

Жуков Н.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ**

В статье рассмотрена система управления активным силовым фильтром высших гармоник. Исследована обобщенная структура параллельного активного фильтра. В структуре системы управления выделен функциональный блок, отвечающий за генерацию сигнала искажений токов нагрузки на основании информации, получаемой непосредственно из системы электроснабжения. Тип и способы получаемой информации напрямую зависят от математического аппарата, используемого исследуемым блоком. Проанализированы два способа выделения сигнала искажений: метод мгновенной мощности и метод режекторной фильтрации. Метод мгновенной мощности (p-q теория) предполагает использование преобразования Кларка для перехода от однофазной системы токов и напряжений к двухфазной системе. Затем производится расчет активной и реактивной мощностей, переменные составляющие которых обусловлены наличием высших гармонических составляющих. Выделение переменных составляющих мощностей необходимо для расчета токов искажений сначала в двухфазной системе, а после обратного преобразования и в трехфазной системе координат. Второй способ заключается в фильтрации режекторным фильтром, настроенным на частоту первой гармоники тока, и получения, таким образом, сигнала искажений. Рассмотрены структурные схемы систем, построенных по исследуемым методам. Исследование и сравнение систем проводилось методом имитационного моделирования. В качестве результатов моделирования приведены спектральные составы скомпенсированных токов системы электроснабжения с потребителями, имеющими нелинейные вольт-амперные характеристики. Также представлены значения коэффициентов несинусоидальности токов, полученные в ходе моделирования. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о наиболее предпочтительном использовании метода режекторной фильтрации в структуре системы управления активным фильтром.

**Ключевые слова:** система управления, силовой активный фильтр, имитационное моделирование, компенсация высших гармоник, теория мгновенной мощности, фазовая автоподстройка частоты.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время для компенсации искажений токов и напряжений в системах электроснабжения нелинейных потребителей используются активные силовые фильтры. Активный силовой фильтр – это преобразователь переменного/постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усредненное значение тока (напряжения), равное разности нелинейного тока или напряжения и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники [1]. Структура активного фильтра (**рис. 1**) включает в себя силовую часть и систему управления (СУ).

Силовая часть строится на базе силовых транзисторных ключей (чаще всего IGBT транзисторов), как правило, соединенных по мостовой схеме Ларионова, а также сглаживающих дросселей на стороне переменного тока и емкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока.

Информация об электромагнитных процессах в сети снимается датчиками и поступает на вход вычислителя-оценщика (ВО), задачей которого является формирование сигнала, пропорционального искажениям кривых токов. Система управления силовыми ключами – следящая система, которая обеспечивает регулирование тока активного фильтра по отклонению. Формирователь импульсов управления (ФИУ) является согласующим устройством между входами силовых приборов и выходом регулятора.

**МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИСКАЖЕНИЙ**

Для исследования систем управления удобно использовать имитационное моделирование на ЭВМ. В

статье рассматривается моделирование ВО в системе Simulink. Вычислитель-оценщик моделируется в зависимости от математического аппарата, используемого системой управления. Методы формирования управляющих сигналов можно разделить на две группы [2]. К первой группе относят методы формирования управляющих сигналов в частотной области. Стратегия формирования управляющих сигналов в частотной области основана на представлении несинусоидальных токов и напряжений в виде ряда Фурье. Общий недостаток методов формирования управляющих сигналов в частотной области заключается в том, что требуется предварительная аналоговая фильтрация для того, чтобы исключить наложение спектров сигналов. Включение фильтра вносит дополнительные амплитудные и фазовые искажения. Кроме того, необходима синхронизация между частотой дискретизации и частотой основной гармоники. И наконец, анализируемый сигнал должен быть стационарным, что на практике выполняется не всегда. Методы формирования управляющих сигналов во временной области основаны на формировании компенсирующих сигналов из мгновенных значений токов и напряжений сети. Благодаря большому быстродействию они получили преимущественное распространение [3].

Имеющиеся методы формирования управляющих сигналов во временной области можно условно разделить на 2 группы:

- метод мгновенной мощности;
- метод режекторной фильтрации.

Метод мгновенной мощности (**рис. 2**) основан на преобразовании токов нагрузки и напряжений сети из трехфазной системы координат  $a, b, c$  в новую систему координат  $\alpha, \beta, 0$  [4, 5].

