

О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями

ПУСТОВЕТОВ М.Ю.

Предложен метод расчёта параметров фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями. Приведены результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, фильтр, широтно-импульсная модуляция, автономный инвертор напряжения

Высокая эффективность частотного регулирования электропривода переменного тока обусловила его чрезвычайно широкое распространение. В большой степени этому способствует возможность использования надёжных трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД). Ввиду известных особенностей питания от преобразователя частоты (ПЧ), таких как импульсная форма питающего напряжения с крутым фронтом, эффект длинного кабеля [1], ускоренная деградация изоляции электрической машины, наиболее целесообразно использовать совместно с ПЧ специализированные АД. Однако предназначенные для питания от ПЧ эти двигатели существенно дороже своих аналогов, получающих питание от сети с синусоидальной формой напряжения [1].

Одним из эффективных решений, позволяющих кардинально улучшить характеристики напряжения, подаваемого на АД с выхода ПЧ, является использование фильтра. Его задача – сглаживание широтно-импульсно модулированного выходного напряжения ПЧ до практически синусоидальной формы, поэтому в дальнейшем будем называть его синус-фильтром (СФ). Применение СФ позволяет использовать совместно с ПЧ неспециализированные рассчитанные на сетевое питание недорогие АД. Несмотря на широкий выбор зарубежных СФ на российском рынке, расчёт их параметров долгое время не был широко освещён отечественными авторами. Только в последнее время растёт интерес к СФ в отечественной научно-технической литературе [4–6], из зарубежных источников следует отметить [2, 3].

Устройство фильтра. Синус-фильтр является реактивным фильтром нижних частот. Обычно состоит из трёх фазных реакторов и трёх конденсаторов, включённых каждый либо между двумя фазами (схема «треугольник»), либо между фазой и нейтральной точкой (схема «звезда»). Напряжения с

A method for calculating the parameters of sine-wave filters for an adjustable-frequency electric drive equipped with asynchronous motors is proposed. Results obtained from computer simulation are presented.

Key words: asynchronous electric drive, sine-wave filter, pulse-width modulation, independent voltage inverter

частотами ниже резонансной f_p фильтр пропускает почти без уменьшения амплитуд, напряжения с частотами выше f_p затухают пропорционально $1/f^2$ [2]. Фильтр борется с противофазной помехой [7].

Общий принцип расчёта параметров СФ заключается в том, что резонансная частота f_p должна быть гораздо выше частоты основной гармоники напряжения, формируемой автономным инвертором напряжения (АИН) в составе ПЧ для питания АД. Одновременно f_p должна быть гораздо ниже частоты переключений инвертора или несущей частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) $f_{\text{ШИМ}}$ [2, 3]. При расчёте параметров СФ можно задаваться индуктивностью или ёмкостью. Следует придерживаться небольшим (0,01, 0,1 Ом) значением активного сопротивления r_C ветвей с ёмкостями. Для надёжного сглаживания напряжения для СФ рекомендуется [6, 8]

$$f_p \geq f_{\text{ШИМ}} / 5. \quad (1)$$

В [3] выбрано $f_{\text{ШИМ}} / f_p \gg 8$, а в [5] это отношение равно 3. По меньшей мере, должно соблюдаться правило: $f_{\text{ШИМ}} > 2f_p$. Необходимо, чтобы падение напряжения основной частоты f_1 на продольной ветви СФ, содержащей индуктивность L , последовательно соединённую с активным сопротивлением реактора r_L , не было чрезмерно большим, позволяло двигателю работать в допустимом диапазоне отклонения напряжения. Рационально ограничить падение напряжения на f_1 в продольной ветви СФ значением 5% номинального напряжения на нагрузке [3, 8] (в крайнем случае, не более 10%). Индуктивности СФ могут быть выполнены в виде дросселя с магнитопроводом или в виде воздушного реактора [4]. Для диапазона мощностей 2,2, 315 кВт отношение масс СФ и четырехполюсного АД (линейное напряжение 380 В, 50 Гц) составляет в среднем 0,18. По данным на 2012 г.,

среднее отношение цен СФ и ПЧ находится в пределах 0,6, 1,5.

