

УДК 621.311.004

**ГИБРИДНЫЕ ФИЛЬТРЫ В УСТРОЙСТВАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****А. А. Колб**Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет"  
просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E-mail: aakolb@gmail.com

Выполнен анализ компоновки и управления гибридными фильтрами, представляющими собой комбинации пассивного фильтра и активного фильтра. Применение гибридных фильтров позволяет существенно снизить требования по току и напряжению к активному фильтру в составе гибридного. Получены выражения для оценки соотношения установленных мощностей силового активного компенсатора и активного фильтра в составе гибридного.

**Ключевые слова:** активный фильтр, гибридный фильтр.**ГІБРИДНІ ФІЛЬТРИ В ПРИСТРОЯХ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ****А. А. Колб**Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет"  
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E-mail: aakolb@gmail.com

Виконано аналіз компоновання й керування гібридними фільтрами, що є комбінаціями пасивного й активного фільтра. Застосування гібридних фільтрів дозволяє суттєво знизити вимоги за струмом й напругою до активного фільтра у складі гібридного. Отримано вирази для оцінки співвідношення встановлених потужностей силового активного компенсатора й активного фільтра у складі гібридного.

**Ключові слова:** активний фільтр, гібридний фільтр.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В настоящее время одной из актуальных и востребованных проблем электроснабжения является повышение качества электроэнергии. Острота этой проблемы связана с непрерывным ростом числа и установленной мощности нелинейных и несимметричных потребителей с динамической нагрузкой (включая однофазные) на основе вентильных преобразователей. Это приводит к значительному искажению формы кривых тока и напряжения, росту неактивных составляющих полной мощности и потерь электроэнергии. Тенденция развития преобразовательной техники такова, что доля высших гармоник тока и напряжения будет непрерывно увеличиваться.

Одним из традиционных способов повышения коэффициента мощности и подавления высших гармоник является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), настроенных в резонанс на частоты дополнительных гармоник. Эффективность их применения ограничена рядом существенных недостатков [1, 2]. Вследствие технологических, временных и температурных отклонений параметров реактивных элементов фильтра практически невозможно их точная настройка в резонанс, что снижает эффективность фильтрации высших гармоник. Кроме того, вследствие возникновения резонансных явлений и негативного влияния ФКУ на переходные процессы, возникают перенапряжения в системах электроснабжения. При сложном характере амплитудного спектра гармоник, когда появляются дробные гармоники, применение ФКУ становится неэффективным [1].

Развитие преобразовательной техники и микропроцессорных систем управления позволяет создать принципиально новые и более эффективные методы и средства нормализации традиционных показателей качества электроэнергии с помощью силовых активных компенсаторов (САК) на основе АИН с ШИМ [3–5]. Такие фильтры (рис. 1,а), управляемые

с использованием метода  $I_x, I_y$  ( $I_x, I_y$ ) теории мгновенной мощности, позволяют с высоким быстродействием и точностью компенсировать неактивные составляющие полной мощности [3–5]. Широкое применение САК (рис. 1,а) ограничивается их высокой стоимостью, обусловленной большой установленной мощностью, соизмеримой с полной реактивной мощностью, подлежащей компенсации.

Целью работы является анализ компоновки и управления гибридными фильтрами, представляющими собой комбинации пассивного фильтра (ПФ) и активного (АФ).

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Схемы параллельного подключения АФ дросселю ПФ представлены на рис. 1,в,г [6]. Следует добавить, что активный фильтр может быть подключен параллельно или последовательно дросселю с помощью трансформатора, в том числе и на высокой стороне. Совместное использование пассивных и активных фильтров в составе гибридного фильтра (рис. 1,в) позволяет существенно (в несколько раз) снизить установленную мощность АФ в сравнении с САК в схеме рис. 1,б.

Активный фильтр в составе гибридного позволяет не только корректировать резонансную частоту ПФ, но и регулировать его добротность в широких пределах, компенсируя падение напряжения на его активном сопротивлении. В результате этого повышается степень фильтрации гармоник на частоте настройки ПФ.

В случае необходимости фильтрации всего спектра гармоник и компенсации реактивной мощности сдвига первых гармоник и несимметрии нагрузки перспективной является схема рис. 1,г. В этой схеме один или два ПФ настраиваются на доминирующие в спектре гармоники, например, пятую и седьмую. Параллельно дросселю каждого ПФ подключается АФ, образуя гибридный фильтр для каждой из гармоник, компенсирующий неточность настройки ПФ.

