
ЛІТЕРАТУРА

1. Ширяев А.А. Применение тонкого грохочения для повышения качества железорудного концентрата на обогатительной фабрике горно-обогатительного комплекса "Арселор-Миттал Кривой Рог" / А.А. Ширяев, Е.Н. Нескоромный, А.И. Мироненко, С.А. Самохина, С.С. Старых // Вісник КНУ. – Кривий Рог, 2013.
2. Хміль І.В. Виробництво залізорудного концентрату в умовах РЗФ-1 ПАТ ПІВНГЗК з впровадженням у технологію збагачення операції тонкого грохочення / І.В. Хміль, О.В. Булах, О.Л. Костючик // Гірничий вісник. – № 97 – Кривий Ріг: КНУ, 2014. – С. 226-231.
3. Булах О.В., Хміль І.В., Булах О.О. Тонке грохочення як перспективний метод підвищення ефективності збагачення магнетитових кварцитів // Гірничий вісник. – 2015. – № 100. – С. 102-105.
4. Булах О.В. Визначення доцільності використання операції тонкого грохочення при збагаченні магнетитових кварцитів // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 67(108). – С. 49-56.
5. Пелевин А.Е. Тонкое грохочение и его место в технологи обогащения железных руд // Известия вузов. Горный журнал – 2011. – № 4. – С. 111-117.

УДК 621.314.5

СИНУС-ФИЛЬТР НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ: ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

М.Ю. Пустоветов

кандидат технических наук, инженер кафедры технологии машиностроения, Технологический институт (филиал) Донского государственного технического университета, г. Азов Россия, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Аннотация. В работе проведено исследование посредством компьютерного моделирования свойств синус-фильтра напряжения повышенной частоты при различных параметрах фильтра и системы электроснабжения, элементом которой он является. Даны рекомендации по выбору параметров фильтра и системы электроснабжения для наилучшего соблюдения электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: синус-фильтр, система электроснабжения, преобразователь частоты, компьютерное моделирование.

SINE-WAVE FILTER FOR INCREASED FREQUENCY OF VOLTAGE: FEATURES OF CHARACTERISTICS AND USAGE

Mikhail Pustovetov

Ph.D., Engineer of Engineering Technology Department, Technological Institute (Branch) of Don State Technical University, Azov, Russia, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Abstract. In this paper author suggests results of the study carried out by simulation of properties of sine-wave filter for increased frequency of voltage at various parameters of the filter and the power supply system, of which it is an element. Paper contains recommendations for parameters of filter and power supply system selection for the best compliance with electro-magnetic compatibility.

Keywords: sine-wave filter, electrical power supply system, frequency converter, simulation.

Введение. Известны используемые для питания автономных объектов системы электроснабжения (СЭ) [1, 2], содержащие в своем составе (рис 1 а)): источник симметричного трехфазного напряжения с частотой 50 Гц и действующим значением линейного напряжения 380 В; преобразователь частоты (ПЧ), состоящий из трехфазного входного выпрямителя 1 (диоды $VD7 - VD12$), звена постоянного напряжения 1 (Г-образный фильтр L_{d1}, C_{d1}) и трехфазного двухуровневого автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) ($IGBT$ -транзисторы $VT1 - VT6$ и диоды $VD1 - VD6$), в установившемся режиме работы частота основной гармоники напряжения на выходе ПЧ составляет $f_1 = 400...600$ Гц [3]; синус-фильтр (СФ) (трехфазный Г-образный фильтр $R_{LSF}, L_{SF}, C_{SF}, R_{CSF}$) [3, 4]; трехфазный повышающий трансформатор (Тр1); кабель-трос (R_C, L_C, C_C); трехфазный понижающий трансформатор (Тр2); трехфазный выпрямитель 2 (диоды $VD13 - VD18$); звено постоянного напряжения 2 (Г-образный фильтр L_{d2}, C_{d2}) и эквивалентную нагрузку в виде активного сопротивления R_{load} . Отметим, что выпрямитель 2 и звено постоянного напряжения 2 являются головной частью еще одного ПЧ, также содержащего АИН, питающий широко регулируемый электропривод (на рис 1 а) эти АИН и электропривод заменены сопротивлением R_{load}). В [1, 2] достаточно полно освещены многие аспекты проектирования таких СЭ за исключением вопроса о характеристиках СФ.

