10. Olentsevich V.A., Belogolov Yu.I., Grigoryeva N.N. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process. In coll.: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. P. 012061.
11. Tumanin A.S. Tekhnologicheskii protsess Dispetcherskogo tsentra upravleniya perevozkami Krasnoyarskoi direksii upravleniya dvizheniem - filiala OAO «RZhD» [Technological process of the traffic control center of the Krasnoyarsk traffic control directorate - a branch of Russian Railways OAO], 2019. 94 p.
12. Arkhangel'skii E. V., Vorob'ev N. A., Drozdov N. A., Miroshnichenko R. I. et al. Raschet propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Calculation of the throughput capacity of railways]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1977, 310 p.
13. Olentsevich V.A., Astashkov N.P. Metody privlecheniya klientov k uslugam transportno - logisticheskogo biznes-bloka v tselyakh uvelicheniya konkurentosposobnosti kholdinga OAO "RZhD" [Methods of attracting customers to the services of the transport and logistics business block in order to increase the competitiveness of the Russian Railways holding company]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2019. Vol. 1. Pp. 4-8.
14. Astrakhansev L. A., Astrakhanseva N. M., Astashkov N. P. Razrabotka resursoberegayushchikh elektrifitsirovannykh tekhnologicheskikh protsessov [Development of resource-saving electrified technological processes]. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2012. No. 8 (71). Pp. 166-169.
15. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008 17.04.2008 [Methods for predicting and optimizing the transport network, taking into account the capacity of passenger and freight traffic. Deposited manuscript No. 330-B2008 17.04.2008].
16. Astrakhansev L. A., Astashkov N. P., Ryabchenok N. L., Alekseeva T. L., Astrakhanseva N. M. Povyshenie elektromagnitnoi sovmestimosti podvizhnogo sostava [Increasing the electromagnetic compatibility of rolling stock]. *Bezopasnost' regionov – osnova ustoychivogo razvitiya* [Safety of regions is the basis of sustainable development], 2012. Vol. 1-2. Pp. 92-94.
17. Astrakhansev L.A., Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L. Energoberezhenie v elektrotekhnicheskoy komplekse transportnykh sredstv. [Energy saving in the electrotechnical complex of vehicles]. V *sbornike: TRANSPORT-2012. Trudy vse-rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 3-kh chastyakh* [In the collection: TRANSPORT-2012. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference: in 3 parts], 2012. Pp. 408-410.
18. Ryabchenok N., Alekseeva T., Astrakhansev L., Astashkov N., Tikhomirov V. Energy-saving driving of heavy trains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 982. Pp. 491-508.
19. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladeltsev [Improvement of freight forwarding services for cargo owners]. Irkutsk, 2011.

Информация об авторах

Асташков Николай Павлович – к. т. н., доцент; кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Оленцевич Виктория Александровна – к. т. н., доцент; доцент кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olencevich_va@irgups.ru

Белоголов Юрий Игоревич – к. т. н., доцент; доцент кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pr-mech@mail.ru

Information about the authors

Nikolai P. Astashkov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astashkovnp@yandex.ru

Victoria A. Olentsevich – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olencevich_va@irgups.ru

Yuriy I. Belogolov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor; Associate Professor of the Subdepartment of Operations Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pr-mech@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).180-189

УДК 620.91

Применение схем фазовой автоподстройки частоты в измерительных органах тока и напряжения микропроцессорных устройств релейной защиты

К. В. Менакер¹, М. В. Востриков¹, В. А. Тихомиров²✉

¹ Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ tikhomirov_va@irgups.ru

Резюме

В статье рассматривается возможность реализации схем фазовой автоподстройки частоты в измерительных органах тока и напряжения микропроцессорных устройств релейной защиты. Показано, что применение схем фазовой автоподстройки частоты вместо цифровых фильтров позволяет достоверно выделить первую гармонику измеряемого сигнала, отсле-

