

DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-146-153

УДК 621.314.58

ББК 32.859

С.С. ФРОЛОВ, Д.А. ШАТИЛОВ

**ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ИСКАЖЕНИЯ
СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА РЕКУПЕРАЦИИ
ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ
В СЕТЬ СИГНАЛОМ С ОДНОТАКТНОЙ ОДНОСТОРОННЕЙ
ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

***Ключевые слова:** принудительный разряд аккумуляторов, коэффициент искажения синусоидальности, ток рекуперации, управление с помощью однотактной односторонней широтно-импульсной модуляцией, активный выпрямитель.*

Для современных удалённых и замкнутых систем бесперебойного питания востребована процедура принудительного разряда аккумуляторных батарей. Указанный процесс принудительного разряда целесообразно осуществлять с рекуперацией в сеть. Такой способ приводит: во-первых, к уменьшению массы зарядно-разрядных устройств за счёт исключения из последних мощных резистивных нагрузок; во-вторых – к заметной экономии электроэнергии для замкнутых автономных объектов. При этом для тока рекуперации предъявляются повышенные требования к его синусоидальности, на коэффициент искажения которой существенно влияют соотношения между ЭДС аккумуляторной батареи и амплитудой напряжения сети, током разряда и максимальным током катушки активного выпрямителя. Также возможно влияние соотношения между частотой управляющего широтно-импульсного сигнала и частотой тока рекуперации (частотой сети). В бесперебойных системах применяются аккумуляторные батареи с различной суммарной ЭДС и ёмкостью, определяющей ток разряда. Кроме того, упомянутые величины изменяются в ходе эксплуатации, и при принудительном разряде могут применяться различные методики, отличающиеся соотношением тока разряда с ёмкостью аккумуляторной батареи и законом его изменения. Поэтому в ходе разработки универсальной системы принудительного разряда батареи в сеть с широтно-импульсным управлением формой возвратного тока актуальна информация о зависимостях коэффициента искажения синусоидальности от указанных выше соотношений между напряжением аккумуляторной батареи и амплитудой напряжения сети, током разряда и максимальным током катушки активного выпрямителя, а также от количества импульсов на период тока рекуперации. В статье представлены результаты работы по получению диаграмм указанных зависимостей. Для получения последних сформирована функция выходного тока активного выпрямителя – тока рекуперации, затем его спектральная функция. С использованием последней выполнена оценка искажений формы тока на основе спектрального подхода. Полученные результаты востребованы при разработке модулей программ для микроконтроллеров широтно-импульсных регуляторов тока рекуперации, реализующих алгоритмы формирования кривой тока с приемлемыми значениями коэффициента искажения синусоидальности при изменении параметров аккумуляторной батареи, сети и тока разряда.

Работа выполнена в рамках разработки системы управления принудительным (тренировочным и восстановительным) разрядом (ПР) аккумуляторных батарей (АКБ) в однофазную сеть (рис. 1) резервных (РСП) и бесперебойных систем питания (БСП) удалённых промышленных объектов, подклю-

ченных к электросети с нестабильной подачей энергии [13], а также замкнутых систем – судов [6], подводных аппаратов [5], космических аппаратов [8].

В перечисленных РСП и БСП общая ЭДС АКБ варьируется от нескольких десятков [7, 12] до нескольких сотен вольт [13, 9], энергоёмкость также от нескольких десятков [11] до нескольких сотен киловатт-часов [4], ёмкость, определяющая тока принудительного разряда, изменяется от сотен до тысячи ампер-часов. Поэтому в обычных зарядно-разрядных устройствах (ЗРУ) применяются резистивные нагрузки мощностью от 1 до 20 кВт, что требует дополнительного теплоотвода и утяжеляет ЗРУ. Также в течение восстановительного цикла (до 10–20 ч) выделяется энергия, составляющая для замкнутых и удалённых систем значительную долю энергозатрат.

