

УДК 62-83 (075.8)

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИНУС-ФИЛЬТРА ДЛЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Пустоветов Михаил Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент, директор НИИЦ «Криотрансэнерго» Ростовского государственного университета путей сообщения, Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2. E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена расширением применения в отечественной практике использования частотно-регулируемого электропривода дополнительных опций, в число которых входит синус-фильтр; востребованностью разработки синус-фильтров на основе отечественных комплектующих.

Цель работы: сформулировать рекомендации по выбору параметров синус-фильтров и корректному подбору элементов по току; рассмотреть явления, возникающие при включении ёмкости на клеммы нагрузки, содержащей асинхронный двигатель: компенсацию и перекомпенсацию реактивной мощности, самовозбуждение.

Методы исследования: испытания на реальной технологической установке; имитационное компьютерное моделирование электромеханической системы с полупроводниковым преобразователем на основе сочетания схемотехнического и операционного принципов составления модели.

Результаты: описаны некоторые итоги опыта проектирования и испытаний синус-фильтра для мощного высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением. Приведены сравнительные результаты компьютерного моделирования процессов при различных параметрах синус-фильтра и преобразователя. Даны рекомендации по проектированию синус-фильтров.

Ключевые слова:

Преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция напряжения, синус-фильтр, асинхронный двигатель, ёмкость, реактивная мощность, самовозбуждение, ток.

С целью сглаживания фронтов импульсов широтно-импульсно модулированного (ШИМ) напряжения, подаваемого на клеммы асинхронных двигателей (АД) от преобразователей частоты (ПЧ) используются выходные фильтры между ПЧ и АД [1]. Негативное влияние ШИМ-напряжения на электрооборудование при отсутствии выходного фильтра выражается в: высокочастотном шуме АД; возрастании уровня электромагнитных помех; электрокоррозии и разрушении подшипников АД и приводимых механизмов; постепенной деградации электрической изоляции, сопровождаемой интенсивным образованием озона, что вредно для персонала.

Вариант решения проблемы – использование синус-фильтра (СФ). Он выполняет максимальное приближение формы выходного напряжения ПЧ к синусоиде, тем самым минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих междофазного напряжения k_U [2] и аналогичного коэффициента k_{I2} для тока I_2 [3]. Целесообразно, во всяком случае для частоты основной гармоники выходного напряжения ПЧ $f_1=50$ Гц, предъявлять требование соответствия выходного напряжения после СФ по k_U сетевому напряжению (не более 12 % согласно [2]). Сложность выбора параметров СФ возрастает при несущей частоте ШИМ ПЧ $f_n < 2$ кГц – получается значительная ёмкость (свыше 1000 мкФ). Это обстоятельство заставляет обратить внимание на возможные особенности, а также положительные и отрицательные эффекты включения емкости на клеммы нагрузки, содержащей АД. Рассмотрим далее несколько конкретных положений.

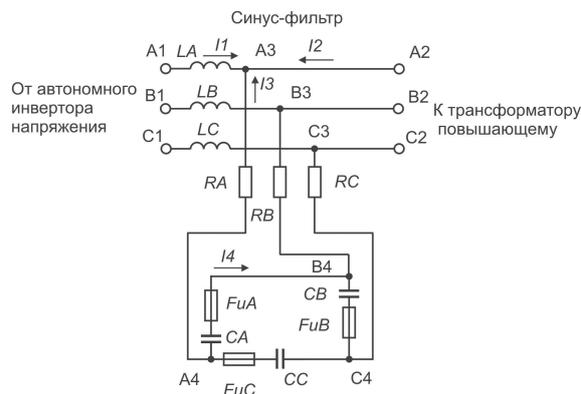


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная СФ

1. Ток через емкости СФ возрастает при уменьшении нагрузки на валу АД.
2. Ёмкость может кроме функции элемента СФ выполнять также функцию компенсации реактивной мощности АД и повышающего трансформатора.
3. Значительная емкость с большой вероятностью будет составной из нескольких параллельно соединенных конденсаторов, возможно, разного номинала и с различными характеристиками.
4. Ёмкость СФ может образовывать резонансные контуры с индуктивностями в различных ветвях схемы.
5. При пропадании напряжения на выходе ПЧ емкость СФ, оставаясь подключенной к контуру нагрузки, содержащей АД, может привести к самовозбуждению АД, сопровождающемуся значительными токами и напряжениями.

Дальнейшие пояснения будут даны на примере конкретной технологической установки – электропривода насоса 14Д6 водонасосной станции (ВНС) на базе четырёхполюсного АД с номинальным линейным напряжением 6 кВ и номинальной мощностью на валу $P_{2H}=630$ кВт. Расчетные параметры схемы замещения АД опубликованы в [1, 4]. При номинальном режиме работы насоса нагрузка АД составляет $0,73P_{2H}$. Питание АД осуществляется по двухтрансформаторной схеме [1, 5] от ПЧ «Веспер EI-7009-1000Н», имеющего диапазон несущих частот ШИМ $f_n=1...2,5$ кГц и наибольший допустимый действующий выходной ток фазы в длительном режиме $I_{1предел}=1600$ А. Индуктивная ветвь СФ в каждой фазе представлена парой параллельно соединенных токоограничивающих реакторов РТСТ-820-0,0505 УЗ. Активное сопротивление одного реактора составляет 1,65 мОм. В тех случаях, где не оговорено отсутствие, подразумевается наличие в схеме согласно рис. 1 в линиях питания емкостной части СФ демпфирующих резисторов RA, RB и RC с номиналом 0,013468 Ом.

В ходе проведения пусконаладочных работ при емкости СФ 8360 мкФ на фазу и отсутствии в схеме на рис. 1 резисторов RA, RB и RC на частоте f_1 около 12 Гц, около 27 Гц и особенно 41,9–42 Гц происходило заметное увеличение тока на выходе ПЧ. Около $f_1=42$ Гц происходило отключение ПЧ по признаку «короткое замыкание на выходе ПЧ». Повышение тока, броски тока, колебания величины тока были видны в довольно широкой полосе прилегающих частот (ширина полосы 7 Гц и более). В этой связи использование функции ПЧ «перескок частоты» не будет эффективным. К тому же полоса частот резонанса тока может пригодиться на употребительный для работы и регулирования привода диапазон. Последовательно вынимая предохранители на конденсаторах по 1000 мкФ симметрично по фазам СФ, при ёмкости 3360 мкФ на фазу удалось достичь безостановочного пуска привода с темпом роста частоты от 0 до 50 Гц за 90 с при насосе, работающем на закрытую заслонку (то есть с пониженной нагрузкой). Тем не менее, качания тока с частотой порядка единиц герц продолжали присутствовать, в том числе при $f_1=50$ Гц. Когда емкость фазы СФ уменьшили до 1360 мкФ, плавкие вставки перегорели в процессе пуска АД без нагрузки.

