

**Ю.П. Гончаров, д-р техн. наук, В.В. Замаруев канд. техн. наук, В.В. Ивахно, Ю.В. Чурсина, Ю.П. Шульга**

(Украина, Харьков, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт")

**Н.В. Панасенко, д-р техн. наук, В.В. Божко канд. техн. наук**

(Украина, Киев, Государственное предприятие "Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины")

**В.Г. Сыченко, канд. техн. наук, В.А. Зубенко**

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В.А. Лазаряна)

## СИСТЕМА АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ДОРОГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Анализ состояния проблемы и постановка задачи работы

Процесс разработки и внедрения новых мировых стандартов на качество потребляемой электроэнергии, который идет в настоящее время, вынуждает по-новому взглянуть на проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразовательных агрегатов тяговых подстанций с питающей сетью промышленного переменного тока. Можно констатировать, что имеющееся в настоящее время электрооборудование тяговых подстанций не удовлетворяет новым требованиям, прежде всего, по двум основным показателям:

- гармоническому составу потребляемого из сети тока;
- соотношению между активной и реактивной компонентами потребляемой мощности.

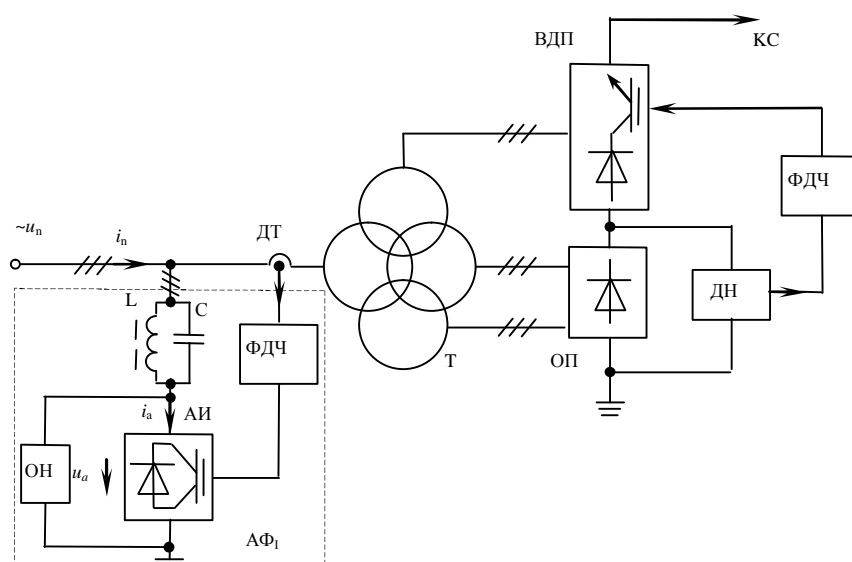
Традиционным средством обеспечения ЭМС по указанным показателям является использование фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) на стороне переменного тока. Однако эти технические средства обладают большой установленной мощностью и решают только одну сторону проблемы ЭМС. По мнению авторов, более эффективными являются решения, которые одновременно решают также проблемы электромагнитной совместимости преобразовательного агрегата с контактной сетью (КС):

- по гармоническому составу напряжения в КС;
- по стабильности величины постоянной составляющей напряжения как основной гармоники выходного напряжения агрегата.

В данной работе предлагается соответствующая структура системы активной фильтрации (САФ), анализируются ее свойства и рассматриваются схемные решения некоторых узлов.