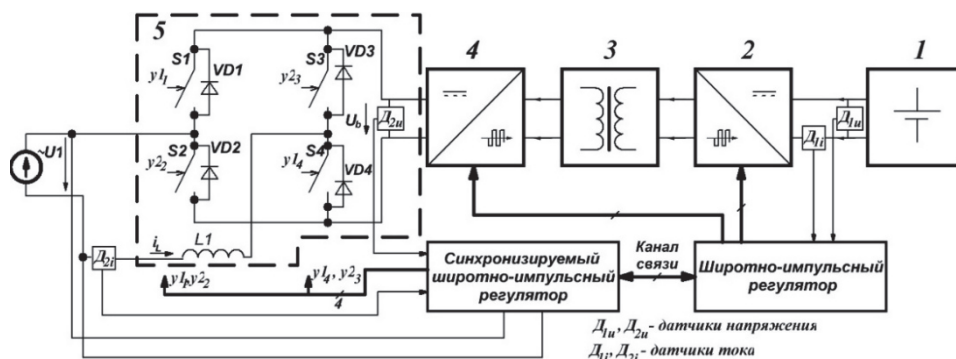


Рис. 1. Система принудительного разряда аккумулятора в сеть

Поэтому применение в РСП и БСП систем ПР в сеть целесообразно для относительно заметной экономии электроэнергии и уменьшения массы ЗРУ за счёт удаления мощных резистивных нагрузок для разряда [5, 8].

Проблема. Применение в ЗРУ активного выпрямителя (АВ) [10] с полностью управляемыми вентилями – транзисторами IGBT или MOSFET – позволяет с помощью сигнала управления с одноконтной односторонней либо двусторонней ШИМ [2] сформировать ток рекуперации i_L с близкой к синусоидальной форме.

Согласно техническим требованиям к качеству электроэнергии в компании Schneider Electric, допустимый коэффициент искажений синусоидальности (КИС) тока статора синхронных машин – 1,3...1,5 % [3]. Значения КИС зависят от ЭДС АКБ, амплитуды напряжения сети, тока разряда, индуктивности катушки $L1$ АВ и числа ШИМ-импульсов N на период сети. ЭДС АКБ и её ёмкость, определяющая ток разряда, со временем изменяются, в РСП и БСП различных объектов их значения отличаются на порядок. Поэтому при разработке универсальной системы ПР требуется информация о зависимости КИС от перечисленных параметров АКБ, сети, ШИМ-сигнала и индуктивности $L1$.

Постановка задачи. В настоящей работе решается задача графического исследования зависимостей КИС тока i_L :

- от отношения напряжения питания АВ U_b , пропорциональной ЭДС АКБ, и амплитуды сети U_m

$$k_u = \frac{U_b}{U_m};$$

– от отношения текущей амплитуды тока катушки $I_{m,0}$, пропорциональной току разряда АКБ, и максимальной амплитуды тока катушки $I_{m,max}$

$$k_I = \frac{I_{m,0}}{I_{m,max}},$$

где $I_{m,max}$ определяется выражением

$$I_{m,max} = \frac{U_m \cdot T_{PWM}}{L1};$$

(T_{PWM} – период ШИМ-импульса);

– от числа ШИМ-импульсов N на период сети.

В этой статье рассматриваются зависимости для одноконтурной односторонней ШИМ – ООШИМ-2, при которой длительность i -го импульса определяется значением синусоидальной функции в начале i -го периода.

Закон широтно-импульсной модуляции. В программе MathCad сформирована функция тока i_L суммированием его нарастающих и спадов на каждом i -м периоде ООШИМ-2 при положительной ($i = 0, \dots, 0,5 \cdot N - 1$)

$$\Delta i_{L,i}^+ = I_{m,max} \cdot (k_u - \sin(i \frac{2\pi}{N})) \cdot D_i, \quad \Delta i_{L,i}^- = -I_{m,max} \cdot \sin(i \frac{2\pi}{N}) \cdot (1 - D_i) \quad (1)$$

и при отрицательной полуволне в сети ($i = 0,5 \cdot N, \dots, N - 1$)

$$\Delta i_{L,i}^+ = -\Delta i_{L,i-0,5 \cdot N}^-, \quad \Delta i_{L,i}^- = -\Delta i_{L,i-0,5 \cdot N}^+ \quad (2)$$

Выражения для коэффициентов заполнения для каждого i -го шага на основании (1) и (2) примут вид

$$D_i = \frac{1}{k_u} \left(k_I \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot \cos\left(\frac{i \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right) + \sin\left(\frac{i \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right) \right) \text{ при } i = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (3)$$

$$D_i = D_{i - \frac{N}{2}} \text{ при } i = \frac{N}{2}, \dots, N - 1. \quad (4)$$

Результаты численного моделирования в программе MathCad подтверждают корректность формирования кривой тока i_L (рис. 2).