Первое положение иллюстрируется рис. 2, где изображены расчетные зависимости токов СФ (определены по мощности, выделяющейся на активном сопротивлении при пропускании через него тока) согласно схеме рис. 1 при $f_1=50$ Гц. При аппроксимации графика тока $I_4=f(P_2)$ кривой 6 на рис. 2 выражением

$$y=0,0000000001x^4-0,0000003028x^3+$$

$$+0,0002864698x^2-0,1487129951x+375,429507481$$

коэффициент детерминированности составляет $R^2=0,9999999995$. Напротив, ток через индуктивности СФ возрастает с увеличением нагрузки на валу АД. Все зависимости, показанные на рис. 2–8,

получены в результате имитационного компьютерного моделирования установившихся режимов работы электропривода. При построении имитационной модели электропривода использованы: подходы и соотношения для расчёта параметров СФ, приведенные в [1, 6–8], математическая модель трёхфазного АД [1, 9, 10], трёхфазного трансформатора [1, 11].

При необходимости определить действующее значение тока в переходном процессе, например, при частотном разгоне АД, следует выбрать для гармонического анализа кривую тока на интервале времени, равном периоду первой гармоники. Возведя кривую тока на периоде в квадрат, выполним ее гармонический анализ. Полученная в результате постоянная составляющая будет соответствовать мощности, которая выделится на активном сопротивлении в 1 Ом при протекании через него рассматриваемого тока. То есть корень квадратный из полученной постоянной составляющей – действующее значение тока с учетом всех гармоник на выбранном интервале времени.

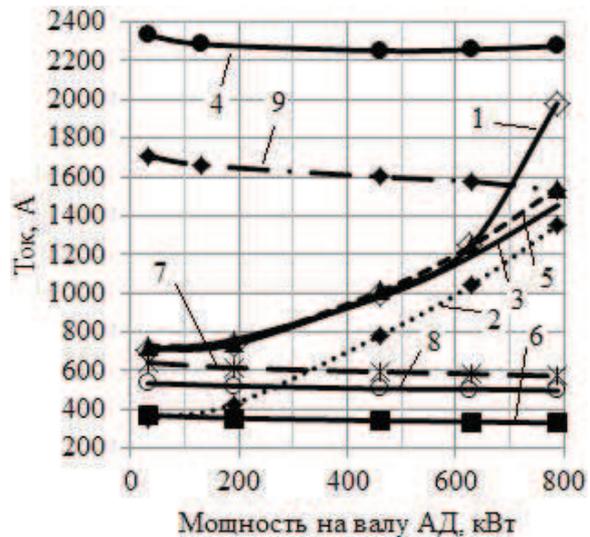


Рис. 2. Расчетные токи СФ: 1 – $I_1=I_2$ без емкостей при $f_n=2,5$ кГц; 2 – I_1 при емкости СФ 2200 мкФ на фазу, $f_n=2,5$ кГц; 3 – I_1 при 2200 мкФ, $f_n=1$ кГц; 4 – I_1 при 8360 мкФ, $f_n=2,5$ кГц и отсутствии демпфирующих резисторов; 5 – I_2 при 2200 мкФ, $f_n=2,5$ кГц (кривые I_2 для остальных случаев весьма близки показанной); 6 – I_4 при 2200 мкФ, $f_n=2,5$ кГц; 7 – I_3 при 2200 мкФ, $f_n=2,5$ кГц; 8 – I_4 при 2200 мкФ, $f_n=1$ кГц; 9 – I_4 при 8360 мкФ, $f_n=2,5$ кГц и отсутствии демпфирующих резисторов

Второе положение также находит свое подтверждение на рис. 2: при емкости на фазу СФ 2200 мкФ ток на выходе СФ (ток нагрузки) превышает ток на входе СФ (потребляемый от ПЧ) за счет компенсации реактивной мощности нагрузкой емкостями СФ [6]. Явление известно для емкостных компенсаторов реактивной мощности АД [12, 13]. Из рис. 3 видно, что с ростом емкости СФ для I_4 снижается k_{I4} . Это при прочих равных условиях происходит с ростом емкости за счет увеличения в гармоническом спектре тока I_4 доли первой

гармоники, на которой и происходит компенсация реактивной мощности.

Однако из того же рис. 2 видно, что при емкости на фазу СФ 8360 мкФ выходной ток ПЧ значительно превышает ток нагрузки и мало зависит от изменения мощности на валу АД. Одновременно кривая I_2 близка к случаю с емкостью СФ 2200 мкФ. Расчетом получено, что для полной компенсации реактивной мощности нагрузки при работе АД в номинальном режиме достаточна емкость СФ 2564 мкФ. То есть «перекомпенсация» реактивной мощности нагрузки посредством завышения емкости СФ приводит к заметному возрастанию I_1 . При моделировании с емкостью СФ 8360 мкФ при малой нагрузке на валу АД без демпфирующих сопротивлений для $f_1=40$ Гц и $f_n=2,5$ кГц удельный ток через емкость составил 0,101 А/мкФ, тогда как при $f_1=45$ Гц – уже 0,181 А/мкФ. Соответственно действующее значение выходного тока ПЧ в длительном режиме 972,3 и 1995,6 А. Таким образом, около $f_1=42$ Гц происходит резкое возрастание I_1 и превышение выходным током ПЧ значения $I_{1\text{предел}}=1600$ А с дальнейшим нарастанием, на что ПЧ реагирует отключением по признаку «короткое замыкание на выходе». Кратное увеличение I_1 в режиме малых нагрузок АД при емкости СФ 8360 мкФ по сравнению со случаем отсутствия емкости подтверждено испытаниями.