### 2. Структура САФ и ее общие свойства

Предлагаемая САФ использует сочетание следующих узлов (рис. 1):



**Рис. 1. Структурная схема системы активной фильтрации:**  $u_n$  – питающая сеть;  $LC$  – индуктивно-емкостной балласт;  $AI$  – автономный инвертор;  $OH$  – ограничитель напряжения;  $T$  – силовой трансформатор;  $OП$  – основной преобразователь;  $ВДП$  – вольтодобавочный преобразователь;  $\Phi_{вых}$  – выходной фильтр;  $КС$  – контактная сеть;  $ДН$  – датчик напряжения;  $ДТ$  – датчик тока;  $\PhiДЧ$  – фильтры дискретных частот

- основного преобразователя ( $OП$ ) многопульсной структуры, работающего по традиционным схемам и с традиционными полупроводниковыми приборами при значениях угла управления в установившемся режиме, близких к  $0^0$  или  $180^0$ ; этот преобразователь обеспечивает основную долю (порядка 80%) от передаваемой активной мощности;

- вольтодобавочного преобразователя ( $ВДП$ ) с широтно-импульсным способом управления, который на выходе стабилизирует напряжение и является последовательным активным фильтром, а на входе – компенсирует избыточную реактивную мощность и принимает на себя дополнительную долю (порядка 20%) от передаваемой активной мощности;

- параллельного активного фильтра ( $AФ$ ) на входе, доводящего до требуемой кондиции гармонический состав потребляемого тока.

Последнее звено отличает систему от той структуры, которая предлагалась ранее, и позволяет придать системе активной фильтрации существенно более комплексный характер. Оно представляет собой трехфазный автономный инвертор с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией ( $ШИМ$ ), который присоединяется к питающей сети через последовательный балласт на основе параллельного соединения дросселя и конденсатора. Балласт не пропускает к  $AФ$  основную гармонику тока сети, что позволяет при 12-пульсном  $OП$  получить установленную мощность собственно  $AФ$  порядка 3% от передаваемой активной мощности. Относительная установленная мощность реактивных элементов балласта порядка 10%. Кроме того,  $AФ$  содержит диодный ограничитель напряжения, нагруженный на емкостной накопитель энергии или варистор. Ограничитель действует в переходных и аварийных режимах работы.

Возможной альтернативой предлагаемому решению является полная замена элементной базы преобразовательного агрегата на новую, позволяющую решать все перечисленные задачи с помощью метода высокочастотной  $ШИМ$  в основном энергетическом канале. Нет никакого сомнения в том, что этим альтернативным решением также целесообразно заниматься в расчете на внедрение в более отдаленной перспективе, когда новая элементная база станет доступной по цене.

### 3. Компенсация реактивной мощности вольтодобавочным преобразователем

Как уже говорилось ранее, задачу компенсации реактивной мощности в питающей сети решают обычно ФКУ на стороне переменного тока. В предлагаемой системе эта функция выполняется с меньшими затратами с помощью  $ВДП$  рис. 2 [1-2], что позволяет исключить из ФКУ компенсирующую часть и оставить в нём только активный фильтр.

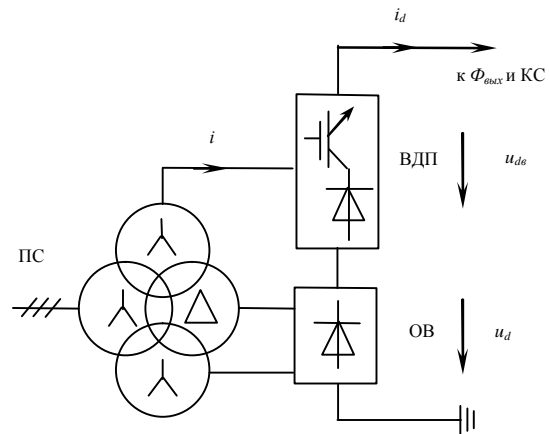
Определим насколько возрастет установленная мощность  $ВДП$  при добавлении функции компенсации реактивной мощности.

Допустим вначале, что, кроме функции компенсации реактивной мощности,  $ВДП$  исполняет только функцию регулирования выходного напряжения в относительных пределах:

$$\Delta u^* = u_{de} / u_d . \quad (1)$$

Тогда, согласно принятому алгоритму управления  $ВДП$  [1-2] наибольшая достижимая амплитуда фазного тока  $i$  на входе  $ВДП$  равна выходному току  $i_d$

$$I_m = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = i_d = \sqrt{2} I , \quad (2)$$



**Рис. 2. Основной (ОП) и вольтодобавочный (ВДП) преобразователи**

где  $I_a$  и  $I_p$  – действующие значения активного и реактивного тока на входе ВДП;  $I$  – полный действующий ток на входе ВДП  
 Наибольшая активная мощность, создаваемая ВДП:

$$P_e = u_{de} i_d = \Delta u^* P_0 = 3UI_a \quad (3)$$

где  $P_0$  – активная мощность основного выпрямителя;  $U$  – действующее значение фазного напряжения на входе ВДП.

