

Е.В. Ягуп

СИЛОВОЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ПРИ РАБОТЕ НА НЕСИММЕТРИЧНУЮ И НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКИ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

Стаття присвячена дослідженню трифазної чотирипровідної системи електропостачання, що живить несиметричне трифазне і нелінійне однофазне навантаження. Силовий активний фільтр являє собою чотириплечовий мостовий інвертор на IGBT транзисторах. Інвертор живиться від енергообмінного конденсатора і інжектуює коригувальні струми через буферні реактори. На відміну від класичної системи управління, заснованої на перетвореннях Кларк для напруг і струмів, в даному варіанті запропоновано управління джерелами еталонних сигналів, які апіорі мають синусоїдальну форму і збігаються з фазами живильних джерел електричної енергії. Визначення необхідних амплітуд еталонних сигналів становить сутність пошукової оптимізації. Оптимізація здійснюється шляхом деформованого багатогранника з використанням візуальної моделі системи електропостачання з силовим активним фільтром. По завершенні оптимізації система приходить до оптимального режиму, що характеризується повною компенсацією всіх складових реактивної потужності. Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова: пошукова оптимізація, візуальна модель, трифазна система електропостачання, реактивна потужність, силовий активний фільтр.

Статья посвящена исследованию трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения, питающей несимметричную трехфазную и однофазную нелинейную нагрузку. Силовой активный фильтр представляет собой четырехплечевой мостовой инвертор на IGBT транзисторах. Инвертор питается от энергообменного конденсатора и инжектирует корректирующие токи через буферные реакторы. В отличие от классической системы управления, основанной на преобразованиях Кларк для напряжений и токов, в рассматриваемом варианте предложено управление источниками эталонных сигналов, априори имеющими синусоидальную форму и совпадающими с фазами питающих источников электрической энергии. Определение необходимых амплитуд эталонных сигналов составляет сущность задачи поисковой оптимизации. Оптимизация осуществляется методом деформируемого многогранника с использованием визуальной модели системы электроснабжения с силовым активным фильтром. По завершении оптимизации система приходит к оптимальному режиму, характеризующемуся полной компенсацией всех составляющих реактивной мощности. Библ. 9, рис. 4.

Ключевые слова: поисковая оптимизация, визуальная модель, трехфазная система электроснабжения, реактивная мощность, силовой активный фильтр.

Введение. Несимметричные и нелинейные нагрузки в трехфазных системах электроснабжения порождают ряд проблем, связанных, в конечном счете, с реактивной мощностью. Циркуляция реактивной мощности в системе в свою очередь приводит к возрастанию токов в линиях электропередач, увеличению необратимых тепловых потерь в проводах, перегреву и преждевременному выходу из строя изоляции электротехнических устройств [1]. В связи с этим вопросы симметрирования и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения представляют собой большой и неослабевающий интерес в течение последних десятилетий. Ряд работ в этом направлении связаны с исследованиями физической природы реактивной мощности и математическими трактовками ее поведения в зависимости от причин ее появления [2]. В этом плане характерен отход от традиционных представлений, сложившихся в 20-50 годы прошлого столетия и выявление слабых сторон этих теорий [3, 4]. Необходимость применения новых теорий, основанных, в частности, на использовании понятия мгновенной мощности, диктуется разработкой систем управления силовыми активными фильтрами [4-8], которые позволяют коренным образом решить проблемы, связанные с несимметричностью и несинусоидальностью напряжений и токов в трехфазных системах электроснабжения. Силовые схемы активных фильтров строятся на основе трехфазных инверторов на IGBT транзисторах с энергообменным конденсатором, заряжаемым через шунтирующие обратные диоды. Генерируемые корректирующие токи через буферные реакторы инжектируются в систему

электроснабжения в точках подключения нагрузок для случая параллельного активного фильтра. Ответственным элементом силового активного фильтра является система управления транзисторами, которая является интеллектуальным устройством, содержащим достаточно сложные вычислительные блоки, реализуемые с помощью микроконтроллеров. Уже установилась традиция проектирования систем управления на основе использования преобразований Кларк и теории мгновенной мощности [5-7]. В то же время не прекращаются попытки применить другие подходы для управления силовыми активными фильтрами, в частности, на основе применения алгоритмов поисковой оптимизации [9]. Эти алгоритмы предполагают нахождение квазиустановившегося режима системы электроснабжения с активным фильтром при помощи программных средств оптимизации, тем самым позволяя исключить указанные традиционные преобразования и получить оптимальные решения для искомого режима.

