

## Регулирование тока активного фильтра гармонических искажений

*Н.Н. Вихорев, А.И. Чивенков, Д.А. Алешин*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

**Аннотация:** В статье приводится один из возможных способов повышения эффективности устройства подавления гармонических искажений тока линии электропередач посредством введения в контур обратной связи по напряжению разностного сигнала, пропорционального отклонению напряжения линии электропередач от эталонного значения. Разработана имитационная модель энергосистемы с устройством подавления гармонических искажений тока, позволяющая произвести оценку эффективности работы активного фильтра при различных параметрах контура обратной связи. Приведены осциллограммы токов в линии электропередач при подключении устройства подавления гармонических искажений. Приведены результаты гармонического анализа напряжения линии электропередач, демонстрирующие снижение уровня искажений напряжения, при подключении активного фильтра к линии электропередач.

**Ключевые слова:** гармонические искажения тока, линия электропередач, имитационное моделирование, активный фильтр, Matlab/Simulink, нелинейная нагрузка, обратная связь, динамические свойства.

Одной из актуальных задач электроснабжения потребителей является снижение уровня гармонических искажений тока (ГИТ) и напряжения в линиях электропередач. Основным источником ГИТ выступают нелинейные нагрузки (электромагнитные приборы, тиристорные установки и т.д.) [1, 2]. Протекающие в электросети ГИТ могут быть причиной ложного срабатывания защитных систем, отказу в работе электроприборов, снижению нагрузочной способности электромагнитных устройств (трансформаторов, двигателей и т.д.) и других нарушений нормального функционирования электроприборов.

На сегодняшний день для подавления ГИТ могут применяться пассивные фильтры, базирующиеся на различных комбинациях емкостных и индуктивных элементов, а также активные фильтры [8], выполненные на базе управляемых инверторов напряжения и тока, СТАТКОМ-ах и т.д [5, 6]. Один из основных способов управления активными фильтрами гармоник тока заключается в определении текущего уровня гармонических искажений с

помощью средств измерения и преобразования Фурье с дальнейшей генерацией в точке подключения фильтра гармонических составляющих в противофазе с целью их компенсации. Таким образом, уровень ГИТ в линии электропередач может быть снижен вплоть до нулевого значения.

Недостатком подобных устройств является их инерционность, обусловленная необходимостью накопления результатов измерений в течение периода изменения сетевого напряжения. Данный аспект ограничивает применение активных фильтров при динамической нагрузке т.к. резкое изменение гармонического состава и несвоевременная реакция фильтра на изменения в линии электропередач могут привести к росту искажений, а не их подавлению. Также следует учитывать, что накопление данных и проведение спектрального анализа требует затрат на вычислительные мощности системы управления, что ведет к ее удорожанию и усложнению.

Одним из способов устранения недостатков активных фильтров предлагается устройство подавления высших гармоник тока [5], представляющее собой ведомый сетью транзисторный инвертор напряжения, подключенный параллельно к линии электропередач через сетевой дроссель, и формирующий напряжение, равное по фазовому углу и величине основной гармоники напряжения сети. Подавление гармоник тока при этом происходит посредством разницы в импедансах входного реактивного элемента и линии электропередач.

Возможным способом повышения эффективности активного фильтра на базе устройства подавления высших гармоник тока предлагается введение в контур управления инвертором напряжения сигнала эквивалентного разности между мгновенными напряжениями линии электропередач  $u_g(t)$  в точке подключения активного фильтра и мгновенными значениями основной

---

гармоники напряжения  $u_1(t)$ . Разностный сигнал, умноженный на коэффициент  $K$  вычитается из мгновенного напряжения сети, формируя, таким образом, задающий сигнал для ШИМ-контроллера инвертора напряжения [8,9]:

$$I_{\Phi}(t) = \frac{u_g(t) - K * (u_g(t) - u_1(t))}{Z(t)} \quad (1)$$

Ток активного фильтра  $I_{\Phi}(t)$  определяется импедансом входного реактивного элемента  $Z(t)$  и пропорционален коэффициенту  $K$ , усиливающему или ослабляющему разностный сигнал и, как следствие, увеличивающему или уменьшающему значения токов подавляемых гармонических составляющих.