Установленная мощность ВДП определяется полным действующим током:

$$S_e = 3UI = \sqrt{(3UI_a)^2 + (3UI_p)^2} = \sqrt{P_e^2 + Q^2} = \sqrt{(\Delta u^* P_0)^2 + P_0^2 (\frac{tg\phi_1}{\sqrt{1-cos^2\phi_1}} \frac{tg\phi_2}{\sqrt{1-cos^2\phi_2}})^2} \quad (4)$$

где  $\phi_1$  и  $\phi_2$  – углы сдвига между напряжением и током питающей сети при отсутствии и наличии ВДП.

Ввиду малости угла  $\phi$  может быть принято приближенное равенство:

$$tg\phi \cong \sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi} \quad (5)$$

С учетом чего получим относительную установленную мощность ВДП:

$$S_e^* = \frac{S_e}{P_0} = \sqrt{\Delta u^{*2} + \left( \sqrt{1 - \cos^2\phi_1} - \sqrt{1 - \cos^2\phi_2} \right)^2} \quad (6)$$

При использовании параллельного АФ на входе в пределе исчезают высшие гармоники из потребляемого тока и тогда  $\cos\phi_2$  может быть принят равным рекомендованному значению 0,98 для коэффициента мощности. При отсутствии ВДП величина  $\cos\phi_1$  составляет около 0,95.

При этих данных на рис. 3 приведена зависимость установленной мощности ВДП от принятого в нем диапазона регулирования напряжения.

Кроме нее, приведена зависимость  $S_e'^* = \Delta u^*$ , которая получается в ВДП без дополнительной функции компенсации реактивной мощности.

Как видно, при введении дополнительной функции связанное с ней увеличение установленной мощности ВДП тем меньше, чем больше принятый в ВДП диапазон регулирования напряжения. Это же соотношение сохраняется и в том случае, если в ВДП диапазон регулирования  $\Delta u^*$  расширен для реализации других дополнительных функций, в частности функции активной фильтрации выходных гармоник.

В работе [2] было найдено, что при этом требуется иметь  $\Delta u^*$  порядка 0,2. Как следует из сопоставления зависимостей для  $S_e^*$  и  $S_e'^*$  присоединение функции компенсации реактивной мощности ведет к увеличению установленной мощности ВДП примерно на 10%. Этот благоприятный фактор объясняется квадратичным суммированием реактивного тока с активным, что ведет лишь к незначительному увеличению длины результирующего вектора тока  $I$  в сравнении с активной составляющей  $I_a$  (рис. 4).

Для понимания сути процессов полезен также следующий дополнительный комментарий: чем больше  $\Delta u^*$ , тем более высокое напряжение  $U$  требуется иметь на входе ВДП и тем меньше, при заданной реактивной мощности  $Q$ , требуемый реактивный ток  $I_p$  на входе ВДП.

Возможной альтернативой применения ВДП является отдельный преобразователь на входе, действующий как генератор реактивной мощности, либо конденсаторная батарея там же с регулированием

