

УДК 621.31

А.В. Погорелов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУДНИЧНОЙ СЕТИ С ПАССИВНЫМИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В сетях с мощными нелинейными электроприемниками (например, тиристорный электропривод скиповых и клетевых подъемных установок) широко применяются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства для подавления гармонических составляющих тока и напряжения и компенсации реактивной мощности. В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности работы данных устройств в рудничных сетях. Для выявления возможности возникновения нежелательных резонансных явлений в рудничной сети с пассивными фильтрами аналитически и с помощью имитационного моделирования проведено исследование амплитудно-частотных характеристик высоковольтной сети рудодобывающего предприятия. Для анализа частотных характеристик исходная сеть представляется схемой замещения в виде пассивного четырехполюсника, для упрощения которой применяется метод последовательных эквивалентных преобразований. В результате исследований подтверждено, что в сети возникают резонансные явления в связи с установкой пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. На основании полученных данных сделан вывод о необходимости использования устройств, позволяющих осуществлять коррекцию частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов. Предлагается использовать активные или гибридные фильтрокомпенсирующие устройства.

Ключевые слова: пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, резонансные явления, рудничная сеть, частотные характеристики сети.

1. Введение

Работа регулируемых скиповых и клетевых подъемных установок сопровождается генерацией высших гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтных рудничных сетях [1]. Данная проблема в большинстве случаев решается за счет применения специальных технических средств повышения качества электрической энергии [2].

Одними из наиболее распространенных, удобных и экономичных технических средств компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений являются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [3]. Однако их эффективность может снижаться при

изменении гармонического состава токов и напряжений и параметров сети, а также установка пассивных фильтров может привести к следующим нежелательным явлениям: режимы перекомпенсации и недокомпенсации реактивной мощности при значительных изменениях потребляемой активной мощности [4], возникновение резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и питающей сетью.

Резонансные явления на высших гармониках проявляются в очень малых значениях сопротивления для частот близких к компенсируемым частотам высших гармоник, что вызывает увеличение токов гармоник и приводит к негативным последствиям. Для выявления наличия резонансных явлений необходимо исследовать частотные характеристики сети, описывающих влияние внутренних параметров источников напряжения, линий электропередач, трансформаторов и других элементов системы электроснабжения на передачу высших гармоник. Оценить эффективность компенсации высших гармоник и выявить наличие резонансов позволит частотная характеристика сети с установленными ФКУ [2].

II. Материалы и методы

На рис. 1 представлен фрагмент схемы электроснабжения скиповой подъемной установки на примере Яковлевского рудника Белгородской области [1, 5, 6].

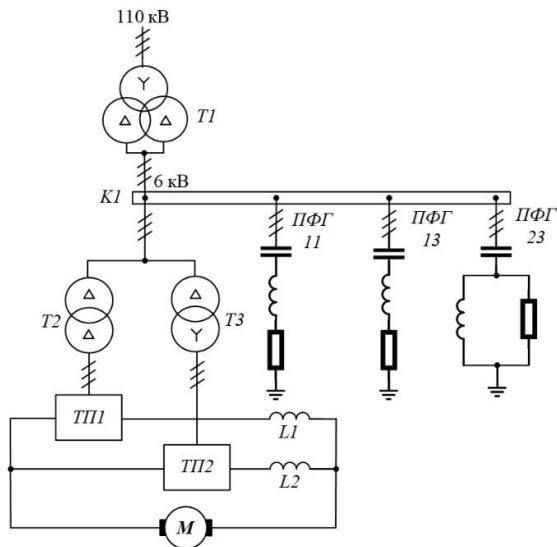


Рис. 1. Фрагмент схемы электроснабжения скиповой подъемной установки рудодобывающего предприятия

Основной особенностью представленной схемы является наличие мощного нелинейного потребителя электрической энергии: электропривода постоянного тока, выполненного по системе 12-ти пульсный тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Для уменьшения суммарных коэффициентов гармонических составляющих по току и напряжению и компенсации реактивной мощности к шине 6 кВ распределительного устройства подключаются два резонансных фильтра, настроенных на подавление 11-й и 13-й высших гармоник, а также широкополосный фильтр второго порядка – для гармоник, начиная с 23-й. Как следует из [1, 5], токи и напряжения принимают формы, близкие к синусоидальным. Установка пассивных фильтров при этом не влияет на временные параметры цикла подъема-опускания и на скорость движения подъемного сосуда [4].

