
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3

С.В. Хворостенко, М.А. Авербух

СИНТЕЗ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

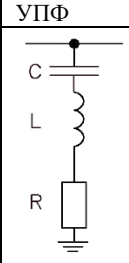
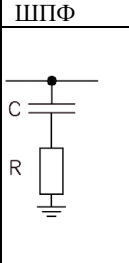
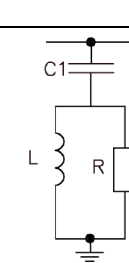
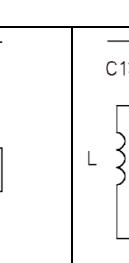
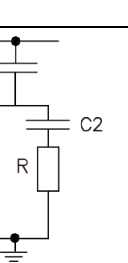
При осуществлении технологического процесса производства железобетонных изделий широко используется частотный электропривод, что позволяет добиться необходимого качества изделий. Однако частотный электропривод является источником высших гармоник токов и напряжений. В статье рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей с цеховой системой электроснабжения за счет использования пассивных фильтров. Представлена схема системы электроснабжения цеха с установкой пассивных фильтров. Аналитически и с помощью имитационного моделирования проведены исследования с целью определения наиболее оптимальных типов и параметров фильтров. Для проведения теоретических исследований использован метод оптимизации на базе теории нечетких множеств. Для выбора оптимальных типов фильтров сформированы критериальные оценки в виде лингвистических переменных, характеризующих альтернативные варианты установок. С помощью имитационного моделирования показано, что подключение на шины трансформаторной подстанции узкополосных фильтров (УПФ) и широкополосных фильтров (ШПВ) второго порядка позволяют снизить суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения до 8,65 % и 3,41 % соответственно. Сделан вывод, что более эффективным средством для снижения гармонических составляющих токов является использование параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Ключевые слова: высшие гармоники токов и напряжений, нелинейные потребители, пассивные фильтры, показатели электромагнитной совместимости, частотные характеристики сети.

1. Введение

Широкое применение статических преобразователей частоты в регулируемом электроприводе для выполнения технологических процессов и обеспечения заданного качества продукции привело к искажению синусоидальности токов и напряжений в цеховых системах электроснабжения. Это, в свою очередь, приводит к целому ряду негативных последствий [1, 2]. Следствием является, например, увеличение потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения, уменьшению срока службы оборудования, снижению энергетических показателей потребления электроэнергии и т.д. Одним из способов снижения влияния высших гармоник токов и напряжений является их компенсация различного рода пассивными фильтрокомпенсирующими устройствами (ПФКУ). Основные типы ПФКУ представлены в табл. 1 [3, 4]: УПФ, для компенсации единичных канонических высших гармоник; ШПФ первого, второго, третьего порядка, предназначены для подавления высших гармоник; фильтр С-типа, для компенсации высших гармоник тока в более высоком диапазоне частот.

Таблица 1.
Схемы ПФКУ

Пассивные фильтры компенсирующих устройств гармоник				
УПФ	ШПФ			С – типа
				

II. Расчетная схема

На рис. 1 приведена схема системы электроснабжения завода по производству железобетонных изделий. Основной особенностью представленной схемы является наличие большого количества нелинейной нагрузки в виде частотных электроприводов на базе полупроводниковый преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД).

Характеристики оборудования и типы электроприемников представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Характеристики применяемого оборудования

Наименование оборудования	Паспортные данные электроприемников					
	Тип электропривода/преобразователя частоты	$P_{ном}$, кВт	$I_{ном}$, А	Угловая скорость n , об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos\phi$
Станок распила	АИР/ Delta VFD	30,0	57,3	2880	90,5	0,89
Мостовые краны		23,0	48,0	750	76,5	0,71
Конвейер протягивания		18,5	38,0	1000	89,0	0,81
Виброплощадка		30,0	57,3	1470	91,5	0,87
Компрессор		110,0	198,0	2980	93,7	0,90

