

# Выходной фильтр инвертора напряжения

Ярослав Гузиньски, Збигнев Кжеминьски

**Аннотация.** В некоторых случаях обязательным является применение на выходе инвертора напряжения пассивного фильтра. Применение соответствующего фильтра обеспечивает возможность получения на выходе синусоидальных токов и напряжений при значительном ограничении токов, протекающих через корпус двигателя и защитный провод РЕ. При подборе параметров фильтра исключительно важно добиться того, чтобы сдвиг по фазе между током и напряжением на входе фильтра и на его выходе был минимальным. Невыполнение этого условия делает невозможной правильную работу инверторов в режиме векторного управления, и в режиме управления с непосредственным регулированием электромагнитного момента асинхронного двигателя (инверторы DTC). Кроме того, в отличие от схемных решений с использованием моторного дросселя использование пассивных фильтров с компенсацией индуктивной составляющей моторного дросселя улучшает коэффициент мощности системы Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель.

## 1. Вступление

Современные транзисторные инверторы, работающие на все более высоких частотах переключений силовых транзисторов, обеспечивают прецизионное регулирование тока и электромагнитного момента двигателя. Частоты переключений транзисторов в применяемых в настоящее время инверторах достигают до 15 кГц. В инверторах повсеместно применяются современные IGBT транзисторы с очень коротким временем включения и выключения. Это вызывает большую крутизну напряжений на выходе инвертора, что может привести к появлению волновых эффектов в кабелях питания двигателя и к опасному росту перенапряжению на клеммах двигателя, и как следствие к старению изоляции. Вдобавок, если на выходе инвертора появляются трехфазные напряжения, мгновенная сумма которых не равна нулю (перекос фаз выходного напряжения), то через распределенные емкости кабеля питания и двигателя протекают токи нулевой составляющей. Рост частоты переключений вызывает рост тока, протекающего через паразитные емкости. Путь протекания паразитного тока изображен на рис. 1.

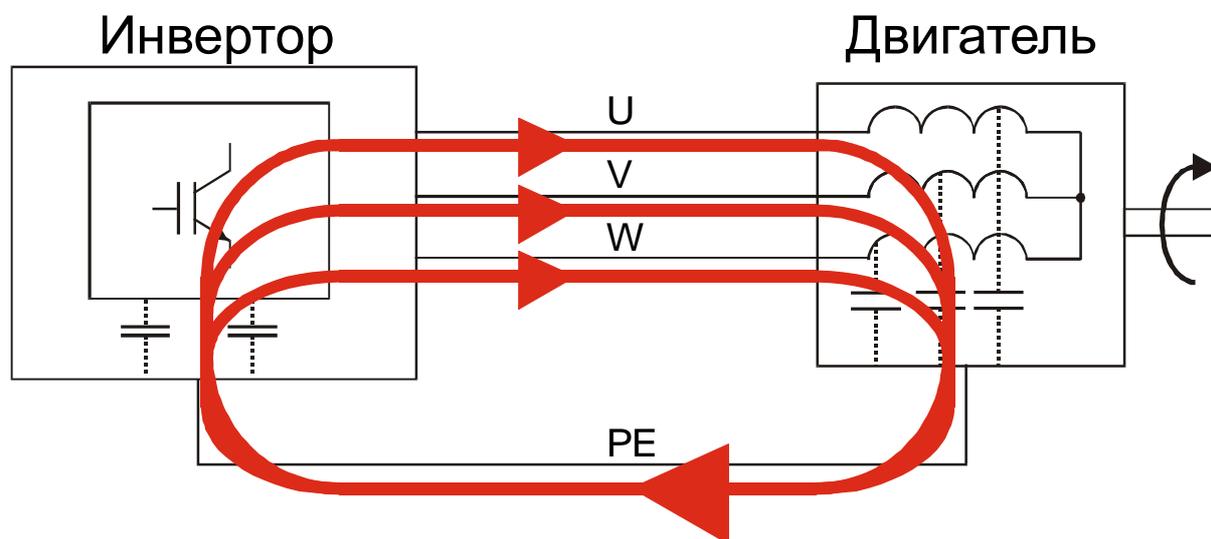


Рис. 1. Упрощенная схема протекания тока нулевой составляющей

Паразитный ток, частично проходит через вал двигателя, подшипниковые узлы и далее к заземленному корпусу двигателя и защитному проводу РЕ. Протекание так называемых токов валов вызывает ускоренную деградацию подшипников. Протекание тока в проводе РЕ может также сделать невозможным применение дифференциальных токовых выключателей в схемах с инверторными приводами.