С целью исследования частотных характеристик электрическая сеть приводится к эквивалентной схеме типа «фильтр гармоник – внешняя сеть», которую представим четырехполюсником. На его внешних зажимах действуют источник синусоидального напряжения, нагрузка и источники тока гармоник J_k (рис. 2).

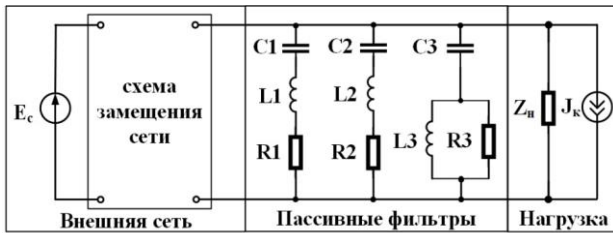


Рис. 2. Эквивалентная схема «Пассивные фильтры гармоник – внешняя сеть»

Внешняя сеть представляет собой источник синусоидального напряжения и схему замещения сети. Схема замещения сети состоит из индуктивного сопротивления источника X_c , схемы замещения высоковольтной линии 110 кВ, схемы замещения трансформатора 110/6 кВ и схемы замещения линия 6 кВ (рис. 3). Расчетные параметры элементов схемы замещения сети и пассивных фильтров представлены в табл. 1 [5].

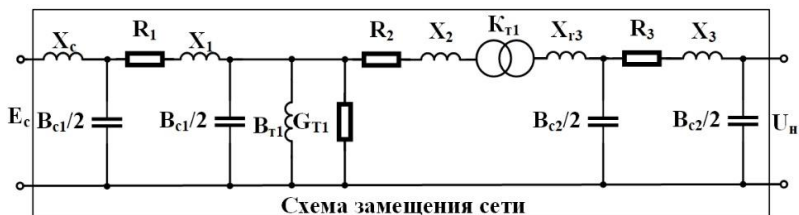


Рис. 3. Схема замещения линий электропередачи и трансформатора

Таблица 1.
Расчетные параметры элементов
схемы замещения и пассивных фильтров

Элемент системы электроснабжения	Значения параметров схемы замещения
Система	$X_c = 15,7 \text{ Ом}$
Высоковольтная линия 110 кВ, провод АС-185	$R_1 = 6,46 \text{ Ом}; X_1 = 16,77 \text{ Ом}; B_{c1} = 111,53 \text{ мкСм}$
Трансформатор ТРДН-25000/110	$R_2 = 2,54 \text{ Ом}; X_2 = 55,55 \text{ Ом}; K_{Т1} = 0,055;$ $G_{Т1} = 2,04 \text{ мкСм}; B_{Т1} = 13,23 \text{ мкСм}$
Реактор РБСГ 10-2-1600-0,25	$X_{r3} = 0,25 \text{ Ом}$
Кабельная линия 6 кВ, кабель ААБЛГ-6,3х150	$R_3 = 0,09 \text{ Ом}; X_3 = 0,03 \text{ Ом}; B_{c2} = 260 \text{ мкСм}$
Резонансный пассивный фильтр 11 гармоники	$R = 0,1047 \text{ Ом}; C = 46 \text{ мкФ}; L = 1,817 \text{ мГн}$
Резонансный пассивный фильтр 13 гармоники	$R = 0,1138 \text{ Ом}; C = 35,87 \text{ мкФ}; L = 1,672 \text{ мГн}$
Широкополосный пассивный фильтр (23 гармоника и выше)	$R = 1,937 \text{ Ом}; C = 71,4 \text{ мкФ}; L = 0,268 \text{ мГн}$

Для построения частотной характеристики применим классические методы последовательных эквивалентных преобразований четырехполюсника. Для упрощения расчетов применяется программный пакет *Mathcad*.

Поскольку анализ частотных характеристик сети с установленными ФКУ экспериментальным путем представляет собой достаточно трудоемкую и дорогостоящую задачу, поэтому для подтверждения результатов теоретического анализа применим программный комплекс Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems [6-8].