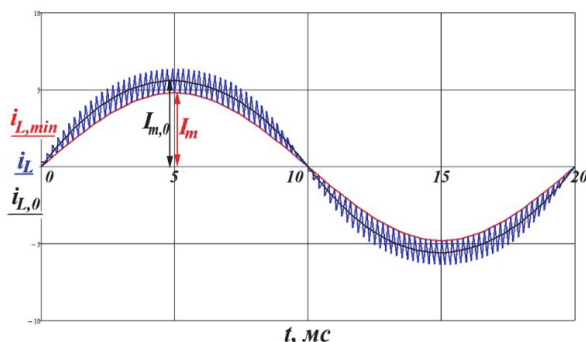


Рис. 2. Ток рекуперации при ООШИМ-2

Спектральная характеристика выходного тока. При расчёте спектра тока i_L , формируемого на основе закономерностей (1)–(4), воспользовались свойствами интегрального преобразования Фурье – суперпозиции (линейности), смещения во времени, первообразной [1], а также соотношениями между спектрами непериодического и периодического сигналов.

Расчётный эксперимент в программе MathCad показал, что для всех точек положительной и отрицательной полуволн i_L выполняется равенство

$$i_L(x) = -i_L(x + \pi), x \in [0, \pi).$$

Поэтому изначально получили выражение спектральной плотности $S^+(\omega)$ первой полуволны

$$S^+(\omega) = \frac{-I_{m,\max}}{\omega^2 \cdot T_M} \sum_{i=0}^{N-1} \left(k_u \left(1 - e^{-j \frac{\omega D_i}{N \cdot f_c}} \right) - \sin \left(i \frac{2\pi}{N} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{j \cdot \omega}{N \cdot f_c}} \right) \right) e^{\frac{-j \cdot i \cdot \omega}{N \cdot f_c}}, \quad (5)$$

где $f_c = 50$ Гц – частота сети.

Спектральную плотность для всего периода рис. 2 получим, просуммировав полученный результат (5) и его инверсию, смещенную на полпериода:

$$S(\omega) = S^+(\omega) - S^+(\omega) \cdot e^{\frac{-j \cdot \omega}{2 \cdot f_c}}. \quad (6)$$

Амплитуды и начальные фазы гармоник периодически повторяющейся волны $i_L(t)$ (рис. 2) получим как выборки из амплитудной и фазовой спектральных плотностей на частотах, кратных частоте сети, т.е. из модуля и аргумента соотношения (6):

$$I_{L,n} = 2 \cdot f_c \cdot |S(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c)|, \quad (7)$$

$$\psi_n = \arg\{S(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c)\}. \quad (8)$$

Корректность расчётов спектра (5) – (8) проверена сравнением диаграмм сформированного в программе MathCad сигнала тока i_L и функции суммы ряда Фурье $i_{L,\sim}$

$$i_{L,\sim}(t) = \sum_{n=1}^{400} I_{L,n} \cdot \cos(n \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot t + \psi_n).$$

Известно и исследованиями диаграмм амплитудного спектра (7) в программе Mathcad подтверждено: последний группируется полосами в области низших частот и в окрестностях частот, кратных частоте ШИМ-сигнала Nf_c . Полосы в окрестностях $k \cdot Nf_c$ (k – целое число) *подавляются* сетевыми фильтрами приборов той же сети.

Поэтому в исследовании рассмотрены только низшие частоты с $n \ll N$. Анализ амплитуд (7) в указанной области показал – чётные составляющие в спектре отсутствуют, а внимания заслуживают «вредные» составляющие с номерами $n = 3$ и $n = 5$.

Диаграммы зависимостей 3-й и 5-й гармоник, приведённые к 1-й

$$k_{e,3} = I_{L,3} / I_{L,1}, \quad k_{e,5} = I_{L,5} / I_{L,1},$$

от приведённой амплитуды тока k_I (рис. 3, а, б) показывают – уровень 5-й гармоники на порядок меньше 3-й. Поэтому КИС достаточно оценить с помощью отношения $k_{e,3}$.

