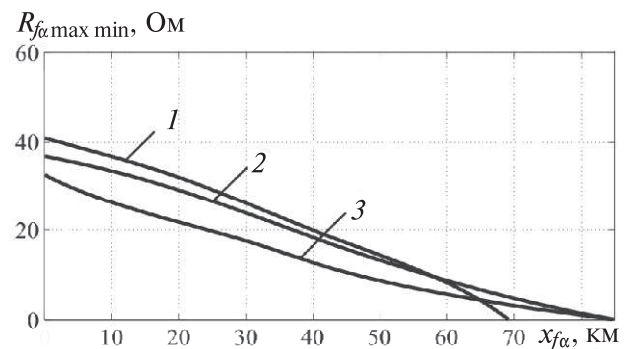


Рис. 4. Объектные характеристики 1 – при  $n = 3$ ; 2 – при  $n = 5$ ; 3 – в установившемся режиме короткого замыкания при  $n = 20$

его свободной составляющей. Обучение заключается в размежевании  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов. Свободный процесс подчёркивает интенсивность коротких замыканий в зоне защиты по сравнению с замыканиями вне зоны и тем самым способствует распознаванию первых, помогая не путать их со вторыми.

**Выводы.** 1. Фильтр ортогональных составляющих с нарастающим окном наблюдения выполняет функцию формирователя комплексного сигнала из малого числа отсчётов наблюдаемой величины. Фильтр, дополненный интервальным алгоритмом устранения постоянной составляющей, обеспечивает первый замер дистанционной защиты за время, равное трём интервалам дискретизации после начала короткого замыкания.

2. Модуль сопротивления, обучаемый в базе комплексных сигналов переходного процесса короткого замыкания, демонстрирует любопытное явление — повышение распознающей способности в начальной стадии наблюдения короткого замыкания, что объясняется позитивным влиянием свободного процесса, способствующего разграничению противостоящих режимов в ходе их распознавания.

3. Каждому информационному свойству релейной защиты отвечают специфические обучающие процедуры. Отстройка от  $\beta$ -режимов гарантирует селективность. Меры, разграничивающие области отображения  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов, дают повышение чувствительности. Наконец, обучение на малом окне наблюдения обеспечивает быстрдействие.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyakov A.F., Liamets Y.Y., Podshivalin A.N., Nudelman G.S., Zakonjsek J., Zhukov A.V. Intelligent relay protection development concept. — CIGRE Session, Paris, B5-115, 2010, pp. 1–5.
2. Куликов А.Л., Бездушный Д.И. Анализ реализаций информационного подхода в релейной защите. — Релейщик, 2016, № 2, с. 24–29.

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 3, pp. 28–33.*

3. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В., Воронов П.И. Обучаемая релейная защита, ч. 1, 2. — Электричество, 2012, № 2, с. 15–19; № 3, с. 12–18.

4. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В. Граничная задача релейной защиты. — Электричество, 2013, № 10, с. 16–22.

5. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В. Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи. — Электричество, 2015, № 10, с. 13–20.

6. Патент РФ № 2594361. Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, М.Ю. Широкин, П.И. Воронов. — БИ, 2016, № 23.

7. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания. — Электричество, 2012, № 4, с. 9–13.

[20.06.2016]

*Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического университета. В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматизации электрических систем». Председатель НТС ООО «Релематика», профессор кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского госуниверситета (ЧГУ).*

*Воронов Павел Ильич окончил в 2014 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ. В 2015 г. в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Информационные аспекты защиты и локализации поврежденной электрической сети». Инженер-исследователь ООО «Релематика».*

*Мартынов Михаил Владимирович окончил в 2011 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ. В 2014 г. в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи». Инженер-исследователь ООО «Релематика».*

*Маслов Александр Николаевич — студент факультета энергетики и электротехники ЧГУ, техник-исследователь ООО «Релематика».*

## Training of Relay Protection with Small Observation Window

LIAMETS Yurii Ya. (Chuvash State University (ChSU), Cheboksary, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

VORONOV Pavel I. (LLC «Relematika», Cheboksary, Russia) — Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

MARTYNOV Mikhail V. (LLC «Relematika», Cheboksary, Russia) — Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

MASLOV Alexander N. (LLC «Research Technician, Student of the ChSU)

*Fast-operating is provided by coordinated procedures of digital processing of input values and training of relay protection. Simulation model produces training signals: the controlled modes of the protected object ( $\alpha$ -modes) and their alternative modes ( $\beta$ -modes). The result of training is detection of area where there are only  $\alpha$ -modes. Tripping characteristic is selected from this area, which ensures selectivity of relay protection. Distance protection operates with complex signals, and its measurements are displayed on the complex impedance plane. Complex signals are generated by filter of orthogonal components with increasing observation window. Previously is performed interval signal processing in order to eliminate aperiodic component. Tripping characteristics of impedance modules are determined for different observation*