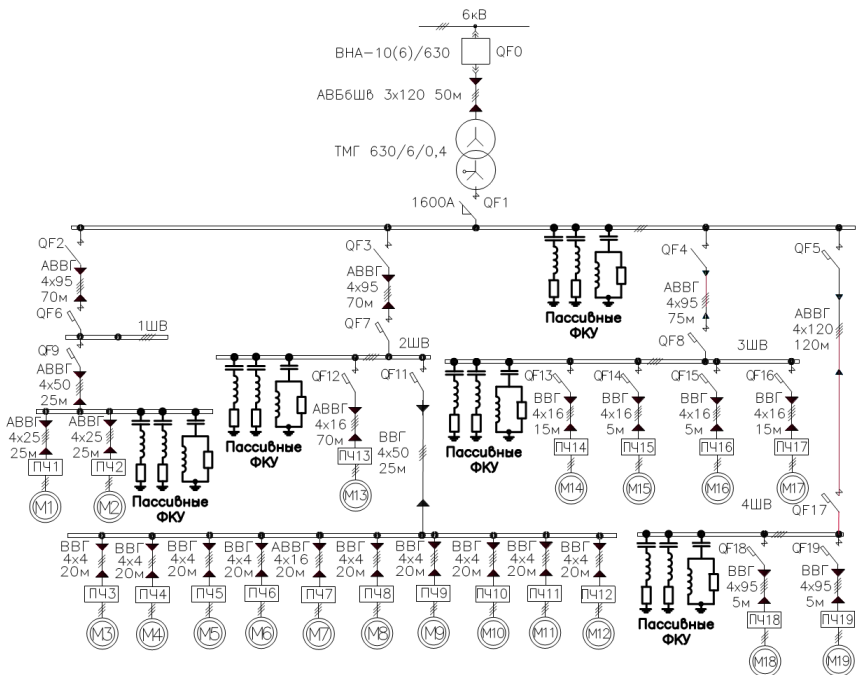


Рис. 1. Схема цеховой системы электроснабжения промышленного предприятия по производству железобетонных изделий

Результаты расчетов, экспериментов и имитационного моделирования подтвердили наличие искажения токов и напряжений на всех участках цеховой системы электроснабжения, где подключены нелинейные потребители. Так суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения соответственно составили $K_I = 40 \div 45 \%$, $K_U = 6,7 \div 8,85 \%$ [5, 6].

Так как ПФКУ являются простейшими и основными видами фильтрокомпенсирующих устройств, то синтез их параметров и выбор места установки представляется важной задачей, решение которой зависит от конфигурации сети, величины тока искажения и необходимости компенсации реактивной мощности.

Для выбора оптимальных типов ПФКУ и места их установки в условиях, отягощенных большим количеством нечеткой информации о режимах цеховой системы электроснабжения, применен метод оптимизации на базе теории нечетких множеств [7].

III. Выбор типа ПФКУ

Нечеткие множества применяются как формальный аппарат обработки высказываний естественного языка для придания конкретного математического смысла результатам экспертной оценки. На основании анализа опыта применения ПФКУ и их эксплуатационных свойств и [8-10] в виде лингвистических переменных сформированы следующие критериальные оценки (K_i), характеризующие альтернативные варианты ПФКУ (F_i):

- стоимость ПФКУ [0:800] у.е. – K_1 ;
- свойство амплитудно-частотной характеристики [0:100] % – K_2 ;
- потери мощности в ПФКУ [0:1] кВт – K_3 ;
- способность компенсации реактивной мощности [0:100] % – K_4 .

Степень соответствия альтернативы, определяемому критерию K_i может быть рассмотрено как нечеткое множество:

$$K_i = \{ \mu_{K_i}(F_1) / F_1, \mu_{K_i}(F_2) / F_2, \dots, \mu_{K_i}(F_n) / F_n \}, \quad (1)$$

где F_n – альтернативные варианты типов ПФКУ, $\mu_{K_i}(F_n)$ [0, 1] – функция принадлежности альтернативы F_n по критерию K_i .

Если имеется i критериев K_1, K_2, \dots, K_i , то выбор наилучшей альтернативы можно записать в виде пересечения соответствующих нечетких множеств K_i , которое соответствует нахождению минимума функции принадлежности:

$$M = K_1 \cap K_2 \cap \dots \cap K_i. \quad (2)$$

Оценки альтернативных вариантов ПФКУ, а именно УПФ на гармонике 5 и 7 (F_1), УПФ и ШПФ второго порядка (F_2), УПФ и фильтра С-типа (F_3) по сформированным критериям представлены в табл. 3.