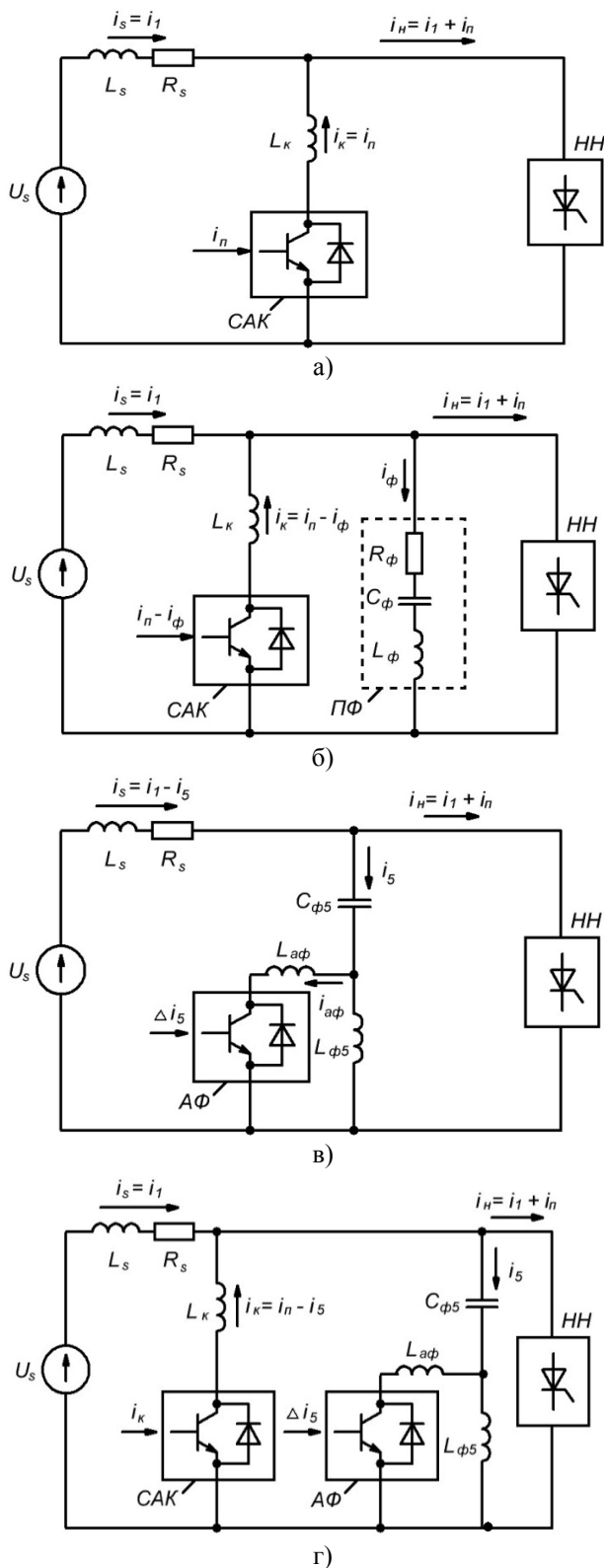


Рисунок 1 – Однофазные схемы подключения силового активного компенсатора (а, б) и гибридных фильтров (в, г)

Параметры реактивных элементов ПФ определяются не только из условия фильтрации соответствующей гармоники, но и компенсации расчетного (заданного) значения реактивной мощности. При этом в случае отклонения реактивной мощности от расчетной происходит недокомпенсация или перекомпенсация. Поэтому для полной фильтрации ос-

тавшегося спектра гармоник и компенсации реактивной мощности, отличной от расчетной, в схеме (рис.1,г) используется САК, с помощью которого можно также решить и ряд других задач, например, симметрирование трехфазной нагрузки, стабилизацию напряжения и др. [4, 5]. Это позволяет полностью компенсировать все неактивные составляющие полной мощности и обеспечить синусоидальность тока и напряжения, что снижает дополнительные потери, увеличивает пропускную способность линий и срок службы изоляции, улучшается электромагнитная совместимость с другими потребителями.

В случае несинусоидального и несимметричного напряжения сети и наличия нелинейных потребителей перспективным является последовательно-параллельное объединение активных фильтров напряжения и тока (рис. 2). Наличие трансформатора в последовательном фильтре напряжения позволяет объединить их цепи в звене постоянного тока общим конденсатором  $C_d$ . Это дает возможность применить такую же комбинацию фильтров и на высокой стороне (рис. 2). На низкой стороне необходимость применения трансформатора Тр в схеме (рис. 2) отпадает. Способ формирования управляющих сигналов определяет быстродействие и точность компенсации неактивных составляющих полной мощности в статических и динамических режимах. Применение обобщенных (пространственных) векторов напряжения и тока в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$  позволяет с высокой точностью выделить и непрерывно контролировать мгновенные значения неактивных составляющих полной мощности. Система координат ориентирована по напряжению сети, отфильтрованного от высших гармоник с помощью последовательного активного фильтра напряжения. Применение релейных регуляторов тока с гистерезисом, охваченных обратной связью, обеспечивает при заданных энергетических ограничениях предельно возможные быстродействие и высокую точность САК [4, 5]. Для реализации метода ШИМ необходимо управляющие сигналы, пропорциональные неактивным составляющим тока, подлежащим компенсации, проинтегрировать и использовать в качестве модулирующего напряжения.