дальше изменение частоты без использования сложных алгоритмов определения числа выборок и значительно упростить устройства релейной защиты. Для этих целей рассмотрены реальные осциллограммы тока и напряжения на выходе измерительных трансформаторов, произведена линейная интерполяция сигналов с последующим разложением в ряд Фурье. Осуществлен синтез схемы фазовой автоподстройки частоты в известной программе электронного моделирования «Multisim 11.0», синтезированы исследуемые сигналы, проведена имитационная проверка. Использование схем фазовой автоподстройки частоты с целью выделения первой гармоники позволит снизить погрешность за счет точной подстройки частоты и фазы управляемого генератора, осуществляющего генерацию первой гармоники, к фазе и частоте измеряемого сигнала, поступающего с выхода трансформатора тока или напряжения, а также упростить существующую схему релейной защиты марки ЦЗА-27,5-ФКС, уменьшив число ее ложных срабатываний. Экспериментальная проверка подтвердила практическую возможность использования схем фазовой автоподстройки частоты в микропроцессорных устройствах релейной защиты в качестве первичных преобразователей измерительных органов тока и напряжения. Проведенные исследования также показали целесообразность снятия токового сигнала без применения измерительных трансформаторов путем размещения измерительной обмотки поверх проводника с током. Данный способ позволяет исключить искажения измеряемого сигнала, однако из-за низкого уровня сигнала требует проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова

схема фазовой автоподстройки частоты, микропроцессорные устройства релейной защиты, цифровой фильтр, гармоника, измерительный трансформатор, измерительные органы тока и напряжения.

Для цитирования

Менакер К. В. Применение схем фазовой автоподстройки частоты в измерительных органах тока и напряжения микропроцессорных устройств релейной защиты / К.В. Менакер, М. В. Востриков, В.А. Тихомиров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 180–189. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).180-189

Информация о статье

поступила в редакцию: 13.04.2020, поступила после рецензирования: 20.05.2020, принята к публикации: 14.06.2020

Application of phase locked loops in current and voltage discriminating elements of microprocessor-based relay protection devices

K. V. Menaker¹, M. V. Vostrikov¹, V. A. Tikhomirov²✉

¹ Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ tikhomirov_va@irgups.ru

Abstract

The article discusses the possibility of implementing phase locked loops in discriminating elements of current and voltage in microprocessor-based relay protection devices. It is shown that the use of phase locked loops instead of digital filters makes it possible to reliably distinguish the first harmonic of the measured signal, track the change in frequency without using complex algorithms for determining the number of samples, and significantly simplify relay protection devices. For these purposes, the real oscillograms of the current and voltage at the output of the measuring transformers were considered. The signals were linearly interpolated with subsequent expansion in a Fourier series. The synthesis of the phase locked loop is carried out in the well-known program of electronic simulation "Multisim 11.0", the signals under study are synthesized, and a simulation check is conducted. The use of phase locked loops in order to isolate the first harmonic will make it possible to reduce the error due to precise adjustment of the frequency and phase of the controlled generator, which generates the first harmonic, to the phase and frequency of the measured signal coming from the output of the current or voltage transformer, as well as to simplify the existing relay protection scheme of the brand TsZA-27.5-FKS, reducing the number of its false responses. Experimental verification has confirmed that it is possible to use phase locked loops in microprocessor-based relay protection devices in practice as primary converters of current and voltage measuring devices. The studies conducted have also shown the feasibility of picking up the current signal without the use of measuring transformers by placing the measuring winding over the current conductor. This method eliminates distortions of the measured signal. However, it requires additional research due to the low signal level.

Keywords

phase locked loop, microprocessor-based relay protection devices, digital filter, harmonic, measuring transformer, current and voltage discriminating elements.