Устранение упомянутых нежелательных явлений возможно путем ограничения крутизны выходных напряжений инвертора, а также включением большого импеданса в цепь протекания тока нулевой составляющей.

## 2. Структура фильтра нулевой составляющей

На факультете Электротехники и Автоматики Гданьского Политехнического института разработана серия фильтров нулевой составляющей типа EFSZ на основе структуры, представленной в [1]. К основной структуре фильтра добавлены были элементы, обеспечивающие устойчивую работу схемы при переходных процессах. Принципиальная схема разработанного фильтра нулевой составляющей типа EFSZ показана на рис. 2 [2]. Представленный фильтр, кроме функции ограничения нулевой составляющей, выполняет функцию синусоидального фильтра.

Элементы фильтра нулевой составляющей, выбираются с использованием математической модели фильтра после преобразования трехфазной системы в ортогональную систему  $\alpha\beta-0$ . При выполнении условий:  $M_1 \gg L_1$ ,  $C_0 \ll C_1$  возможен отдельный подбор элементов фильтра для составляющих  $\alpha\beta$  и для составляющей 0 [2].

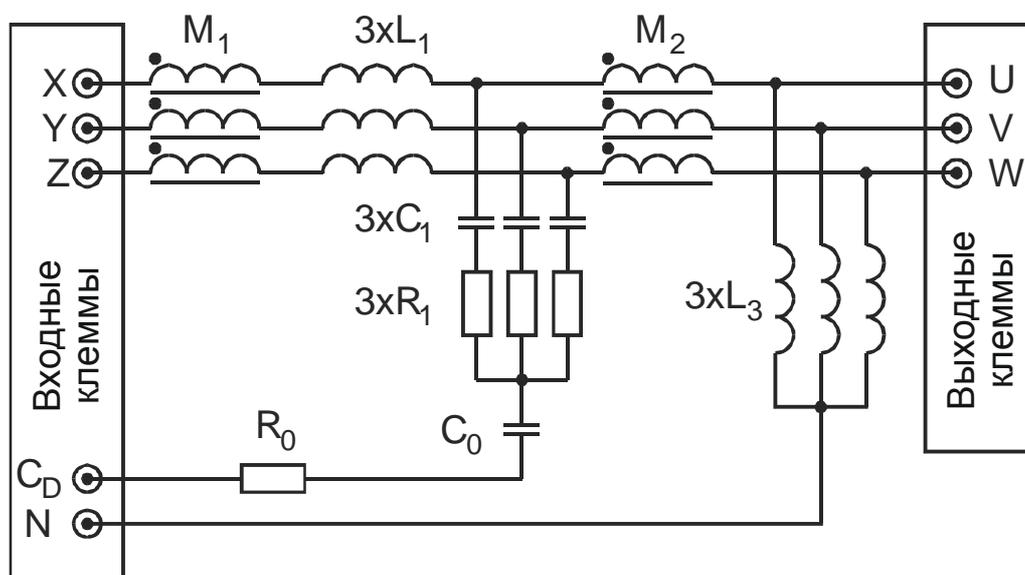


Рис. 2. Структура фильтра нулевой составляющей типа EFSZ

Уменьшение нулевой составляющей тока на выходе инвертора с помощью фильтра происходит путем включения в цепь большого импеданса, а также создания дополнительной цепи протекания паразитного тока. Цепь эта замыкается положительным либо отрицательным полюсом конденсатора в промежуточной цепи постоянного напряжения инвертора. В большинстве инверторов, доступных на рынке, положительный полюс конденсатора выведен на силовую клемму инвертора, к которой подключается внешний тормозной резистор или блок динамического торможения. Элементами фильтра компенсирующие нулевую составляющую являются магнитосвязанный дроссель  $M_1$ , конденсатор  $C_0$  и резистор  $R_0$ . Они образуют цепь

протекания высокочастотной составляющей тока с выхода инвертора до положительного полюса конденсатора в промежуточном контуре постоянного напряжения. Магнитосвязанный дроссель M2 ограничивает ток нулевой составляющей протекающий во внешней по отношению к фильтру и инвертору электрической цепи. Три дросселя  $L_1$ , три конденсатора C1, а также три резистора  $R_1$ , образуют фильтр для составляющих  $\alpha\beta$ . Резисторы  $R_0$  и  $R_1$  необходимы для подавления переходных процессов в составных фильтрах. Дополнительными элементами фильтра являются три дросселя  $L_3$  большой индуктивности. Они служат для снижения постоянной составляющей напряжения на конденсаторах.