Расчёт синус-фильтра от индуктивности. По заданным f_p и индуктивности СФ L можно рассчитать ёмкость СФ:

$$C = \frac{1}{L} \frac{1}{2pf_p} \quad (2)$$

где значение C взято для случая соединения конденсаторов по схеме «звезда». При соединении конденсаторов по схеме «треугольник», когда каждый конденсатор подключён к линейному напряжению, значение ёмкости будет в три раза меньше.

Расчёт синус-фильтра от ёмкости. Выбираем конденсатор из условия компенсации всей реактивной мощности нагрузки на основной частоте $f_1 = 50$ Гц. Для случая соединения конденсаторов в «звезду» ёмкость фазы СФ

$$C = \frac{S}{3} \frac{1}{2pf_1 U_1^2} \sqrt{1 - (\cos j)^2}, \quad (3)$$

где S – суммарная мощность нагрузки, подключённой после СФ; $\cos j$ – коэффициент мощности нагрузки; U_1 – действующее значение первой гармоники напряжения на ёмкости СФ.

По значениям частоты f_p , выбираемой из условия (1), и ёмкости C , взятой для случая соединения конденсаторов в «звезду», можно рассчитать индуктивность:

$$L \geq \frac{1}{C} \frac{1}{2pf_p} \quad (4)$$

Пример выбора параметров СФ. Рассмотрим схему питания АД привода водяного насоса (рис. 1). Понижающий трансформатор получает питание от сети 50 Гц, 6 кВ. Схема соединения обмоток понижающего трансформатора $Y_n / D-11$, тип ТМ 400/6. От обмотки низшего напряжения 400 В понижающего трансформатора питается ПЧ, состоящий из

диодного выпрямителя, Г-образного фильтра в звене постоянного напряжения и двухуровневого АИН. На выход АИН присоединён СФ, от которого получает питание обмотка низшего напряжения повышающего трансформатора типа ТМ 630/6-У1 со схемой соединения обмоток $Y / Y_n - 0$. Повышающий трансформатор от обмотки высшего напряжения питает четырёхполюсный АД типа А355L4 на линейное напряжение 6 кВ с номинальной мощностью на валу $P_{2\text{номАД}} = 250$ кВт.

В данной схеме с помощью СФ исправляется форма напряжения, подаваемого не только на АД, но и на повышающий трансформатор. Принято $f_{\text{шим}} = 5000$ Гц. Дополнительным условием является необходимость использования в продольной ветви СФ токоограничивающего реактора типа РТСТ-660-0,064 УЗ с параметрами $L_p = 0,064 \cdot 10^{-3}$ Гн, $r_p = 0,0276$ Ом. Рассчитаем падение напряжения от основной гармоники на реакторе при протекании по обмотке низшего напряжения повышающего трансформатора тока, соответствующего номинальной нагрузке АД:

$$DU_{\%} = \frac{\sqrt{3} I_{2\text{ном.л}} k_{\text{нг}} \sqrt{(2pf_{1\text{ном}} L_p)^2 + r_p^2}}{U_{2\text{ном}}} 100\%, \quad (5)$$

где коэффициент нагрузки повышающего трансформатора

$$k_{\text{нг}} = \frac{P_{2\text{номАД}}}{S_{\text{ном}} h_{\text{номАД}} \cos j_{\text{номАД}}}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) и (5): $S_{\text{ном}} = 630$ кВА (номинальная мощность повышающего трансформатора); $h_{\text{номАД}} = 0,934$ (номинальное значение КПД АД); $\cos j_{\text{номАД}} = 0,85$ (номинальное значение коэффициента мощности АД); $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц (номинальное значение частоты); $U_{2\text{ном}} = 400$ В (номинальное напряжение обмотки низшего напряжения повышающего трансформатора); $I_{2\text{ном.л}} = 910$ А (номинальное значение тока обмотки низшего на-

