

## РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ LC-ФИЛЬТРА С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ И ДЛИННОГО КАБЕЛЯ

Турпак А.М., Ключников А.Т.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Пермь, e-mail: Turpak.Alexander@gmail.com

Целью данной работы является разработка методики расчёта и формирование критериев для выбора параметров синус-фильтра – пассивного устройства, состоящего из трёхфазного дросселя и батареи конденсаторов, соединённых треугольником. Новый метод должен позволять варьировать параметры фильтра исходя из текущих потребностей и энергетической эффективности при расчёте. Для расчётов принимается ряд допущений. Исследуется метод выбора параметров синусного фильтра на основе ограничения высокочастотного тока, протекающего через ёмкость, и ограничения падения напряжения на индуктивности. Получены расчётные значения индуктивности  $L_\phi = 12$  мГн и ёмкости конденсатора, при соединении звездой  $C_\phi = 6$  мкФ. Для исследования коэффициента нелинейных искажений и количественной оценки высокочастотных гармоник при использовании синусного фильтра в среде MATLAB составлена схема математической модели с учётом принятых допущений. Произведено исследование системы при различных параметрах фильтра, модулирующих частотах ( $f_m = 1, 2, 3$  кГц) и различных несущих частотах ( $f_n = 1,5$  Гц). По результатам исследований сделаны выводы относительно выбираемых параметров фильтра.

**Ключевые слова:** синус-фильтр, линейный цилиндрический двигатель, математическая модель, коэффициент нелинейных искажений, высокочастотные гармоники

## CALCULATION OF PARAMETERS OF LC-FILTER, TAKING INTO ACCOUNT THE LOAD PARAMETERS AND LONG CABLE

Turpak A.M., Kluchnikov A.T.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: Turpak.Alexander@gmail.com

The goal of this work is to develop methods of calculation and formation of the criteria for selecting the parameters of the sine-filter – a passive device, consisting of a three-phase inductor and a capacitor bank connected by a triangle. The new method allow to vary the filter parameters based on the current needs and energy efficiency in the calculation. Series of assumptions were made to simplify the calculations. We study the method of selecting the sine filter parameters based on the limitation of high-frequency current flowing through the capacity and limitations of the voltage drop across the inductance. We obtain the calculated values of inductance  $L_\phi = 12$  mH and capacitor capacitance in star connection  $C_\phi = 6$  uF. To investigate the THD and quantifying high frequency harmonics using a sine filter in MATLAB was drawn diagram of a mathematical model, taking into account the assumptions. Investigated the system under different filter parameters modulating frequencies ( $f_m = 1, 2, 3$  kHz) and the different carrier frequencies ( $f_c = 1,5$  Hz). According to the research conclusions are made regarding the selected filter settings.

**Keywords:** sine filter, linear cylindrical motor, mathematical model, harmonic distortion, high frequency harmonics

Электроэнергетика играет ключевую роль как в жизни человека, так и в промышленности. Однако ископаемые источники энергии являются основой для производства электрической (уголь, газ и нефть). Без использования электротехнических устройств их добыча затруднительна. В работе рассматривается составной блок нефтяной промышленности – добыча нефти из скважин, а именно повышение коэффициента полезного действия перспективных погружных установок [5] с линейными двигателями [8] за счёт качественной фильтрации подводимого напряжения.

Цилиндрический линейный вентильный двигатель (ЦЛВД) [8] используется для привода безштангового насоса в погружных установках для добычи нефти из скважин. Специфика использования данного двигателя заключается в длинной кабельной линии

(до 3 км) между непосредственно двигателем и преобразователем частоты (ПЧ). При его эксплуатации крайне важно высокое качество фильтрации, так как выходное линейное напряжение ПЧ содержит широкий спектр высокочастотных гармоник. Один из вариантов улучшения качества выходного напряжения – использование фильтра. Общая теория расчёта LC-фильтров излагается в [1, 4, 6]. В данной работе используется методика расчёта синусного фильтра в упрощённом варианте [4], исходя из резонансной частоты LC-контура, которая должна быть не менее чем в два раза меньше модулирующей частоты. Во многих случаях авторы рассматривают работу фильтра без учёта нагрузки.