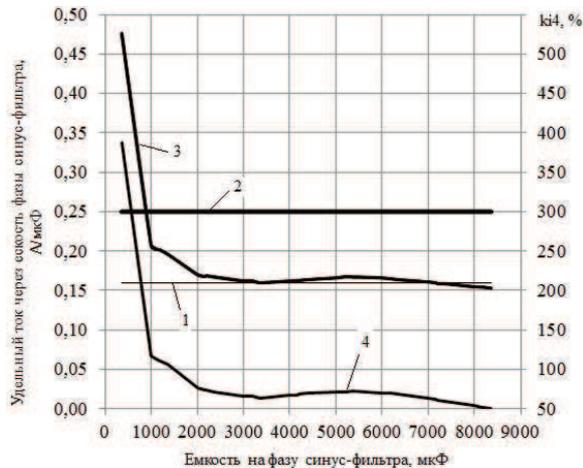


Рис. 3. Расчётный удельный действующий ток через емкость СФ и коэффициент гармонических составляющих тока I_4 при $f_1=50$ Гц и нагрузке на валу АД $0,05P_{2н}$. Кривые получены при включенных демпфирующих резисторах. При их отсутствии удельный ток через емкость выше в 1,3–1,4 раза. 1 – допустимый удельный ток 0,16 А/мкФ для конденсаторов емкостью 1000 мкФ; 2 – допустимый удельный ток 0,25 А/мкФ для конденсаторов емкостью 160 и 200 мкФ; 3 – расчетный удельный ток через емкость СФ; 4 – $k_{г4}$

Третье положение иллюстрируется конкретным примером: емкость фазы СФ 8360 мкФ [7], рассчитанная из условия работы при $f_n=2,1$ кГц, практически была получена сочетанием конденсаторов с номиналами 1000, 200 и 160 мкФ. Каждый кон-

денсатор защищен плавким предохранителем. Предельные действующие значения токов длительного режима составляют: 40 А для 160 мкФ, 50 А для 200 мкФ и 160 А для 1000 мкФ. Соответственно длительно допустимый удельный ток на единицу емкости составляет для младших номиналов конденсаторов 0,25 А/мкФ, для старшего номинала 0,16 А/мкФ. Таким образом, если подключим, как рассмотрено на рис. 2, на фазу СФ 2200 мкФ, то по сумме токов через предохранители длительно допустимо 370 А на фазу, и следовало бы на этом основании по рис. 2 и 4 ожидать, что при $f_1=50$ Гц, $f_n=2,5$ кГц и нагрузке на валу АД более $0,05P_{2н}$ конденсаторы по току в длительном режиме работы перегружены не будут. Но ток через параллельно соединенные конденсаторы распределяется прямо пропорционально их емкостям. Отсюда следует, что оценивать допустимость загрузки конденсаторов током при наличии параллельно подключенных старших и младших номиналов следует по величине 0,16 А/мкФ. Из рис. 4 видно, что лишь при мощности на валу АД свыше $0,4P_{2н}$ имеем допустимую загрузку конденсаторов током в длительном режиме. В противном случае, так как расчетный удельный ток емкости превосходит допустимое значение 0,16 А/мкФ незначительно, будет наблюдаться срабатывание защиты (плавких вставок) в первую очередь конденсаторов номиналом 1000 мкФ по току перегрузки (по перегреву в длительном режиме). Это наблюдалось в ходе проведения пусконаладочных работ СФ на ВНС, когда обрабатывался длительный режим работы на $f_1=50$ Гц при отсутствии нагрузки на валу АД и емкостях на фазу СФ 2200 и 2000 мкФ (срабатывание плавких вставок в течение 10–15 мин) или 1000 мкФ (срабатывание плавких вставок в течение 5 мин).

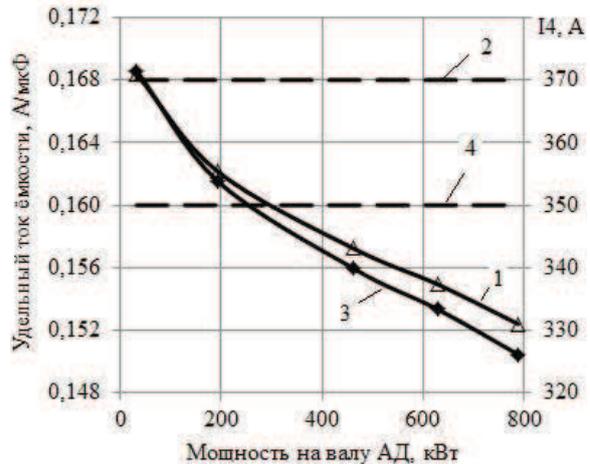


Рис. 4. I_4 и удельный ток емкости в функции мощности на валу АД для случая ёмкости в фазе СФ 2200 мкФ, $f_1=50$ Гц и $f_n=2,5$ кГц: 1 – I_4 ; 2 – наибольший допустимый ток длительного режима $I_{4\text{предел}}=370$ А; 3 – действующий удельный ток емкости в длительном режиме; 4 – наибольший допустимый действующий удельный ток емкости в длительном режиме равный 0,16 А/мкФ

Из рис. 3 следует, что при мощности на валу АД $0,05P_{2н}$, $f_1=50$ Гц и $f_n=2,5$ кГц имеем допустимую загрузку конденсаторов током в длительном режиме при емкости в фазе СФ не менее 7160 мкФ, если включены демпфирующие резисторы.

С принятыми токоограничивающими реакторами в индуктивной части выходного фильтра ПЧ выполнение им функций СФ возможно при величине емкости на фазу не менее 360 мкФ при $f_n=2,5$ кГц. Для составления емкости 360 мкФ используются лишь конденсаторы номиналов 160 и 200 мкФ с большим допустимым удельным током. Но в этом случае величина расчетного удельного тока почти в два раза выше, чем 0,25 А/мкФ (рис. 3). Следует ожидать быстрого перегорания плавких вставок, защищающих конденсаторы, по пусковому току типа тока короткого замыкания. При проведении пусконаладочных работ СФ с емкостью 360 мкФ на фазу перегорание плавких вставок происходило уже в процессе частотного пуска ненагруженного АД при $f_1=20-25$ Гц (приблизительно через 40 с после начала частотного разгона АД). Корпуса предохранителей даже не успевали нагреться.

На рис. 5 показаны расчетные графики удельных токов длительного режима емкостей СФ в функции частоты выходного напряжения ПЧ для трех значений ёмкости в фазе СФ при малых нагрузках на валу АД в условиях наличия в емкостной части СФ демпфирующих резисторов RA, RB и RC.