For citation

Menaker K. V., Vostrikov M. V., Tikhomirov V. A. Primenenie skhem fazovoi avtopodstroiki chastoty v izmeritel'nykh organakh toka i napryazheniya mikroprotsessornykh ustroystv releinoi zashchity [Application of phase locked loops in current and voltage discriminating elements of microprocessor-based relay protection devices]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 180–189. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).180-189

Article Info

Received: 13.04.2020, Revised: 20.05.2020, Accepted: 14.06.2020

Введение

В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты основным компонентом измерительных органов является цифровой фильтр (ЦФ). Назначение ЦФ заключается в выделении полезного сигнала (обычно это основная гармоника) и в максимально возможном подавлении помехи. В общем случае сигнал помехи содержит высшие гармоники, кратные основной частоте и дополнительные составляющие [1].

Анализ работы ЦФ показывает, что несмотря на постоянное их совершенствование, связанное с реализацией все более сложных алгоритмов обработки контролируемых сигналов, увеличение частоты дискретизации входных сигналов до 64 выборок на период промышленной частоты, качество выделения основной гармоники является незначительным. Одним из главных недостатков ЦФ является сложность их технической реализации, которая связана с построением различных алгоритмов обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов, на базе дискретного преобразования Фурье [2], формирования ортогональных составляющих [3] и других методик в зависимости от набора компонент в помехе. Значимым недостатком ЦФ также является

увеличение погрешности определения параметров полезного сигнала при отклонении частоты контролируемого сигнала от номинальной. На практике при отклонении частоты сигнала алгоритмы ЦФ предусматривают изменение числа выборок как в пределах целого, так нецелого чисел. Этот факт собственно и приводит к увеличению погрешности определения параметров полезного сигнала.

Идея использования схем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в устройствах релейной защиты нова, однако проведенные исследования показали высокую эффективность использования данных схем для выделения основной гармоники измеряемого сигнала [4, 5].

Основной задачей схем ФАПЧ является отслеживание фазы и частоты измеряемого сигнала при прохождении сигнала через нулевые отметки и своевременная подача управляющих воздействий на электронные ключи с целью формирования на выходе устройства гармонических колебаний по частоте и фазе совпадающих с измеряемым сигналом. Таким образом, схема ФАПЧ является идеальным устройством для выделения полезного сигнала в микропроцессорных устройствах релейной защиты.

С целью доказательства применимости ФАПЧ в

Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения, снятые на тяговой подстанции Карымская Забайкальской железной дороги

Fig. 1. Oscillograms of current and voltage, taken at the traction substation of the Karymskaya Zabaikalskaya railway

устройствах релейной защиты рассмотрим действие схемы на примере обработки сигналов тока и напряжения, представленных в виде осциллограмм (рис. 1), снятых с устройств микропроцессорной релейной защиты (ЦЗА) на тяговой подстанции Карымская Забайкальской железной дороги.

Рассмотрим период тока I_1 на временном интервале от 335 до 355 мс, который выделен пунктирными линиями (рис. 1).

Осуществим линейную интерполяцию анализируемой функции тока (рис. 2) в программе «Mathcad 13.0» с последующим разложением интерполированной функции в ряд Фурье:

$$I_f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^9 \left[\left(\frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \cdot dt \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) + \left(\frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \cdot dt \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \right], \quad (1)$$

где $I(t)$ – линейно интерполированная функция тока (рис. 2);

$$a_0 = \frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot dt.$$

Рис. 2. Линейная интерполяция функции тока
Fig. 2. Linear interpolation of the current function

Графики функции (1) и первой гармоники представлены далее (рис. 3).

Рис. 3. Графики функции тока (1) и первой гармоники
Fig. 3. Graphs of the current function (1) and the first harmonic

Следует отметить, несмотря на то, что совершенствование элементной базы устройств релейной защиты позволяет учитывать все большее число высших гармоник, во многих работах доказана целесообразность учета гармоник не выше 7–9-й [6–8]. Поэтому в выражении (1) произведен учет первых 9 гармоник исследуемого сигнала тока.

С помощью полученного выражения для тока (1) определим основные параметры исходного сигнала $I(t)$ за период в сравнении с параметрами сигнала $I_f(t)$, представленного в виде ряда Фурье и сигнала $I_1(t)$ первой гармоники.