Таблица 3.
Оценка типов ПФКУ по критериям

Тип ПФКУ	K_1	K_2	K_3	K_4
Подключение на шинах трансформаторной подстанции				
F_1	0,59	0,70	0,60	0,77
F_2	0,70	0,75	0,74	0,84
F_3	0,79	0,82	0,68	0,89
Подключение около вводных шкафов				
F_{11}	0,63	0,72	0,64	0,79
F_{22}	0,69	0,78	0,77	0,88
F_{33}	0,82	0,84	0,69	0,92

На рис. 2 представлена оценка альтернатив по критериям равной степени важности.

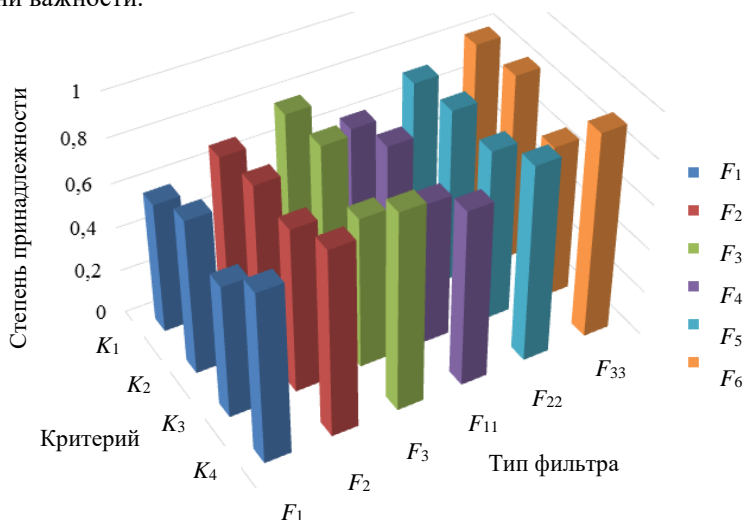


Рис. 3. Оценки альтернатив по критериям равной степени важности

Нечеткое множество из функций принадлежности альтернативных типов ПФКУ по критериям составлено на основании (1):

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \{0,59 / F_1; 0,7 / F_2; 0,79 / F_3; 0,63 / F_{11}; 0,69 / F_{22}; 0,82 / F_{33}\}; \\
 K_2 &= \{0,7 / F_1; 0,75 / F_2; 0,82 / F_3; 0,72 / F_{11}; 0,78 / F_{22}; 0,84 / F_{33}\}; \\
 K_3 &= \{0,6 / F_1; 0,74 / F_2; 0,68 / F_3; 0,64 / F_{11}; 0,77 / F_{22}; 0,69 / F_{33}\}; \\
 K_4 &= \{0,77 / F_1; 0,84 / F_2; 0,89 / F_3; 0,79 / F_{11}; 0,88 / F_{22}; 0,92 / F_{33}\}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Выбор решения осуществляется согласно (2):

$$\begin{aligned}
 M &= \\
 &= \max \left\{ \begin{array}{l} \min (0,59; 0,7; 0,6; 0,77 / F_1); \min (0,63; 0,72; 0,64; 0,79 / F_{11}); \\ \min (0,7; 0,75; 0,74; 0,84 / F_2); \min (0,74; 0,78; 0,77; 0,88 / F_{22}); \\ \min (0,79; 0,82; 0,68; 0,89 / F_3); \min (0,82; 0,84; 0,69; 0,92 / F_{33}); \end{array} \right\} = \tag{4} \\
 &= \max \{0,59 / F_1; 0,7 / F_2; 0,68 / F_3; 0,63 / F_{11}; 0,69 / F_{22}; 0,69 / F_{33}\}.
 \end{aligned}$$

В результате нахождения \max (4) определен оптимальный вариант использования альтернативы F_2 установленного на шинах трансформаторной подстанции (ТП):

$$F_2 = \{0,7; 0,75; 0,74; 0,84\}.$$

Таким образом, к установке предлагается вариант с комбинацией УПФ настроенного на компенсацию 5-й, 7-й гармоник и ШПФ настроенного на компенсацию гармоник начиная с 11.

IV. Частотные характеристики системы электроснабжения – пассивные фильтры

Как следует из табл. 1, УПФ одной частоты представляет собой RLC – цепочку, настроенную на частоту одной гармоники. Коэффициент передачи тока во внешнюю сеть фильтром имеет вид [11]:

$$F_{\text{УПФ}}(s) = \frac{s^2 + R \cdot C \cdot s + 1}{C \cdot (L + L_C) \cdot s^2 + (R + R_C) \cdot C \cdot s + 1}, \tag{5}$$

где R_C , L_C – активное сопротивление и индуктивность внешней сети соответственно.