Для исследования возможностей предлагаемого способа регулирования фильтра ГИТ разработана имитационная модель в среде Matlab/Simulink, приведенная на рисунке 1 [3,7].

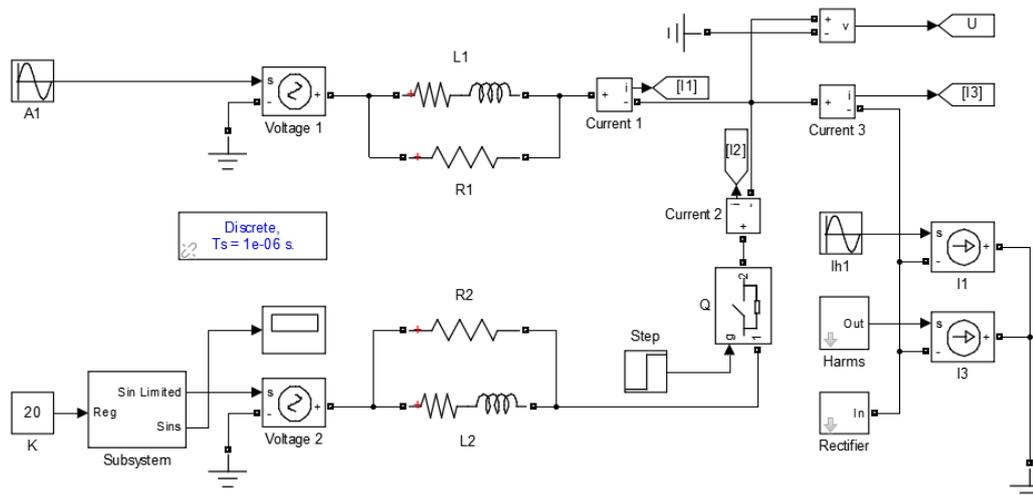


Рис. 1 – Имитационная модель фильтра ГИТ

В состав имитационной модели входят элементы:

L1- элемент, задающий импеданс линии электропередач (0,1мГн, 0,1 Ом);

L2 – элемент, задающий, импеданс сетевого дросселя (0,01мГн, 0,1 Ом);

Ih1 – задатчик амплитуды первой гармоники тока нагрузки (30 А);

Harms – задатчик амплитуд 3, 5, 7 гармоник тока (3 А, 2 А, 1 А соответственно);

Rectifier – мостовой выпрямитель напряжения с емкостным фильтром и нагрузкой, подключаемой в установленное время (0,04 с);

Step, Q – таймер и контактор подключения фильтра к сети;

Voltage 1, A1 – задатчики амплитуды напряжения линии электропередач;

Voltage 2, Subsystem – задатчики амплитуды напряжения фильтра ГИТ;

K – коэффициент усиления разностного сигнала.

Остальные элементы представляю собой средства измерения или выполняют вспомогательные функции.

Формирование напряжения активного фильтра осуществляется с помощью блока Subsystem, структура которого приведена на рисунке 2.