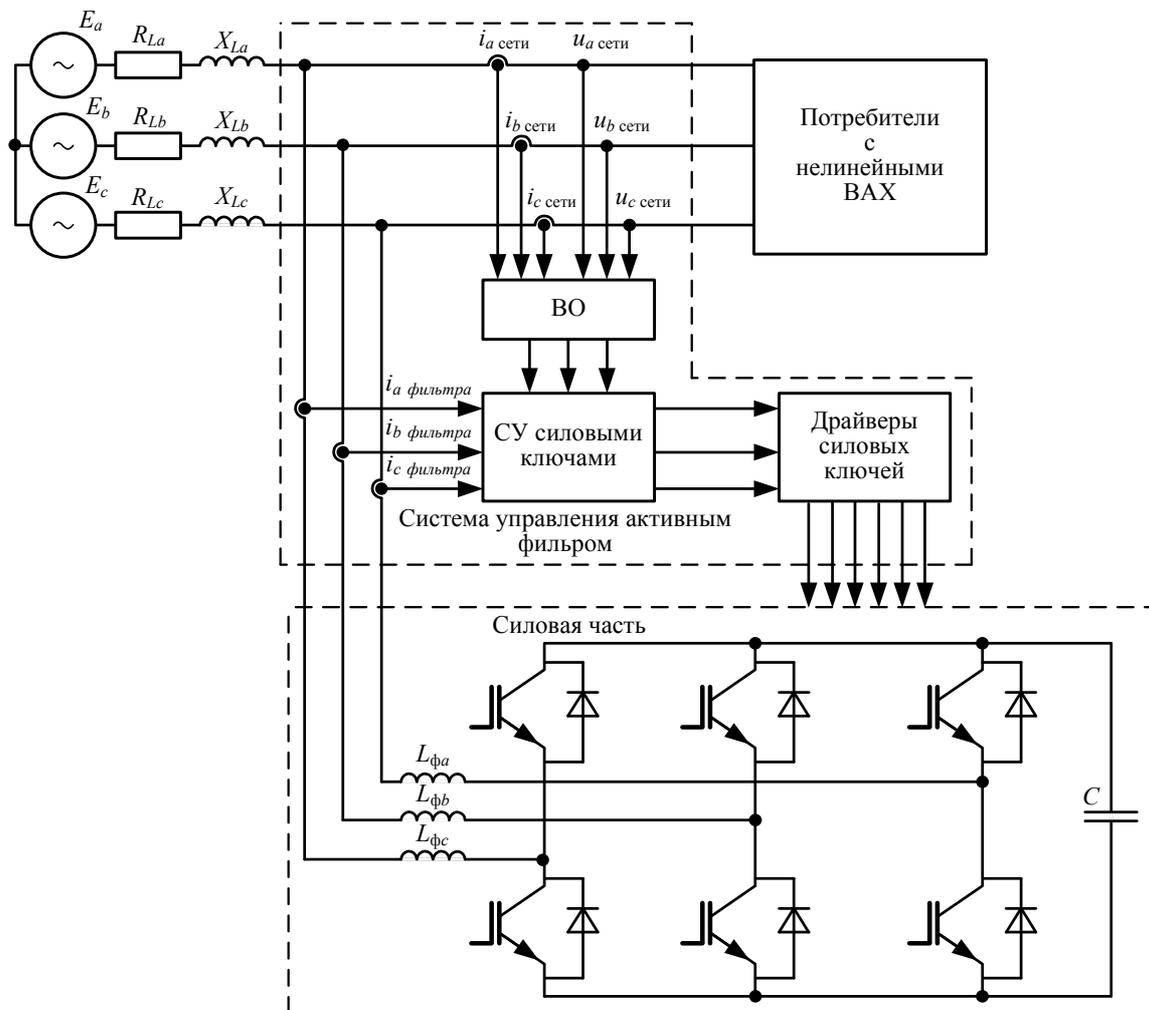


Рис. 1. Функциональна схема силового активного фильтра

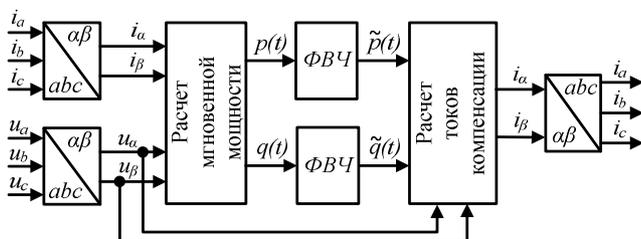


Рис. 2. Имитационная модель вычислителя оценщика, основанная на методе мгновенной мощности

По полученным значениям производится расчет активной  $p$  и реактивной  $q$  составляющих мощности. С помощью фильтров высокой частоты (ФВЧ) из сигналов мощностей выделяются сигналы искажений (переменные составляющие) [6, 7]. Далее производится вычисление токов компенсации в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta, 0$ . Затем при помощи обратного преобразования токи компенсации переводятся в реальную координатную систему  $a, b, c$ , в которой они являются искомыми сигналами управления  $i_a^*, i_b^*, i_c^*$ . Модель описанного вычислителя-оценщика представлена на **рис. 3**.