Коэффициент передачи тока во внешнюю сеть ШПФ имеет вид:

$$F_{\text{ШПФ}}(s) = \frac{s^2 \cdot L \cdot R \cdot C + s \cdot L + R}{s^3 \cdot L_C + s^2 \cdot [(L + L_C) \cdot R \cdot C + L \cdot C \cdot R_C] + s \cdot (L + C \cdot R \cdot R_C) + R}. \quad (6)$$

Расчет УПФ для 5-й и 7-й гармоник и ШПФ второго порядка выполнен в соответствии с [12]. В табл. 4 представлены результаты расчетов УПФ.

Таблица 4.
Параметры УПФ и ШПФ второго порядка

Место подключения	№ компенсируемой гармоники	L_n , мГн	C_n , мкФ	R_n , мОм	Q_{LC} , квар	ΔP_{Σ} , кВт
Шины ТП	5	0,241	1681	9,475	88	0,298
	7	0,204	1013	11	52	0,172
	≥ 10	0,085	1194	377	60	0,723

Примечание: ΔP_{Σ} – суммарные потери активной мощности в элементах УПФ.

На основании рассчитанных параметров фильтров на рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) «Система электропитания – УПФ, ШПФ».

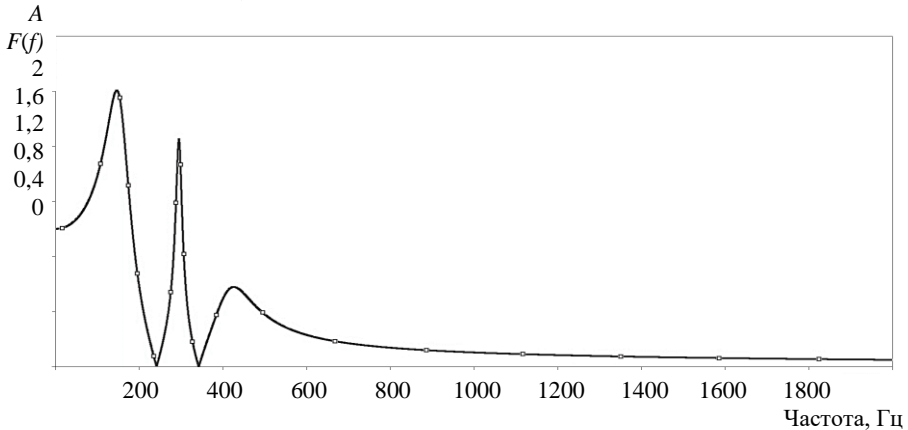


Рис. 4. АЧХ системы УПФ и ШПФ второго порядка – питающая сеть

Как следует из рис. 4, в районе частот 180 Гц, 300 Гц наблюдаются резонансные явления, возникающие в результате установки УПФ. Использование ШПФ второго порядка снижает амплитуду высших гармоник и исключает появление резонанса на частотах более 500 Гц.

В результате имитационного моделирования с применением УПФ и ШПВ второго порядка, подключенного на шинах ТП, установлено снижение суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения до 8,65 % и 3,41 % соответственно.

У. Заключение

Таким образом, использование ПФКУ в цеховой системе электроснабжения позволяет снизить амплитуды нежелательных высокочастотных гармонических составляющих. Однако циклический режим работы оборудования при производстве железобетонных изделий предопределяет паузы в работе нелинейных электроприемников. При этом включенные ПФКУ вносят риск перекомпенсации реактивной мощности и возникновения резонансных явлений, образованных емкостью фильтра и индуктивностью сети. В результате работы подтверждено, что более эффективным средством для снижения гармонических составляющих токов является использование параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства.

© Авербух М.А., 2019

© Хворостенко С.В., 2019

Библиографический список

- [1] Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Молот С.В. Влияние частотно-регулируемого электропривода на питающую сеть // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 29-34.
- [2] Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Борисов Б.П. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. Киев: Наукова Думка, 1992. – 236 с.
- [3] Das J. Passive filters – potentialities and limitations // IEEE Transaction on Industry Applications. 2004. № 40 (1). P. 232-241.
- [4] Авербух М. А., Жилин Е.В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54-57.
- [5] Авербух М.А., Жуков Н.А., Хворостенко С.В. Оценка уровня высших гармоник токов и напряжения в электрических сетях заводов железобетонных изделий // Научное обозрение. 2016. № 7. С. 79-86.
- [6] Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 24-31.
- [7] Борисов А. Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
- [8] Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant // IEEE Transaction on Industry Applications. 2011. № 47 (2). P. 973-983.