Выясним влияние отклонения параметров реактивных элементов пассивного фильтра на форму резонансной кривой  $I = f(\Delta x)$  при  $\omega = \omega_0 = const$ , где  $\Delta x$  – отклонение сопротивления резонансного контура. Обозначим  $L = L_0$ ,  $C = C_0$  при резонансной частоте  $\omega_0$  и преобразуем выражение полного сопротивления резонансного контура:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + \left[ L_0 \omega_0 \left( \frac{L}{L_0} - \frac{C_0}{C} \right) \right]^2} = R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{L}{L_0} - \frac{C_0}{C} \right)^2} = R \sqrt{1 + Q^2 \Delta x^{*2}},$$

где  $(L/L_0 - C_0/C)^2 = \Delta x^2 / x_0^2 = \Delta x^{*2}$  – квадрат отно-

сительного отклонения сопротивления контура от резонансного;  $x_0 = \omega_0 L_0 = 1/\omega_0 C_0$  – резонансное сопротивление реактивных элементов цепи;  $Q$  – добротность контура.

На основании (1) можно определить ток в контуре LC при отклонении сопротивлений его элементов на величину  $\Delta x$ :

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}} = \frac{I_0}{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}}, \quad (2)$$

где  $I_0 = U/R$  – действующее значение тока соответствующей гармоники при резонансе.

Разность токов  $I_0 - I = I_f$  определяет ток, который должен генерировать САК в схеме (рис. 1,б), включенный параллельно нелинейной нагрузке для полной фильтрации соответствующей гармоники, т.е.

$$I_f = I_0 - I = \frac{I_0(\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}} - 1)}{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}}. \quad (3)$$

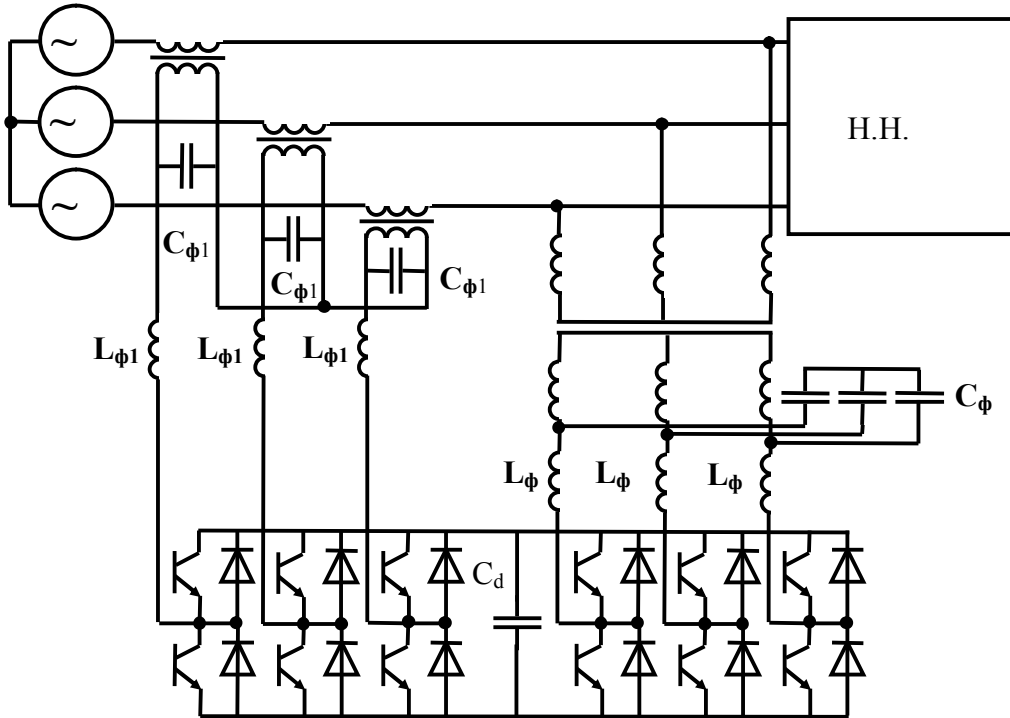


Рисунок 2 – Совместное подключение последовательного и параллельного активных фильтров

Разность падений напряжений на реактивных элементах резонансного контура при отклонении их сопротивлений на величину  $\Delta x$  составит при этом с учетом (2):

$$\Delta U = I\Delta x = I\Delta x^* x_0 = \frac{I_0\Delta x^* x_0}{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}}. \quad (4)$$