Имитационная модель рудничной сети с установленными пассивными фильтрами (блок PF) и соответствующая ей имитационная модель схемы замещения сети с пассивными фильтрами представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

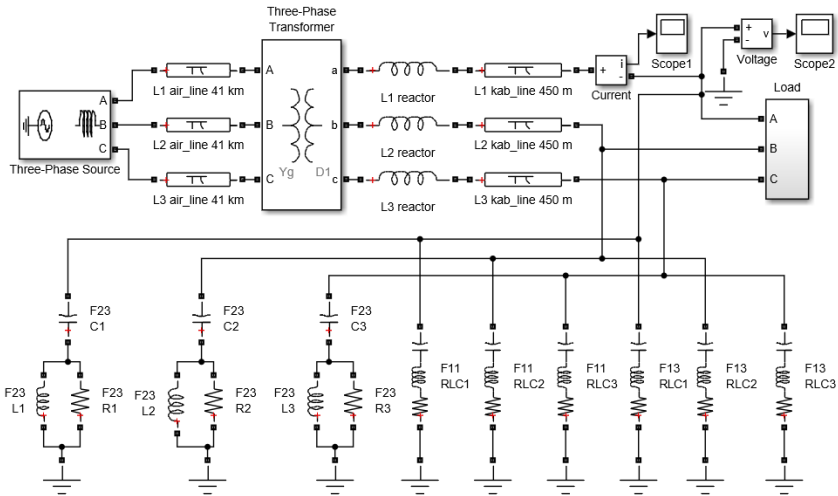


Рис. 4. Имитационная модель системы электроснабжения

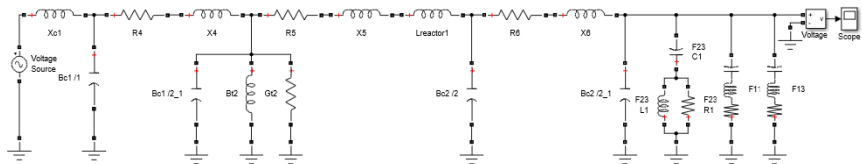


Рис. 5. Имитационная модель схемы замещения в Matlab Simulink

III. Результаты

На рис. 6 и 7 представлены амплитудно-частотные характеристики сети с установленными пассивными фильтрами (ПФ), полученные расчетным путем и с помощью имитационного моделирования соответственно. На осях ординат обозначен модуль комплексной передаточной функции сети в относительных единицах, причем, шкала является логарифмической, а на осях абсцисс – частота сети в герцах. Результаты моделирования полностью соответствуют характеристикам, полученным расчетным путем, что доказывает правильно выбранную методику расчета частотных характеристик.

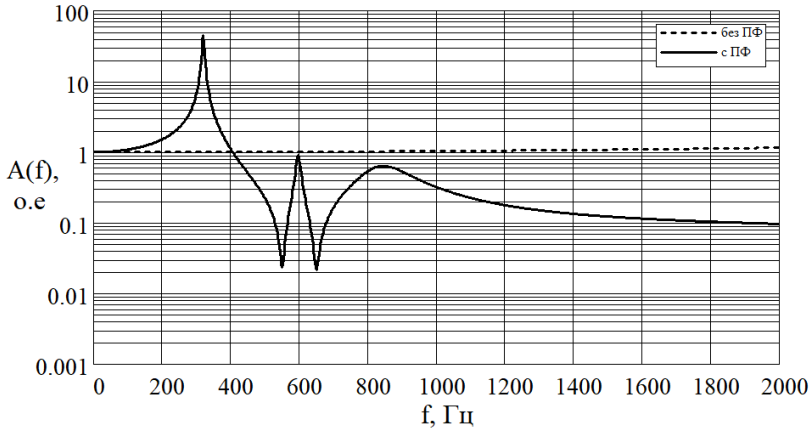


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики сети с ПФ, полученные расчетным путем