### 3. Исследования фильтра нулевой составляющей в схеме с инвертором и двигателем

Лабораторные исследования были проведены на фильтре нулевой составляющей типа EFSZ-5, 5/400 с номинальным током  $I_n = 15$  А, предназначенном для двигателя мощностью 5,5 кВт. Фильтр исследовался при подключении к выходу инверторов типа АМТ-030 и АСS600. В схеме с инвертором АМТ-030 тесты проводились при управлении  $U/f = \text{const}$ , а также при мультискалярном управлении без датчика обратной связи по скорости с вычислением скорости вращения. Мультискалярное управление, описанное в [3] является обобщенным векторным управлением, основанным на нелинейном преобразовании переменных. Замеры в схеме с инвертором АСS600 проводились при управлении с непосредственным регулированием электромагнитного момента асинхронного двигателя методом DTC без обратной связи по скорости. Исследования проводились для широкого диапазона частоты от 0,3 Гц до 100 Гц и при нагрузке, изменяющейся от холостого хода до номинального момента двигателя.

На рис. 3 показаны токи на входе и на выходе фильтра при выходной частоте 40 Гц и номинальной нагрузке двигателя.

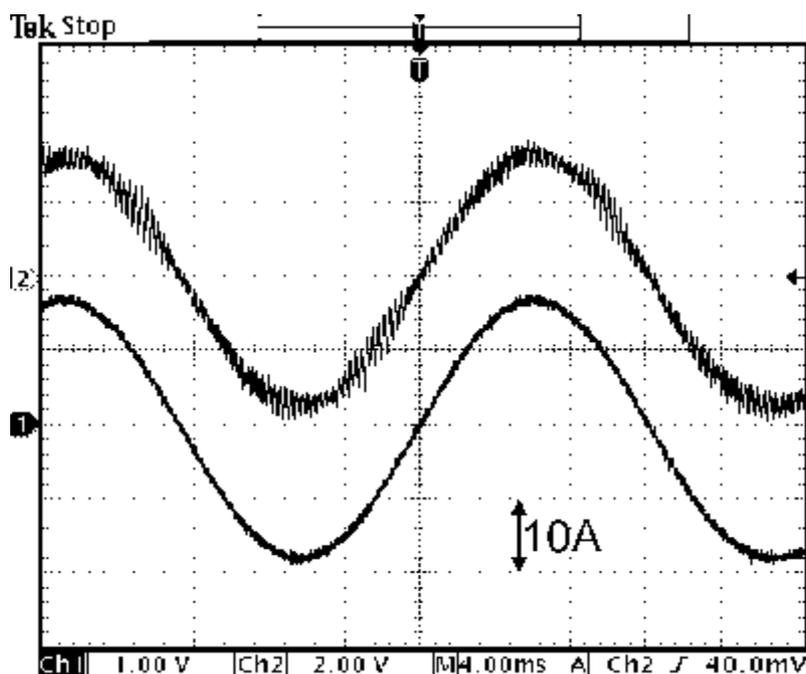


Рис. 3. Изменение токов перед фильтром (2) и за фильтром (1) при частоте 40 Гц

Ток перед фильтром содержит высшие гармонические составляющие с частотой широтно-импульсной модуляции. В кривой тока на выходе фильтра эти составляющие в значительной степени подавлены. Одновременно можно констатировать, что фазовый сдвиг на входе фильтра и на его выходе близок к нулю.

На рис. 4 представлены характеристики напряжений на входе фильтра и на его выходе при частоте основной гармонической составляющей напряжения, равной 100 Гц.