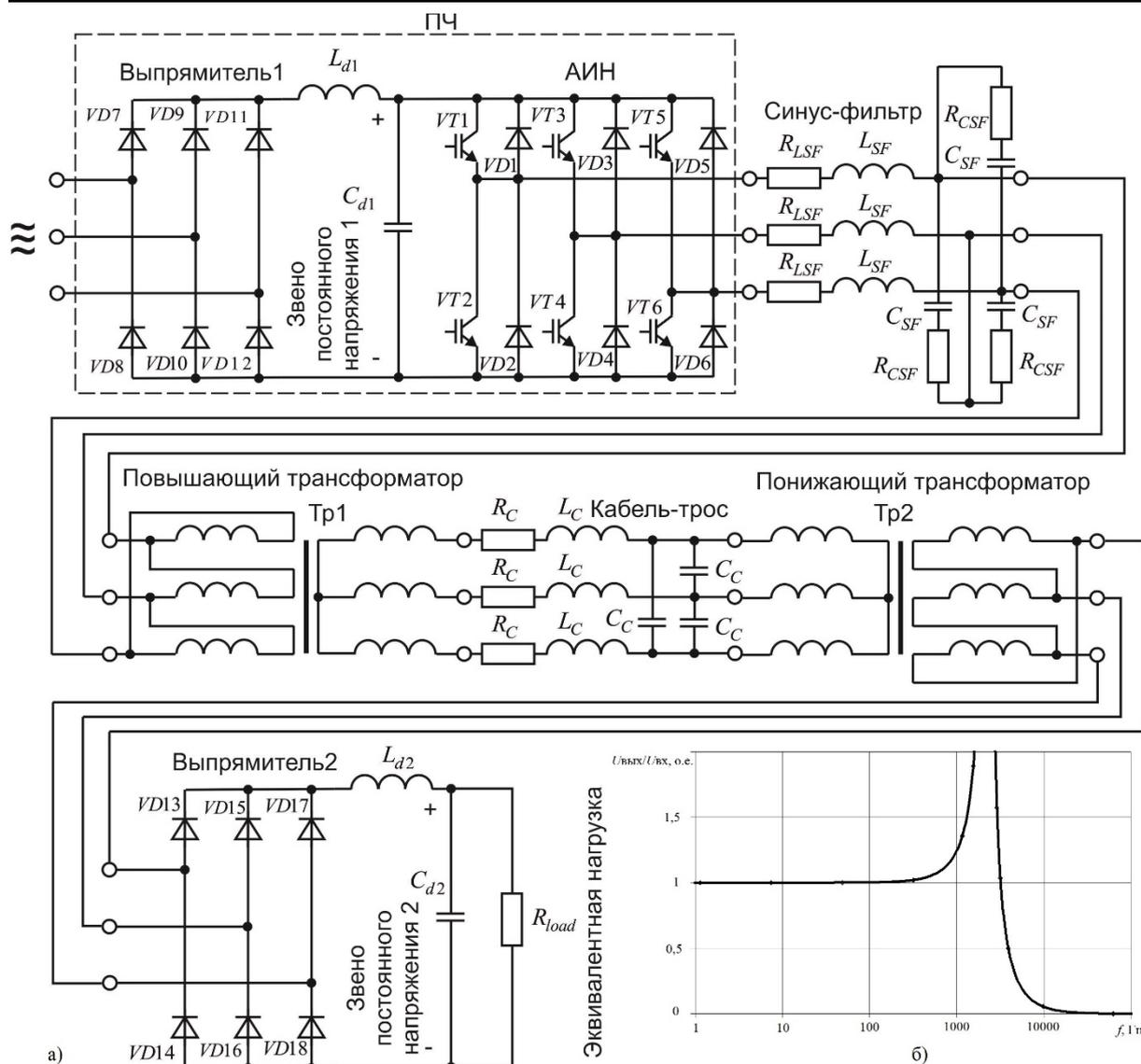


Рисунок 1 – а) схема электрическая принципиальная СЭ;
б) расчетная АЧХ СФ *Schaffner FN5020-75-35*

Цель работы. Требуется выявить особенности характеристик и использования СФ при повышенной частоте напряжения для их учета при разработке СЭ.

Материал и результаты исследований. Исследование производится методом компьютерного моделирования СЭ, изображенной на рис 1 а). Поскольку промышленностью изготавливаются СФ для повышенной частоты напряжения, имеет смысл проанализировать характеристики серийного СФ. Автору были любезно предоставлены параметры СФ *Schaffner FN5020-75-35*, измеренные специалистами ООО «МГ-Сервис» (г. Москва). Эти данные совместно с характеристиками, опубликованными в [5], сведены в табл 1, где $f_{рез}$ – резонансная частота СФ [3], $f_{ШИМ}$ – несущая частота ШИМ в АИН, U_K – падения напряжения в продольной ветви фазы СФ, рассчитанное

по выражению (1), $U_{ЛНОМ}$ – номинальное действующее значение линейного напряжения, $I_{НОМ}$ – номинальное действующее значение тока продольной ветви СФ (через цепь R_{LSF}, L_{SF}).

$$U_K = \frac{\sqrt{3}I_{НОМ} \sqrt{(2\pi f_1 L_{SF})^2 + r_{LSF}^2}}{U_{ЛНОМ}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Таблица 1 – Расчетные характеристики СФ *Schaffner FN5020-75-35*

f_1	$I_{НОМ}$	$U_{ЛНОМ}$	L_{SF}	R_{LSF}	C_{SF}	R_{CSF}	$f_{рез}$	$f_{ШИМ}$	$\frac{f_{ШИМ}}{f_{рез}}$	U_K
Гц	А	В	мГн	МОм	мкФ	МОм	кГц	кГц	о.е.	%
400	75	500	0,195	8,62	8,5	10	2,3	14	6,2	13
600										19

На рис 1 б) изображена расчетная АЧХ СФ *Schaffner FN5020-75-35*. В табл 2 сведены значения ординаты АЧХ для некоторых характерных частот.