Среднее значение тока за период

$$I_{cp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot dt = 0,275 \text{ A},$$

$$I_{fcp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_f(t) \cdot dt = 0.275 \text{ A},$$

$$I_{1cp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_1(t) \cdot dt = 0.275 \text{ A}.$$

Средневыпрямленное значение тока

$$I_{срв} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I(t)| \cdot dt = 5.825 \text{ A},$$

$$I_{fсрв} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I_f(t)| \cdot dt = 5.825 \text{ A},$$

$$I_{1срв} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I_1(t)| \cdot dt = 6.389 \text{ A}.$$

Действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I^2(t) \cdot dt} = 8.292 \text{ A},$$

$$I_f = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_f^2(t) \cdot dt} = 8.272 \text{ A},$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_1^2(t) \cdot dt} = 7.099 \text{ A}.$$

Анализ полученных данных показывает приемлемые отклонения параметров сигнала первой гармоники относительно исходного сигнала тока и сигнала, представленного в виде ряда Фурье.

Имитационную проверку возможности применения ФАПЧ с целью выделения первой гармоники исследуемого сигнала тока проведем в программе электронного моделирования «Multisim 11.0».

Синтез исследуемого сигнала в программе «Multisim 11.0» осуществим с помощью источника кусочно-линейного напряжения (рис. 4).

Рис. 4. Синтез исследуемого сигнала в программе «Multisim 11.0»

Fig. 4. Synthesis of the studied signal in the program "Multisim 11.0"

Синтез схемы ФАПЧ в программе «Multisim 11.0» в виду отсутствия специализированных микросхем осуществим на логических элементах (рис. 5). С целью опытной проверки схема ФАПЧ была реализована на микросхеме 74НС4046, обладающей широким спектром дополнительных возможностей.

Опытную проверку начнем с подачи на вход ФАПЧ исходного сигнала, синтезированного с помощью источника кусочно-линейного напряжения (рис. 4). Осциллограммы входного и выходных сигналов представлены (рис. 6, 7).

Анализ полученных осциллограмм показывает, что схема ФАПЧ точно срабатывает в моменты времени прохождения входного сигнала через нулевые отметки и восстанавливает первую гармонику. Однако наличие высших гармоник в исходном сигнале приводит к тому, что фаза восстановленной первой

Рис. 5. Схема фазовой автоподстройки частоты в программе «Multisim 11.0»

Fig. 5. Diagram of phase locked loop in the program "Multisim 11.0"

Рис. 6. Осциллограммы входного и выходных управляющих сигналов схемы фазовой автоподстройки частоты

Fig. 6. Oscillograms of input and output controlling signals of the phase locked loop

Рис. 7. Осциллограммы входного и выходного (первая гармоника) сигналов схемы фазовой автоподстройки частоты

Fig. 7. Oscillograms of the input and output (first harmonic) signals of the phase locked loop

гармоники не совпадает с фазой первой гармоники, полученной через преобразование Фурье (см. рис. 3). Причем, чем больше отклонение исходного анализируемого сигнала от синусоидальной формы, тем

больше отклонение фазы восстановленной первой гармоники [9]. С целью уменьшения погрешности фазы восстановленного сигнала на практике прибегают к предварительной фильтрации анализируемо-

го сигнала. Пропустив исходный сигнал через фильтр нижних частот, настроенный на частоту среза третьей гармоники 150 Гц, удастся исключить составляющие высших гармоник и значительно повысить точность фазы восстановленной первой гармоники на выходе ФАПЧ.

Установим на входе ФАПЧ фильтр нижних частот (рис. 8, а). Представлены осциллограммы сигналов на входе и выходе фильтра представлены (рис. 8, б).