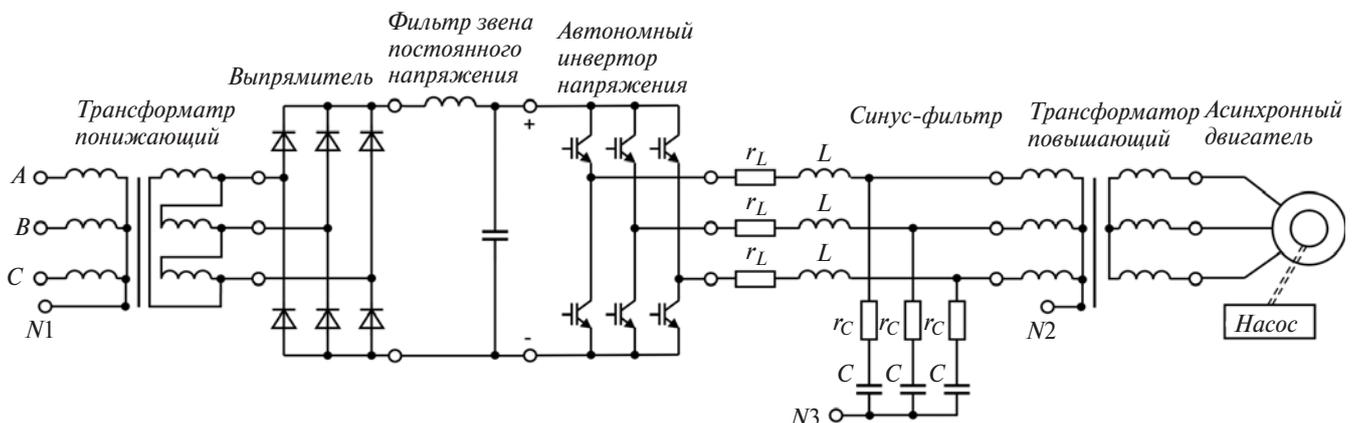


Рис. 1. Схема питания АД привода водяного насоса

пряжения повышающего трансформатора), вычисляем искомые значения $k_{\text{НГ}} = 0,5$ и $DU_{\%} = 6,73\%$. Последнее значение позволяет использовать реактор РТСТ-660-0,064 УЗ в качестве составной части СФ.

Результаты расчета параметров СФ «от индуктивности и ёмкости» по выражениям (1) – (4) следующие ($r_C = 0,01$ Ом):

расчет «от индуктивности» $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 5$;

$L = 0,0640$ мГн; $r_L = 0,0276$ Ом; $C = 396$ мкФ;

$DU_{\%} = 6,73\%$;

расчет «от емкости» $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 5$;

$L = 0,0074$ мГн; $r_L = 0,0032$ Ом; $C = 3410$ мкФ;

$DU_{\%} = 0,78\%$;

расчет «от индуктивности» $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 25$;

$L = 0,0640$ мГн; $r_L = 0,0276$ Ом; $C = 9895$ мкФ;

$DU_{\%} = 6,73\%$.

Анализ результатов говорит о предпочтительности варианта расчета «от ёмкости» с точки зрения минимизации падения напряжения в продольной ветви СФ, но при этом невозможно использовать заданный тип токоограничивающего реактора, поэтому выбираем вариант «от индуктивности» при $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 5$.

Компьютерное моделирование СФ. Для проверки результатов расчёта параметров было проведено имитационное компьютерное моделирование СФ в составе модели электропривода. Ввиду неполноты исходных данных об устройствах, входящих в состав схемы на рис. 1, значения ряда их параметров вычислены приближённо. Коэффициенты насыщения магнитных систем трансформаторов и АД приняты неизменными, соответствующими номинальному режиму работы. В модели с целью получения при 50 Гц на выходе АИН того же линейного напряжения 400 В, что и на входе выпрямителя, при формировании ШИМ-сигнала использована предмодуляция напряжением третьей гармоники и перемодуляция [9], в результате чего действующее значение первой гармоники напряжения на выходе ПЧ возрастает за счёт уплощения вершины кривой модулирующего напряжения. С другой стороны, эти обстоятельства затрудняют получение синусоидального напряжения на выходе СФ по сравнению с классическим алгоритмом синусоидально-треугольной ШИМ – кривая отфильтрованного напряжения напоминает трапецию. Результаты моделирования показаны на рис. 2–4, они соответствуют схеме соединения конденсаторов СФ в «треугольник»: 1 – линейное напряжение на входе СФ; 2 – линейное напряжение на выходе СФ; график 3 – ток через конденсатор СФ; на рис. 2 и 3 кривая 2 показана с обратным знаком для наглядности.