Таблица 2 – АЧХ СФ *Schaffner FN5020-75-35*

$f, Гц$	400	2000	2800	600	3000	4200
№ гармоники	1	5	7	1	5	7
$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$, о.е. (в режиме ХХ)	1,03	5,21	1,87	1,08	1,30	0,40
$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$, о.е. (в номинальном режиме)	1,03	3,57	1,70	1,07	1,23	0,39

Из рис 1 б) и табл 2 видно, что основная гармоника напряжения попадает в зону усиления сигнала (в ту же область, кстати, попадают одна или обе наиболее низкочастотные высшие временные гармоники (ВВГ) напряжения: 5-я и 7-я). С точки зрения наименьшего усиления 5-й и 7-й ВВГ вариант с $f_1 = 600$ Гц предпочтителен по сравнению с вариантом при $f_1 = 400$ Гц.

На основании АЧХ можно уточнить требование по ограничению падения напряжения в продольной ветви фазы СФ, которое в [3] ограничивалось $U_K \leq 10\%$ во избежание чрезмерного ослабления основной гармоники напряжения. Учитывая усиление первой гармоники напряжения на выходе СФ, при необходимости можно допустить $U_K > 10\%$, что фактически имеет место для СФ *Schaffner FN5020-75-35* согласно данным табл 1. Таким образом, обоснована возможность использования некоторого увеличения L_{SF} в

случае необходимости снижения $f_{рез}$ с целью смещения резонансного пика АЧХ ниже диапазона рабочих частот основной гармонике СФ.

Согласно рекомендациям [3] автором были предложены параметры СФ (на тот момент автор не располагал параметрами *Schaffner FN5020-75-35*), приведенные в табл 3 (как и в случае с *Schaffner*, схема соединения емкостей фаз (ССЕФ) Δ). Рекомендации по выбору конденсаторов СФ приведены в [6].

Таблица 3 – Расчетные характеристики СФ, предложенных автором

L_{SF}	R_{LSF}	C_{SF}	R_{CSF}	$f_{рез}$	$f_{ШИМ}$	$\frac{f_{ШИМ}}{f_{рез}}$
мГн	мОм	мкФ	мОм	кГц	кГц	о.е.
0,16	11	8	10	2,6	14	5,5
		13		2,0		6,9

Далее на рис 2 – 6 приведены результаты компьютерного моделирования токов и напряжений СФ с параметрами согласно табл 3 в зависимости от мощности эквивалентной нагрузки СЭ. Моделирование проводилось при условии максимального использования выходного напряжения ПЧ при $f_1 = 600$ Гц. Нагрузка СЭ (на R_{load}) может изменяться от холостого хода до перегрузки 45 кВт. За номинальную мощность Тр1 приняты 36 кВА и 30 кВА для Тр2. В схеме отсутствует L_{d2} . На рис 2 – 6 принята следующая нумерация графиков: 1 – действующее значение спектра тока через L_{SF} при $C_{SF} = 8$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 24$ мкФ (ССЕФ Y); 2 – действующее значение спектра тока через L_{SF} при $C_{SF} = 13$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 39$ мкФ (ССЕФ Y); 3 – действующее значение 1-й гармоники тока через L_{SF} при $C_{SF} = 8$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 24$ мкФ (ССЕФ Y); 4 – действующее значение 1-й гармоники тока через L_{SF} при $C_{SF} = 13$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 39$ мкФ (ССЕФ Y); 5 – величина падения напряжения на продольной ветви фазы СФ от 1-й гармоники тока, % (за 100 % приняты 380 В), при $C_{SF} = 8$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 24$ мкФ (ССЕФ Y); 6 – величина падения напряжения на продольной ветви фазы СФ от 1-й гармоники тока, % (за 100 % приняты 380 В), при $C_{SF} = 13$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 39$ мкФ (ССЕФ Y); 7 – действующее значение спектра линейного тока на выходе СФ при $C_{SF} = 8$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 24$ мкФ (ССЕФ Y); 8 – действующее значение спектра линейного тока на выходе СФ при $C_{SF} = 13$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 39$ мкФ (ССЕФ Y); 9 – действующее значение 1-й гармоники линейного тока на выходе СФ при $C_{SF} = 8$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 24$ мкФ (ССЕФ Y); 10 – действующее значение 1-й гармоники линейного тока на