Подадим отфильтрованный сигнал на вход ФАПЧ. Осциллограммы входного и выходного сигнала при наличии предвходного фильтра представлены далее (рис. 9). Анализ осциллограмм показывает значительное снижение отклонения начальной фазы восстановленной первой гармоники на выходе ФАПЧ.

Следует отметить, что при восстановлении первой гармоники с помощью схем ФАПЧ немаловажное значение имеет не только начальная фаза, но и амплитуда сигнала.

Авторами был предложен и апробирован способ восстановления амплитуды первой гармоники, заключающийся в подаче питающего напряжения на транзисторные ключи выпрямленного и сглаженного сигнала с выхода трансформатора тока или трансформатора напряжения в зависимости от измеряемой величины. Данный подход продемонстрирован в схеме (см. рис. 5). Параллельно выходной обмотки измерительного трансформатора подключается диодный мост и сглаживающий конденсатор. Округленно среднее значение выпрямленного напряжения на выходе диодного моста при наличии сглаживающей емкости близко к амплитудному

Рис. 8. Схема предвходного фильтра нижних частот (а) и осциллограммы на входе и выходе фильтра (б)

Fig. 8. Circuit of the pre-input low-pass filter (a) and oscillograms at the input and output of the filter (b)

Рис. 9. Осциллограммы входного и выходного (первая гармоника) сигналов схемы фазовой автоподстройки частоты

Fig. 9. Oscillograms of the input and output (first harmonic) signals of the phase locked loop

значению переменного напряжения на входе [10]:

$$U_{\text{вых}} = 1.41 \cdot U - 2 \cdot U_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где U – действующее напряжение на вторичной обмотке измерительного трансформатора; $U_{\text{пр}}$ – прямое падение напряжения на одном диоде моста (берется из справочника, не превышает 1 В).

Следует отметить, что выражение (2) применимо для синусоидального сигнала. При условии использования фильтра низких частот на выходе измерительных трансформаторов погрешность амплитуды восстановленных сигналов первой гармоники тока и напряжения на выходе ФАПЧ будет минимальной.

Кроме того, многочисленные исследования, проведенные в работах [11, 12] показывают, что при наличии в первичном сигнале тока экспоненциально затухающей апериодической составляющей магнитопровод трансформатора тока входит в насыщение. Следствием этого являются искажение вторичного тока трансформатора тока и появление в нем выс-

ших гармоник, а также гармоник не кратных основной. Проведенные опыты позволили установить целесообразность снятия токового сигнала без применения измерительного трансформатора путем размещения обмотки, намотанной поверх проводника с током. Данный способ позволяет исключить искажения измеряемого сигнала, однако из-за низкого уровня амплитуды сигнала требует дополнительных исследований.

Подводя итоги, можно отметить, что использование схемы ФАПЧ в микропроцессорных системах релейной защиты позволит не только упростить устройства, но и значительно уменьшить погрешность выделения первой гармоники анализируемых сигналов тока и напряжения, особенно при изменении их частоты. Возможность практической реализации данного подхода доказана теоретическими исследованиями путем имитационного моделирования и экспериментально [13–17].