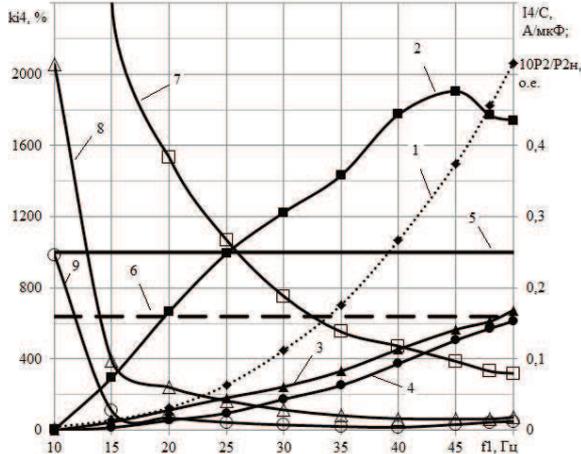


Рис. 5. Удельный ток емкости в длительном режиме и k_d в функции частоты выходного напряжения ПЧ для случаев ёмкости в фазе СФ 360, 2200 и 8360 мкФ при $f_n=2,5$ кГц, малых нагрузках на валу АД и включенных демпфирующих резисторах: 1 – $10P_2/P_{2н}$ (отношение мощности на валу АД к номинальной); 2 – удельный ток емкости при 360 мкФ; 3 – удельный ток емкости при 2200 мкФ; 4 – удельный ток емкости при 8360 мкФ; 5 – максимальный допустимый в длительном режиме удельный ток конденсаторов номиналов 160 и 200 мкФ; 6 – максимальный допустимый в длительном режиме удельный ток конденсаторов номинала 1000 мкФ; 7, 8, 9 – k_d при ёмкости 360, 2200 и 8360 мкФ соответственно

Из рис. 5 видно, что при емкости 8360 мкФ удельный ток емкости ниже предельного значения

длительного режима во всем диапазоне f_1 . При 2200 мкФ удельный ток емкости ниже предельного значения до $f_1=49$ Гц, а при 360 мкФ – только до частоты $f_1=25$ Гц. Причем, при 360 мкФ наибольшая загрузка емкостей по току наблюдается при $f_1=45$ Гц, а не при $f_1=50$ Гц, как в двух других случаях. Во всех случаях наблюдается тенденция уменьшения $k_{д4}$ с ростом частоты. Но при 8360 мкФ $k_{д4}$ несколько возрастает после 40 Гц, а при 2200 мкФ – после 45 Гц.

Четвертое положение в части возникновения резонансов емкостей СФ с сетевой стороной привода невозможно ввиду односторонней проводимости диодов входного неуправляемого выпрямителя ПЧ. Как видно из рис. 6, I_c , потребляемый из сети электроприводом (ток обмотки высокого напряжения понижающего трансформатора), слабо зависит от наличия и параметров СФ. Следует констатировать некоторое возрастание I_c при наличии СФ по сравнению с его отсутствием (на 1–41 %, большие значения соответствуют меньшей нагрузке АД). Для сетевого тока $k_{тс}$ также несколько меняется от емкости СФ (рис. 6).

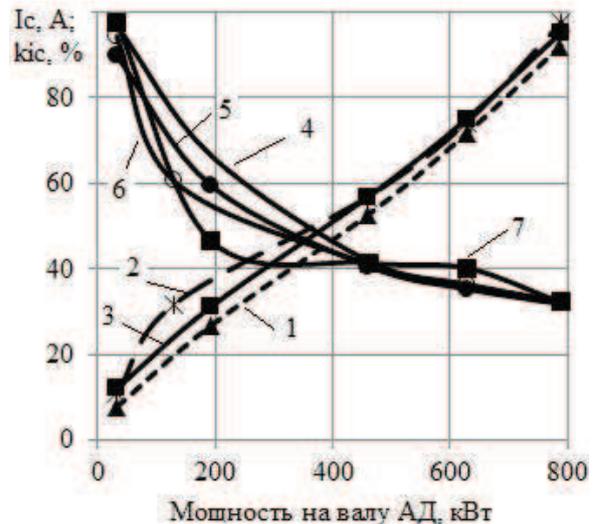


Рис. 6. Сетевой ток электропривода при $f_1=50$ Гц: 1 – I_c при $f_n=2,5$ кГц, отсутствии СФ или при емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах; 2 – I_c при $f_n=2,5$ кГц, емкости 8360 мкФ на фазу СФ без демпфирующих резисторов; 3 – I_c при $f_n=1$ кГц, емкости 2200 мкФ на фазу СФ и включенных демпфирующих резисторах; 4 – $k_{тс}$ при $f_n=2,5$ кГц и отсутствии СФ; 5 – $k_{тс}$ при $f_n=1$ кГц, емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах; 6 – $k_{тс}$ при $f_n=2,5$ кГц, емкости 8360 мкФ на фазу без демпфирующих резисторов; 7 – $k_{тс}$ при $f_n=2,5$ кГц, емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах

Имеется возможность возникновения резонансных явлений между индуктивными элементами ПЧ и емкостями СФ, а также между емкостями СФ и индуктивностями нагрузки.

В [14] в п. 3.4 относительно СФ сказано: «LC-фильтр позволяет сформировать в двигателе близкую к синусоидальной форму напряжения. В ряде

случаев к LC-фильтру добавляют диссипативный элемент – резистор, включение которого исключает вероятность возникновения процессов ударного возбуждения вследствие циклического обмена энергии в контуре «емкость фильтра – индуктивность двигателя». С целью демпфирования возможных резонансных колебаний тока в контурах, содержащих емкости СФ, было принято решение подключить резисторы RA, RB и RC в линии питания емкостей (рис. 1). Такие технические решения используются зарубежными электротехническими фирмами [15, 16]. Были выбраны сопротивления по 0,013468 Ом, позволяющие в длительном режиме рассеивать до 8 кВт на фазу СФ. Компьютерное моделирование показало, что удовлетворить ограничению по рассеиваемой мощности на резисторах с учетом весьма сложного гармонического состава токов через них возможно лишь при емкости фазы СФ, не более 2360 мкФ. Температура сопротивлений при испытаниях без обдува составила 172 °С, что говорит о необходимости их принудительного охлаждения. На рис. 7 показаны расчетные энергетические характеристики СФ с емкостью 2200 мкФ на фазу при $f_1=50$ Гц, $f_n=2,5$ кГц и $k_U=32,3$ % для линейного напряжения на входе СФ. В случае снижения f_n при прочих равных условиях энергетические характеристики СФ ухудшаются.

