

Шпенст Вадим Анатольевич¹, доктор техн. наук, профессор, **Григорьев Павел Сергеевич^{1*}**, аспирант

¹Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2

*E-mail: p.grigorjew2012@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМОВ ШИМ С СИНУСНЫМ ФИЛЬТРОМ В ТРЕХФАЗНОМ ИНВЕРТОРЕ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Аннотация: Проведен анализ взаимодействия алгоритмов широтно-импульсной модуляции с синусным фильтром в составе тягового электропривода карьерного самосвала. Методами теории автоматического управления рассчитан синусный фильтр для подавления высших гармонических составляющих напряжений автономного инвертора. Для обеспечения эффективного подавления высших гармоник определена частота модуляции. Построена имитационная модель инверторной части тягового электропривода переменного тока самосвала «БЕЛАЗ» 90 т. Моделирование проведено в среде Matlab/Simulink. В результате установлено, что эффективное снижение амплитуд высших гармоник напряжения обеспечивается подбором резонансной частоты синусного фильтра в 5 и более раз ниже частоты модуляции инвертора. Взаимодействие синусоидальной широтно-импульсной модуляции с синусным фильтром позволяет снизить коэффициент искажений выходного напряжения инвертора до 10%. Использование предмодуляции третьей гармоникой несущей частоты широтно-импульсной модуляции совместно с синусным фильтром обеспечивает коэффициент искажений кривой напряжения автономного инвертора в пределах 8%. Применение синусного фильтра приводит к снижению напряжения на выводах статорных обмоток приводного двигателя, в связи с чем снижается его перегрузочная способность. Для компенсации падения напряжения на синусном фильтре необходимо повысить напряжение ДС-шины преобразователя частоты. В переходных режимах работы электропривода резкое увеличение тока нагрузки приводит к критическому снижению напряжения на обмотках приводного двигателя и его опрокидыванию. Снижение токов приводного двигателя в этих режимах может быть обеспечено системой управления электроприводом. Результаты могут быть применены для оценки качества выходного напряжения автономных инверторов, а также в исследованиях тяговых электроприводов.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, ШИМ, синусоидальная ШИМ, ШИМ с предмодуляцией, автономный инвертор напряжения, синусный фильтр, высшие гармоники, тяговый электропривод, карьерный самосвал.

Информация о статье: принята 11 мая 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-60-70

Введение. «ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» предъявляет требования к качеству электроэнергии в изолированных системах электроснабжения общего назначения, в то же время электроэнергетическая система карьерного самосвала является автономной системой специального назначения согласно «ОБС.465.046 РЭ Электропривод переменного тока самосвала «БЕЛАЗ» 90 т. Руководство по эксплуатации». Требования к качеству электрической энергии, питающей тяговые двигатели, в этих условиях регламентируются требованиями технического задания на разработку электропривода.

Плавность хода карьерного самосвала обеспечивается за счет соответствия величин частоты вращения и момента на валу приводного двигателя требуемым значениям. При этом колебания момента при-

водного двигателя могут привести к рывкам при разгоне и торможении, износу редукторов вследствие ударных нагрузок. Момент асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату амплитуды напряжения на выводах статорных обмоток. В свою очередь, качество питающего двигателя напряжения определяется его гармоническим составом [1-3]. Это означает, что от гармонического состава питающего напряжения зависит гармонический состав момента асинхронного двигателя.

Таким образом, обеспечение электромеханической совместимости преобразователей частоты с приводными двигателями карьерных самосвалов представляет собой актуальную задачу.

Цель исследования: исследовать взаимодействие алгоритмов модуляции и пассивных средств подавления искажений кривых напряжения в системе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель.

Идея работы: модификация алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сама по себе не обеспечивает требуемого качества выходного напряжения инвертора, применение фильтрового оборудования приводит к снижению амплитуды выходного напряжения, для чего требуется модернизация привода.

Задачи исследования:

1. разработать имитационную модель для исследования алгоритмов классической синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) и широтно-импульсной модуляции с предмодуляцией третьей гармоникой (ПСШИМ);
2. проанализировать влияние предмодуляции третьей гармоникой на качество выходного напряжения инвертора напряжения;
3. проанализировать влияние пассивных средств подавления искажений кривых напряжения, разработать рекомендации по их применению.