Список литературы

1. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю.В. Румянцев, Ф.А. Романюк, В.Ю. Румянцев и др. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. 2016. № 5 (59). С. 397–417.
2. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and their Applications. Springer Science & Business Media, 2008. 248 p.
3. Романюк Ф.А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок. Минск : Технопринт, 2001. 133 с.
4. Востриков М.В., Менакер К.В., Ушаков В.А. Применение схем фазовой автоподстройки частоты для выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Девятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. С. 629–633.
5. Востриков М.В., Менакер К.В., Ушаков В.А. Повышение надежности работы микропроцессорной защиты фидеров контактной сети на основе использования схем ФАПЧ // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Девятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. С. 263–268.
6. Копьев В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения. Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. 153 с.
7. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учеб. пособие для вузов. М. : Издательство МЭИ, 2000. 199 с.
8. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф.А. Романюк и др. // Перспективные материалы и технологии. Витебск, 2015. Т. 1. С. 115–139.
9. Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю. Аналого-цифровая частотная фильтрация входных сигналов релейной защиты // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. Сер.: Энергетика. Минск, 1994. № 3–4. С. 7–12.
10. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1982. 496 с.
11. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит / Ф.А. Романюк и др. // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. Сер.: Энергетика. Минск, 2010. № 1. С. 5–9.
12. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты: новые перспективы или новые проблемы // Промышленная энергетика. 2006. № 3–4. С. 15–19.
13. Менакер К.В., Востриков М.В. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе схем ФАПЧ // Силовая электроника. 2016. Т. 6. № 63. С. 44–47.
14. Епифанов Е.Л., Филиппов С.А., Востриков М.В. Проблемы существующих устройств релейной защиты фидеров контактной сети и пути их решения // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование – наука – производство. 2017. Т. 1. С. 217–223.
15. Востриков М.В., Филиппов С.А., Яковлев Д.А. Повышение надежности перевозочного процесса за счет внедрения устройства адаптивной дистанционной защиты резервных ступеней фидеров контактной сети // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 745–748.
16. Электронные преобразователи / В.С. Цыбульский, Л.А. Астраханцев, Н.Л. Рябченко и др. // Железнодорожный транспорт. 2008. № 10. С. 54–55.
17. Пат. 2708684 Рос. Федерация. Устройство фильтрации и выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети на основе схем ФАПЧ / Менакер К.В. и др. № 2018134810; заяв. 01.10.2018.