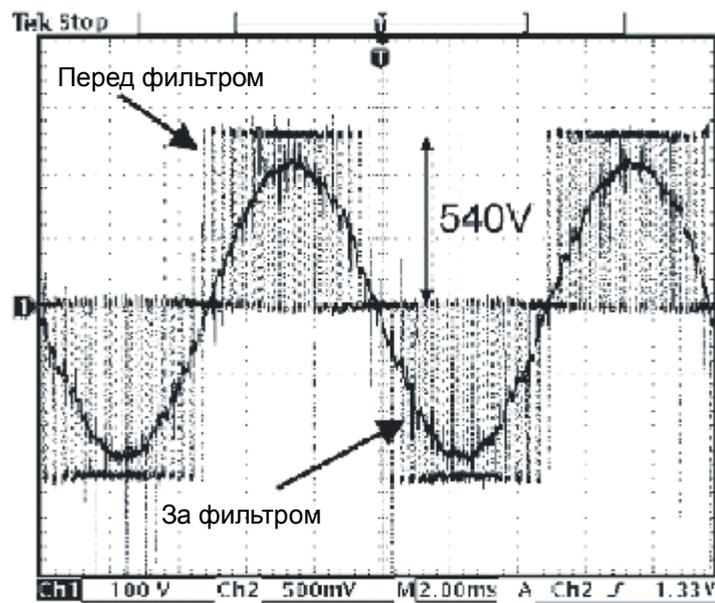


Рис. 4. Характеристика линейного напряжения на входе фильтра и его выходе

Напряжение на входе фильтра является последовательностью прямоугольных импульсов с большой крутизной фронтов, то есть высокой скоростью нарастания напряжения  $du/dt$ . Фильтр нулевой составляющей существенно подавляет высшие гармоники выходного напряжения инвертора, сводя их до незначительных величин. На выходе фильтра появляется практически синусоидальное напряжение, т.е. только основная гармоника выходного напряжения инвертора. Так же, как и в случае тока между напряжением на входе фильтра и напряжением на его выходе практически нет фазового сдвига.

Включение на выходе инвертора фильтра с некорректно подобранной структурой и параметрами может вызывать ухудшение работы или совсем сделать невозможной работу инвертора в режиме векторного управления или в режиме прямого управления моментом (DTC). Это вызвано вносимым фильтром фазовыми сдвигами токов и напряжений, а также падением напряжения на фильтре. Правильный подбор элементов фильтра позволяет обеспечить корректную работу инвертора в вышеперечисленных режимах работы. Хорошо подобранные элементы фильтра должны обеспечить минимизацию сдвига фазы токов и напряжений на входе фильтра и на его выходе, а также максимально уменьшить падение напряжения на фильтре.

Фильтр EFSZ в исследуемом диапазоне частоты и нагрузки не вносит заметного сдвига фаз. Падение напряжения на фильтре EFSZ составляет около 3% от выходного напряжения инвертора при номинальной нагрузке и частоте основной гармоники напряжения 50 Гц.

На рис. 5 и рис. 6 представлен эффект подавления нулевой составляющей тока. В процессе исследований измерялся ток, протекающий по защитному проводу двигателя. На рис. 5 представлена токовая характеристика в системе без фильтра. Вследствие перекоса фаз на выходе инвертора и наличия паразитных емкостей в двигателе появляется значительная нулевая составляющая тока в проводе РЕ. Максимальные импульсы тока могут иметь амплитуду, достигающую 4,3 А.

Применение фильтра нулевой составляющей вызывает значительное, более, чем 8-кратное ограничение этого тока, как показано на рис. 6. В системе с фильтром амплитуда отдельных импульсов тока не превышает 0,6 А.