Цель работы заключается в применении методов поисковой оптимизации для нахождения квазиустановившегося режима трехфазной системы электроснабжения с силовым активным фильтром параллельного типа при одновременном питании трехфазной несимметричной активно-индуктивной нагрузки и нелинейной вентильной нагрузки.

Основной материал исследования. Визуальная модель исследуемой системы электроснабжения приведена на рис. 1.

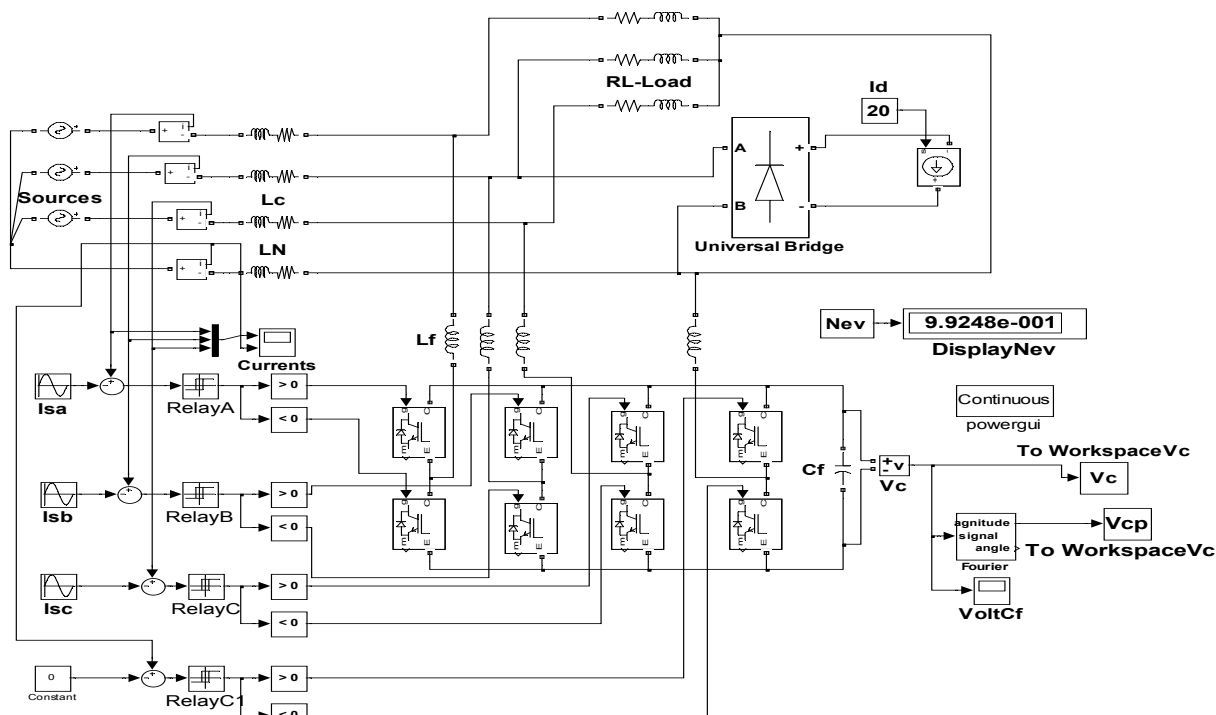


Рис. 1. Визуальная модель исследуемой системы

Здесь питающая трехфазная симметричная сеть бесконечной мощности представлена источниками напряжения Sources, имеющих нормированную амплитуду 100 В и частоту 50 Гц. Линии электропередачи, в отличие от [2], не внесены в нагрузку, а рассматриваются отдельно и, таким образом, не охватываются силовым активным фильтром. Они представлены активно-индуктивными элементами L_c , сопротивления резисторов которых приняты равными 0,1 Ом, а индуктивности – 0,001 Гн. Сопротивление и индуктивность нейтрального провода LN в три раза превышают соответствующие величины параметров линий электропередачи. Трехфазная несимметричная линейная нагрузка RL-Load по схеме звезды, соединенной с нейтральным проводом, имеет следующие величины параметров по фазам: $R_a=1,5$ Ом, $L_a=0,025$ Гн, $R_b=1,0$ Ом, $L_b=0,01$ Гн, $R_c=2,0$ Ом, $L_c=0,04$ Гн. Нелинейная нагрузка представлена однофазным мостовым выпрямителем Universal Bridge. Он присоединен к фазе В в точке подключения линейной нагрузки и к нейтральному проводу, таким образом, выпрямитель питается фазным напряжением. Нагрузка выпрямителя осуществляется управляемым источником постоянного тока фиксированной величины $I_d=20$ А. Силовой блок активного фильтра представлен в виде инвертора четырьмя плечами IGBT транзисторов, каждый из которых шунтирован обратным диодом. Через обратные диоды заряжается энергообменный конденсатор C_f , который фактически питает активный фильтр, для чего необходимо обеспечить заряд этого конденсатора до напряжения, превышающего амплитуду линейного напряжения сети в точках подключения нагрузок. К этим точкам через буферные реакторы L_f подводятся корректирующие токи, снимаемые с диагоналей мостов инвертора. Эти токи должны обеспечить в линиях электропередачи синусоидальные токи, совпадающие по фазе с напряжениями фаз соответствующих источников питания.