Обзор литературы. Исследования в области модификации ШИМ широко представлены в отечественной и зарубежной литературе. Именно типом ШИМ в первую очередь определяется эмиссия высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения, в том числе в электроэнергетические сети, питаемые от альтернативных источников энергии [4, 5]. В работах [6-8] описаны способы повышения электромеханической совместимости ШИМ-инверторов с приводными двигателями. Основными направлениями исследований являются:

1. глубокая модернизация алгоритмов СШИМ, применение переменной частоты модуляции [3, 9];
2. применение специальных конструкций приводных двигателей для подавления ВГС напряжения;
3. использование скользящих систем ШИМ, пространственно-векторных ШИМ [10-12].

Стоит отметить, что качество напряжения, формируемого инвертором, зачастую оказывается недостаточным для непосредственного питания нагрузки, в связи с чем необходимо применять пассивные средства подавления искажений кривых напряжения [13].

Известно, что в соответствии с уравнением (1) момент на валу асинхронного двигателя M_{AD} пропорционален квадрату амплитуды питающего

напряжения [1, 2]. Следовательно, с точки зрения управления двухуровневым инвертором напряжения решение задачи о стабилизации заданного значения момента на валу приводного двигателя состоит в том, чтобы обеспечить поддержание амплитуды переменного напряжения инвертора в заданных пределах.

$$M_{AD} = \frac{m_s}{\omega_0} \cdot \frac{U_S^2 r'_R s}{(r_S s + r'_R)^2 + x_K^2 s^2}, \quad (1)$$

где m_s – число фаз обмотки статора; ω_0 – циклическая частота вращения электромагнитного поля статора, рад/с; U_S – напряжение статора, В; r'_R – активное сопротивление ротора, приведенное к параметрам обмотки статора, Ом; s – скольжение ротора, о.е.; r_S – активное сопротивление обмотки статора, Ом; x_K – суммарное реактивное сопротивление статора и ротора, Ом.

Гармонический состав выходного напряжения U_n автономного инвертора описывается формулой (2): где k_M – коэффициент модуляции инвертора, о. е.; U_{DC} – напряжение на конденсаторе DC-шины, В;

$$U_n = \frac{k_M U_{DC}}{2} \sin(\omega_1 t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} U_{mM} \sin(m\omega_c t) + \sum_{m=1}^{m=\infty} \sum_{n=1}^{n=\infty} U_{nM} \sin(m\omega_c \pm n\omega_1) t, \quad (2)$$

ω_1 – циклическая частота основной гармоники напряжения, рад/с; U_{mM} – амплитуды гармоник напряжения, В, кратные несущей частоте ω_c – рад/с; U_{nM} – амплитуды комбинационных гармоник, В, частоты которых равны сумме и разности несущей и основной частот $m\omega_c \pm n\omega_1$; t – время, с [3].

В то же время известно, что наличие ВГС напряжения негативно сказывается на качестве управления. ВГС напряжения приводят к возникновению в обмотках машины ВГС тока. При взаимодействии ВГС токов статора с ВГС тока ротора с разными порядковыми номерами возникают переменные составляющие электромагнитного момента [3].

Таким образом, задача о повышении качества работы тягового асинхронного двигателя может быть сформулирована следующим образом: для форми-

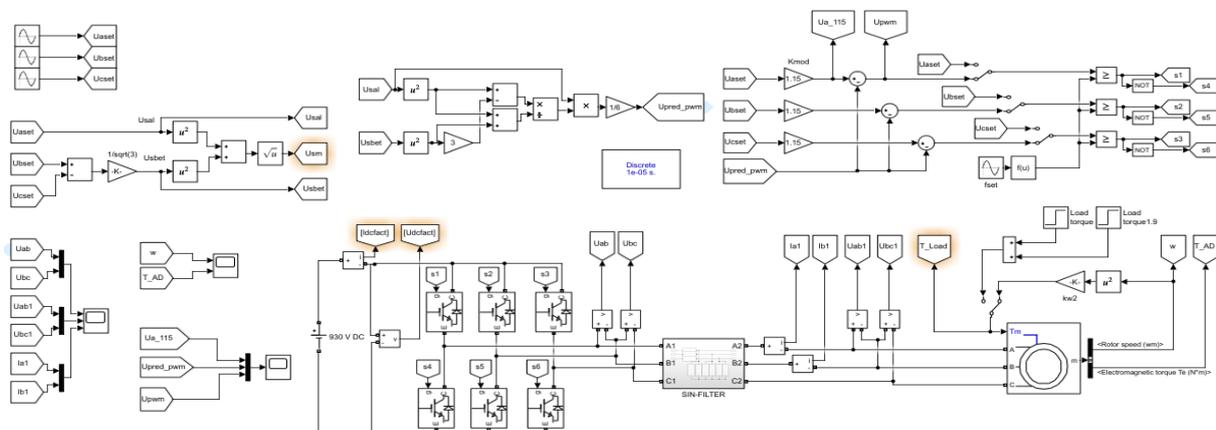


Рис. 1. Модель для исследования алгоритмов ШИМ
Fig 1. Model for PWM algorithms investigation