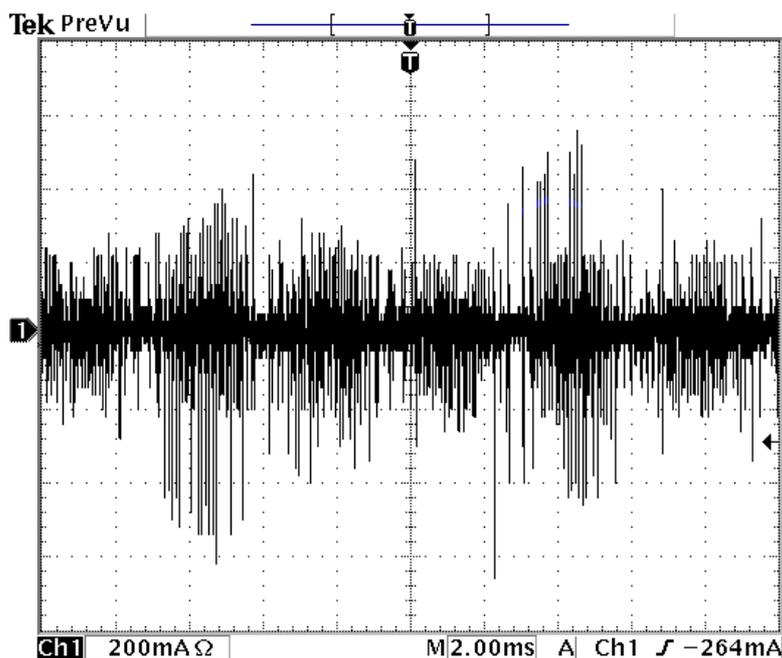


Рис. 5. Ток в защитном проводе РЕ двигателя без фильтра нулевой составляющей

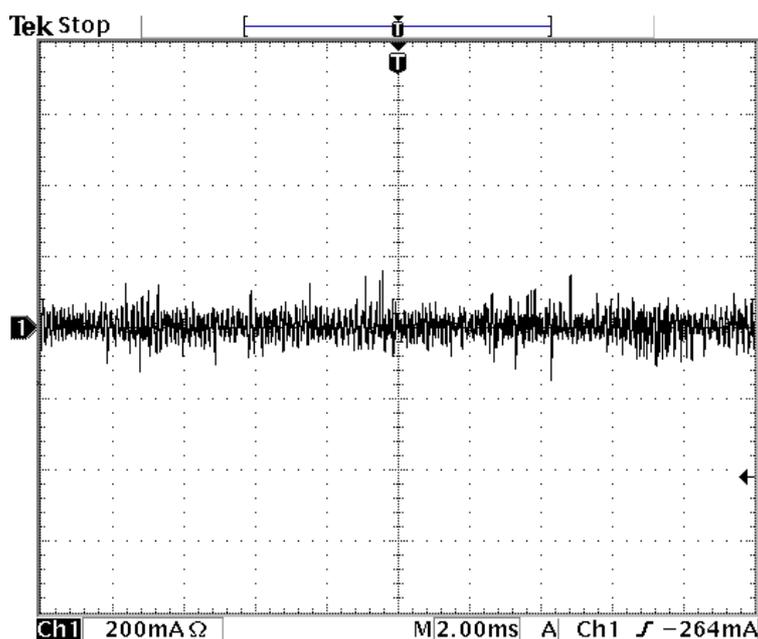


Рис. 6. Ток в защитном проводе РЕ двигателя с фильтром нулевой составляющей

Во время исследований не замечено влияния фильтра на ухудшение качества регулирования при различных режимах управления (скалярное, векторное, прямое управление моментом).

В исследованиях сравнены также свойства инвертора работающего в замкнутой системе регулирования с обратной связью по скорости с фильтром и без него. С этой целью регистрировались изменения скорости и электромагнитного момента при реверсе двигателя в системе с инвертором АМТ-030 при алгоритме мультискалярного управления асинхронным двигателем с вычислением скорости вращения. Полученные результаты представлены на рис. 7.

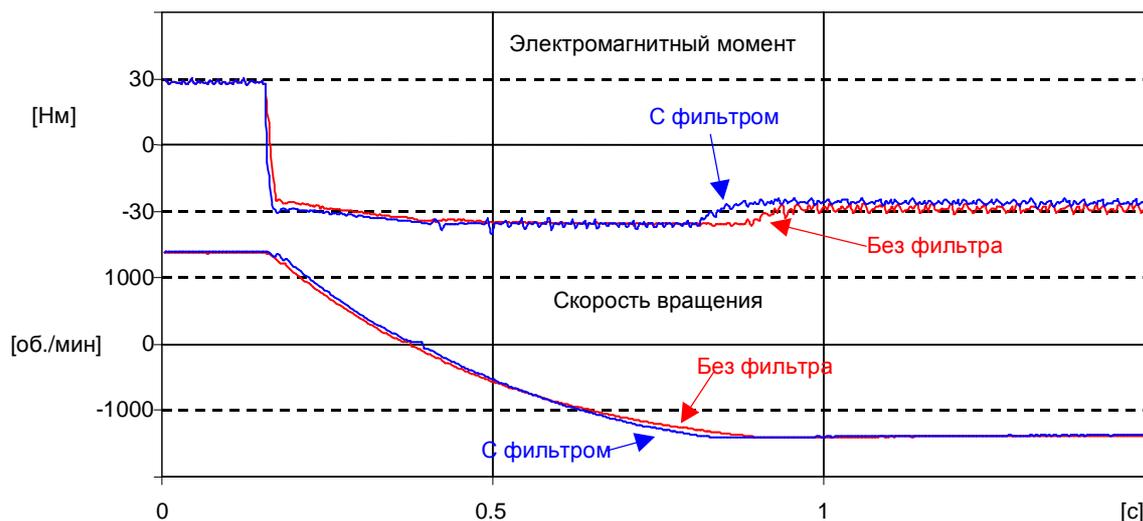


Рис. 7. Изменения электромагнитного момента двигателя и скорости вращения в системе с инвертором АМТ-030 без фильтра, а также с фильтром нулевой составляющей