выходе СФ при $C_{SF} = 13$ мкФ (ССЕФ Δ) или $C_{SF} = 39$ мкФ (ССЕФ Υ); 11 – амплитудное значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 24$ мкФ; 12 – амплитудное значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 39$ мкФ; 13 – действующее значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 24$ мкФ; 14 – действующее значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 39$ мкФ; 15 – действующее значение 1-й гармоники тока через C_{SF} при $C_{SF} = 24$ мкФ; 16 – действующее значение 1-й гармоники тока через C_{SF} при $C_{SF} = 39$ мкФ (для графиков 11 – 16 ССЕФ Υ); 17 – амплитудное значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 8$ мкФ; 18 – амплитудное значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 13$ мкФ; 19 – действующее значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 8$ мкФ; 20 – действующее значение спектра тока через C_{SF} при $C_{SF} = 13$ мкФ; 21 – действующее значение 1-й гармоники тока через C_{SF} при $C_{SF} = 8$ мкФ; 22 – действующее значение 1-й гармоники тока через C_{SF} при $C_{SF} = 13$ мкФ; 23 – амплитудное значение спектра напряжения на цепочке C_{SF}, R_{CSF} при $C_{SF} = 8$ мкФ; 24 – амплитудное значение спектра напряжения на цепочке C_{SF}, R_{CSF} при $C_{SF} = 13$ мкФ (для графиков 17 – 24 ССЕФ Δ); 25 – амплитудное значение спектра напряжения на цепочке C_{SF}, R_{CSF} при $C_{SF} = 24$ мкФ; 26 – амплитудное значение спектра напряжения на цепочке C_{SF}, R_{CSF} при $C_{SF} = 39$ мкФ (для графиков 25 – 26 ССЕФ Υ).

На рис 7 – 10 показаны расчетные осциллограммы для некоторых установившихся режимов работы СЭ [7], когда СФ имеет параметры, указанные в табл 3 (ССЕФ Δ), $C_{d2} = 9000$ мкФ. Для рис 7 – 9 отсутствует L_{d2} , а для рис 10 $L_{d2} = 0,44$ мГн. Нумерация графиков на рис 7 – 10 следующая: 1 – линейное напряжение на выходе ПЧ (входе СФ); 2 – линейное напряжение на выходе СФ; 3 – линейное напряжение на обмотке низшего напряжения Тр2; 4 – напряжение на C_{d2} или на R_{load} ; 5 – напряжение на выходе выпрямителя 2.

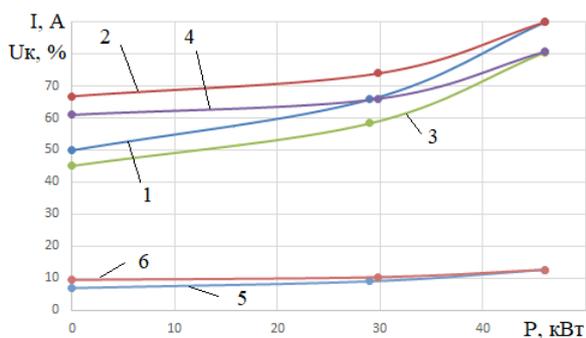


Рисунок 2 – Токи через L_{SF} и U_K

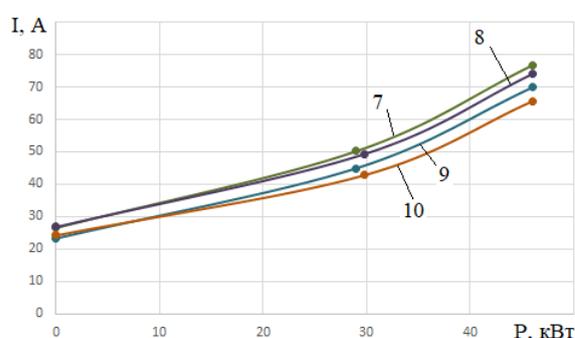
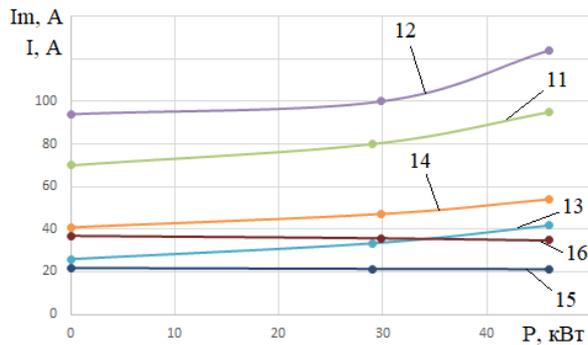
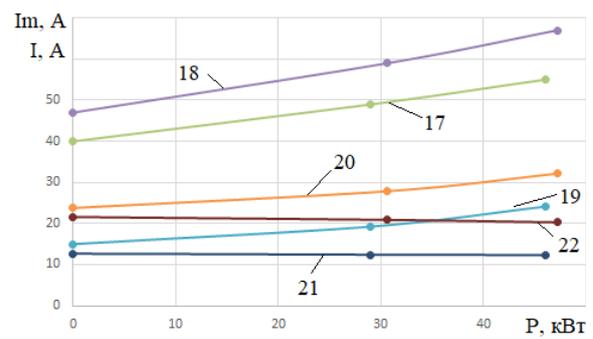
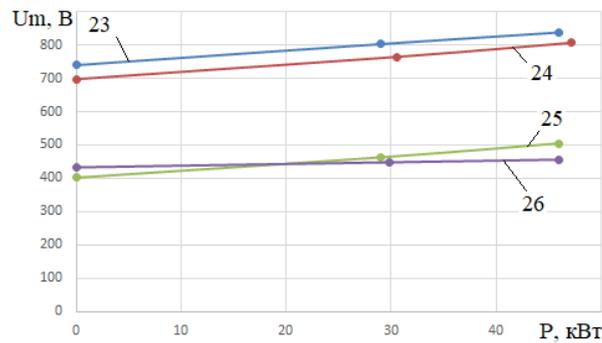