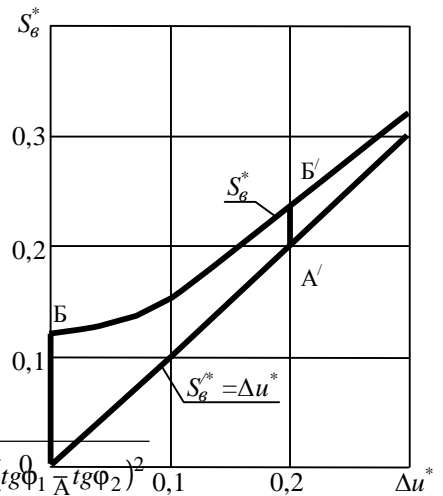


Рис. 3. Установленная мощность ВДП d-функции диапазона регулирования

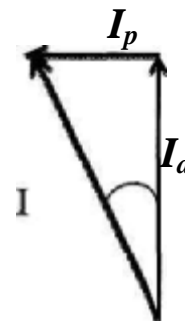


Рис. 4. К пояснению механизма снижения затрат на генерацию реактивной мощности

числа конденсаторов при изменении нагрузки подстанции. Однако относительная установленная мощность такого отдельного компенсирующего устройства пропорциональна длине отрезка АБ на рис. 3, в то время как добавочная установленная мощность ВДП, решающего ту же задачу, пропорциональна отрезку А'Б', т. е. примерно в 5 раз меньше.

#### 4. Параллельный активный фильтр

Силовую схему АФ можно охарактеризовать системой трех относительных параметров:

$$b^* = \omega CR_N = \frac{R_N}{\omega L}; \quad u_0^* = \frac{u_0}{\sqrt{6}U_\phi}; \quad S_a^* = \frac{S_a}{P} \quad (7)$$

где  $b^*$  – относительная проводимость балласта;  $\omega$  – частота первой гармоники сети;  $R_N = U_\phi / I_N$  – номинальное (базисное) сопротивление;  $U_\phi$  и  $I_N$  – действующие значения первой гармоники фазного напряжения и номинальной активной составляющей фазного тока сети;  $u_0^*$  – уровень ограничения напряжения в отношении к амплитуде линейного напряжения сети;  $P = 3U_\phi I_N$  – номинальная активная мощность агрегата;  $S_a^*$  – относительная установленная мощность автономного инвертора.

Прокомментируем величины  $u_0^*$  и  $S_a^*$ . На рис. 5 показана целесообразная структура ограничителя напряжения. Его нагрузкой является источник противо-ЭДС  $u_0$ , например, варистор или конденсатор достаточно большой емкости, напряжение на котором поддерживается маломощным обратимым преобразователем. Схема ограничивает амплитуду выходных линейных напряжений инвертора на уровне  $u_0$ . Амплитуда  $I_{ам}$  фазного тока инвертора ограничивается его средствами управления.

Для установленной мощности автономного инвертора получаем:

$$S_a^* = u_0^* I_{ам}^*, \quad I_{ам}^* = I_{ам} / (\sqrt{2} I_N). \quad (8)$$

В установившемся режиме ток  $i_a$  автономного инвертора равен с обратным знаком совокупности высших гармоник входного тока  $i_\phi$  преобразовательного агрегата. Если пренебречь неканоническими гармониками этого тока, то частотный спектр удовлетворяет равенству:

$$k = 12q \pm 1, \quad q = 1, 2, 3... \quad (9)$$

На рис. 6 показан ток фазы автономного инвертора при пуске схемы.

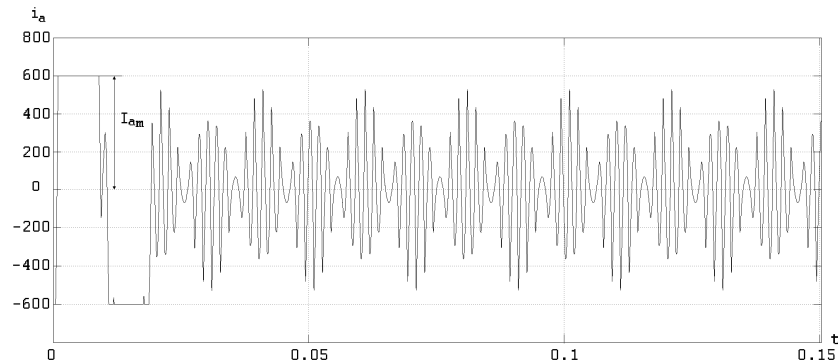


Рис. 6 Фазный ток автономного инвертора при пуске с нулевых начальных условий

В начале пуска происходит заряд емкостного балласта от источника  $u_n$  через ОН, поэтому ИН входит в режим токоограничения на один период питающей сети. В установившемся режиме величина  $I_{ам}^*$  зависит от индуктивного сопротивления рассеяния силового транзистора  $x_s^*$ , снижаясь с его увеличением. В типовом диапазоне  $0,08 \leq x_s^* \leq 0,12$  можно принять в качестве минимального значения (без запаса)