Несмотря на включение фильтра на выходе инвертора без обратной связи по скорости, привод работает с незначительными допустимыми отклонениями. Замечено незначительное ускорение процессов регулирования электромагнитного момента двигателя и скорости вращения в системе с фильтром.

Инвертор ACS600 нормально работает с фильтром нулевой составляющей – рис. 8, не замечено динамической погрешности регулирования скорости.

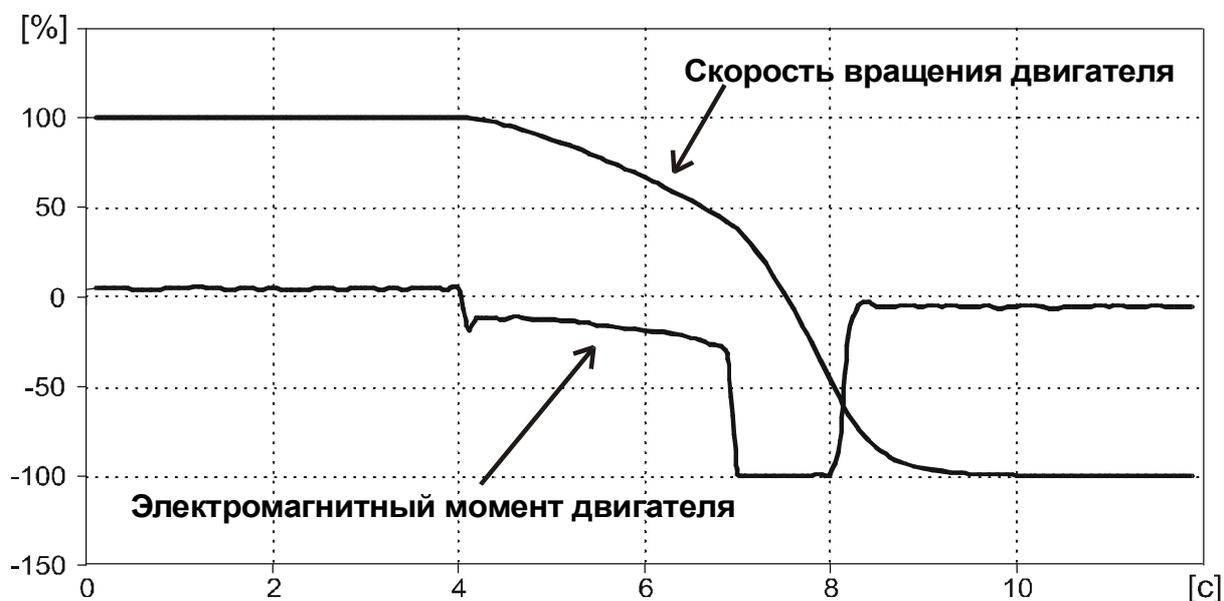


Рис. 8. Изменения электромагнитного момента двигателя и скорости вращения в схеме с инвертором ACS600 с управлением DTC и фильтром нулевой составляющей на выходе

#### 4. Другие области применения фильтра нулевой составляющей

В настоящее время получили распространение схемы, использующие низковольтные инверторы для питания высоковольтных асинхронных двигателей с применением двух трансформаторов (рис. 9). При работе инвертора на первичную обмотку повышающего трансформатора возникают проблемы описанные выше. Для устранения этих проблем между инвертором и трансформатором необходимо установить фильтр нулевой составляющей.