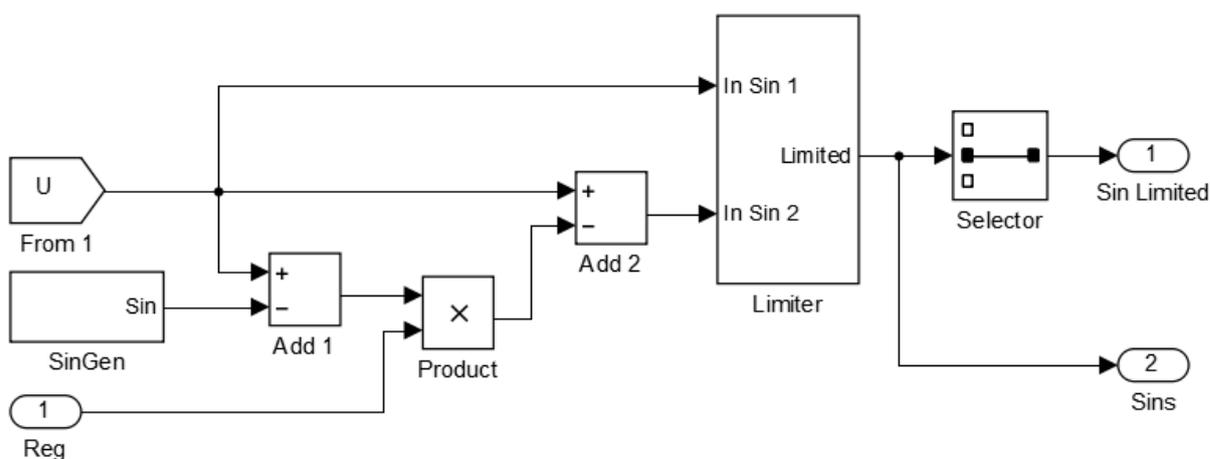


Рис. 2 – Блок формирования задающего сигнала напряжения фильтра ГИТ

Subsystem включает в себя источник сигнала, эквивалентного основной гармонике напряжения сети SinGen, набор математических элементов, реализующих выполнение соотношения (1), и блок Limiter.

Генератор SinGen формирует первую гармоническую составляющую напряжения, синхронную с напряжением линии электропередач и равную ей по величине посредством элементов, реализующих выполнение тригонометрических преобразований.

Амплитудное значение основной гармоники сети может быть получено, как с помощью средств фильтрации, так с помощью преобразования Фурье. В рамках упрощения имитационной модели применен блок определения параметров гармонических составляющих Fourier.

Блок Limiter, задает допустимый диапазон отклонения напряжения фильтра ГИТ  $\pm 10\%$  и как следствие, выполняет роль ограничителя максимально допустимого тока для активного фильтра ГИТ. Принцип работы блока Limiter заключается в непрерывном сравнении формируемого сигнала с максимально и минимально допустимыми эталонными сигналами. В случае выхода за пределы допустимого диапазона напряжения блоки Switch переключают выходной сигнал на ближайший эталонный сигнал.

На рисунке 3 приведен результат плавного увеличения коэффициента  $K$  от нуля до 3 на временном интервале от 0 до 0,1 с. При этом осциллограмме  $I_1$  соответствует ток линии электропередач,  $I_2$  – ток нагрузки,  $I_3$  – ток фильтра,  $K$  – коэффициент разностного сигнала.

Осциллограммы токов в энергосистеме, приведенные на рисунке 3, наглядно демонстрируют плавное снижение уровня гармонических составляющих тока в линии электропередач при увеличении коэффициента  $K$  и пропорциональное увеличение уровня гармоник тока в цепи активного фильтра, при неизменном токе нагрузки.

---

Таким образом, гармонические составляющие тока замыкаются в контуре, образованном нагрузкой и устройством подавления гармонических составляющих, значительно снижая уровень искажений тока в линии электропередач.