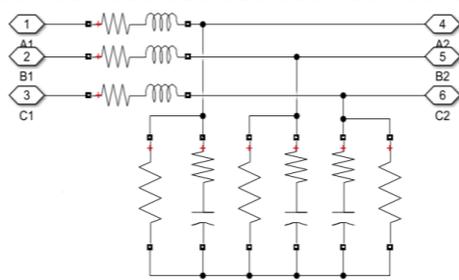


Рис. 2. Блок синусного фильтра
Fig. 2. Sine-wave filter unit

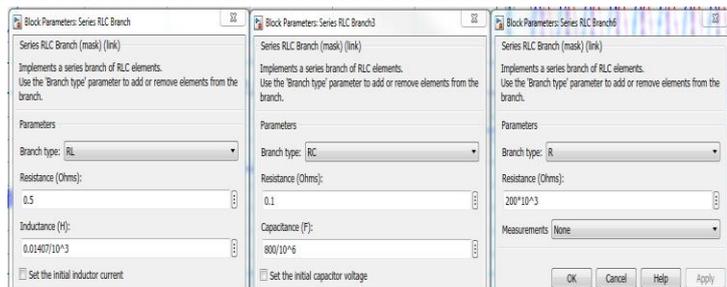


Рис. 3. Параметры синусного фильтра
Fig. 3. Sine-wave filter parameters

рования заданной величины момента на валу приводного двигателя необходимо обеспечить требуемую амплитуду переменного напряжения инвертора, а также свести к минимуму число и амплитуду высших гармоник напряжения.

В данной работе исследуется установившийся режим работы тягового асинхронного двигателя при питании от автономного трехфазного двухуровневого инвертора напряжения (АИН). Рассматривается взаимодействие алгоритмов широтно-импульсной модуляции напряжения и пассивных средств подавления искажений кривых напряжения. Анализируются амплитуды и гармонический состав линейного напряжения АИН. Исследуемые алгоритмы ШИМ представлены классической синусоидальной

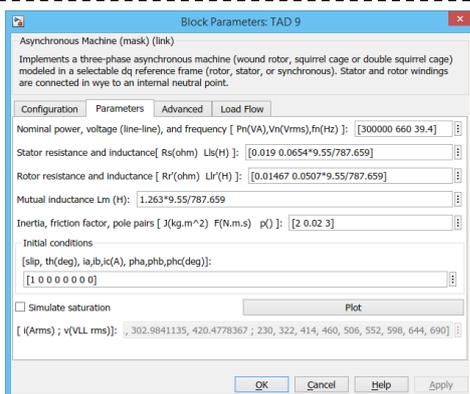


Рис. 4. Параметры тягового двигателя ТАД9
Fig. 4. TAD9 traction engine parameters

ШИМ и синусоидальной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой несущей частоты. Пассивные

средства подавления искажений кривых напряжения представлены трехфазным LC-фильтром 2-го порядка (синусный фильтр).

Описание эксперимента. Модель представлена на рисунке 1, она состоит из силового канала и канала управления. Силовой канал содержит: источник постоянного напряжения 933 В, что соответствует номинальному напряжению на конденсаторе DC-шины электропривода карьерного самосвала БелАЗ-75541, полупроводниковый блок из 6-ти транзисторных ключей, блок синусного фильтра 2-го порядка (внешний вид представлен на рисунке 2, его параметры – на рисунке 3), модель тягового асинхронного двигателя ТАД9, параметры которого приведены на рисунке 4, блок имитатора нагрузки – датчики ступенчатого воздействия и нагрузки вентиляторного типа.

Канал управления представлен источником модулирующего сигнала, блоками координатного преобразования из системы АВС в систему $\alpha\beta$ и вычисления третьей гармоники модулирующего сигнала, системой предмодуляции и блоком ШИМ.

Кроме перечисленного, модель снабжена датчиками линейного напряжения, фазного тока, частоты вращения и электромагнитного момента асинхронного двигателя, а также блоками осциллографирования.