Разработка методики расчёта синусного фильтра с учётом параметров нагрузки позволит повысить коэффициент полезного

действия погружных установок, а также учесть особенности работы потребителей с длиной кабельной линии. Отсюда следует, что разработка методики расчёта LC-фильтра с учётом длинной кабельной линии и нагрузки является актуальной задачей.

Высокая стоимость фильтра иностранных производителей, отсутствие отечественных аналогов, общий курс на импортозамещение и специфические условия эксплуатации вентильного линейного двигателя – основные причины для создания методики расчёта и выбора параметров индуктивности и ёмкости для погружной установки.

Также были поставлены задачи:

- сформировать критерии выбора параметров элементов синусного фильтра;
- расчётным путём определить характеристики выходного напряжения [7];
- проверить адекватность выбранных параметров с помощью математического моделирования в среде MatLab Simulink;
- исследовать работу фильтра при различных частотах модуляции и несущих частотах.

### Расчёт параметров синус-фильтра

Синусный фильтр состоит из трёхфазной индуктивности и ёмкости, соединённой по схеме «треугольник». Особенность этого фильтра заключается в том, что значение его частоты резонанса должно быть меньше половины от значения несущей частоты. В таком случае обеспечивается эффективное сглаживание и подавление высоких частот [7]. Синусный фильтр устраняет импульсные отражения в моторном кабеле, вследствие чего уменьшаются потери и обеспечивается надёжная и долговременная работа электродвигателей. В некоторых странах установка синус-фильтров обязательна.

Разработанная модель для исследования влияния параметров синус-фильтра представлена на рис. 1.

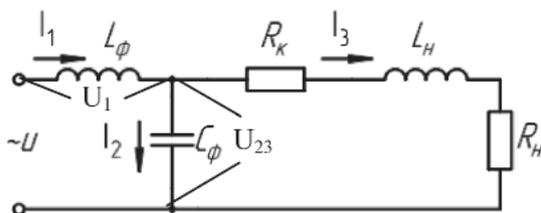


Рис. 1. Расчётная схема цепи:

$U$  – выходное напряжение преобразователя частоты;  $L_\phi$  и  $C_\phi$  – ёмкость и индуктивность синус-фильтра;  $R_k$  – активное сопротивление кабеля;  $R_n$ ,  $L_n$  – индуктивное и активное сопротивление нагрузки

Допущения, принятые в данной работе.

1. Использовалась однофазная схема замещения, так как нагрузка и питающий кабель симметричны.

2. Конденсаторы рассчитывались для схемы «звезда» с последующим пересчётом в «треугольник».

3. Индуктивное и ёмкостное сопротивление кабеля не учитывалось.

4. Двигатель представлен статической активно-индуктивной нагрузкой с параметрами, соответствующими началу пуска.

Согласно [3] в качестве индуктивности фильтра возможно использование индуктивности вторичных обмоток разделительных трансформаторов. При отсутствии трансформатора после преобразователя частоты необходимо выбирать индуктивность исходя из падения напряжения  $\Delta U \leq 5\%$  ( $U_{ном}$ ) на индуктивном элементе. Таким образом, индуктивное сопротивление

$$X_L \leq \frac{U \cdot 5\%}{I_{ном}}, \quad (1)$$

а индуктивность в свою очередь равна

$$L_\phi = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (2)$$

где  $f$  – рабочая частота ( $f = 5$  Гц).

Расчётное значение индуктивности в результате  $L_\phi = 12$  мГн.

Для разработанной схемы замещения получены значения токов и напряжений согласно основным законам электротехники. Расчётные значения представлены на графике (рис. 2).

Минимальное значение ёмкости определяется коридором допустимых значений высокочастотных гармоник тока, которые должны быть не более 10% от номинального тока [2].

Величина ёмкости  $C = 6,2$  мкФ, на границе коридора (рис. 2 т. А) удовлетворяет условиям критерия. Ёмкости пересчитываются для схемы соединения в треугольник, так как расчёт был для фазного тока в звезде. Таким образом, ёмкость конденсатора для треугольника равна  $C = 2$  мкФ.