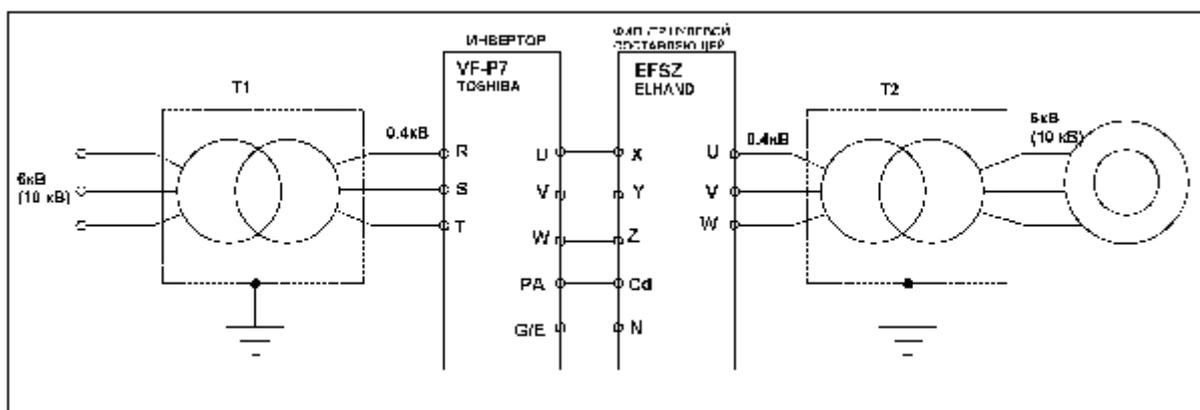


Рис. 9. Схема использования фильтра нулевой составляющей в схеме питания высоковольтного двигателя

## **Выводы**

1. Фильтр нулевой составляющей имеет простую конструкцию, похожую на встречаемые до настоящего времени конструкции синусоидальных фильтров. Однако подбор элементов фильтра нулевой составляющей значительно более сложен и требует применения соответствующей процедуры (математического моделирования).
  2. Фильтр нулевой составляющей значительно ограничивает паразитный высокочастотный ток, протекающий от двигателя через подшипниковые узлы к защитному проводу РЕ увеличивая срок службы подшипников.
  3. При использовании фильтра EFSZ двигатель питается синусоидальным током и напряжением, что снижает потери в двигателе и его рабочую температуру.
  4. Использование фильтра позволяет снизить помехи, создаваемые инвертором особенно в схемах, в которых имеют место очень длинные соединительные кабели между инвертором и двигателем. Для достижения наибольшего эффекта от использования фильтра необходимо расположить его как можно ближе к двигателю.
  5. Использование фильтра исключает появление на обмотках статора двигателя импульсов высокого напряжения. Вследствие чего увеличивается срок эксплуатации двигателя за счет снижения старения изоляции обмоток статора.
  6. Дополнительно устраняются проблемы с применением дифференциальных токовых выключателей в системах электроснабжения к которым подключены, в том числе и инверторы.
  7. Правильно спроектированный и изготовленный фильтр можно включить на выход инвертора без ухудшения статических и динамических характеристик электропривода при работе инвертора в режиме векторного управления без обратной связи и с обратной связью по скорости, а также в режиме прямого управления моментом (DTC).
  8. Если сравнивать схему, использующую моторный дроссель и схему, в которой применен фильтр нулевой составляющей, то можно отметить еще и тот факт, что вариант с фильтром нулевой составляющей не ухудшает коэффициент мощности системы инвертор – асинхронный двигатель.
  9. Фильтр нулевой составляющей можно использовать в схемах питания высоковольтных двигателей, где применяется низковольтный инвертор.
- Подбор и изготовление фильтров нулевой составляющей осуществляется на фирме:

ELHAND TRANSFORMATORY, 42-700 Lubliniec, ul. PCK 22, [www.elhand.pl](http://www.elhand.pl)  
e-mail: [info@elhand.pl](mailto:info@elhand.pl) , , тел. +48 34 353 17 10, факс. +48 34 356 40 03

## **Список литературы**

- [1] Akagi H.: Prospects and Expectations of Power Electronics in The 21<sup>st</sup> Century. Power Conversion Conference. PCC'2002, Osaka, Japan 2002.
- [2] Krzemiński Z.: Zastosowanie filtrów składowej zerowej do ograniczania napięć i prądów współbieżnych. Seminarium Oddziału Gdańskiego SEP: Projektowanie, budowa, eksploatacja instalacji i urządzeń elektroenergetycznych oraz certyfikacji wyrobów. Gdańsk 2004.
- [3] Krzemiński Z.: Cyfrowe sterowanie maszynami асинхронными. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. PAN, Komitet Elektrotechniki, Seria Wydawnicza „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Tom 45. 2001.

**Научная работа финансировалась со средств Комитета по Научным Исследованиям как исследовательский проект № 3Т10А05727.**