Недостатком этого принципа является большое количество математических операций, что, безусловно, усложняет практическую реализацию вычислителя-оценщика и снижает точность выявления сигнала управления и, соответственно, снижает точность фильтрации тока.

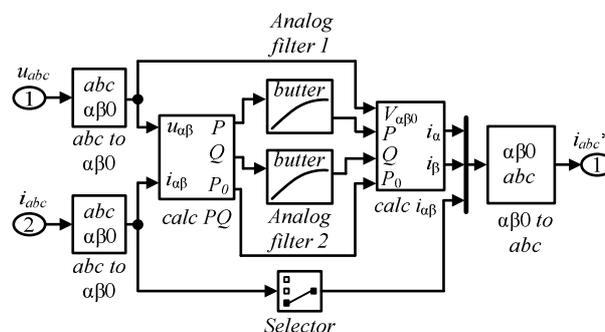


Рис. 3. Имитационная модель ВО, построенная по принципу мгновенной мощности

Такие вычислители-оценщики имеют высокую стоимость, что при нынешней покупательной способности промышленных предприятий сдерживает внедрение активных фильтров, построенных по данному принципу [8].

Использование режекторных фильтров позволяет выделять сигнал искажений без предварительных преобразований сигналов токов. Суть метода заключается в фильтрации режекторным фильтром, настроенным на частоту первой гармоники тока, и получения, таким образом, сигнала искажений (**рис. 4**). При таком подходе возникает необходимость в синхронизации фазы и частоты управляющего компенсируемого сигналов. Для решения этой задачи в состав вычислителя-оценщика включают устройство фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, англ. PLL) [9].

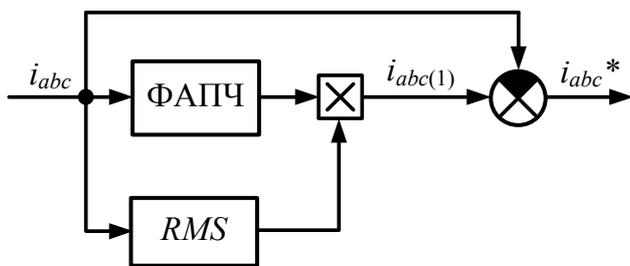


Рис. 4. Функциональная схема режекторного фильтра

Сигнал  $i_{abc}$ , пропорциональный токам нагрузки, поступает на вход блоков «ФАПЧ» и «RMS». В функции блока «ФАПЧ» [10] входит выделение частоты и фазового сдвига основной гармоники токов сети. Блок «RMS» вычисляет действующее значение токов сети. Произведение выходных сигналов описанных блоков есть сигнал, пропорциональный току основной гармоники  $i_{abc(1)}$ . Разность полученного сигнала и сигнала токов сети и есть сигнал искажений  $i_{abc}^*$ . Имитационная модель описанного вычислителя-оценщика представлена на рис. 5. Результатом описанных выше вычислений является аналоговый сигнал, пропорциональный искажениям токов в сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имитационное моделирование систем управления активными фильтрами с вычислителями-оценщиками, построенным по двум разным принципам (рис. 6, 7), показывает:

1. Точность вычисления сигнала искажений, при прочих равных условиях, определяется характеристиками используемых в структуре ВО фильтров.
2. Структура ВО, формирующего управляющие сигналы по методу мгновенной мощности при вычислении искажений токов в трехфазной неподвижной системе координат, предполагает использование сигнала напряжений в сети (см. рис. 2), следовательно, несинусоидальность кривых напряжения будет негативным образом сказываться на точности расчета тока компенсации. Такого недостатка лишена система, использующая в своей структуре устройство ФАПЧ, следовательно, является наиболее предпочтительной.