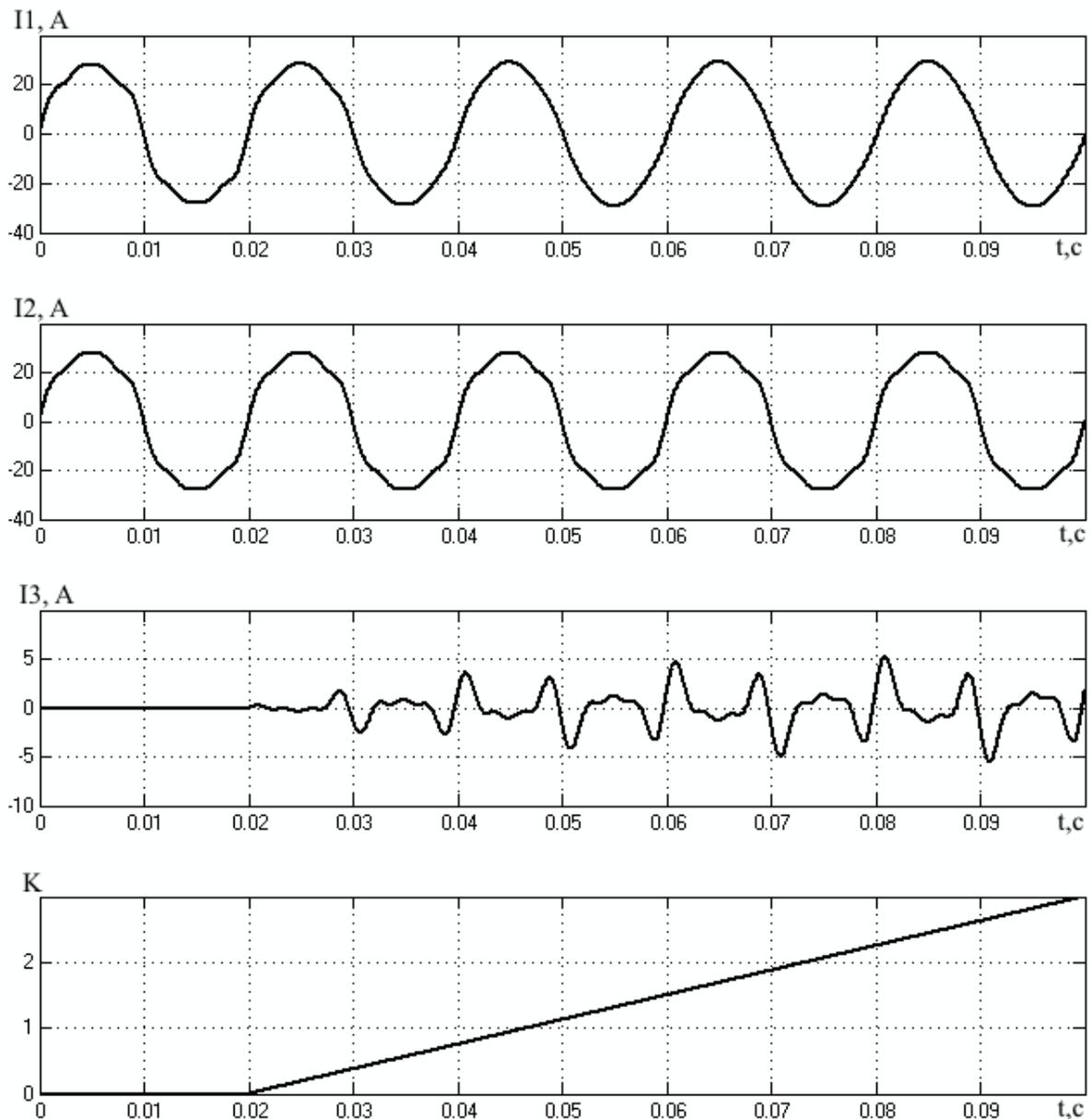


Рис. 3 – Осциллограммы токов в узле подключения активного фильтра

На рисунке 4 приведены осциллограммы токов линии электропередач II и активного фильтра I3, при ступенчатом включении генерации гармонических составляющих тока и последующем их отключении на интервале 0,04 – 0,06с.