Рисунок 3 – Токи на выходе СФ

Рисунок 4 – Токи через C_{SF} (ССЕФ Y)Рисунок 5 – Токи через C_{SF} (ССЕФ

Δ)

Рисунок 6 – Амплитуды напряжений на цепочке C_{SF} , R_{CSF}

Анализ рис 7 – 10 показывает, что СФ эффективно удаляет из спектра напряжения ВВГ, обусловленные ШИМ. Тем не менее, при отсутствии L_{d2} синусоидальность напряжения на выходе СФ и далее по схеме рис 1 а) на рис 7 и 9 выглядит весьма относительной. Форма напряжений (графики 2 и 3) близка к синусоидальной лишь в режиме холостого хода (рис 8). С увеличением нагрузки форма графика 2 все более отклоняется от синусоиды.

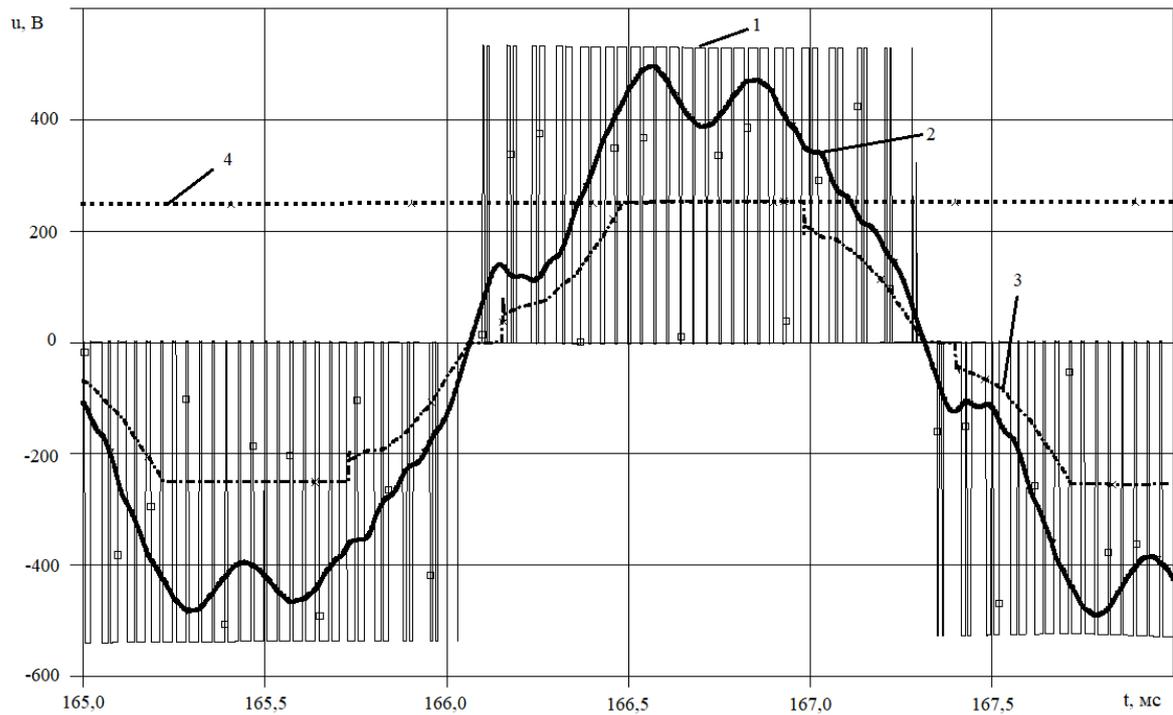


Рисунок 7 – Работа под нагрузкой при $f_1 = 400$ Гц при неполном напряжении на выходе ПЧ. $C_{SF} = 13$ мкФ