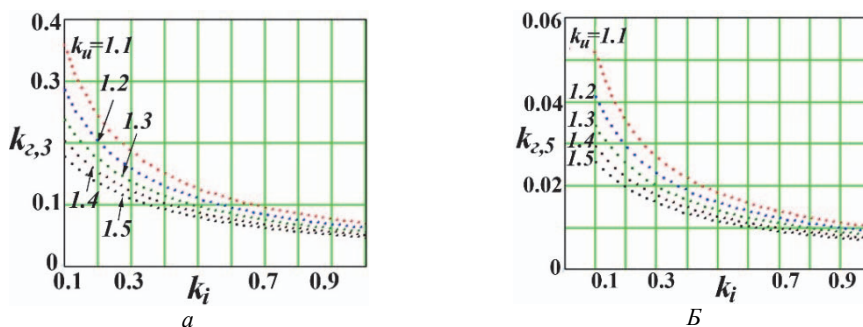


Рис. 3. Зависимости приведённых амплитуд: 3-й (а) и 5-й (б) гармоник от приведённой амплитуды тока k_i

Исследованы зависимости коэффициента гармоник $k_{2,3}(k_i)$ при фиксированных значениях k_u (рис. 3, а) и $k_{2,3}(k_u)$ при фиксированных значениях k_i (рис. 4, а), обе при $N=100$, а также зависимость $k_c(N)$ при $k_u=1.1$ и $N=100\dots 5000$ (рис. 4, б).

Последняя диаграмма (рис. 4, б) показывает практическую независимость КИС от отношения N частоты ШИМ-сигнала к частоте сети.

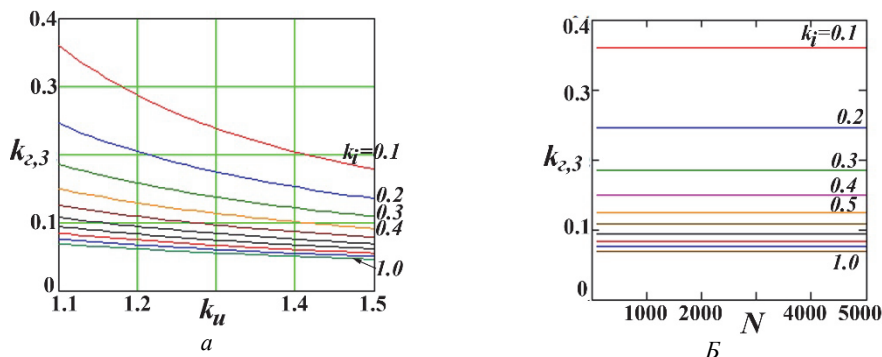


Рис. 4. Зависимости коэффициента искажений синусоидальности: от приведённого напряжения питания активного выпрямителя k_u (а) и от числа ШИМ-импульсов N на период сети (б)

Полученные зависимости $k_{2,3}(k_i)$ и $k_{2,3}(k_u)$ дают полезную информацию для разработчика программного обеспечения микроконтроллеров широтно-импульсных регуляторов рис. 1.

В частности, потребуются при разработке подпрограмм подстройки тока разряда АКБ при заданных ограничениях на КИС k_c . Ток разряда связан с напряжением питания АВ U_b и амплитудой тока катушки $I_{m,0}$. В свою очередь, соотношения между напряжением питания U_b и амплитудой напряжения сети U_m , а также между амплитудой тока катушки $I_{m,0}$ и его максимальной амплитудой $I_{m,max}$ (определяется индуктивностью LI) влияют на КИС тока рекуперация k_c .

