

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
ФИРМЫ ELHAND TRANSFORMATORY НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
«ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»**

Широкое внедрение преобразователей частоты (ПЧ) требует решения проблемы электромагнитной совместимости. В некоторых случаях обязательным является применение на выходе ПЧ пассивного фильтра [1]. Применение соответствующего фильтра обеспечивает возможность получения на выходе синусоидальных токов и напряжений при значительном ограничении токов, протекающих через корпус двигателя и защитный провод PE. Кроме того, в отличие от схемных решений с использованием обычного дросселя, использование пассивных фильтров с компенсацией индуктивной составляющей дросселя двигателя улучшает коэффициент мощности системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД).

Современные ПЧ, работающие на все более высоких частотах переключений силовых транзисторов, обеспечивают прецизионное регулирование тока и электромагнитного момента двигателя. Но при этом на выходе инвертора ПЧ 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.

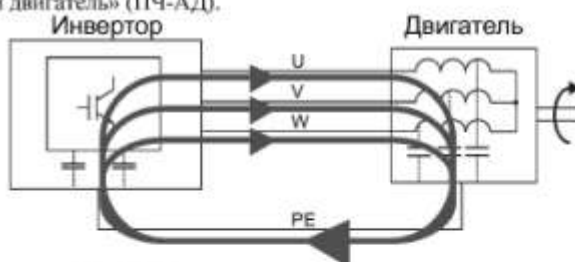


Рис. 1. Упрощенная схема протекания тока нулевой составляющей

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

Целью данной работы является устранение упомянутых нежелательных явлений, которое возможно путем ограничения крутизны выходных напряжений инвертора, а также включением большого импеданса в цепь протекания тока нулевой составляющей.

В творческом содружестве с учеными Гданьского Политехнического института фирмой ELHAND TRANSFORMORY разработана серия фильтров нулевой составляющей типа EFSZ на основе структуры, представленной в [1]. К основной структуре фильтра были добавлены 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.

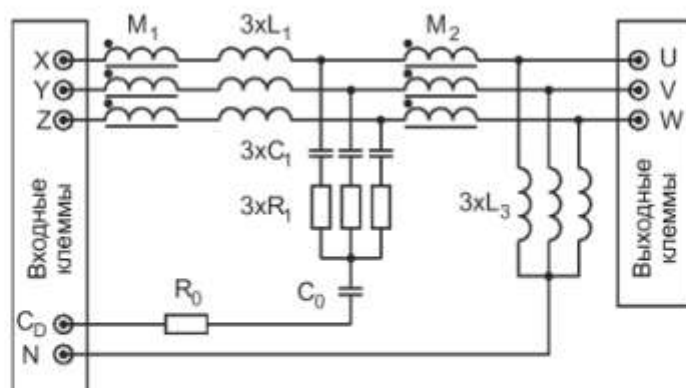


Рис.2. Структура фильтра нулевой составляющей типа EFSZ

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

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 ПЧ, доступных на рынке, положительный полюс конденсатора выведен на силовую клемму инвертора, к которой подключается внешний тормозной резистор или блок динамического торможения. Элементами фильтра компенсирующего нулевую составляющую являются магнитосвязанный дроссель M1, конденсатор C0 и резистор R0. Они образуют цепь протекания высокочастотной составляющей тока с выхода ПЧ до положительного полюса конденсатора в промежуточном контуре постоянного напряжения. Магнитосвязанный дроссель M2 ограничивает ток нулевой составляющей протекающий во внешней по отношению к фильтру и ПЧ электрической цепи. Три дросселя L1, три конденсатора C1, а также три резистора R1, образуют фильтр для составляющих $\alpha\beta$. Резисторы R0 и R1 необходимы для подавления переходных процессов в составных фильтрах. Дополнительными элементами фильтра являются три дросселя L3 большой индуктивности. Они служат для снижения постоянной составляющей напряжения на конденсаторах.

Исследования фильтра нулевой составляющей в системе ПЧ-АД

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 ПЧ типа АМТ-030 и АСS600. В схеме с ПЧ типа 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.