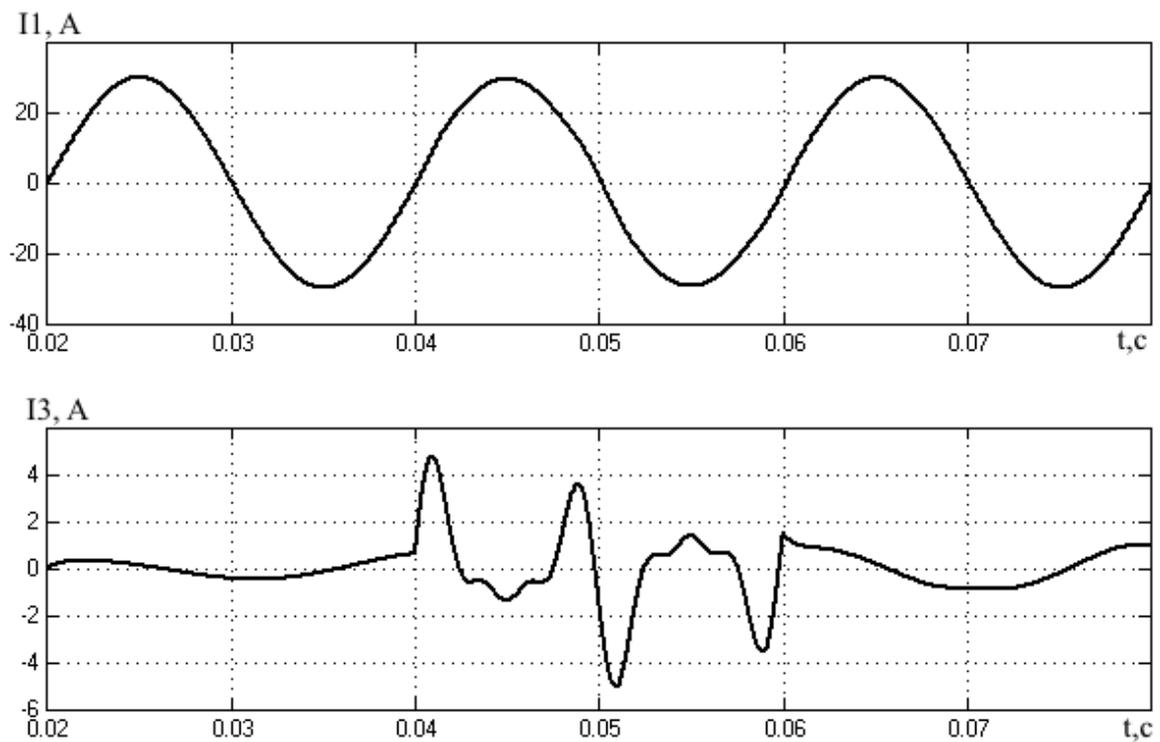


Рис. 4 – Реакция активного фильтра на изменение уровня гармоник тока

Как следует из приведенных осциллограмм, реакция фильтра на резкое изменение спектрального состава тока в линии электропередач происходит практически мгновенно и не приводит к возникновению переходного процесса.

На рисунке 5 приведены осциллограммы токов линии электропередач II и активного фильтра I3 при подключении импульсной нагрузки (I2), в качестве которой могут выступать мощные выпрямители, сварочные инверторы и т.п.

Исследование имитационной модели показало, что для наиболее эффективного подавления импульсных токов коэффициент  $K$  следует

устанавливать более 10 при импедансе сетевого дросселя меньшем, чем импеданс линии в узле подключения.