Литература

1. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. 5-е изд., стереотип. М.: Высш. шк., 2005. 462 с.
2. *Берендс Д.А., Кукулиев Р.М., Филиппов К.К.* Приборы и системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 280 с.
3. Гармонические искажения в электрических сетях [Электронный ресурс] // Schneider Electric. Техническая коллекция Schneider Electric. 2018. Вып. № 22. 32 с. URL: <http://www.pro-schneider.ru/content/files/140.pdf> (дата обращения: 28.08.2020).
4. *Каменев Ю.Б., Лушина М.В., Яковлев В.А., Леонов В.Н.* Новый свинцово-кислотный аккумулятор для морских подводных аппаратов // Электрохимическая энергетика. 2009. Т. 9, № 3. С. 166–170.
5. *Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И.* Техническое совершенствование автономного зарядно-разрядного электротехнического комплекса аккумуляторных батарей подводных аппаратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 3(134). С. 154–171.
6. Пат. 2595267 Российская Федерация, МПК Н 02 J 7/24. Мобильный зарядно-разрядный комплекс для корабельных аккумуляторных батарей / Темирёв А.П., Цветков А.А., Киселёв В.И. и др., заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Малое инновационное предприятие «Мехатроника» Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института)». 2015120990/07. Заявл. 02.06.2015, опубл. 27.08.2016, Бюл. №24. 12 с.
7. *Петровичев М.А., Гуртов А.С.* Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосмического ун-та, 2007. 88 с.
8. П.м. 103427 Российская Федерация, МПК Н 02 J 7/10. Зарядно-разрядное устройство для аккумуляторных батарей / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Ракитин Г.А. и др., заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). 2010144262/07. Заявл. 28.10.2010, опубл. 10.04.2011, 25 с.
9. *Савченко А.В.* Разработка корабельной автоматизированной системы контроля и диагностики аккумуляторных батарей дизель-электрических подводных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 16 с.
10. *Чалыгин Е.Е.* Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. М.: Изд-во МЭИ, 2012. 48 с.
11. *Чёрная М.М.* Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 142 с.
12. *Чёрная М.М.* Системы электропитания космических аппаратов с модулем зарядно-разрядного устройства // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2018. Т. 1, № 2. С. 163–166.
13. *Шичков Л.П., Людин В.П., Мохова О.П.* Автоматизированный зарядно-разрядный тиристорный преобразователь для электротехнологий регенерации аккумуляторных батарей // Российский государственный аграрный заочный университет // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14(19). С. 105–109.

ФРОЛОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники, Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург (frolovsergey7@mail.ru).

ШАТИЛОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ – магистрант электроэнергетического факультета, Оренбургский государственный университет, Россия, Оренбург (dmitriyshatilov97@gmail.com).

Sergey S. FROLOV, Dmitry A. SHATILOV

DEPENDENCIES OF THE DISTORTION FACTOR OF THE SINUSOIDALITY OF THE RECOVERY CURRENT ON THE PARAMETERS OF THE PROCESS WHEN CONTROLLING THE FORCED DISCHARGE OF ACCUMULATOR BATTERIES INTO THE NETWORK BY SIGNAL WITH SINGLE-CYCLE ONE-WAY PULSE-WIDTH MODULATION

Key words: forced discharge of batteries, distortion coefficient of the sinusoidality, regeneration current, control using single-cycle one-way pulse-width modulation, active rectifier.

For modern remote and closed systems of uninterruptible power supply, a operation of forced discharge of accumulator batteries is in demand. It is advisable to carry out the specified process of forced discharge with recuperation into the network. This way of leads: firstly, to a decrease in the mass of charging and discharging devices due to the exclusion of powerful resistive loads from the latter; secondly, to noticeable energy savings for closed autonomous objects. At the same time, for the regenerative current, increased requirements are imposed on its sinusoidality, the distortion coefficient of which is significantly influenced by the relationship between the EMF of the battery and the amplitude of the mains voltage, the discharge current and the maximum current of the coil of the active rectifier. The influence the frequency of the PWM control signal and the frequency of the regeneration current (mains frequency) is also possible. In uninterruptible systems, storage batteries are used with different total EMF and capacity that determines the discharge current. In addition, the mentioned values change during operation, and at forced discharge, various technique can be used that differ in the ratio of the discharge current to the capacity of the battery and the law of its change. Therefore, in the development of a universal system for forced discharge of a battery into a network with pulse-width control of the regenerative current shape, is relevant information on the dependences of the distortion factor of the sinusoidality on the above ratios of the battery voltage and the amplitude of the mains voltage, the discharge current and the maximum current of the coil of the active rectifier coil, as well as from the number of pulses for the regeneration current period. The article presents the results of work on obtaining diagrams of these dependencies. To obtain the latter, the function of the output current of the active rectifier is formed – of the regeneration current, then its spectral function. Using the latter, the current waveform distortions are estimated based on the spectral approach. The results obtained are in demand in the development of program modules for microcontrollers of the pulse-width regulators of the regeneration current, which implement algorithms for the formation of a current curve with acceptable values of the distortion coefficient of the sinusoidality when changing the parameters of the battery, network and discharge current.