References

1. Rummyantsev Yu.V., Romanyuk F.A., Rummyantsev V.Yu., Novash I.V. Realizatsiya tsifrovyykh fil'trov v mikroprotsessornyykh ustroystvakh releinoi zashchity [Implementation of digital filters in microprocessor-based devices for relay protection]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. Belorussian National Technical Un-ty Publ. Minsk, 2016. No. 5 (59). Pp. 397–417.
2. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and their Applications. Springer Science & Business Media, 2008. 248 p.
3. Romanyuk F.A. Informatsionnoe obespechenie mikroprotsessornyykh zashchit elektroustanovok [Information support of microprocessor protection of electrical installations]. Minsk: Tekhnoprint Publ., 2001. 133 p.
4. Vostrikov M.V., Menaker K.V., Ushakov V.A. Primenenie skhem fazovoi avtopodstroiki chastoty dlya vydeleniya pervoi garmoniki v mikroprotsessornyykh ustroystvakh releinoi zashchity fiderov kontaktnoi seti [Application of phase locked loops to extract the first harmonic in microprocessor relay protection devices of overhead contact system feeders]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Devyatoi Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, 10–13 aprelya 2018 g [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of Ninth Internat. Scientific and Practical Conf., April 10-13, 2018]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018.
5. Vostrikov M.V., Menaker K.V., Ushakov V.A. Povyshenie nadezhnosti raboty mikroprotsessornoi zashchity fiderov kontaktnoi seti na osnove ispol'zovaniya skhem FAPCh [Increasing the reliability of the microprocessor protection of the overhead contact system line feeders based on the use of PLL]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Devyatoi Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, 10–13 aprelya 2018 g [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Ninth Internat. Scientific and Practical Conf., April 10-13, 2018]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018.
6. Kop'ev V.N. Releynaya zashchita. Printsipy vypolneniya i primeneniya: Uchebnoe posobie [Relay protection. Principles of implementation and application: a textbook]. Tomsk: Tomsk Polytechnical university Publ., 2009. 153 p.
7. D'yakov A.F., Ovcharenko N.I. Mikroprotsessornaya releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem: uchebnoe posobie dlya vuzov [Microprocessor relay protection and automation of electric power systems: a textbook for universities]. Moscow: MEI Publ., 2000. 199 p.
8. Romanyuk F.A. et al. Perspektivnye tekhnologii realizatsii mikroprotsessornyykh zashchit linii raspredelitel'nykh setei [Promising technologies for the implementation of microprocessor protection of distribution lines]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii* [Advanced materials and technologies]. Vitebsk State Technological university Publ., Vitebsk, 2015. Vol. 1. Pp. 115–139.
9. Romanyuk F.A., Rummyantsev V.Yu. Analogo-tsifrovaya chastotnaya fil'tratsiya vkhodnykh signalov releinoi zashchity [Analog-digital frequency filtering of input signals of relay protection]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. Belorussian National Technical Un-ty Publ. Minsk, 1994. No. 3-4. Pp. 7–12.
10. Zabrodin Yu. S. Promyshlennaya elektronika: uchebnik dlya vuzov [Industrial electronics: a textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1982. 496 p.
11. Romanyuk F.A. et al. Vliyanie nasyshcheniya transformatorov toka na rabotu tokovykh zashchit [Influence of saturation of current transformers on the work of current protection]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. Belorussian National Technical Un-ty Publ. Minsk, 2010. No. 1. Pp. 5–9.
12. Gurevich V.I. Mikroprotsessornyye rele zashchity: novye perspektivy ili novye problemy [Microprocessor protection relays: new perspectives or new problems]. *Promyshlennaya energetika* [Industry power engineering]. Energoprogress ZAO Publ. Moscow, 2006. No. 3-4. Pp. 15–19.
13. Menaker K.V., Vostrikov M.V. Sozdanie vysokoeffektivnykh impul'snykh istochnikov elektropitaniya na osnove skhem FAPCh [Creation of highly efficient switching power supplies based on PLLs]. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2016. Vol. 6. No. 63. Pp. 44–47.
14. Epifanov E.L., Filippov S.A., Vostrikov M.V. Problemy sushchestvuyushchikh ustroystv releinoi zashchity fiderov kontaktnoi seti i puti ikh resheniya [Problems of existing relay protection devices for overhead contact system line feeders and ways to solve them]. *115 let zhelezнодорожному образованию v Zabaikal'e: obrazovanie – nauka – proizvodstvo* [115 years of railway education in Transbaikalia: education – science – production], 2017. Vol. 1. Pp. 217–223.
15. Vostrikov M.V., Filippov S.A., Yakovlev D.A. Povyshenie nadezhnosti perevozochnogo protsessa za schet vnedreniya ustroystva adaptivnoi distantsionnoi zashchity rezervnykh stupenei fiderov kontaktnoi seti [Increasing the reliability of the transportation process by introducing a device for adaptive distance protection of backup steps of the overhead line feeders]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017. Vol. 1. Pp. 745–748.
16. Tsybul'skii B.C., Astrakhantsev L.A., Ryabchenok N.L. et al. Elektronnyye preobrazovateli [Electronic converters]. *The Zhelezнодорожный transport* [Railway Transport], 2008. No. 10. Pp. 54–55.
17. Menaker K.V. et al. Ustroystvo fil'tratsii i vydeleniya pervoi garmoniki v mikroprotsessornyykh ustroystvakh releinoi zashchity fiderov kontaktnoi seti na osnove skhem FAPCh [A device for filtering and separating the first harmonic in microprocessor-based relay protection devices for overhead contact system line feeders based on PLLs]. Patent of invention RU 2708684. / No. 2018134810; applied 01.10.2018.

Информация об авторах

Менакер Константин Владимирович – к. т. н., доцент кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Востриков Максим Викторович – ст. преподаватель кафедры электроснабжения, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Тихомиров Владимир Александрович – к. т. н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tikhomirov_va@irgups.ru

Information about the authors

Konstantin V. Menaker – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Power Supply, Trans-Baikal Institute of Railway Transport, Chita, e-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Maksim V. Vostrikov – Senior lecturer of the Subdepartment of Electric Power Supply, Trans-Baikal Institute of Railway Transport, Chita, e-mail: sekretar@zab.megalink.ru

Vladimir A. Tikhomirov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tikhomirov_va@irgups.ru