### Моделирование синус-фильтра

Исследование синусного фильтра отдельно от нагрузки невозможно, так как параметры нагрузки, очевидно, будут влиять на качество выходного напряжения. Исходя из этого, необходимо составить математическую схему, с учётом ЦЛВД и кабеля. Так как величина ЭДС у неподвижного ЦЛВД равна нулю, двигатель представлен в виде эквивалентной активно-индуктивной нагрузки.

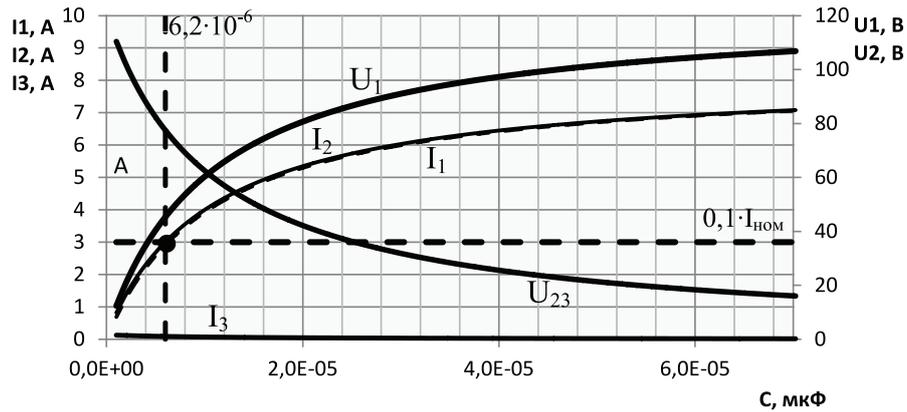


Рис. 2. Графики зависимостей токов и напряжений от величины ёмкости фильтра.  $U, I = f(C)$

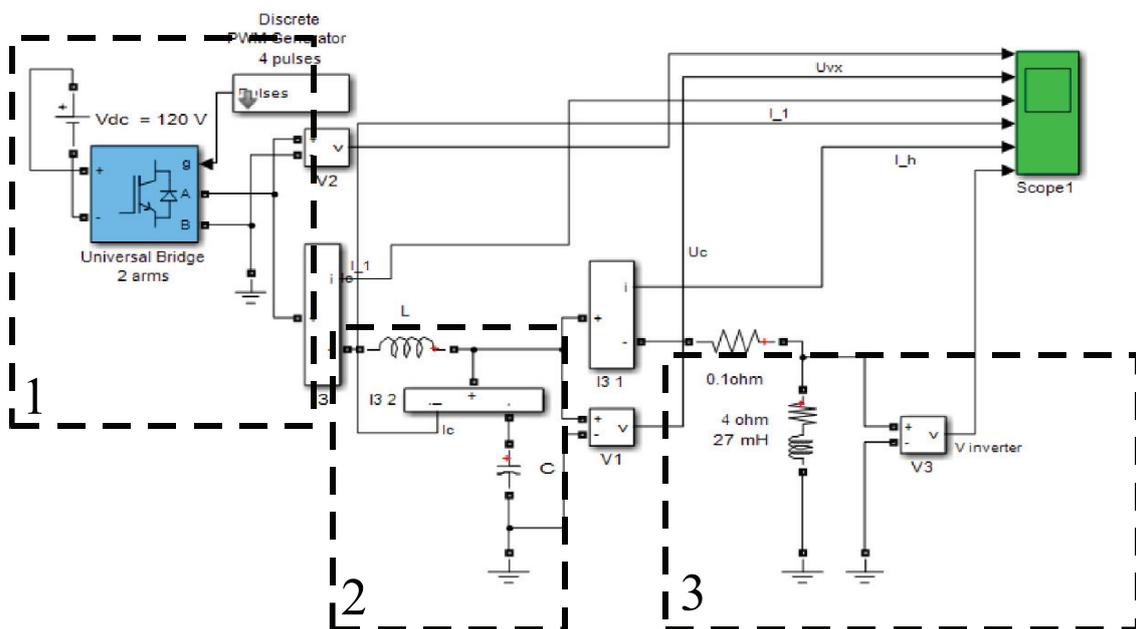


Рис. 3. Структурная схема ПЧ с SIN-фильтром:

1 – ШИМ-инвертор; 2 – синусный фильтр;  
3 – статическая нагрузка с параметрами ЦЛВД и с учётом активного сопротивления кабеля

Разработанная математическая модель представлена на рис. 3.