- [9] Arrillaga J., Watson N.R. Power systems harmonics. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2003.
- [10] Ермоленко Д.В., Молин Н.И., Павлов И.В. Исследование многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях // Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 7. С. 44-47.
- [11] Phipps J.K. A transfer function approach to harmonics filter design // IEEE Industry Application Magazine. 1997. № 3 (2). P. 68-82.
- [12] Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.

S.V. Khvorostenko, M.A. Averbuk

**SYNTHESIS OF PASSIVE FILTER – COMPENSATING
DEVICES FOR ATTENUATION HIGHER HARMONICS
IN POWER SUPPLY SYSTEM OF WORKSHOP
WITH NON-LINEAR CONSUMERS**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

Abstract. Frequency electric drive is widely used in the technological process of production of reinforced concrete products, which allows to achieving necessary quality of products. However, the frequency drive is a source of higher harmonics of currents and voltages. The article deals with the issues of electromagnetic compatibility of non-linear consumers with the workshop power supply system through the use of passive filters. The scheme of workshop power supply system with installation of passive filters is presented. The most optimal types and parameters of filters were identified analytically and by means of simulation modeling. The optimization method based on the fuzzy set theory is used for theoretical research. Criteria estimates in the form of linguistic variables characterizing alternative installations are formed to select the optimal filter types. It is shown that the connection of narrowband filters and broadband filters of the second order to the bus of transformer substation can reduce the total coefficients of the harmonic components of current and voltage to 8.65% and 3.41%, respectively. It is concluded that the use of a parallel active filter-compensating device is a more effective means to reduce the harmonic components of the currents.

Keywords: frequency responses of network, higher harmonics of currents and voltages, indicators electromagnetic compatibility, non-linear consumers, types of passive filters.

References

- [1] I.I. Artjukhov, I.I. Bochkareva and S.V. Molot, «Influence of frequency-regulated electric drive of ventilators on the feeding network», *Science Review*, vol. 4, pp. 29-34, 2015.
- [2] A.K. Shidlovsky, G.Y. Vagin and B.P. Borisov, *Elektromagnitnaya sovместimost' elektropriyemnikov promyshlennykh predpriyatiy*. Kiev: Naukova Dumka, 1992 (in Russian).
- [3] J. Das, «Passive filters – potentialities and limitations», *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 232-241, Jan./Feb. 2004.
- [4] M.A. Averbukh and E.V. Zhilin, «O poteryakh elektroenergii v sistemakh elektro-snabzheniya individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva», *Energetika*, vol. 6, pp. 54-57, 2016.
- [5] M.A. Averbukh, N.A. Zhukov and S.V. Khvorostenko, «Evaluation of higher harmonics level of currents and voltages in electrical networks of concrete products plants», *Science Review*, vol. 7, pp. 79-86, 2016.
- [6] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and S.V. Khvorostenko, «Experimental study of non-sinusoidal manufactory works power supply systems in dynamic formation vibrating concrete mixtures», *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 1, no. 34, pp. 24-31, 2017.
- [7] A.N. Borisov, *Obrabotka nechetkoy informatsii v sistemakh prinyatiya resheniy*. Moscow: Radio and communication, 1989 (in Russian).
- [8] D. Badrzadeh, K. Smith and R. Wilson, «Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant», *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 47, no 2, pp. 973-983, March/Apr. 2011.
- [9] J. Arrillaga and N.R. Watson, *Power systems harmonics*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2003, P. 412.
- [10] D.V. Ermolenko, N.I. Molin and I.V. Pavlov, «The analysis of power loss in the catenary system under shunt capacitive compensation», *Vestnik of the Railway Research Institute*, vol. 7, pp. 44-47, 1991.
- [11] J.K. Phipps, «A transfer function approach to harmonics filter design», *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 68-82, Apr. 1997.
- [12] N.P. Boyarskaya, V.P. Dovgun and D.E. Yegorov, *Sintez fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektro-snabzheniya*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2014 (in Russian).