Система управления активным фильтром построена по релейному принципу. Она реализуется при помощи четырех релейных элементов Relay, с выходов которых сигналы разделяются на два канала при помощи элементов сравнения с нулем. Получаемые пары импульсных сигналов подаются на транзисторы верхнего и нижнего плеча соответствующей фазы. Таким образом осуществляется широтно-импульсная модуляция, благодаря которой и формируются корректирующие токи активного фильтра. Для формирования сигналов по релейному принципу с помощью измерителей токов снимаются токи в линиях электропередачи и нейтральном проводе. Далее из полученных сигналов вычитаются эталонные сигналы, форму которых должны повторить в результате воздействия корректирующих токов фильтра токи в линиях нагрузки и нейтральном проводе. Поэтому эталонные сигналы I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} для фаз А, В, С соответственно заданы в виде трехфазной симметричной системы синусоид подобным синусоидам питающих напряжений системы электроснабжения. Поскольку нейтральный провод должен быть совершенно разгружен, эталонный сигнал для него задан источником нулевой константы. При таких условиях для выхода на квазиустановившийся режим остается неизвестной лишь амплитуда эталонных сигналов, обеспечивающая этот режим.

Нескомпенсированный режим при отключенном силовом активном фильтре характеризуется несинусоидальностью и нелинейностью токов и напряжений в системе и перегрузкой нейтрального провода по току. На рис. 2 приведены три тока в линиях электропередачи (верхние диаграммы) и ток в нейтральном проводе. Здесь видно, что ток в фазе В, которая подгружена выпрямителем, достигает амплитуды 40 А, а ток в нейтральном проводе – 25 А, что в два раза превышает амплитуды линейных токов фаз А и С. Все токи имеют явно выраженную несинусоидальную форму, что означает присутствие в системе токов высших гармоник и реактивной мощности искажений.

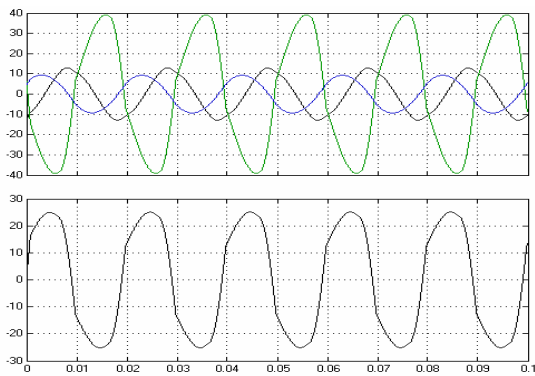


Рис. 2. Токи в нескомпенсированном режиме

Оптимизация режима осуществляется при подключенном силовом активном фильтре программными средствами Matlab с использованием представленной визуальной модели. Оптимизация основана на требовании задания такого единственного значения амплитуд эталонных сигналов для фаз, при котором в системе имеет место квазиустановившийся режим. Он характеризуется установлением периодических токов и напряжений на всех элементах системы. В частности, напряжение на энергообменном конденсаторе должно представлять сумму постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая напряжения на конденсаторе, как указано ранее, должна превосходить амплитуду линейного напряжения. Пульсации напряжения на конденсаторе, представляющие переменную составляющую, зависят от нагрузки и величины емкости энергообменного конденсатора. С точки зрения работоспособности фильтра можно считать, что эта емкость бесконечна, и в этом случае играет роль источника напряжения. В этом случае пульсации будут отсутствовать. Однако на практике емкость энергообменного конденсатора конечна (в модели ее величина принята равной 600 мкФ). При конечной величине емкости конденсатора напряжение на нем отражает отличие амплитуды эталонного сигнала от оптимальной величины. При превышении этой величины в систему поступает избыточная энергия и напряжение на энергообменном конденсаторе стремится нарастать, достигая в асимптотике некоторого весьма большого значения, соответствующего условиям баланса активных мощностей. При недостатке амплитуды эталонного сигнала напряжение на энергообменном конденсаторе стремится убывать из-за недостатка поступающей в систему энергии, достигая в асимптотике нулевого значения, что отнюдь не соответствует нормальным условиям работы силового активного фильтра. Таким образом, напряжение на энергообменном конденсаторе фильтра при условии конечной величины его емкости является своего рода индикатором достижения оптимального скомпенсированного режима в системе.