Для исследования рассчитанных параметров фильтра были взяты ещё три комбинации параметров фильтра  $L_\phi = 6$  мГн;  $C_\phi = 12$  мкФ;  $L_\phi = 2$  мГн;  $C_\phi = 12$  мкФ и  $L_\phi = 2$  мГн;  $C_\phi = 22$  мкФ. Для каждого варианта было произведено моделирование системы при различных соотношениях несущей и модулирующей частот. Результаты занесены в табл. 4 и табл. 5.

Для оценки качества фильтрации исследовался параметр THD с помощью инструмента FFT Analysis в среде MATLAB Simulink. THD – суммарный коэффициент нелинейных

искажений (КНИ) периодического сигнала в процентах. THD характеризует, в какой степени сигнал отклонён от синусоидальной формы, даёт количественную оценку нелинейных искажений периодического сигнала.

Полученные результаты КНИ, оциллограмма тока и спектр гармоник при  $L_\phi = 12$  мГн;  $C_\phi = 6$  мкФ;  $f_m = 1$  кГц;  $f_n = 1$  Гц и при  $L_\phi = 12$  мГн;  $C_\phi = 6$  мкФ;  $f_m = 1$  кГц;  $f_n = 1$  Гц представлены на рис. 4.

Расчётные значения КНИ, полученные с помощью инструмента FFT-Analysis, сведены в таблицу. Таблица содержит значения КНИ тока через дроссель, тока через нагрузку и напряжения на нагрузке.

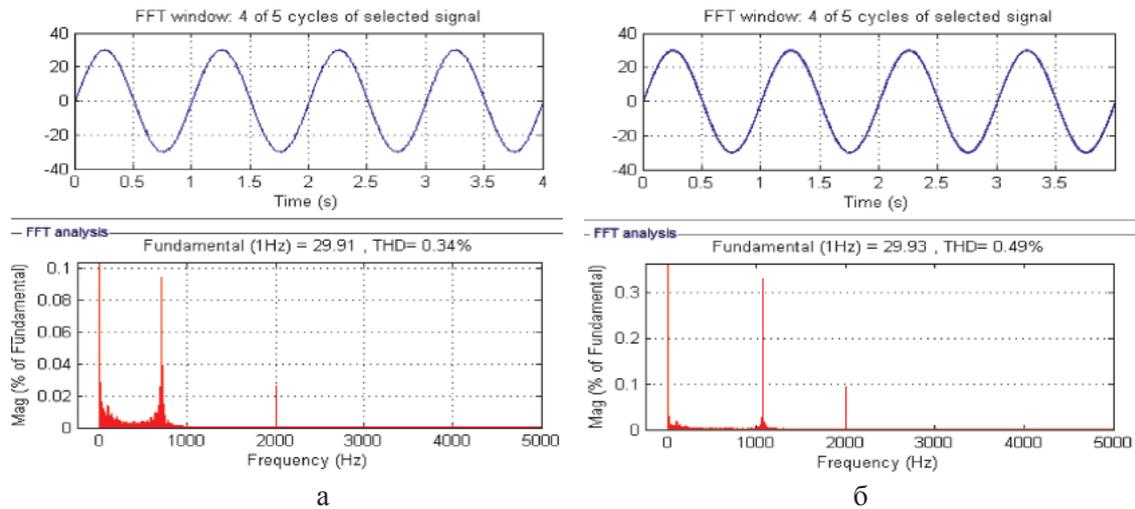


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений схемы:  
 а – при  $L_\phi = 12$  мГн;  $C_\phi = 6$  мкФ,  $f_m = 1$  кГц,  $f_n = 1$  Гц;  
 б – при  $L_\phi = 12$  мГн;  $C_\phi = 6$  мкФ,  $f_m = 1$  кГц;  $f_n = 1$  Гц