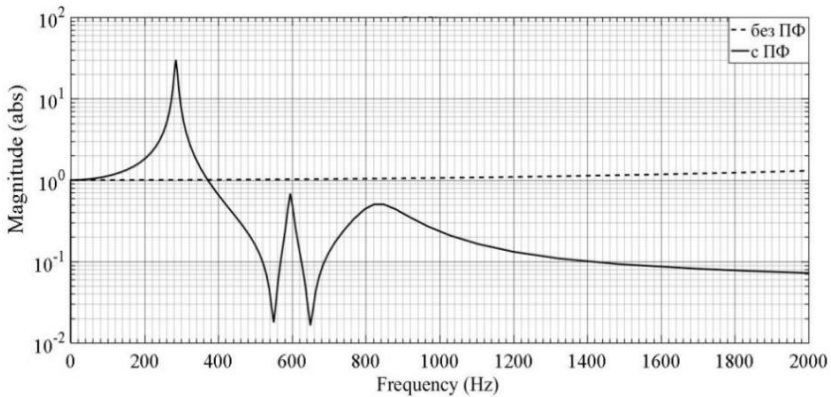


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика сети с ПФ, полученная в результате моделирования

Анализируя амплитудно-частотные характеристики можно сделать вывод, что при использовании данных пассивных фильтров [9] заметно ослабляется уровень 11-й (550 Гц) и 13-й (650 Гц) гармоник, а также значительно снижается уровень гармоник на частотах, начиная с 23-й (1150 Гц). Однако для распространения частот, близких к 5-й гармонике, сеть с ПФ не только не является препятствием, но может значительно увеличить их уровень. Это свидетельствует о резонансных явлениях, возникших вследствие установки пассивных ФКУ.

IV. Заключение

Использование пассивных ФКУ в рудничной системе электроснабжения позволяет заметно снизить амплитуды нежелательных высокочастотных гармонических составляющих. Однако, в результате проведенных исследований подтверждено, что пассивные фильтры приводят к возникновению резонансных явлений в системе электроснабжения рудничных подъемных установок, а согласно данным, представленным в [4], можно сделать вывод, что пассивные фильтры также вызывают перекомпенсацию и недокомпенсацию реактивной мощности. Соответственно, в рудничной сети с установленными пассивными фильтрами рекомендуется использовать устройства, позволяющие осуществлять коррекцию частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов. Технически это реализуется с помощью активных и гибридных силовых фильтров высших гармоник [2]. Более перспективны гибридные ФКУ, так как их можно использовать в сетях с уже установленными пассивными ФКУ, что значительно уменьшает стоимость всего устройства.

© Погорелов А.В., 2019

Библиографический список

- [1] Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприемниками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 2. С. 75-84.
- [2] Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
- [3] Хворостенко С.В., Авербух М.А. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для ослабления высших гармоник в цеховых сетях электроснабжения с нелинейными потребителями // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1 (5). С. 84-93.
- [4] Прасол Д.А., Погорелов А.В. Анализ работы пассивных фильтров высших гармоник в рудничной системе электроснабжения подъемных установок // Научное развитие технологий и инновации: Междунар. науч. – практ. конф., Белгород, 2019. Ч. 11. С. 39-43. [Электронный ресурс]. URL: http://conf.bstu.ru/material_conf/XXIII_nauchnye_chteniya (дата обращения 03.07.2019).
- [5] Авербух М.А., Прасол Д.А., А.В. Погорелов. Минимизация потерь мощности при несинусоидальных режимах в высоковольтных рудничных сетях // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 38-46.
- [6] Прасол Д.А. Особенности имитационного моделирования рудничных высоковольтных сетей при нелинейных потребителях // Борисовские чтения: материалы Всерос. науч.-техн. конф., 17-19 декабря 2017 г. Красноярск, 2017. С 179-182.

- [7] Кирилина О.И., Массов А.А., Плотников С.В., Салтан М.С. Использование имитационного моделирования для выбора и проверки фильтрокомпенсирующих устройств скиповой подъемной установки // *Промышленная энергетика*. 2016. № 11. С. 51-56.
- [8] Семенов А.С., Хубиева В.М., Кугушева Н.Н. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий. М.: Перо, 2015. – 100 с.
- [9] Прасол Д.А. Электромагнитная совместимость в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами постоянного тока: дис. канд. техн. наук, БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2018. – 199 с.