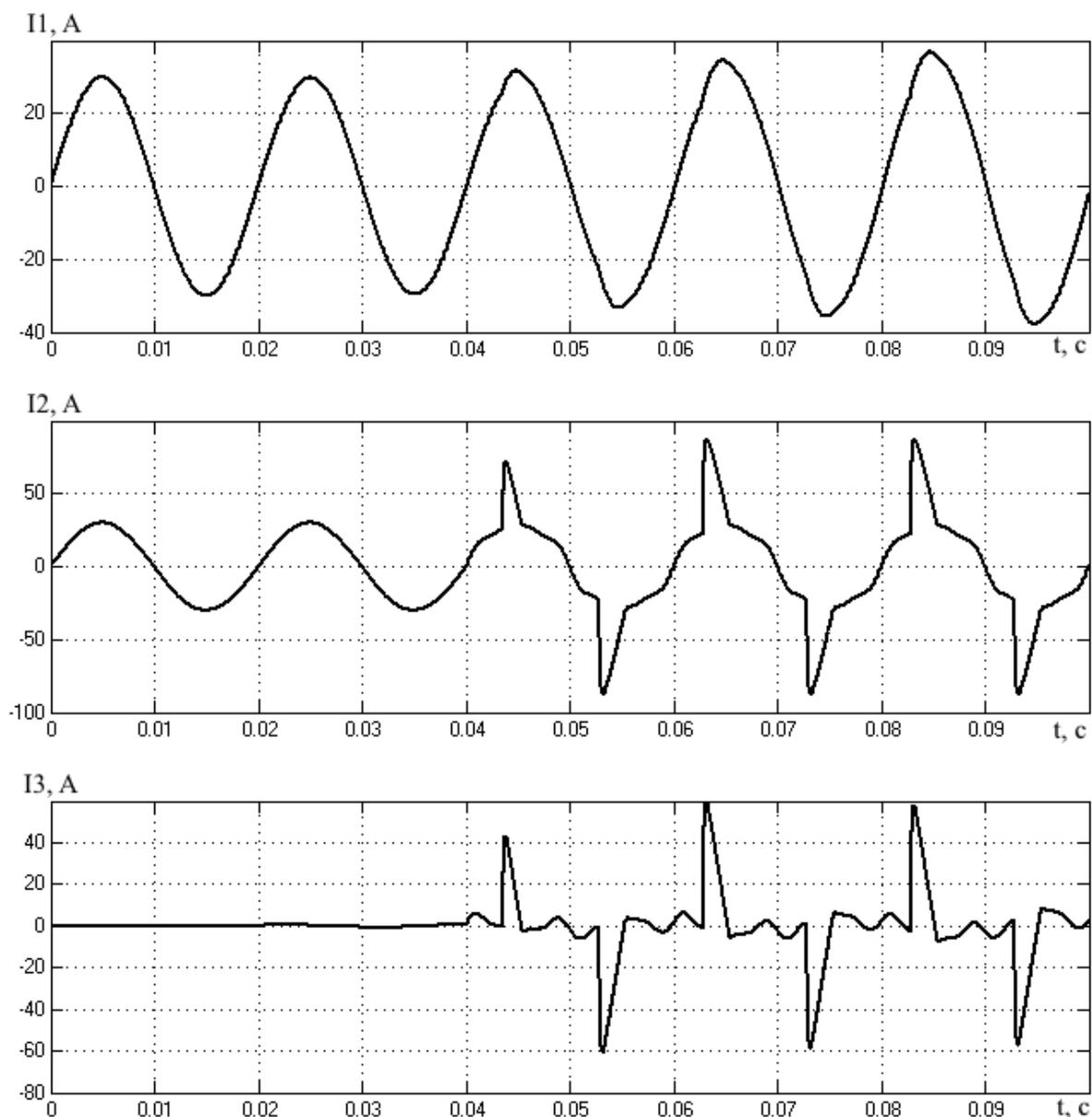


Рис. 5 – Реакция активного фильтра на подключение импульсной нагрузки

На рисунке 6 приведен гармонический состав напряжения линии электропередач при отключенном фильтре (а) и при подключенном фильтре (б). Как следует из приведенных результатов исследований, суммарный коэффициент гармонических составляющих снижен на 2 %. Эффективность подавления гармонических составляющих выражена тем сильнее, чем выше

разница между импедансами линии и входного реактивного элемента, а также пропорциональная вводимому коэффициенту  $K$ .

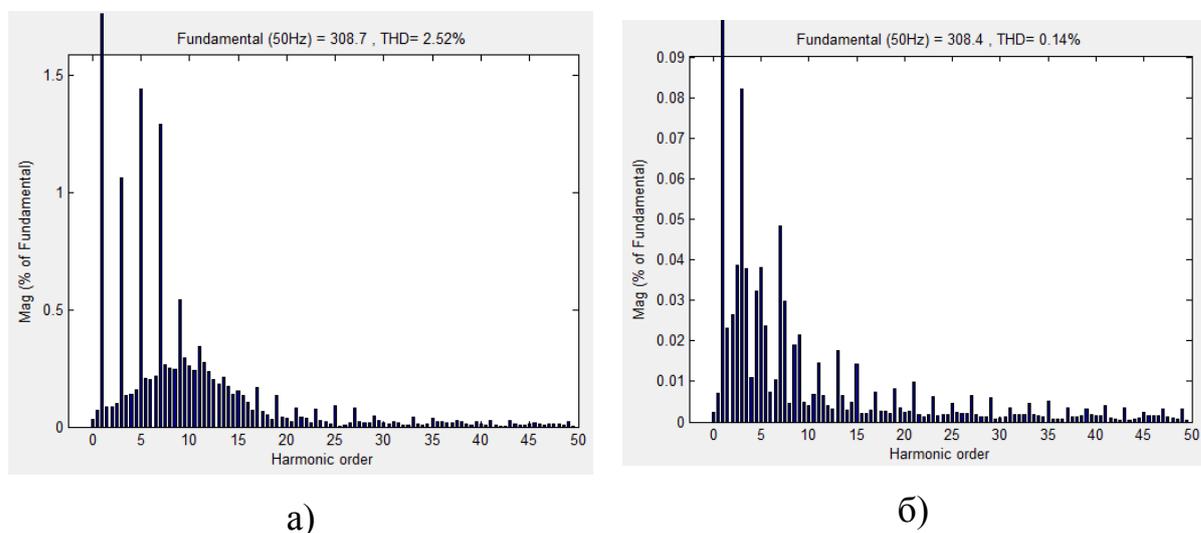


Рис. 6 – Спектральный состав напряжения сети до включения фильтра (а) и после (б)