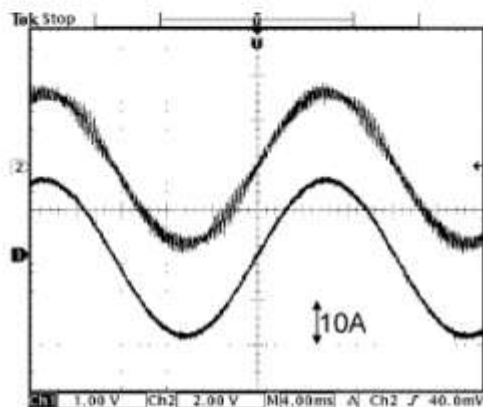


Рис. 3. Изменение токов перед фильтром (2) и за фильтром (1) при частоте 40 Гц

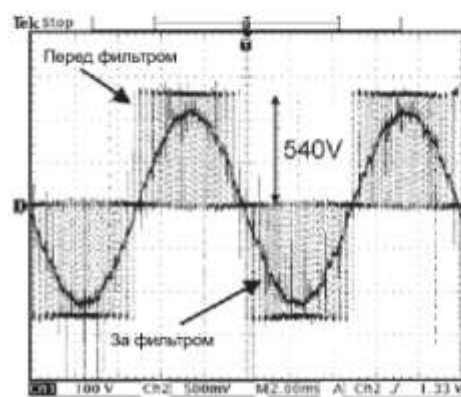


Рис. 4. Характеристика линейного напряжения на входе фильтра и его выходе

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.

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 ПЧ фильтра с некорректно подобранной структурой и параметрами может вызывать ухудшение работы или сделать совсем невозможной работу ПЧ 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 ПЧ 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 ПЧ 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.

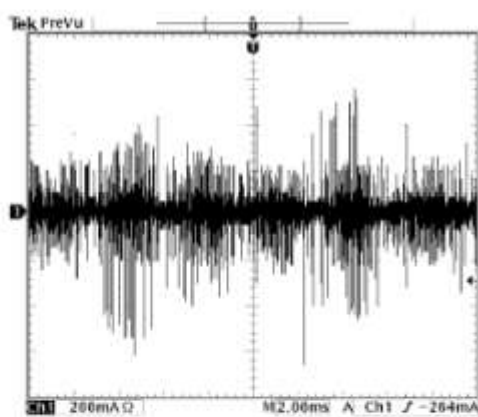


Рис. 5. Ток в защитном проводе РЕ двигателя без фильтра нулевой составляющей

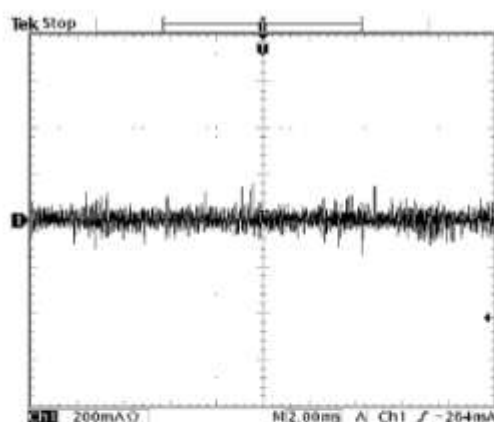


Рис. 6. Ток в защитном проводе РЕ двигателя с фильтром нулевой составляющей

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

Выводы

1. Фильтр нулевой составляющей значительно ограничивает паразитный высокочастотный ток, протекающий от двигателя через подшипниковые узлы к защитному проводу РЕ увеличивая срок службы подшипников.
2. При использовании фильтра EFSZ двигатель питается синусоидальным током и напряжением, что снижает потери в двигателе и его рабочую температуру.
3. 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.
4. Использование фильтра исключает появление на обмотках статора двигателя импульсов высокого напряжения. Вследствие этого увеличивается срок эксплуатации двигателя за счет снижения старения изоляции обмоток статора.

Литература

1. Akagi H., Prospects and Expectations of Power Electronics in The 21st 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 elektroen. oraz certyfikacji wyrobów. Gdańsk 2004.
3. Krzemiński Z. Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. PAN, Komitet Elektrotechniki, Seria Wydawnicza „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Tom 45. 2001.