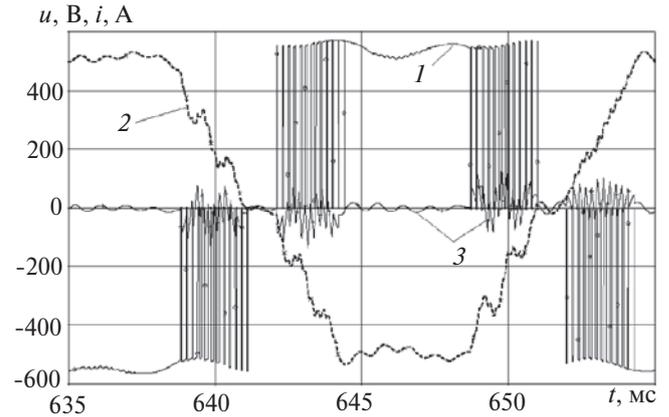


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования СФ с параметрами, рассчитанными «от индуктивности» при $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 5$

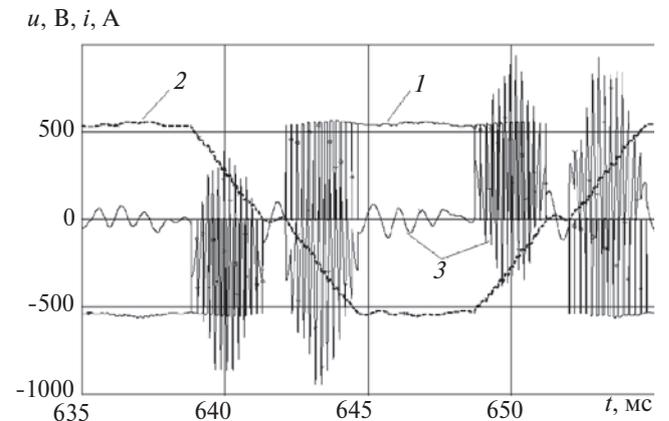


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования СФ с параметрами, рассчитанными «от ёмкости» при $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 5$

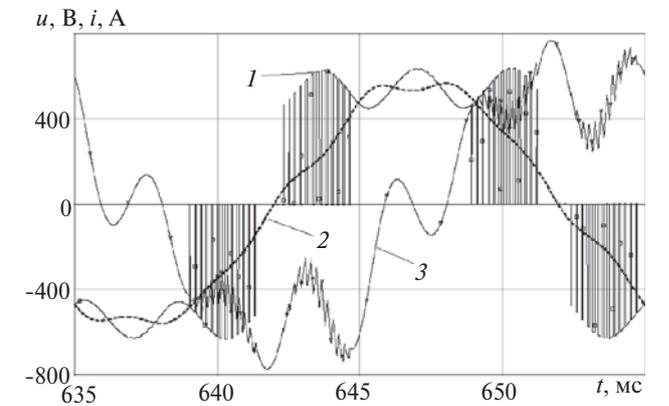


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования СФ с параметрами, рассчитанными «от индуктивности» при $f_{\text{ШИМ}} / f_p = 25$

Увеличение ёмкости при неизменной индуктивности СФ позволяет улучшить сглаживание высокочастотных компонентов напряжения, но при этом существенно возрастает ток через конденсаторы СФ, в том числе на основной частоте (этому вопросу уделяется внимание в [5]). Кроме того, увеличение ёмкости СФ не даёт существенного преимущества в подавлении относительно низкочастотных высших временных гармоник (250 Гц, 350 Гц и другие гармоники нечётных порядков

приблизительно до частоты 1400 Гц); они проходят в спектр выходного напряжения СФ, а некоторые даже усиливаются.

Аналогичное явление можно заметить на рис. 2 [4]. Сравнивая форму входного напряжения СФ на рис. 2 – 4, нетрудно заметить единственное различие между графиками – пульсации на частоте 300 Гц имеют наибольшую амплитуду на рис. 4, т.е. при самом большом значении ёмкости. Наблюдается паразитное взаимодействие между реактивными элементами СФ и фильтра звена постоянного напряжения. Принимая во внимание вышесказанное, а также учитывая минимизацию тока через конденсатор СФ, в том числе по амплитуде, минимизацию ёмкости конденсатора, возможность использования заданного типа токоограничивающего реактора, а также приемлемую форму выходного напряжения, следует признать наилучшим вариант расчёта параметров СФ «от индуктивности» при $f_{\text{шим}} / f_p = 5$. При исключении требования о типе индуктивности СФ предпочтение следовало бы отдать варианту расчёта параметров СФ «от ёмкости».