Предлагаемый способ модификации системы управления активного фильтра, выполненного на базе устройства подавления высших гармоник тока, позволяет регулировать глубину подавления ВГТ, а также эффективность фильтрации при динамически изменяющемся спектральном составе или работе на импульсные варианты нагрузок.

Приведенный в статье вариант обратной связи системы управления также позволяет ограничить максимальный ток фильтра, тем самым реализова защитный алгоритм, препятствующий протеканию аварийных значений тока через полупроводниковые ключи силовой части преобразователя.

Предлагаемый способ фильтрации позволяет ограничиться анализом параметров лишь одной гармоники напряжения линии электропередач – основной. Альтернативным вариантом является применение фильтров, выделяющих основную гармонику напряжения сети, что позволяет реализовать систему управления без цифровых элементов.

## Литература

1. Akagi H., Kazanava Y., Nubae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuit // Int. Power Electronics Conf, Tokio, Japan, 1983. – pp. 1375 – 1386.

2. Akagi H., Vatanable H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning // N.Y., IEEE Press, 2007. – 389 p.

3. Вихорев Н.Н., Чивенков А.И., Панфилов И.С., Панфилов С.Ю. Моделирование работы автономного источника электропитания в среде MATLAB/Simulink // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2015. №4(111). С. 94-101.

4. Вихорев Н.Н., Чивенков А.И., Алешин Д.А. Устройство подавления высших гармоник // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5240.

5. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии // Москва: Техносфера, 2011. – 576 с.

6. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; Питер, 2008. – 288 с.

8. Чаплыгин Е.Е. Активный фильтр для подавления неактивных составляющих сетевого тока выпрямителей с емкостным фильтром // Электричество. №4. 2015. – С. 38-45.

9. Чивенков А.И., Гребенщиков В. И., Антропов А.П., Михайличенко Е.А. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети //



Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564.

10. Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Гедифа А. и др. Соотношение параметров входных цепей UPFC // Инженерный вестник Дона, 2016, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3788.

### References

1. Akagi H., Kazanava Y., Nubae A. Generalized theory of the instantaneous power in three-phase circuit Tokyo, Japan. 1983. pp. 1375-1386.

2. Akagi H., Vatanable H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press. 2007, 389 p.

3. Vihorev N.N., Chivenkov A.I., Panfilov I.S., Panfilov S.Ju. Modelirovanie raboty avtonomnogo istochnika jelektropitanija v srede MATLAB/Simulink. N. Novgorod: NGTU, 2015, №4 (111), pp. 94-101.

4. Vihorev N.N., Chivenkov A.I., Aleshin D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5240.

5. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. Upravlenie tranzistornymi preobrazovateljami jelektrojenergii [Transistor power converter control]. M.: Tehnosfera, 2011, 576 p.

6. Romash Je.M., Drabovich Ju.I., Jurchenko N.N., Shevchenko P.N. Vysokochastotnye tranzistornye preobrazovateli [High frequency transistor converters]. Moscow: Radio isvjaz', 1988, 288 p.

7. Chernih I.V. Modelirovanie electrotechnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. M: DMK Press, Piter, 2008, 288 p.

8. Chaplygin E.E. Aktivnyj fil'tr dlya podavleniya neaktivnyh sostavlyayushchih setevogo toka vypryamitelej s emkostnym fil'trom. Elektrichestvo. №4, 2015, pp. 38-45.



9. Chivenkov A.I., Grebenshikov V. I., Antropov A.P., Mihajlichenko E.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564).

10. Chivenkov A.I., Vihorev N.N., Gedifa A. i dr. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3788](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3788).