СШИМ формируется с использованием следующих уравнений. Управляющие сигналы U_{SA} , U_{SB} , U_{SC} вычисляются в соответствии с (3).

$$U_{SA,SB,SC} = U_{DC} \sin\left(\omega t - \frac{n\pi}{3}\right), \quad (3)$$

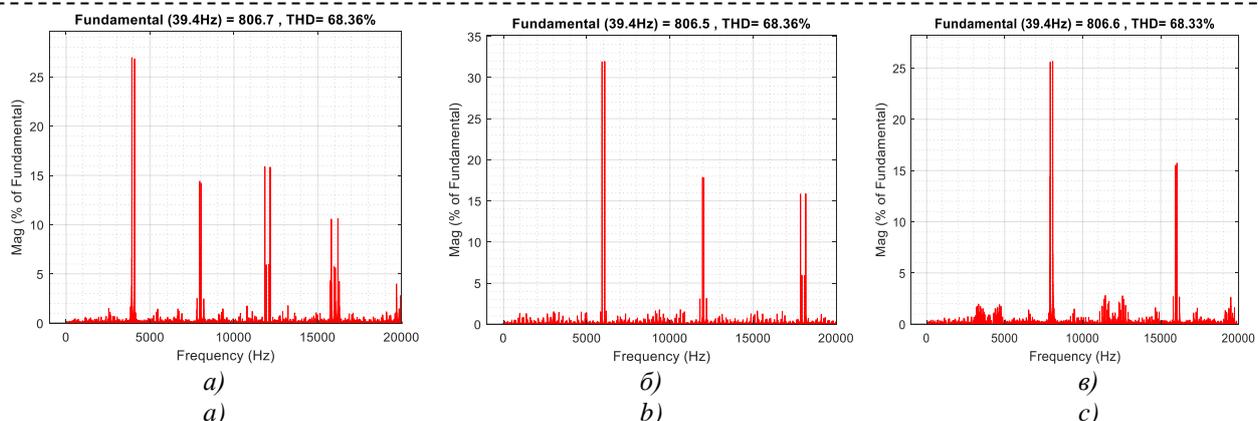


Рис. 5. Гармонический состав напряжений АИН под управлением СШИМ частотой: а) 4 кГц, б) 6 кГц, в) 8 кГц
Fig. 5. Harmonic composition of the SPWM-controlled inverter voltages at frequencies: a) 4 kHz, b) 6 kHz, c) 8 kHz

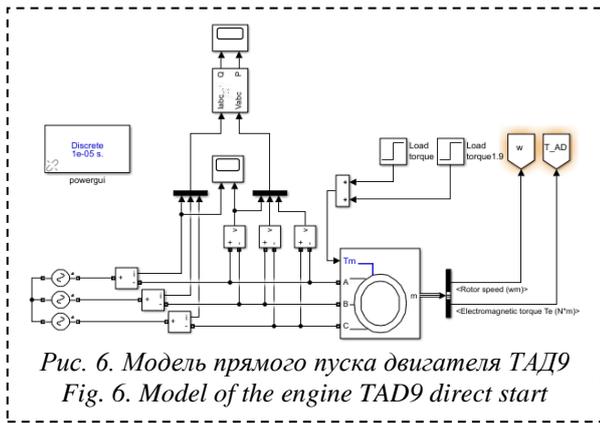


Рис. 6. Модель прямого пуска двигателя ТАД9
Fig. 6. Model of the engine TAD9 direct start

где ω – циклическая частота основной гармоники выходного напряжения АИН, рад/с; t – время, с; n – коэффициент, $n=0$ для U_{SA} , $n=2$ для U_{SB} , $n=4$ для U_{SC} .

Сигнал несущей частоты ШИМ U_m вычисляется по формуле (4).

$$U_m = \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin(2\pi f_m t)), \quad (4)$$

где f_m – несущая частота ШИМ, Гц.

Закон формирования коммутационной функции транзисторной стойки АИН строится на основе системы уравнений (5).

$$\begin{aligned} U_{SA} < U_m &\Rightarrow S_A = 1 \\ U_{SA} \geq U_m &\Rightarrow S_A = 0 \\ U_{SB} < U_m &\Rightarrow S_B = 1 \\ U_{SB} \geq U_m &\Rightarrow S_B = 0 \\ U_{SC} < U_m &\Rightarrow S_C = 1 \\ U_{SC} \geq U_m &\Rightarrow S_C = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

где S_A , S_B , S_C – коммутационные функции каждой стойки АИН, соответственно. Значение функции равно 1, если верхний ключ стойки замкнут, нижний – разомкнут, и равно 0, если верхний ключ стойки разомкнут, нижний – замкнут.