Результаты математического моделирования

$f_m$ , кГц	$f_n$ , Гц	$L_\phi = 12$ мГн; $C_\phi = 6$ мкФ					$L_\phi = 6$ мГн; $C_\phi = 12$ мкФ				
		$I_1$ , А	КНИ			$U_n$ , В	$I_1$ , А	КНИ			$U_n$ , В
			$I_1$ , %	$I_n$ , %	$U_n$ , %			$I_1$ , %	$I_n$ , %	$U_n$ , %	
1	1	29,91	1,32	0,34	6,58	119,7	29,92	2,78	0,37	8,80	119,8
	5	28,71	3,06	2,77	5,91	117,5	29,05	3,41	2,22	5,25	118,8
2	1	29,91	0,81	0,36	2,36	119,8	29,93	1,57	0,33	6,52	119,8
	5	28,71	2,86	2,78	4,37	117,5	29,06	2,63	2,23	4,45	118,9
3	1	29,91	0,51	0,30	2,60	119,8	29,93	1,03	0,27	4,01	119,8
	5	28,71	2,82	2,77	5,24	117,5	29,05	2,73	2,24	8,36	118,8
$f_m$ , кГц	$f_n$ , Гц	$L_\phi = 2$ мГн; $C_\phi = 12$ мкФ					$L_\phi = 2$ мГн; $C_\phi = 22$ мкФ				
		$I_1$ , А	КНИ			$U_n$ , В	$I_1$ , А	КНИ			$U_n$ , В
			$I_1$ , %	$I_n$ , %	$U_n$ , %			$I_1$ , %	$I_n$ , %	$U_n$ , %	
1	1	29,93	10,66	0,49	23,86	119,8	9,22	0,42	13,82	119,8	9,22
	5	29,25	15,72	2,09	43,63	119,6	11,03	1,94	19,08	119,6	11,03
2	1	29,93	8,94	0,64	27,47	119,8	4,08	0,25	5,37	119,8	4,08
	5	29,26	5,51	1,89	12,14	119,7	9,78	1,98	21,56	119,7	9,78
3	1	29,93	13,16	0,98	43,28	119,8	3,64	0,28	6,95	119,9	3,64
	5	29,25	6,21	1,91	17,80	119,6	4,89	1,88	9,36	119,6	4,89

Заключение

1. Показана методика расчёта параметров индуктивности и ёмкости согласно следующим критериям: величина индуктивности выбрана из условия допустимого на ней падения напряжения в номинальном режиме работы; ёмкость выбрана исходя из условия, что ток высокочастотных гармоник через конденсатор не должен превышать 10%, то есть  $I_c \leq 10\%$  от  $I_{ном}$ .

2. Расчётные параметры фильтра показали необходимость учёта параметров нагрузки в процессе проектирования данного фильтра.

3. Спроектированный синус-фильтр с рассчитанным вариантом  $L_\phi = 12$  мГн;  $C_\phi = 6$  мкФ и при частотах  $f_m = 2$  кГц;  $f_n = 5$  Гц имеет наименьшие значения коэффициента нелинейных искажений тока  $K_I = 2,78\%$  и напряжения  $K_U = 4,37\%$  на нагрузке.

4. При изменении параметров фильтра, для  $L_{\phi} = 6$  мГн;  $C_{\phi} = 12$  мкФ значения искажений на нагрузке практически не меняются ( $K_I = 2,23\%$  и напряжения  $K_U = 4,45\%$ ).

5. Уменьшение индуктивности, при неизменной ёмкости синус-фильтра влечёт практически пропорциональное увеличение коэффициента нелинейных искажений напряжения.

6. Показана необходимость обязательной установки синусного фильтра при использовании ПЧ с ШИМ.