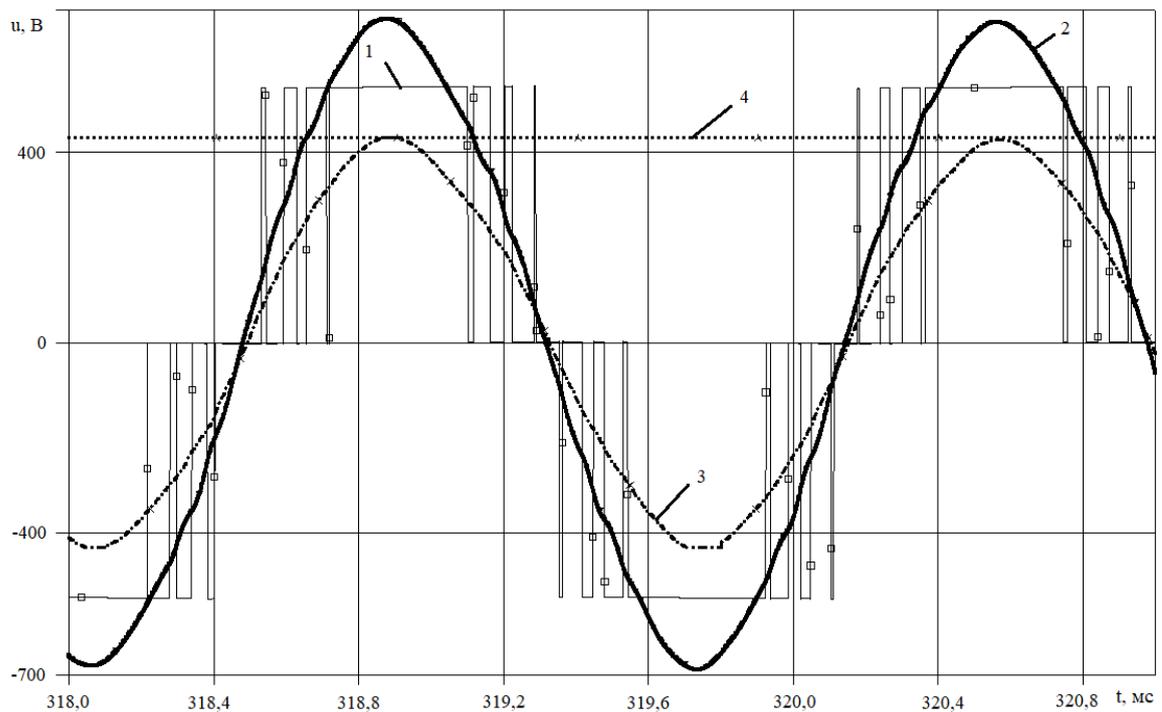


Рисунок 8 – Работа на холостом ходу и $f_1 = 600$ Гц при полном напряжении на выходе ПЧ. $C_{SF} = 13$ мкФ

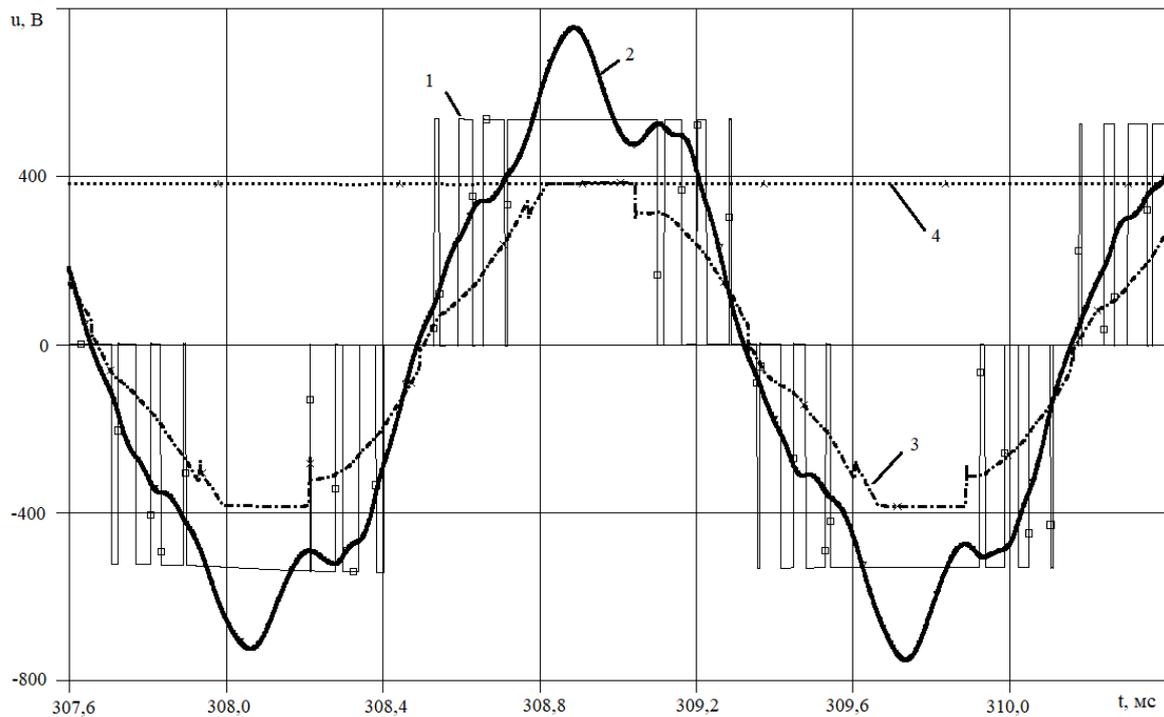


Рисунок 9 – Работа при эквивалентной нагрузке 30,6 кВт и $f_1 = 600$ Гц при полном напряжении на выходе ПЧ. $C_{SF} = 13$ мкФ