Результаты моделирования в части влияния СФ на токи элементов для всех трех вышеописанных случаев (рис. 2–4) в сравнении с отсутствием СФ даны в таблице. Режим работы АД во всех случаях одинаков.

Вариант СФ	Действующее значение тока транзистора АИН, %	Постоянная составляющая выходного тока выпрямителя ПЧ, %
СФ отсутствует	100,0	100,0
СФ по рис. 2	95,1	95,3
СФ по рис. 3	90,5	108,8
СФ по рис. 4	83,2	110,6

Выводы. 1. Фильтры с выбранными по изложенной методике параметрами показывают удовлетворительное качество сглаживания формы выходного напряжения ПЧ. Установка СФ приводит к снижению тока через транзисторы АИН, но может увеличить ток выпрямителя ПЧ примерно на 10%.

2. При $f_{\text{шим}} = 1250$ Гц следует использовать метод расчета параметров СФ «от индуктивности», так как при расчете «от емкости» падение напряжения основной частоты на продольной ветви СФ может быть неприемлемо велико. Целесообразность использования метода расчета «от емкости» возрастает с увеличением несущей частоты ШИМ.

3. Заземление нейтрали СФ при соединении конденсаторов в «звезду» никак не влияет на качество работы СФ, что справедливо при любом соче-

тании заземленных нейтралей СФ и трансформаторов (рис. 1). Результаты для аналогичных СФ с соединением конденсаторов в «звезду» и «треугольник» одинаковы; ток через конденсатор приблизительно в $\sqrt{3}$ раз больше при соединении конденсаторов в «звезду».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пехотский И.В., Пустоветов М.Ю., Колпахчян П.Г., Пустоветова С.Ю. Моделирование электромагнитных процессов в частотно-регулируемом асинхронном приводе с длинным питающим кабелем. – В сб.: Электровозостроение, 2003.
2. Muetze A. Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors: Darmstaedter Dissertation, 2004; <http://www.evv.tu-darmstadt.de/media/evv/disserta> (дата обращения: 05.01.12).
3. Kascak S., Kapusta T. Design and analysis for two-stage converter system with AC interlink and sinusoidal output. – Conf. proc. XI Workshop of all branches of electrical engineering, biomedical engineering and applied computer science. XLIV Sedit katedry elektrotechniky. – Technical University of Ostrava, 2011.
4. Сазонов А.С. Лебедев Д.Ю. Расчёт и выбор параметров синусных фильтров частотно-регулируемых приводов с ШИМ-инвертором напряжения. – Промышленная энергетика, 2012, № 2.
5. Берестов В.М., Вдовин В.В., Доманов С.С. и др. Инженерная методика расчётов синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ. – Труды XV Международ. научно-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ-2012). – Екатеринбург: УрФУ, 12 – 16 марта 2012.
6. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров, предназначенных для исключения эффекта озонирования изоляции электродвигателей в частотно-регулируемом электроприводе водяных насосных станций. – Материалы Международ. научно-практ. конф. «Проблемы трансфера современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт», т. I. – Чита: ЗаБИЖТ, 13–14 октября 2011.
7. Шишкин С. Внешние фильтры электромагнитной совместимости частотно-регулируемого асинхронного электропривода с IGBT-инвертором. – Силовая электроника, 2006, № 1.
8. Пустоветов М.Ю., Синявский И.В. Расчёт параметров синус-фильтра при несущих частотах ШИМ 900-1000 Гц. – В сб.: Новые технологии, конструкции и процессы производства, Ростов-н/Д, 2009.
9. Курочка А.А., Кабанов Д.А., Лушникова Л.Д. Выбор алгоритма широтно-импульсной модуляции в автономном инверторе напряжения промышленного электровоза НПМ2. – Новочеркасск: Вестник ВЭЛНИИ, 2004, № 1.

[14.05.12]

Автор: Пустоветов Михаил Юрьевич закончил энергетический факультет Ростовского-на-Дону института инженеров железнодорожного транспорта в 1992 г. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию «Совершенствование методов расчета асинхронных тяговых двигателей с целью улучшения их электрических характеристик и снижения пульсаций электромагнитного момента» в Южно-Российском государственном техническом университете. Зав. кафедрой в Донецком государственном техническом университете, старший научный сотрудник НИИЦ «Криотрансэнерго» Ростовского государственного университета путей сообщения.