### Список литературы

1. Барегамян Г., Маргарян В. Выбор параметров LC-фильтра инвертора с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением // Силовая электроника. – 2011. – № 29. – С. 50–56.

2. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.

3. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Вып. 4. – т. 324.

4. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров, предназначенных для исключения эффекта озонирования изоляции электродвигателей в частотно регулируемом электроприводе водяных насосных станций // Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт: Сборник трудов международной научно-практической конференции. – Чита: ЗаБИЖТ, 2011. – С. 8795.

5. Сравнительные исследования энергетических характеристик приводов погружных насосов с асинхронными и вентильными двигателями. Отчет НИР. – М.: РИТЭК-ИТЦ, 2009.

6. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности / В. Павленко, В. Климов, И. Климов // Силовая электроника. – 2010. – № 26. – С. 30–35.

7. Хабибуллин А.Т. Проявление высших гармоник при работе преобразователей частоты / А.Т. Хабибуллин, Д.О. Хасанов, Р.М. Мухутдинов // Вестник магистратуры. – 2016. – № 1(52). – С. 65–67.

8. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. Пермский

национальный исследовательский политехнический университет. – 2015. – Т. 1. – С. 158–162.

### References

1. Vybór parametrov LC-filtra invertora s širotno-impulsnoju moduljaciej i sinuso-idealnym vyhodnym naprjazheniem [Selection of the parameters of the inverter LC-filter with pulse-width modulation and sinusoidal output voltage] / Baregamjan G., Margarjan V. // Silovaja jelektronika. 2011. no. 29. pp. 50–56.

2. GOST R 54149–2010. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost tehničeskix sredstv jelek-tromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskox jenergii v sistemah jelektronsnabzhenija obshhego naznachenija [Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems.]. Moscow: Standartinform, 2012. 20 p.

3. Pustovetov M.Yu. Opyt razrabotki sinus filtra dlja silovox shemy chastotno reguli-ruemogo jelekdroprivoda [Experience in developing sine filter for the power circuits of frequency controlled electric drive] // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2014. vol. 4. 324 p.

4. Pustovetov M.Yu. Raschjot parametrov i kompjuter-noe modelirovanie sinusnyx filtrov, prednaznachennyx dlja isključenija jeffekta ozonirovanija izoljácii jelekdrodvigatelej v chastotno-reguliruemom jelekdroprivode vodjanyx nasosnyx stancij [The calculation of parameters and computer simulation of the sine filters, designed to eliminate the effect of ozonation electric insulation VFD of water pumping stations] // Problemy transferta sovremennyx tehnologij v jekonomiku Zabajkalja i zhelezodorozhnyj transport: Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskox konferencii. Chita: ZabIZhT, 2011. pp. 87–95.

5. Sravnitelnye issledovanija jenergetičeskix harakteristik privodov pogruzhnyx nasosov s asinhronnymi i ventilnymi dvigateljami (Research report. «Comparative studies of the energy characteristics of the drives of submersible pumps with asynchronous and brushless motors») Otchet NIR. Moscow: «RITJEK-ITC». 2009.

6. Sravnitelnyj analiz jelektromaginitnyx processov v strukturah jelekdroprivodov nefteobvayushhej promyšlennosti [Comparative analysis of electromagnetic processes in the structures of electric oil industry] / Pavlenko V., Klimov V., Klimov I. // Silovaja jelektronika. 2010. no. 26. pp. 30–35.

7. Habibullin A.T. Projavlenie vysshix garmonik pri rabote preobrazovatelej chastyty [The manifestation of the higher harmonics at the frequency converter] / A.T. Habibullin, D.O. Hasanov, R.M. Muhutdinov. // Vestnik magistratury. 2016. no 1(52). pp. 65–67.

8. Cilindricheskij linejnyj ventilnyj jelekdrodvigatel dlja pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Cylindrical linear motor valve for rodless submersible pump] / A.T. Ključnikov, A.D. Korotaev, N.V. Shulakov, S.V. Shutemov // Avtomatizacija v jelektrójenergetike i jelektrótehnike. Permskij nacionalnyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet. 2015, no. 1, pp. 158–162.