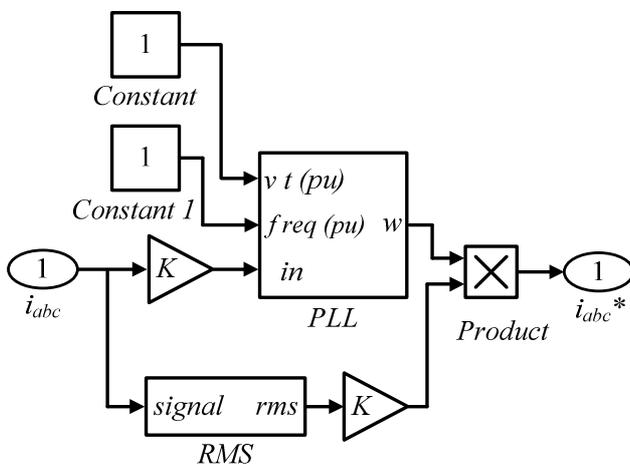


Рис. 5. Имитационная модель ВО, построенная по принципу режекторного фильтра

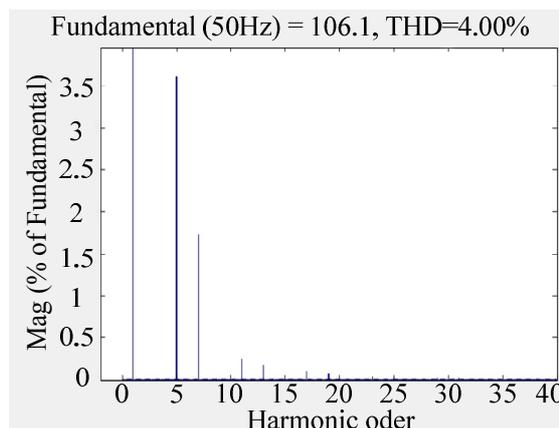


Рис. 6. Спектральный состав сигнала скомпенсированного тока в результате применения метода мгновенной мощности

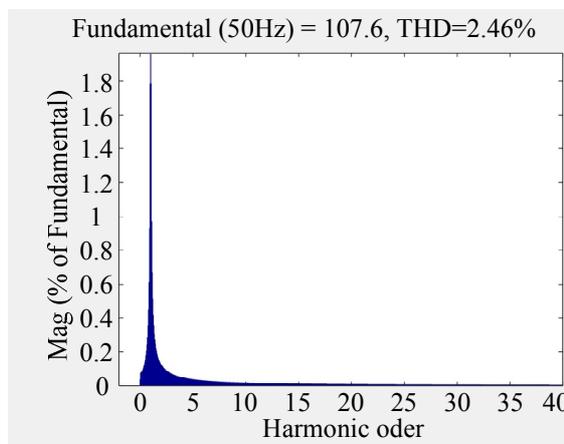


Рис. 7. Спектральный состав сигнала скомпенсированного тока в результате применения метода режекторной фильтрации

*Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Ю.К., Рябчинский М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
2. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Боярская Н.П. и др.; ред. В.П. Довгун. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2014.
3. Боярская Н.П., Дербенев А.М., Довгун В.П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник // Ползуновский вестник. 2011. № 2/1. С. 25-29.
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Wiley-IEEE Press, N. J., 2007. 375 p.
5. Akagi H. Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. No. 12. P. 2128-2141.
6. Жуков Н.А. Применение метода мгновенной мощности в системе управления активным фильтрокомпенсирующим устройством // Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. X междунар. науч.-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 т. Т. 4. / сост. В.Н. Рошупкина, В.Н. Уваров [и др.]. Губкин; Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2017. С. 227-231.

7. Mahni T. et al. Three-phase for-wire shunt active filter with unbalanced loads // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 528-535.
8. Климаш В.С., Светлаков Д.П. Анализ физических процессов компенсатора реактивной мощности с симметрированием тока сети и новым принципом управления // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2007. № 5. С. 18-22.
9. Jeno Paul R.D.P., Raglend J. Design and Simulation of Phase Locked Loop Controller Based Three Phase Unified Power Quality Conditioner for Nonlinear and Voltage Sensitive loads // *International journal of applied Engineering research*, Dindigul. 2010. Vol. 1. No. 2. P. 234-243.
10. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / пер. с англ.; под ред. Б.Н. Бронина. М.: Бином, 2012.
11. Авербух М.А., Жуков Н.А., Хворостенко С.В. Оценка уровня высших гармоник токов и напряжений в электрических сетях заводов железобетонных изделий // *Научное обозрение*. 2016. № 7. С. 79-85.
12. Жуков Н.А. Сравнение систем управления активными фильтрокомпенсирующими устройствами при нестационарных процессах // *Молодежь. Наука. Технологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конференции студентов и молодых ученых: в 4 ч. / под ред. Е.Г. Гуровой, С.В. Макарова*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. ISBN 978-5-7782-3196-2. Ч. 4: Промышленная электроника. Энергетика. С. 31-33.