$I_{am}^* = 0,16$ . Принимая, что эквивалентная относительная частота  $f_3^*$  тока инвертора по отношению к минимальной частоте гармоники ( $\kappa = 11$ ) равна 1,4, компенсируем относительную амплитуду выходного напряжения инвертора как падение напряжения на конденсаторе балласта, и минимальный уровень ограничения напряжения:

$$U_{am}^* = \frac{I_{am}^*}{11f_3^*b^*} = u_0^* \quad (10)$$

Например, при  $b^* = 0,1$  имеем  $u_0^* = 0,104$  и  $S_a^* = 1,7 \cdot 10^{-2}$ , то есть установленная мощность *АИ* составляет всего 1,7% от мощности *ОП*. Но при этом реактивная мощность балласта, равная  $b^*$ , составляет 10% от мощности *ОП*. Как следует из (8) и (10), можно изменить эту пропорцию: при увеличении  $S_a^*$  пропорционально снижается  $b^*$  и наоборот.

В основу систем управления *АФИ* и *ВДП* целесообразно положить показанные на рис. 1 разомкнутые структуры. В *АФИ* для этого имеется датчик тока, выходной сигнал которого поступает на вход фильтра дискретных частот, который отделяет высшие гармоники тока  $i_a$  от основной гармоники, на которую *АИ* не должен оказывать влияние. Методика синтеза такого *ФДЧ* рассмотрена в [3]. Сигнал высших гармоник тока воспроизводится коммутатором *АИ*, работающим с высокочастотной *ШИМ*. При использовании автономного инвертора напряжения может быть применен, например, метод однопозиционного слежения за результирующим вектором тока трехфазной системы [4].

Канал управления *ВДП*, который действует на выходе как последовательный активный фильтр, строится по дуальным принципам.

## 5. Результаты моделирования

Система рис. 1 моделировалась в пакете "Matlab" при замещении коммутатора *АИ* непрерывным звеном, что соответствует неограниченно большой частоте *ШИМ*. Были приняты исходные данные примера, рассматривавшегося выше, при следующих базисных данных:  $u_{a0} = 3300$  В,  $P = 5 \cdot 10^6$  Вт. Коэффициент трансформации силового трансформатора *T* принимался равным единице. Шаг дискретизации импульсной характеристики *ФДЧ* составлял 1/96 от периода питающей сети. При экспериментах, которые комментируются ниже, изучались свойства параллельного *АФ<sub>I</sub>* и проверялись соотношения методики выбора его параметров. Поэтому *ВДП* в схеме отсутствовал, а нагрузка *ОП* заменялась источником тока. Машинограмма рис. 4 получена на этой модификации модели.

На рис. 7, а–б показаны, соответственно, токи  $i_a$  и  $i_n$ . (рис. 1) при пуске с нулевых начальных условий.

Машинограмма  $i_b$  соответствует ступенчатому входному току 12-пульсного выпрямителя при  $\alpha \cong 0$ . На машинограмме  $i_n$  видно превращение этого тока практически в синусоидальный. Для этого требуется примерно 3 периода, т. е. рассматриваемая структура управления обеспечивает достаточно высокое быстродействие каналов подавления высших гармоник. При этом в ФДЧ выходной сигнал устанавливается за один период, а остальное время уходит на установление режима в реактивном балласте.

Малая постоянная времени последнего процесса обеспечивается за счет действия ОН, а также вспомогательного канала управления, на схеме рис. 1 не показанного и обеспечивающего режим эквивалентного активного сопротивления на выходе АИ.