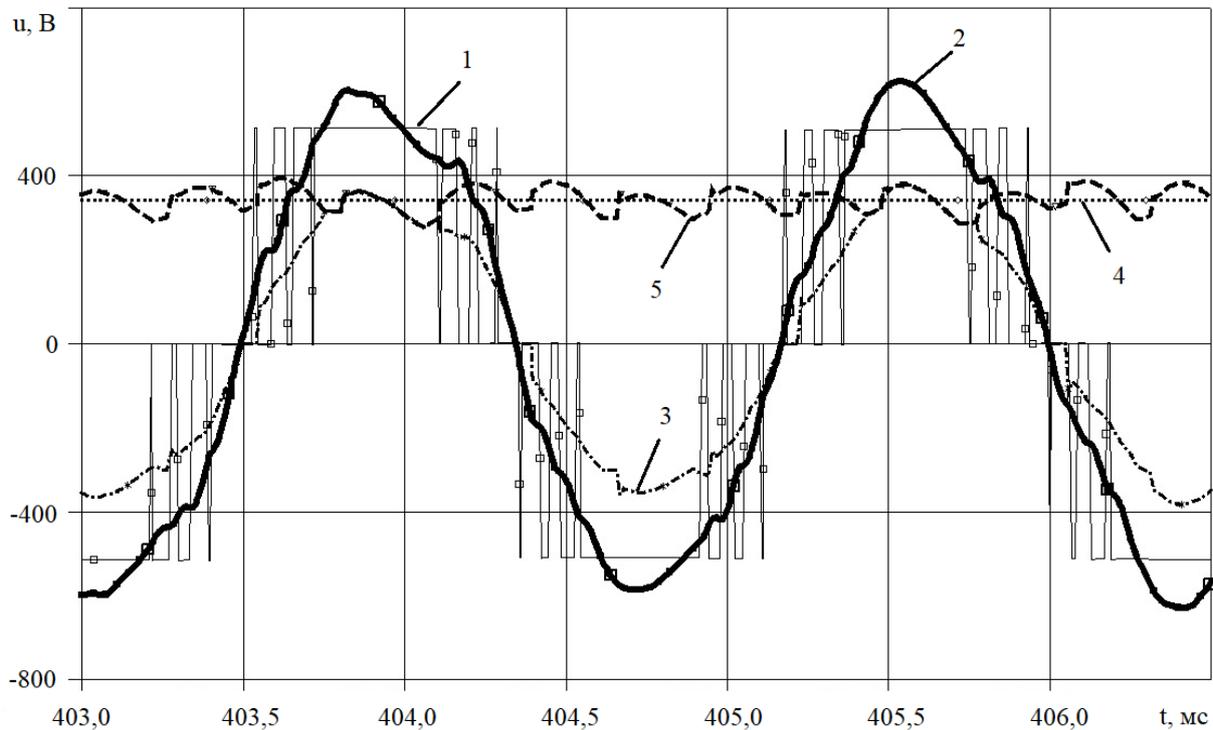


Рисунок 10 – Работа при эквивалентной нагрузке 24,4 кВт и $f_1 = 600$ Гц при полном напряжении на выходе ПЧ. $C_{SF} = 8$ мкФ

Как показывает гармонический анализ, это происходит за счет увеличения 5-й и 7-й ВВГ в спектре напряжения. Одновременно специфически деформируется график 3: у него появляется плоская (срезанная) вершина. Причем, абсолютная величина амплитуды графика 3 (плоская вершина) совпадает с участками графика 4 (рис 7 и 9).

То есть, если выпрямитель 2 СЭ нагружен непосредственно на C_{d2} , СФ способен обеспечить близкую к синусоиде форму выходного напряжения только в режиме холостого хода. Этот вывод подтверждается показанными на рис 11 опытными осциллограммами напряжений СЭ без L_{d2} , любезно предоставленными ООО «МГ-Сервис».