Поступила в редакцию 16 августа 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SIMULATION MODELING OF ACTIVE FILTERS CONTROL SYSTEM

Nikolay A. Zhukov

Teaching Assistant, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, Russia.  
E-mail: Nikolayzhukov1993@gmail.com.

The paper is concerned with power active filters of high harmonics control system. Shunt active filter generalized structure was investigated. A functional unit responsible for generating a distortion signal of the circuit currents is considered in the structure of the control system. Two ways of isolating the distortion signal are analyzed: the instantaneous power method and the notch filtering method. The instantaneous power method (p-q theory) assumes the use of the Clarke transformation for the transition from a single-phase system of currents and voltages to a two-phase system. Then, the active and reactive powers are calculated, the variable components of which are determined by the presence of higher harmonic components. The allocation of variable power components is necessary for calculating distortion currents from the beginning in a two-phase system, and after an inverse transformation, and in a three-phase coordinate system. The second method consists in filtering the notch filter tuned to the frequency of the first harmonic of the current, and thus obtaining a distortion signal. Structural diagrams of systems constructed according to the methods are studied. Research and comparison of the systems were carried out by the method of simulation modeling. As the simulation results, the spectral compositions of the compensated currents of the power supply system with consumers having nonlinear current-voltage characteristics are given. Also, the values of the non-sinusoidal current coefficients were obtained during the simulation. The analysis of the obtained results made it possible to draw a conclusion about the most preferable use of the notch filtering method in the structure of the active filter control system.

**Keywords:** Control system, power active filter, simulation modelling, high harmonics compensation, instantaneous power theory, phase-locked loop.

#### REFERENCES

1. Rozanov Yu.K., Ryabchinskiy M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow: Izd. dom MEI, 2007. (In Russian)
2. Boyarskaya N.P. and others. *Sintez filtrokompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem elektrosnabzheniya: kollektivnaya monografiya* [Synthesis of filter compensating devices for power supply systems: collective monograph]. [ed. V.P. Dovgun]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2014.
3. Boyarskaya N.P., Derbenev A.M., Dovgun V.P. Adaptive system for generating control signals for active harmonic filters. *Polzunovskiy vestnik*. 2011, no. 2/1, pp. 25-29. (In Russian)
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press, N. J., 2007. 375 p.
5. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. vol. 93. 2005, no. 12, pp. 2128-2141.
6. Zhukov N.A. Application of the instantaneous power method in the control system of the active filter compensating device. *Molodezh i nauchno-tekhnicheskii progress: Sbornik dokladov X mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: v 4t* [Young people and scientific and technical progress: Collected papers of the X International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists: in 4 volumes]. Vol. 4. Compiled by V.N. Roshchupkina, V.N. Uvarov [and others]. Gubkin, Staryy Oskol: Assistent plyus, 2017, pp. 227-231. (In Russian)
7. Mahni T. et al. Three-phase for-wire shunt active filter with unbalanced loads. *Energy Procedia*. 2014, vol. 50, pp. 528-535.
8. Klimash V.S., Svetlakov D.P. Analysis of physical processes of the compensator of reactive power with the symmetry of the network current and a new control principle. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry]. 2007, no. 5, pp. 18-22. (In Russian)
9. JenoPaul R.D.P., Raglend J. Design and Simulation of Phase Locked Loop Controller Based Three Phase Unified Power Quality Conditioner for Nonlinear and Voltage Sensitive loads // *International journal of applied Engineering research*, Dindigul. 2010, vol. 1, no. 2, pp. 234-243.
10. Horovits P., Hill W. *Iskusstvo skhemotekhniki* [The art of electronics]: Translation from English P. Horovits, Under the editorship of B.N. Bronina. Moscow: Binom, 2012.
11. Averbukh M.A., Zhukov N.A., Khvorostenko S.V. Evaluation of the level of higher harmonics of currents and volt-

ages in electrical networks of reinforced concrete products plants]. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific review]. 2016, no. 7, pp. 79-85. (In Russian)

12. Zhukov N.A. Comparison of control systems of active filter-compensating devices in nonstationary processes. *Molodezh. Nauka. Tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*

*studentov i molodykh uchenykh v 4 ch.* [The youth. The science. Technologies: a collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists in 4 parts] Ed. E.G. Gurovoy, S.V. Makarova. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017, vol. 4: Promyshlennaya elektronika. Energetika. [Industrial electronics. Power Industry], pp. 31-33.

---

Жуков Н.А. Имитационное моделирование систем управления активными фильтрами // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4(37). С. 27-31. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-27-31](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-27-31)

Zhukov N.A. Simulation modeling of active filters control system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 27-31. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-27-31](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-27-31)

---