Программные средства оптимизации взяты из стандартной библиотеки Matlab, где имеются такие программы нелинейной оптимизации, как `fminsearch()`, реализующая алгоритм деформируемого многогранника, и `fminunc()`, использующая метод сопряженных градиентов. Обе программы легко взаимозаменяемы изменением имени, по которому они вызываются, аргументы у обеих функций могут совпадать. В качестве переменных оптимизации используются амплитуда эталонного сигнала системы управления и начальное напряжение на энергообменном конденсаторе. Целевая функция формируется из

дискретных значений напряжения на энергообменном конденсаторе. Эти значения выдаются на интервале прогона визуальной модели в течение пяти периодов питающего напряжения с интервалом дискретизации, равным периоду питающего напряжения. Для формирования целевой функции составляются разности смежных дискретных значений, из которых формируется шаровая метрика. Дополнительно введено также условие достижения дискретными значениями заданного уровня (в работе он принимался равным 400 В). Таким образом, при прогоне модели дискретные значения передаются в рабочую область Matlab, где они подхватываются дополнительной функцией, осуществляющей прогон визуальной модели с последующим вычислением значения целевой функции, которое далее передается в головную программу, вызывающую функцию оптимизации. На рис. 1 показано состояние модели по достижении минимума, где можно видеть значение целевой функции в виде глобальной константы $Nev = 0,99248$, что достаточно точно определяет скомпенсированный режим в системе. Амплитуды эталонных сигналов при этом составили величины $I_{sm} = 12,369$ А. Из этого значения 4,243 А приходится, как это показано в [10], на питание несимметричной линейной нагрузки, а остальная доля 8,126 А приходится на обеспечение питания нелинейной нагрузки выпрямителя. Справедливость этого распределения иллюстрируется простым оценочным расчетом доли активной мощности, потребляемой выпрямителем. На рис. 3 приведены диаграммы токов в линиях нейтральном проводе в скомпенсированном режиме (аналогичные диаграммам на рис. 2). Здесь видно, что амплитуды линейных токов уравнились, а их фазы совпадают с фазами питающих напряжений. Ток в нейтральном проводе практически исчез. Это свидетельствует о полном симметрировании и уравнивании режима в системе электроснабжения.

На рис. 4 приведена диаграмма напряжения на энергообменном конденсаторе. Оно начинается с найденного в ходе поисковой оптимизации напряжения в нулевой моменте $V_{co} = 401,562$ В и образует вектор дискретных величин $V_c = [400.099; 399.878; 399.885; 399.356; 399.179]$, свидетельствующих об обеспечении заданного стабильного напряжения на энергообменном конденсаторе в пределах заданной погрешности.