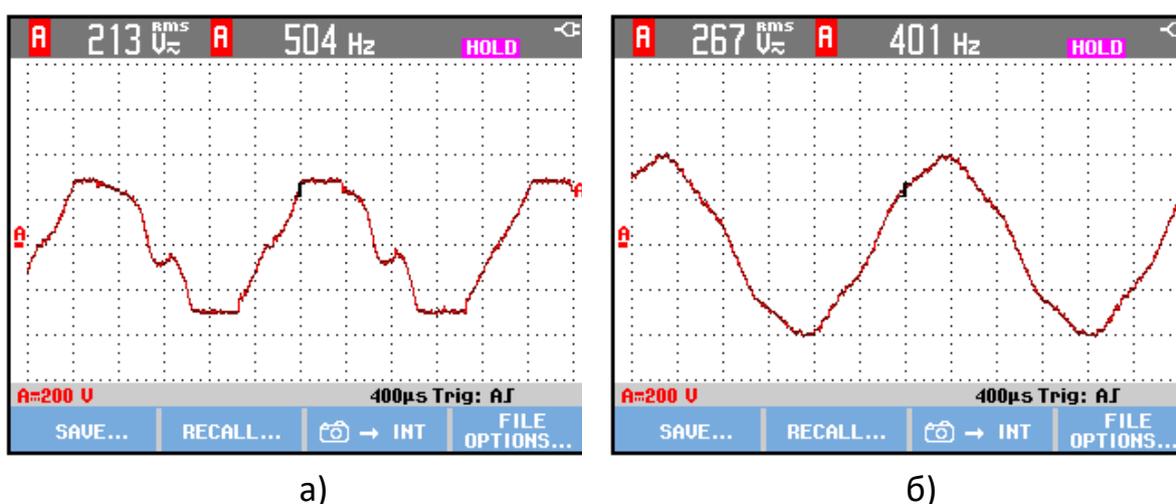


Рисунок 11 – Опытные осциллограммы напряжений СЭ при эквивалентной нагрузке 10 кВт и $L_{SF} = 0,09937$ мГн, $C_{SF} = 12$ мкФ.

а) линейное напряжение на обмотке низшего напряжения Тр2 при $f_1 = 504$ Гц; б) линейное напряжение на выходе СФ при $f_1 = 401$ Гц

На рис 10 вершина графика 3 совпадает с графиком 5, что способствует «скруглению» графика 3, делает его более подобным синусоиде, в том числе под нагрузкой. Аналогичные результаты получаются при моделировании СЭ с СФ типа *Schaffner FN5020-75-35* [7]. Положительный эффект от наличия L_{d1} в схеме СЭ аналогичен описанному в [8].

Вывод. 1) с помощью АЧХ можно уточнить требование по ограничению падения напряжения в продольной ветви фазы СФ. Учитывая усиление первой гармоники напряжения на выходе СФ, при необходимости можно допустить $U_K > 10\%$;

2) при работе СФ на выпрямитель простым способом минимизировать искажение напряжения на выходе СФ и на эквивалентной нагрузке СЭ во

всем диапазоне нагрузки является использование в звене постоянного напряжения 2 индуктивности L_{d2} . При ее отсутствии добиться синусоидальной формы напряжения на выходе СФ возможно только на холостом ходу, но под нагрузкой форма напряжения на выходе СФ и на эквивалентной нагрузке будет заметно искажена;

3) дополнительным положительным эффектом от использования L_{d2} является снижение амплитуды напряжения на C_{SF} [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Букреев В.Г. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса /В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, В.М. Рулевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 114 – 123.

2. Правикова А.А. Математическая модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе /А.А. Правикова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов, В.Г. Букреев // Доклады ТУСУРа, 2017. – Т. 20. – № 1. – С. 131 – 135.

3. Пустоветов М.Ю. Процедура выбора параметров синус-фильтра при повышенной частоте напряжения /М.Ю. Пустоветов // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта, 2019. – Т. 1. – № 1 (6). – С. 146 – 152.

4. Пустоветов М.Ю. Имитационное моделирование явлений во вспомогательном асинхронном электроприводе электроподвижного состава: монография. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. – 159 с.

5. Sine wave filters FN 5020 - SCHAFFNER Group - PDF Catalogs [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/pdf/schaffner-group/sine-wave-filters-fn-5020/15134-878671.html>

6. Пустоветов М.Ю. Выбор конденсаторов для использования в выходных фильтрах электромагнитной совместимости преобразователей частоты /М.Ю. Пустоветов // Наука, образование, инновации: пути развития : материалы Десятой национальной (все-российской) научно-практической конференции (21–23 мая 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2019. – С. 38 – 40.

7. Пустоветов М. Ю. Компьютерное моделирование вариантов системы электро-снабжения, содержащей преобразователь частоты и синус-фильтр /М.Ю. Пустоветов // Международная научно-практическая конференция "Наука, образование, культура" : сборник статей – Комрат : КГУ, 2020. – Т. 1 : Экономические науки. Сельское хозяйство и перерабатывающая промышленность. Информационные технологии, математика и физика. – С. 495 – 499. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kdu.md/images/Files/sbornik-statey-29-2020-1.pdf>

8. Пустоветов М.Ю. Сравнительный анализ влияния индуктивности Г-образного фильтра в звене постоянного напряжения преобразователей частоты различной мощности на потребляемый из сети ток /М.Ю. Пустоветов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2018. – № 12. – С. 8 – 14.