References

1. Baskakov S.I., *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. 5-e izd., stereotip.* [Radio technic circuits and signals]. Moscow, High school Publ., 2005, 462 p.
2. Berends D.A., Kukuliev R.M., Filippov K.K. *Pribory i sistemy avtomaticheskogo upravleniya s shirotno-impul'snoi modulyatsiei* [Automatic control appliances and systems with pulse-width modulation]. Leningrad, 1982, 280 p.
3. *Garmonicheskie iskazheniya v elektricheskikh setyakh* [Harmonic distortion in electrical networks]. *Schneider Electric. Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric*, 2018, iss. 22, 32 p. Available at: <http://www.pro-schneider.ru/content/files/140.pdf> (Accessed 31 August 2020).
4. Kamenev Yu.B., Lushina M.V., Yakovlev V.A., Leonov V.N. *Novyi svintsovo-kislotnyi akkumulyator dlya morskikh podvodnykh apparatov* [New lead-acid battery for marine submersibles]. *Electrochemical power engineering*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 166–170.
5. Konstantinov G.G., Fam Kong Tao, Kiselev V.I. *Tekhnicheskoe sovershenstvovanie avtonomnogo zaryadno-razryadnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa akkumulyatornykh batarei podvodnykh apparatov* [Technical improvement of the autonomous charging and discharging electro-

technical complex of underwater vehicles storage batteries]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 3(134), pp. 154–171.

6. Savchenko A.V. *Razrabotka korabel'noi avtomatizirovannoi sistemy kontrolya i dia-gnostiki akkumulyatornykh batarei dizel'-elektricheskikh podvodnykh apparatov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a ship's automated system for monitoring and diagnostics of storage batteries of diesel-electric underwater vehicles: Abstract of Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2007, 16 p.

7. Temirev A.P., Tsvetkov A.A., Kiselev V.I. i dr. *Mobil'nyi zaryadno-razryadnyi kompleks dlya korabel'nykh akkumulya-tornykh batarei* [Mobile charging and discharging complex for ship batteries], Patent RF, no. 2595267, 2015.

8. Petrovichev M.A., Gurtov A.S. *Sistema energosnabzheniya bortovogo kompleksa kosmicheskikh apparatov* [Energy supply system of onboard complex of spacecraft], Samara, Samara State Technical University Publ., 2007, 88 p.

9. Mishin V.N., Bubnov O.V., Rakitin G.A. i dr. *Zaryadno-razryadnoe ustroystvo dlya akkumulyatornykh batarei* [Charger-discharger device for battery], Utility model RF., no. 103427, 2010.

10. Chaplygin E.E. *Spektral'noe modelirovanie preobrazovatelei s shirotno-impul'snoi modulyatsiei* [Spectral modeling of pulse-width modulated converters], Moscow, MEI Publ., 2012, 48 p.

11. Chernaya M.M. *Issledovanie i razrabotka energopreobrazuyushchei apparatury vysokovol'tnykh sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of energy-converting equipment for high-voltage power supply systems for spacecraft: Cand. Diss.]. Tomsk, 2017, 142 p.

12. Chernaya M.M. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov s modulem zaryadno-razryadnogo ustroystva* [Power supply systems for spacecraft with a module of charge-discharge device]. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 163–166.

13. Shichkov L.P., Lyudin V.P., Mokhova O.P. *Avtomatizirovannyi zaryadno-razryadnyi tiristornyi preobrazovatel' dlya elektrotekhnologii regeneratsii akkumulyatornykh batarei* [Automated charger-discharger thyristor converter for electrical technologies of regeneration of battery]. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta*, 2013, no. 14(19), pp. 105–109.

SERGEY S. FROLOV – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Industrial Electronics and Information and Measuring Technology, Orenburg State University, Russia, Orenburg (frolovsergey7@mail.ru).

DMITRY A. SHATILOV – Master's Program Student, Electrical Power Faculty, Orenburg State University, Russia, Orenburg (dmitriyshatilov97@gmail.com).

Формат цитирования: Фролов С.С., Шатилов Д.А. Зависимости коэффициента искажения синусоидальности тока рекуперации от параметров процесса при управлении принудительным разрядом аккумуляторных батарей в сеть сигналом с одноканальной односторонней широтно-импульсной модуляцией // Вестник Чувашияского университета. – 2021. – № 1. – С. 146–153. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-146-153.