На рис. 7, в показана машинограмма напряжения на выходе АИ. На ней также виден процесс установления режима, в результате которого первая гармоника из выходного напряжения АИ исчезает.

Моделирование подтвердило также количественные соотношения раздела 4 данной статьи.

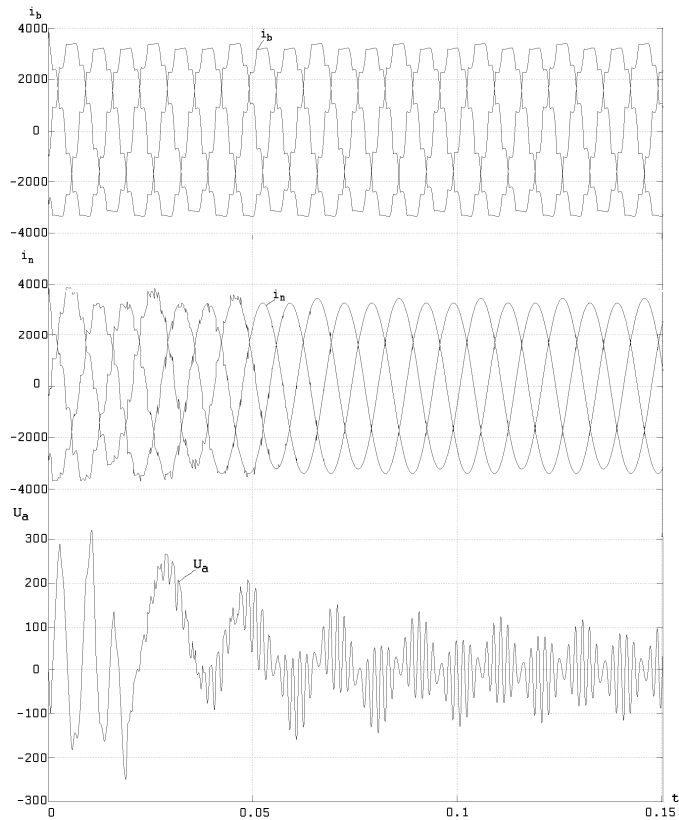


Рис. 7. Токи и напряжение при пуске с нулевых начальных условий

#### Выводы:

1. При рассматриваемом комбинированном подходе к построению системы активной фильтрации сокращается примерно в 5 раз затраты по установленной мощности звена, компенсирующего потребляемую из питающей сети реактивную мощность.
2. Система активной фильтрации преобразовательного агрегата основана на присоединении к многопульсному основному преобразователю вольтодобавочного ШИМ-преобразователя, работающего в качестве последовательного активного фильтра на выходе и компенсатора реактивной мощности на входе, а также параллельного активного фильтра при подавлении высших гармоник тока на входе.
3. Высокие коэффициенты подавления вредных гармоник и высокое быстродействие обоих активных фильтров достаточно при использовании структур управления с фильтрами дискретных частот, обеспечивающими прямоугольную частную характеристику на совокупности гармоник с частотами, кратными частоте питающей сети.

#### Список литературы

1. Гончаров, Ю. П. Перетворювач з вольтодобатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко / Електротехніка і Електроенергетика, 2007.– №2.– С. 4–11.
2. Гончаров, Ю. П. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Божко. – Киев. : Залізничний транспорт України, 2007.– № 4. – С. 76–80.
3. Гончаров, Ю.П. Ограничение спектра периодических сигналов обратных связей в силовых активных фильтрах для систем электроснабжения контактных сетей [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко В.Г. Сыченко / Науково-технічний збірник "Гірнична електромеханіка та автоматика", – Випуск 84, Дніпропетровськ 2010, с. 28 – 37.
4. Гончаров, Ю.П. Характеристики системы "инвертор напряжения-двигатель" при прогнозном управлении по результирующему вектору тока [Текст]/ Ю.П. Гончаров, М.В. Хворост, Н.Ю. Родін / Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність", ч.4 Київ, 2006, С. 45-50

Рекомендовано до друку: проф. Гетьманом Г.К.