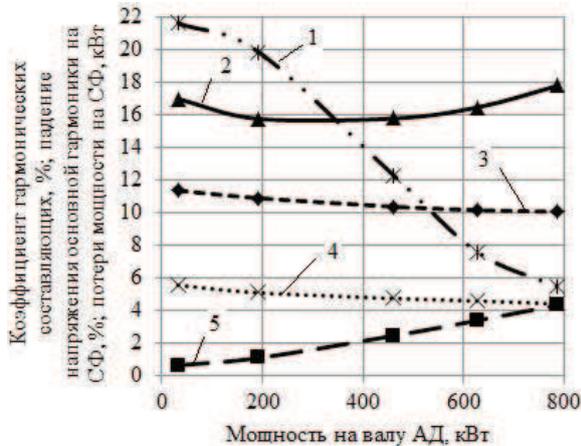


Рис. 7. Расчётные энергетические характеристики СФ: 1 – k_n ; 2 – суммарные потери в СФ; 3 – k_U суммарный коэффициент гармонических составляющих междуфазного напряжения на нагрузке; 4 – потери мощности на демпфирующем сопротивлении фазы; 5 – падение напряжения от основной гармоники на фазе СФ

Рис. 8 свидетельствует об эффективности воздействия СФ на гармонический состав тока. Наибольшей паразитной гармоникой тока I_2 является 5-я.

По рис. 7 и 8 можно сделать заключение о вполне удовлетворительных характеристиках СФ при $f_1=50$ Гц и $f_n=2,5$ кГц, исключая чрезмерный удельный ток через емкость при малых нагрузках АД (рис. 3–5). Говоря иначе, такой СФ может эксплуатироваться при мощности на валу АД свыше $0,4P_{2н}$. Проводить пусконаладочные работы на приводе с таким СФ без нагрузки на валу или с ма-

лой нагрузкой в длительном режиме невозможно. Вполне возможна эксплуатация СФ во всем диапазоне нагрузок АД при $f_1 < 49$ и $f_n = 2,5$ кГц. При $f_n = 1$ кГц эксплуатация СФ невозможна.

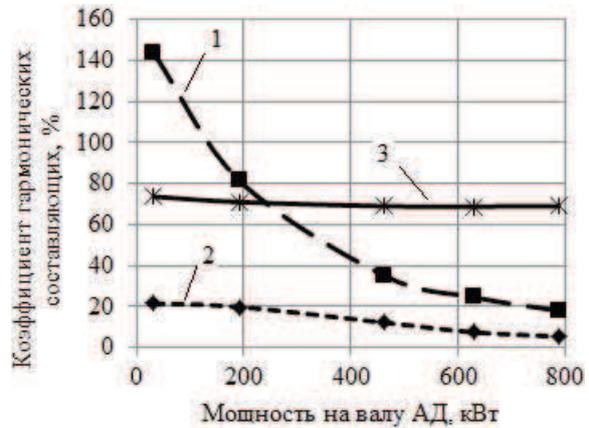


Рис. 8. Расчётные суммарные коэффициенты гармонических составляющих для токов СФ: 1 – k_n ; 2 – k_2 ; 3 – $k_3=k_4$

Позволив осуществлять уверенный безаварийный пуск привода, ввод демпфирующих резисторов не устранил полностью низкочастотных качаний тока (порядка единиц герц) на выходе ПЧ при некоторых частотах выходного напряжения. В ходе испытаний с емкостью СФ 2000 мкФ на фазу колебания действующего значения тока I_1 составляли до 17 % от средней величины при $f_1=50$ Гц и свыше 11 % при $f_1=38$ Гц. Рост тока при разгоне отмечен примерно до $f_1=30$ Гц. Свыше частоты 30 Гц следовал спад значений тока I_1 . Так как на испытаниях темп набора частоты преобразователем был задан 50 Гц за 90 с, то явления пускового тока АД должны были бы уже закончиться ранее достижения частоты 30 Гц. Поэтому, возможно, имеют место резонансные явления амплитуд токов ПЧ и АД. В ходе анализа результатов компьютерного моделирования отмечено, что при мощности на валу АД $0,05P_{2н}$ при различных значениях f_1 имеют место колебания частоты вращения ротора с частотой примерно $f_{кр}=5-7,25$ Гц (среднее арифметическое 6,125 Гц). Их наличие в результатах моделирования не связано с величиной или отсутствием емкости СФ. В условиях малой нагрузки в процессе колебаний частоты вращения ротора возможны периодические выходы АД в генераторный режим. Тот же период колебаний имеет амплитуда тока фазы АД I_2 и амплитуда выходного тока ПЧ I_1 . Также имеются колебания мощности, выделяемой на активных сопротивлениях реакторов и на демпфирующих резисторах, той же частоты, что и колебания частоты вращения ротора АД. Колебания мощностей наиболее заметны при $f_1=25$ и 35 Гц. Соответственно частоты колебаний составляют около 5 и 6,67 Гц. Эти же частоты колебаний амплитуды зафиксированы в результатах моделирования сетевого тока привода. Возрастание сетевого тока в результате таких колебаний могло бы объяснить зафиксированные во время ис-

питаний единичные случаи срабатывания защиты понижающего трансформатора. Значения частоты выходного напряжения ПЧ, для которых в ходе испытаний и моделирования замечено возрастание амплитуды I_1 , а именно: 12, 25, 27, 35, 38, 42, 47, 50 Гц, близки к числам, кратным $f_{\text{вр}}$.

В [17] указано на то, что при питании от высоковольтных ПЧ мощных АД насосных станций возможны явления возникновения автоколебаний тока и скорости вращения. Иными словами, возможны проявления резонансных явлений тока I_1 . О наличии или отсутствии в схеме выходных фильтров ПЧ в [17] упоминаний нет. Основным критерием склонности АД к вхождению в резонанс в [17] называется величина коэффициента передачи магнитного потока между статором и ротором $k \geq 0,95$

$$k = L_{\mu} / \sqrt{(L_{\mu} + L_{\sigma 1})(L_{\mu} + L'_{2})}. \quad (1)$$

Для АД ВНС составляющие выражения (1) имеют значения, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Значения составляющих выражения (1) [1, 4]

Главная индуктивность асинхронной машины L_{μ} , Гн	Индуктивность рассеяния фазы обмотки статора $L_{\sigma 1}$, Гн	Индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, приведенная к фазе статора L'_{2} , Гн	Коэффициент передачи магнитного потока между статором и ротором k , о.е.
Асинхронный двигатель 630 кВт, 1500 об/мин, 6 кВ			
0,277214	0,01084367	0,01518114	0,955

Очевидно, что конкретный АД отвечает критерию склонности к вхождению в резонанс, так как рассчитанное $k=0,955 > 0,95$. Возможно, наличие емкостного накопителя энергии на клеммах нагрузки способствует усугублению проявлений этой склонности, так как на испытаниях при пусках привода без СФ заметных низкочастотных качаний тока I_1 не зафиксировано.