A.V. Pogorelov

**RESEARCH OF FREQUENCY RESPONSES
OF MINE POWER SUPPLY SYSTEM WITH PASSIVE
FILTER-COMPENSATING DEVICES**

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov
Belgorod, Russia

Abstract. In power supply systems with powerful non-linear electrical receivers, such as thyristor electric drive of skip and cage hoist installations, passive filter-compensating devices are widely used to suppress harmonic components of current and voltage and to compensate reactive power. The article discusses issues of improving the performance of these devices in the power supply systems of mine. To identify the possibility of undesirable resonance phenomena in the power supply systems with passive filters analytically and with the help of simulation modeling, the amplitude-frequency characteristics of the high-voltage power supply systems of the mining enterprise were studied. To analyze the frequency characteristics of the original grid is represented by the equivalent circuit in the form of a passive quadrupole, to simplify which, the method of successive equivalent transformations is used. As a result of the research, it was confirmed that resonance phenomena occur in the electrical grid in connection with the installation of passive filter-compensating devices. On the basis of the data obtained, it was concluded that it was necessary to use devices that allow the correction of the frequency responses of the electrical grid and the elimination of parallel resonances. For this purpose, it is proposed to use active or hybrid filter-compensating devices.

Keywords: frequency responses, passive filter-compensating devices, power supply systems of mine, resonant phenomena.

References

- [1] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and S.V. Khvorostenko, «Experimental evaluation of mode parameters in high-voltage mine networks with powerful nonlinear electric receivers», *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*, vol. 21, no. 2, pp. 75-84, 2017.

- [2] N.P. Boyarskaya, V.P. Doygun and D.E. Yegorov, *Sintez fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektrosnabzheniya (Synthesis of filter compensating devices for power supply systems)*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2014 (in Russian).
- [3] S.V. Khvorostenko and M. A. Averbukh, «Synthesis of passive filter – compensating devices for attenuation higher harmonics in power supply system of workshop with non-linear consumers», *Smart Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 84-93, 2019.
- [4] D.A. Prasol and A.V. Pogorelov, «Analiz raboty passivnykh fil'trov vysshikh garmonik v rudnichnoi sisteme elektrosnabzheniya pod"emnykh ustanovok (Analysis of the operation of passive filters of higher harmonics in the mine power supply system of lifting installations)», in proc. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii (High technology and innovation)*, Belgorod, 2019, ch. 11. pp. 39-43 [Online]. Available at: http://conf.bstu.ru/material_conf/XXIII_nauchnye_chteniya [Accessed: July 3, 2019] (in Russian).
- [5] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and A.V. Pogorelov, «Minimization of power losses upon non-sinusoidal modes of high-voltage mine networks», *Industrial Power Engineering*, vol. 7, pp. 38-46, 2018.
- [6] D.A. Prasol, «Osobennosti imitatsionnogo modelirovaniya rudnichnykh vysokovol'tnykh setey pri nelineynykh potrebitelyakh (Features of simulation of mining high-voltage networks for non-linear consumers) », in proc. *Borisovskie chteniya (Borisov readings)*, Dec. 17-19, 2017, Krasnoyarsk, pp. 179-182 (in Russian).
- [7] O.I. Kirilina, A.A. Massov, S.V. Plotnikov and M.S. Saltan, «Ispol'zovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya vybora i proverki fil'trokompensiruyushchikh ustroystv skipovoi pod"emnoi ustanovki (Using simulation to select and test filter-compensating devices of a skip hoist) », *Industrial Power Engineering*, vol. 11, pp. 51-56, 2016 (in Russian).
- [8] A.S. Semenov, V.M. Khubieva and N.N. Kugusheva, *Modelirovanie rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya gornykh predpriyatiy (Modeling the operation of power supply systems of mining enterprises)*. Moscow: Pero, 2015 (in Russian).
- [9] D.A. Prasol, «*Elektromagnitnaya sovместimost' v vysokovol'tnykh rudnichnykh setyakh s moshchnimi tiristornymi elektroprivodami postoyannogo toka (Electromagnetic compatibility in high-voltage mine networks with powerful thyristor DC drives)*», Cand. Of Tech. S. thesis, Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, 2018 (in Russian).