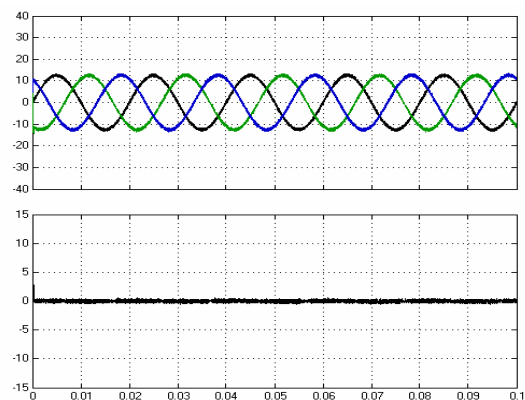


Рис. 3. Токи в скомпенсированном режиме

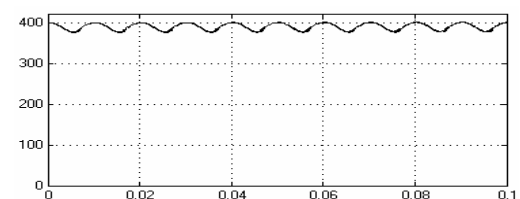


Рис. 4. Напряжение на конденсаторе

Выводы. Проведенное исследование показывает, что предложенный алгоритм управления активным фильтром, основанный на применении поисковой оптимизации совместно с визуальной моделью системы электроснабжения, позволяет определить квазиустановившийся режим системы и выйти на оптимальный режим полной компенсации всех составляющих реактивной мощности при питании несимметричной линейной и нелинейной нагрузок. При этом представляется возможным сформировать целевую функцию из дискретных значений напряжения на энергообменном конденсаторе, а в качестве переменных оптимизации использовать амплитуду эталонного синусоидального сигнала для предложенной системы управления и начальное значение напряжения на энергообменном конденсаторе. Введение в выражение для целевой функции параметра стабилизации напряжения на энергообменном конденсаторе позволяет также задать должный уровень превышения напряжения на конденсаторе над амплитудой линейного напряжения сети, обеспечив тем самым нужное направление потока энергии от фильтра к сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. – Bodmin, MPG Books Ltd, Cornwall. – 2002. – 443 p. ISBN 0 7506 5126 1.
2. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных PQR координатах // *Электротехника і електромеханіка*. – 2016. – №2. – С. 11-20. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.02.
3. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1987. – vol.IM-36. – no.3. – pp. 834-837. doi: 10.1109/TIM.1987.6312797.
4. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1996. – vol.11. – no.3. – pp. 1238-1243. doi: 10.1109/61.517477.
5. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits // *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan. – 1983. – pp. 1375-1386.
7. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1984. – vol.IA-20. – no.3. – pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
8. Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 1998. – vol.13. – no.6. – pp. 1174-1181. doi: 10.1109/63.728344.
9. Ягуп Е.В. Оптимизация режима несимметричной трехфазной системы с использованием активного фильтра и модифицированного алгоритма управления // *Вісник НТУ «ХПІ»*, серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2016. – №42(1214). – С. 124-128. doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.20.

REFERENCES

1. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Bodmin, MPG Books Ltd, Cornwall, 2002. 443 p. ISBN 0 7506 5126 1.
2. Zhemerov G.G., Tugay D.V. Components of total electric energy losses power in PQR spatial coordinates. *Electrical*

engineering & electromechanics, 2016, no.2, pp. 11-20. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.02.

3. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987, vol.IM-36, no.3, pp. 834-837. doi: 10.1109/TIM.1987.6312797.
4. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol.11, no.3, pp. 1238-1243. doi: 10.1109/61.517477.
5. Akagi H., Watanabe E. H. and Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, April 2007. 379 p. ISBN: 978-0-470-10761-4.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
7. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol.IA-20, no.3, pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
8. Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, vol.13, no.6, pp. 1174-1181. doi: 10.1109/63.728344.
9. Yagup E.V. Optimization of the mode of asymmetric three-phase system using an active filter and a modified control algorithm. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*, 2016, no.42(1214), pp. 124-128. (Rus). doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.20.

Ягуп Екатерина Валериевна, к.т.н., доц.,
Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,
тел/phone +380 57 7073114, e-mail: kata3140@gmail.com

E.V. Yagup

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

An active power filter at operation on the unbalanced and nonlinear loads with control by optimization algorithm.

Purpose is to develop a method for controlling a power active filter based on search optimization using software of Matlab package and applying this method for balancing and compensating for all components of reactive power in a three-phase system feeding unbalanced linear and nonlinear loads simultaneously. **Methodology** consists in the development of a visual model of the power supply system that supplies unbalanced and non-linear loads, to the connection points of which a power active filter on IGBT transistors is connected according to a parallel type scheme. We propose an algorithm for calculating the chosen optimization criterion using a visual model, linking the visual model with an optimizing program, and performing a search engine optimization process using an embedded program that implements the deformable polyhedron algorithm. **Results** lead to an optimal mode, which is characterized by the amplitudes of the control signals of the power active filter control system determined by the search, as well as the initial value of the voltage on the filter energy exchange capacitor. **Originality** lies in the fact that the proposed method of controlling the operation of the power filter makes it possible to dispense with the construction of a relatively complex filter control system based on Clark's mathematical transformations. **Practical value** lies in the fact that finding a quasi-steady-state optimal mode of the power supply system with a power active filter is performed automatically in the process of search optimization with a simplified control system. The above principles can be implemented in the microprocessor control system for power active filters. References 9, figures 4

Key words: search optimization, visual model, three-phase power supply system, reactive power, power active filter.