Для того, чтобы снова вернуть контур в режим резонанса, необходимо в системах с гибридными фильтрами, в которых активный фильтр подключен параллельно дросселю, изменить с его помощью ток дросселя на величину:

$$I_g = \frac{\Delta U}{x_0 \pm \Delta x} = \frac{I_0\Delta x^* x_0}{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}(x_0 \pm \Delta x)}. \quad (5)$$

Для оценки установленной мощности активного фильтра в системе гибридного можно с учетом колебаний сопротивления  $\pm \Delta x$  использовать среднее значение тока АФ:

$$I_{g.sr} = \frac{I_0\Delta x^*}{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}}}. \quad (6)$$

На основании (3) и (6) отклонение токов САК и активного фильтра в составе гибридного определяется как

$$\frac{I_f}{I_{g.sr}} = \frac{\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}} - 1}{\Delta x^*}. \quad (7)$$

Соотношение установленных мощностей САК и АФ в составе гибридного с учетом (7) можно приблизительно оценить как

$$\frac{P_f}{P_g} = \frac{U_{d.f}(\sqrt{1+Q^2\Delta x^{*2}} - 1)}{U_{d.g}\Delta x^*},$$

где  $U_{d.f}, U_{d.g}$  – соответственно напряжения в звене постоянного тока САК и гибридного, отношение которых равно приблизительно двум.

Так, например, при  $Q=10$  и  $\Delta x=0,1$  отношение мощностей равно восьми, а с ростом  $Q$  заметно растет. Поэтому применение гибридных фильтров позволяет существенно снизить требования по току и напряжению к активному фильтру в составе гибридного.

**ВЫВОДЫ.** 1. Гибридные фильтры на основе пассивного и активного фильтра, включенного последовательно дросселем, позволяют автоматически корректировать резонансную частоту и добротность контура и тем самым повысить степень фильтрации гармоник на частоте резонанса.

2. Гибридные фильтры позволяют в несколько раз снизить требования по току и напряжению активного фильтра, включенного параллельно дросселю пассивного фильтра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко В.И. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

2. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // *Электротехника*. – 1999. – № 4. – С. 28–32.

3. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования актив-

ного фильтра // *Электротехника*. – 2002. – № 12. – С. 40–48.

4. Колб А.А. Система автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых инверторов с релейно-векторным управлением // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 37–41.

5. Колб А.А. Система группового питания электроприводов с емкостными накопителями и силовыми активными компенсаторами // *Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика"*. – Днепропетровск: ДГТУ, 2007. – С. 119–121.

6. Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // *Электротехника*. – 2010. – № 6. – С. 55–60.

#### HYBRID FILTERS IN ELECTRIC POWER QUALITY CONTROL UNITS

**A. Kolb**

State Higher Education Institution «National Mining University»

ul. K. Marxa, 19, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine. E-mail: aakolb@gmail.com

The analysis of build and management of hybrid filter, which is a combination of passive filters and active filters. The use of hybrid filters can significantly reduce the requirements for voltage and current to the active filter in the hybrid. The expressions for estimating the relation installed capacities of power active compensator and an active filter in the hybrid is obtained.

**Key words:** active filter, hybrid filter.

#### REFERENCES

1. Zhezhelenko V.I. *Ultraharmonics is in the systems of power supply of enterprises*. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 p. [in Russian]

2. Rozanov J.K., Ryabchitsky M.V., Kvasnyuk A.A. Modern methods of electric power quality adjusting by power electronics // *Electrical Engineering*. – 1999. – № 4. – PP. 28–32. [in Russian].

3. Volkov A.V. The analysis of electromagnetic processes and improving of active filter control // *Electrical Engineering*. – 2002. – № 12. – PP. 40–48. [in Russian]

4. Kolb A.A. The system of automatic control of electric power quality on the basis of the fully controlled inverters with relay vector control // *Bulletin of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*. – Kremenchuk: KDPU, 2004. – Iss. 2/2004 (25). – PP. 37–41. [in Russian]

5. Kolb A.A. System of group feed of electromechanics with capacity stores and power active compensators // *Proceedings of the Dneprodzerzhinsk State Technical University (Engineering Sciences). Special Issue "The problems of automated electric. Theory and Practice."* – Dneprodzerzhinsk: DSTU. – 2007. – PP. 119–121. [in Russian]

6. Rozanov J.K., Greenberg R.P. Hybrid filters to reduce wave form of current and voltage in power systems // *Electrical Engineering*. – 2010. – № 6. – PP. 55–60. [in Russian]

Стаття надійшла 9.07.2012.

Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Садовим О.В.