Пятое положение отражено, например, в [13, 18], где установлено соответствие между номинальной мощностью АД на 0,4 кВ линейного напряжения с синхронной частотой вращения 1500 об/мин и максимальной реактивной мощностью компенсирующих конденсаторов, кВАр, подключаемых к клеммам двигателя, гарантирующей отсутствие самовозбуждения АД (табл. 2). Из табл. 3 следует, что емкости мощных СФ для работы при $f_{\text{н}}=2$ кГц известных зарубежных фирм с запасом соответствуют требованиям табл. 2. Малая емкость в СФ достигается за счет увеличения индуктивности, что приводит в некоторых случаях к падению напряжения на индуктивности более 10 %. Тем не менее, [13, 18] не отрицают возможности использования емкостей больших, чем рекомендованные.

Возможным компромиссным решением по использованию СФ при двухтрансформаторной схеме питания высоковольтного АД от низковольтного ПЧ является установка высоковольтных кон-

денсаторов на клеммы обмотки высокого напряжения повышающего трансформатора, индуктивности рассеяния которого в этом случае выполняют функцию индуктивности СФ.

Таблица 2. Рекомендованные соответствия между номинальной мощностью АД и максимальной реактивной мощностью конденсаторов

Номинальная мощность АД, кВт	Максимальная реактивная мощность конденсаторов, кВАр	C, мкФ (на фазу) при подключении по схеме треугольник на напряжение 0,4 кВ
22	8	53
30	10	66
37	11	73
45	13	86
55	17	113
75	22	146
90	25	166
110	29	192
132	36	239
160	41	272
200	47	312
250	57	378
280	63	418
355	76	504
400	82	544
450	93	617
Последующие значения получены экстраполяцией		
500	102	675
630	123	816
800	150	994

Таблица 3. Характеристики мощных синус-фильтров фирм Danfoss [19] и Schaffner [20] на линейное напряжение 0,4 кВ

Номинальная мощность АД, кВт	C, мкФ (на фазу) при подключении по схеме треугольник	L, мГн	Резонансная частота СФ f_r , Гц	Несущая частота ШИМ ПЧ $f_{\text{н}}$, Гц	$f_{\text{н}}/f_r$	Падение напряжения на частоте 50 Гц на индуктивности СФ в % от 380 В	Выходной ток ПЧ, А
250	94	0,11	903,6	3000	3,3	4,4	480
400	165	0,2	505,8	2000	4,0	12,4	750
450	188	0,11	639,0	2000	3,1	8,0	880
500	188	0,11	639,0	2000	3,1	8,0	880
560	282	0,075	631,8	2000	3,2	7,4	1200
630	282	0,075	631,8	2000	3,2	7,4	1200
800	330	0,1	505,8	2000	4,0	12,4	1500

Достоинства такого решения: емкость СФ получается небольшой и формируется единственным конденсатором на фазу, удовлетворяются рекомендации табл. 2 (если считать, что максимальная реактивная мощность конденсаторов, которую можно присоединить к клеммам АД без риска развития самовозбуждения, не зависит от напряжения). Недостатком будет отсутствие защиты посредством СФ повышающего трансформатора. Для ВНС в ряде случаев такой вариант приемлем, так как явление озонирования требуется исключить в помеще-

ниях, где находятся люди. АД с насосными агрегатами устанавливаются в машинном зале, где работает персонал. Трансформаторы устанавливаются в отдельных боксах, куда доступ людей ограничен.

В рассматриваемом случае с высоковольтным АД мощностью 630 кВт могут быть использованы высоковольтные конденсаторы КЭК1-6,3-75, подключаемые по схеме звезда. Ёмкость конденсатора 6 мкФ. Подключается каждый конденсатор на номинальное фазное напряжение $U_{\text{сфн}}=6300/\sqrt{3}=3467\text{В}$. Номинальный ток конденсатора рассчитаем по номинальной реактивной мощности и номинальному напряжению: $I_{\text{сн}}=Q_{\text{сн}}/U_{\text{сн}}=75000/6300=11,905\text{ А}$. Конденсатор допускает перегрузку по току на 30 %. При номинальных токе и фазном напряжении реактивная мощность трёх фаз конденсаторов СФ составит $Q_{\text{сф}}=3U_{\text{сфн}}I_{\text{сн}}=3\cdot 3467\cdot 11,905=123823,9\text{ Вар}$, то есть 123,8 кВар, что незначительно больше предельного значения (123 кВар) из табл. 2. Характер зависимости тока через конденсатор от нагрузки на валу АД такой же, как и при низковольтных конденсаторах: при неизменной частоте напряжения с ростом нагрузки ток через конденсаторы СФ снижается. То есть ток конденсаторов в режиме холостого хода будет наибольшим. Моделированием получено при нагрузке АД $0,05P_{\text{дн}}$ действующее значение тока через конденсатор СФ в установившемся режиме 11,439 А, что ниже номинального тока. Реакторы РТСТ в этом случае практически не являются значимой частью индуктивности СФ – в основном её функцию выполняют индуктивности рассеяния обмоток трансформатора ТСЗГЛФ 1250/10 УЗ, используемого в качестве повышающего, для которого в первом приближении сумма индуктивностей рассеяния обмоток $L_{\sigma 1}+L_{\sigma 2}'=2\cdot 0,0032=0,0072\text{ Гн}$. Тогда $f_{\text{н}}/f_{\text{р}}=2500/765,7=3,265$.

Выводы

1. При использовании емкостей СФ, составленных из параллельно соединенных конденсаторов с различными характеристиками, следует принимать в качестве ограничения по току наименьшее из возможных для различных конденсаторов значение удельного тока через емкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустоветов М.Ю., Солтус К.П., Синявский И.В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. – Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 209 с. URL: http://rgups.ru/books/komputernoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigatellei_i_transformatorov.pdf (дата обращения: 06.09.2013).
2. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.
3. Черный А.П., Полищук П.И., Воробейчик О.С. Анализ динамических характеристик частотно-регулируемого электропривода с фильтром на выходе инвертора // Електротехнічні і