Для формирования ПСШИМ вычисляется сигнал предмодуляции U_{pm} в соответствии с системой уравнений (6).

$$\begin{aligned} U_{S\alpha} &= U_{SA}, \\ U_{S\beta} &= \frac{U_{SB} - U_{SC}}{\sqrt{3}}, \\ U_{pm} &= \frac{U_{S\alpha}}{6} \cdot \frac{(U_{S\alpha})^2 - 3 \cdot (U_{S\beta})^2}{(U_{S\alpha})^2 + (U_{S\beta})^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $U_{S\alpha}$, $U_{S\beta}$ – проекции трехфазного напряжения АИН на оси неподвижной системы координат $\alpha\beta$.

Управляющие сигналы ПСШИМ U_{SApm} , U_{SBpm} , U_{SCpm} вычисляются в соответствии с (7).

$$\begin{aligned} U_{SApm} &= U_{SA} + U_{pm}, \\ U_{SBpm} &= U_{SB} + U_{pm}, \\ U_{SCpm} &= U_{SC} + U_{pm} \end{aligned} \quad (7)$$

При использовании ПСШИМ закон формирования коммутационной функции транзисторной стойки АИН строится аналогично формулам (5), используются управляющие сигналы ПСШИМ U_{SApm} , U_{SBpm} , U_{SCpm} .

Фазное напряжение на выходе АИН в общем случае применения ШИМ формируется в соответствии с системой уравнений (8).

$$u = u \left(2 \cos \frac{1}{3} \cos \frac{1}{3} \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} U_B &= U_{DC} \cdot \left(-\frac{1}{3} S_A + \frac{2}{3} S_B - \frac{1}{3} S_C \right), \\ U_C &= U_{DC} \cdot \left(-\frac{1}{3} S_A - \frac{1}{3} S_B + \frac{1}{3} S_C \right) \end{aligned}$$

Частота ШИМ f_m как для случая СШИМ, так и для ПСШИМ выбрана равной 8 кГц, так как в этом случае обеспечивается смещение пакетов высших гармоник, вносимых АИН в состав напряжения, в область высоких частот. Гармонический состав напряжений инвертора при частотах ШИМ 4 кГц, 6 кГц, 8 кГц приведен на рисунках 5а, 5б, 5в соответственно. Видно, что повышение частоты ШИМ не приводит к существенному снижению коэффициента искажений кривой напряжения (THD_U). В то же время, смещение пакетов ВГС напряжения в область высоких частот обеспечивает возможность подбора параметров синусного фильтра таким образом, чтобы величины индуктивности и емкости были минимальны [14].

Параметры синусного фильтра рассчитаны в соответствии с методикой, изложенной в [15, 16] Резонансная частота фильтра f_r выбирается исходя из условия (9).

$$f_r \leq f_{PWM}/5, \quad (9)$$

где f_{PWM} – частота ШИМ, Гц.

Емкость конденсатора фильтра выбирается исходя из условия компенсации реактивной мощности нагрузки. Реактивная мощность Q может быть вычислена в соответствии с (10).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (10)$$

где S – полная мощность, ВА, P – активная мощность, Вт.

Данные о величинах активной и полной мощности, развиваемых приводным двигателем получены из опыта прямого пуска. Модель представлена на рисунке 6. Результаты приведены на рисунке 7.

Таким образом, значение емкости фильтрового конденсатора C_F может быть определено, как (11):

$$C_F = \frac{S}{3} \cdot \frac{1}{2\pi f_1 U_1^2} \sqrt{1 - (\cos \phi)^2}, \quad (11)$$

где f_1 – частота основной гармонической составляющей выходного напряжения АИН, Гц, U_1 – амплитуда основной гармонической составляющей выходного напряжения АИН, В.