2. При использовании емкостей СФ, составленных из определённого набора параллельно соединенных конденсаторов с различными номиналами, следует предусматривать возможность использования у потребителя разных сочетаний номиналов конденсаторов, позволяющих производить настройку ёмкости СФ под конкретные условия эксплуатации. Следует предусматривать возможность эксплуатации СФ как без, так и с демпфирующими резисторами в емкостной части.
3. Конденсаторы СФ наиболее нагружены током в режиме холостого хода нагрузки. СФ должен обеспечивать возможность работы в длительном режиме при реальном холостом ходе нагрузки, например, АД, во всем диапазоне значений выходного напряжения и частоты ПЧ. Это весьма важно для проведения пусконаладочных работ.
4. В СФ не следует использовать емкость большую, чем пригодная для обеспечения полной компенсации реактивной мощности нагрузки. Нарушение этого правила ведет к неоправданному увеличению выходного тока ПЧ и тока через емкости СФ.
5. Метод расчета действующего значения тока через емкость СФ должен обеспечивать корректный учет вклада широкого спектра высших временных гармоник. Целесообразно для расчета действующего значения тока через емкость проводить компьютерное моделирование установившихся режимов работы привода, а для выявления максимальных мгновенных величин тока – динамических режимов. Расчет действующего значения тока через емкость СФ методом, описанным в [21], по результатам моделирования динамических режимов привода может приводить к заниженным значениям.
6. Снижать удельный ток через емкость СФ за счет увеличения сопротивления демпфирующих резисторов нецелесообразно. Например, двукратное увеличение сопротивления приводит к возрастанию на нем потерь на 83 % при снижении удельного тока через емкость СФ лишь на 4 %.

енергозберігаючі системи, 2007. – Випуск 2. – С. 5–11. URL: http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007_02/EES_2_2007_PDF/5.pdf (дата обращения: 14.09.2013).

4. Пустоветов М.Ю. Приближённое определение параметров асинхронных двигателей / Технологія-2013: матеріали міжнар.наук.-техн. конф. – Северодонецк, 26–27 квіт. 2013. – Северодонецк: Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2013. – Ч. II. Укл. Тарасов В.Ю. – С. 84–86. URL: http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech_2013_sborn_2.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
5. Пустоветов М.Ю. Характеристики L-CR синус-фильтра для мощного частотно-регулируемого электропривода // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VI Междунар. научно-практ. конф. – Белово, 17–18 мая 2013. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово; Велико Търново, Бол-

- гария: Изд-во университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», 2013. – Ч. 2. – С. 292–295. URL: conference.kemsu.ru/conf/bfkuzgtu2013/index.htm (дата обращения: 11.09.2013).
6. Пустоветов М.Ю. О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями // *Электричество*. – 2013. – № 5 – С. 41–44.
 7. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров в частотно-регулируемом электроприводе // *Вестник ДГТУ*. – 2012. – Т. 12. – № 3 (64). – С. 56–64. URL: http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6_PUBLICATION:68640 (дата обращения: 28.08.2013).
 8. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусного фильтра для преобразователя собственных нужд электровоза // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2012. – № 5–6. – С. 13–15.
 9. Пустоветов М.Ю. Математическая и компьютерная модели асинхронного двигателя в трёхфазной системе координат // *Электричество*. – 2013. – № 7 – С. 41–45.
 10. Пустоветов М.Ю. Выбор математической модели асинхронного двигателя в трёхфазных заторможенных координатах // *Вестник РГУПС*. – 2012. – № 4 (48). – С. 136–144. URL: <http://elibrary.ru/download/73081796.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
 11. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трёхфазного трансформатора // *Известия ТПУ*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 97–100. URL: <http://elibrary.ru/download/50974557.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
 12. Пустоветов М.Ю. О прямом пуске асинхронного двигателя с двухступенчатой компенсацией реактивной мощности в составе вспомогательного привода электровоза // *Известия Транссиба*. – 2012. – № 3 (11). – С. 83–88. URL: http://om-gups.ru/structure/transsib/2012/2012_03.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
 13. Руководство по устройству электроустановок 2009. Технические решения «Шнейдер Электрик». URL: http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical_Guide_2009.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
 14. Хачатурян В.А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 64 с. URL: zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc (дата обращения: 28.08.2013).
 15. Type SF Sinewave Output Filters. URL: <http://www.powe-rohm.com/pdfs/HFCAT00.pdf> (дата обращения: 11.09.2013).
 16. Trans-Coil. Inc. Performance and Protection for Drives. Motor Guard TM Sine Wave Filter. Installation, Operation and Maintenance Manual. URL: www.clrwtr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
 17. Чепкунов Р.А. Исследование электромеханических автоколебаний в асинхронном электроприводе на низких частотах // *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. – 2008. – Вип. 4 (51). – Ч. 2. – С. 17–20. URL: <http://www.kdu.edu.ua/statsti/2008-4-2/17.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
 18. EPCOS. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Product Profile 2009. URL: http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC_Katalog2009.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
 19. Danfoss. Output Filters Design Guide. URL: www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EAO-849044873F59/0/Output_Filters_Design_Guide.pdf (дата обращения: 28.08.2013).
 20. LC Sine Wave Filter for Motor Drives. Output Filters FN5040 / FN5045. Schaffner. URL: <http://www.schaffner.com/en/products/datasheet-low-res/product/fn-5040-fn-5045-lc-sine-wave-filter-for-motor-drives.html> (дата обращения: 28.08.2013).
 21. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. – М.: СОЛЮН-Пресс, 2005. – 200 с.

Поступила 15.09.2013 г.

UDC 62-83 (075.8)

EXPERIENCE IN DEVELOPING SINE-WAVE FILTER FOR POWER CIRCUIT OF VVVF-DRIVE WITH INDUCTION MOTOR

Mikhail Yu. Pustovetov,

Cand. Sc., Rostov State Transport University, Russia, 344038, Rostov-on-Don, Narodnogo Opolcheniya sq., 2. E-mail: mgsn2006@rambler.ru

The relevance of the work reflects the increased use in domestic practice of variable frequency electric drive additional options, which include sine-wave filter; the demand for development of sine-wave filters based on domestic components.

The main aim of the study: *to develop guidelines for choosing the parameters of the sine-wave filters and the correct selection of the elements in the current; to consider the phenomena occurring when the capacity turn on to terminals of the load with induction motor, such as: reactive power compensation and overcompensation, self-excitation.*

The methods used in the study: *test on a real process plant; computer simulation of an electromechanical system with a semiconductor converter based on a combination of circuit and operational principles for preparing the model.*

The results: *the author describes some of the results of experience in the design and testing of the sine-wave filter for high-power VVVF drive with high voltage induction motor with scalar control. The paper introduces the comparative results of the computer simulation of processes at different sets of the sine-wave filter and converter parameters. Some recommendations for sine-wave filter design are suggested.*

Key words:

Frequency converter, pulse-width modulation of voltage, sine-wave filter, induction motor, capacitance, reactive power, self-excitation, current.

REFERENCES

- Pustovetov M.Yu., Soltus K.P., Sinyavskiy I.V. *Kompyuternoe modelirovanie asinkhronnykh dvigateley i transformatorov. Privery vzaimodeystviya s silovymi elektronnyimi preobrazovatelyami* [Computer modeling of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 209 p. Available at: http://rgups.ru/books/kompyuternoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigateli_i_transformatorov.pdf (accessed 06 September 2013).
- GOST R 54149–2010. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard R 54149–2010. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards of electrical energy in power systems of general purpose]. Moscow, Standartinform, 2012. 20 p.
- Cherny A.P., Polishchuk P.I., Vorobeychik O.S. Analiz dinamicheskikh kharakteristik chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s filtrom na vykhode invertora [Analysis of dynamic characteristics of the variable frequency electric drive with inverter output filter]. *Elektrotehnichni i energoberigajuchi sistemi – Electrical and Energy-Saving Systems*, 2007, no. 2, pp. 5–11. Available at: http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007_02/EES_2_2007_PDF/5.pdf (accessed 14 September 2013).
- Pustovetov M.Yu. Priblizhynnoe opredelenie parametrov asinkhronnykh dvigateley [Approximate determination of the parameters of induction motors]. *Tekhnologiya–2013: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technology 2013. Proc. of International Research Conference]. Severodonetsk, April 26–27 2013. Part II, pp. 84–86. Available at: http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech_2013_sborn_2.pdf (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Kharakteristiki L-CR sinus-filtra dlya moshchnogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Characteristics of L-CR sine-wave filter for a powerful variable frequency drive]. *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii. Sb. statey uchastnikov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in technology and education: a collection of articles by participants VI Intern. scientific and practical. conf.]. Belovo, 17–18 May 2013. P. 2. Belovo, Publisher of branch of Kuznetsk State Technical University; Veliko Tarnovo, Bulgaria, Publishing House of the University «St. Cyril and Methodius», 2013, pp. 292–295. Available at: conference.kemsu.ru/conf/bfku2013/index.htm (accessed 11 September 2013).
- Pustovetov M.Yu. O parametrah filtrov dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s asinkhronnymi dvigatelyami [About filter parameters for VVVF-drive with induction motor]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no. 5, pp. 41–44.
- Pustovetov M.Yu. Raschet parametrov i kompyuternoe modelirovanie sinusnykh filtrov v chastotno-reguliruemom elektroprivode [VVVF-drive sinusoidal filters parameters calculation and computer modeling]. *Vestnik DGTU – Herald of Don State Technical University*, 2012, vol. 12, no. 3 (64), pp. 56–64. Available at: http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6_PUBLICATION:68640 (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Raschet parametrov i kompyuternoe modelirovanie sinusnogo filtra dlya preobrazovatelya sobstvennykh nuzhd elektrovoza [Electric locomotive's auxiliary drive sine-wave filter parameters calculation and computer modeling]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2012, no. 5–6, pp. 13–15.
- Pustovetov M.Yu. Matematicheskaya i kompyuternaya modeli asinkhronnogo dvigatelya v trekhfaznoy sisteme koordinat [Induction motor mathematical and computer model in the 3-phase stator reference frame]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no. 7, pp. 41–45.
- Pustovetov M.Yu. Vybormatematicheskoy modeli asinkhronnogo dvigatelya v trekhfaznykh zatormozhennykh koordinatakh [The choice of induction motor mathematical model in the 3-phase stator reference frame]. *Vestnik RGUPS – Herald of Rostov State University of Transport Communications*, 2012, no. 4 (48), pp. 136–144. Available at: <http://elibrary.ru/download/73081796.pdf> (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Matematicheskaya model trekhfaznogo transformatora [3-phase transformer mathematical model]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 97–100. Available at: <http://elibrary.ru/download/50974557.pdf> (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. O pryamom puske asinkhronnogo dvigatelya s dvukhstupenchatoy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti v sostave vspomogatelnogo privoda elektrovoza [About direct start of induction motor with two-step reactive power compensation with an auxiliary electric drive of electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba – Proceedings of the Trans-Siberian Railway*, 2012, no. 3 (11), pp. 83–88. Available at: http://omgups.ru/structure/transsib/2012/2012_03.pdf (accessed 28 August 2013).
- Rukovodstvo po ustroystvu elektroustanovok 2009. Tekhnicheskie resheniya «Schneider-Electric»* [Electrical installation guide 2009. Technical solutions of «Schneider Electric»]. Available at: http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical_Guide_2009.pdf (accessed 28 August 2013).
- Hachaturyan V.A. *Upravlenie elektrosnabzheniem neftepererabatyvayushchikh predpriyatii v usloviyakh massovogo primeneniya reguliruemogo elektroprivoda* [Managing electricity refineries at mass application controlled electric drives]. St. Petersburg, Publisher of the St. Petersburg State Technical University, 2001. 64 p. Available at: zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc (accessed 28 August 2013).
- Type SF Sinewave Output Filters*. Available at: <http://www.powerohm.com/pdfs/HFCAT00.pdf> (accessed 11 September 2013).
- Trans-Coil. Inc. Performance and Protection for Drives. Motor Guard TM Sine Wave Filter. Installation, Operation and Maintenance Manual*. Available at: www.clrwr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf (accessed 28 August 2013).
- Chepkunov R.A. Issledovanie elektromekhanicheskikh avtokolebaniy v asinkhronnom elektroprivode na nizkikh chastotakh [Study of electromechanical oscillations in an induction motor based electric drive at low frequencies]. *Visnik KDPU imeni Mihayla Ostrogradskogo – Herald of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2008, no. 4 (51), P. 2, pp. 17–20. Available at: <http://www.kdu.edu.ua/statti/2008-4-2/17.pdf> (accessed 28 August 2013).
- EPCOS. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Product Profile 2009*. Available at: http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC_Katalog2009.pdf (accessed 28 August 2013).
- Danfoss. Output Filters Design Guide*. Available at: www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EA0-849044873F59/0/Output_Filters_Design_Guide.pdf (accessed 28 August 2013).
- LC Sine Wave Filter for Motor Drives. Output Filters FN5040 / FN5045*. Schaffner. Available at: <http://www.schaffner.com/en/products/datasheet-low-res/product/fn-5040-fn-5045-lc-sine-wave-filter-for-motor-drives.html> (accessed 28 August 2013).
- Bolotovskiy Yu.I., Tanazly G.I. *OrCAD. Modelirovanie. «Povarennaya» kniga* [Simulation. «Cookbook»]. Moscow, SOLON-Press, 2005. 200 p.