Индуктивность фильтра L_F выбирается исходя из условия обеспечения резонансной частоты по формуле (12).

$$L_F \geq \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2\pi f_r} \right)^2 \quad (12)$$

Анализ результатов. Проведено моделирование работы электропривода с номинальной скоростью вращения приводного двигателя 82 рад/с, при этом питание двигателя осуществлялось от автономного трехфазного двухуровневого инвертора под управлением ШИМ в следующих режимах:

1. классическая СШИМ без синусного фильтра с набросом номинального момента, затем – полукратного момента;
2. классическая СШИМ с синусным фильтром с набросом $1/4$ номинального момента, затем – $1/2$ номинального момента;

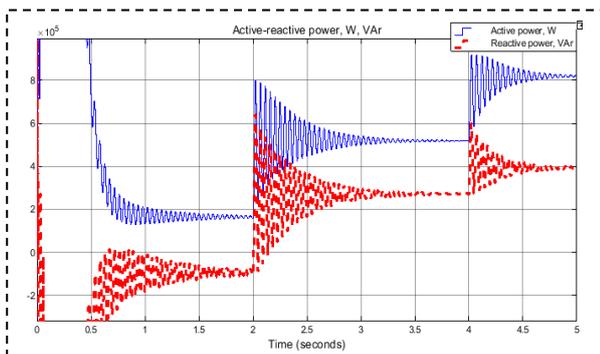


Рис. 7. Активная (вверху) и реактивная (внизу) мощности двигателя ТАД9
 Fig. 7. Active (top curve) and reactive (bottom curve) power of the engine TAD9

3. ПСШИМ без синусного фильтра с набросом номинального момента, затем – двукратного номинального момента;
4. ПСШИМ с синусным фильтром с набросом $\frac{1}{4}$ номинального момента, затем – $\frac{1}{2}$ номинального момента;

С целью исследования влияния синусного фильтра на динамику разгона и перегрузочную способность приводного двигателя проведено моделирование пуска с вентиляторной нагрузкой в режимах:

5. разгон до номинальной частоты вращения под управлением классической СШИМ;
6. разгон до номинальной частоты вращения под управлением ПСШИМ;

Результаты моделирования всех исследуемых режимов сведены в таблицу 1.

Использование классической СШИМ без синусного фильтра обеспечивает работу электропривода с номинальной нагрузкой, подача полуторакратного момента приводит к опрокидываю двигателя, результаты представлены на рисунках 8-11.

Современные системы управления высокочастотными электроприводами, описанные в работах [1, 17-19], имеют обратную связь по линейному напряжению. В связи с этим необходимым условием является сглаживание кривых выходного линейного напряжения инвертора для точного измерения амплитуды и фазы датчиками напряжения. Работа электропривода под управлением классической СШИМ с использованием синусного фильтра представлена на рисунках 12-15.

Из сопоставления осциллограмм, полученных в ходе первых двух опытов, следует, что использование синусного фильтра приводит к падению напряжения на нем 101 В, что составляет 10,86% амплитуды выходного напряжения АИН. В то же время за счет синусного фильтра обеспечивается снижение THD_U в 11 раз (рисунки 10 и 14). В 2,2 раза снижаются колебания момента на валу THD_{T_e} приводного двигателя, что следует из сравнения спектров на рисунках 11 и 15.

Аналогично проведено моделирование работы тягового электропривода под управлением ПСШИМ: без синусного фильтра с номинальной и двукратной нагрузкой (рисунки 16-19), с синусным фильтром с четвертью и половиной номинальной нагрузки (рисунки 20-23).

Применение ПСШИМ в сравнении с классической СШИМ обеспечивает снижение THD_U на 11%, при этом на 3,5% увеличиваются колебания момента на валу приводного двигателя (рисунок 19). Использование синусного фильтра совместно с ПСШИМ обеспечивает снижение THD_U в 10,4 раза по сравнению с бесфильтровой схемой (рисунки 18 и 22) и в 1,2 раза по сравнению с СШИМ с синусным фильтром (рисунки 14 и 22). При этом отмечается значительное снижение перегрузочной способности двигателя (рисунок 20, кривая момента на валу), обусловленное падением напряжения на синусном фильтре – 85 В, что составляет 9,14% выходного напряжения АИН.

Таблица 1. Результаты моделирования.
 Table 1. Results of the modelling.

Тип широтно-импульсной модуляции	Наличие фильтра	Тип нагрузки	Величина момента	Действующий ток нагрузки	Действующее напряжение АИН	Амплитуда 1-ой ВГС напряжения	THD_U	THD_{T_e}
			Н*М	А	В	В		
классическая синусоидальная ШИМ	нет	статическая	3400,0	353,55	657,61	806,60	68,33	5,57
			5100,0	срыв	657,61			
		вентиляторная	909,3	848,53	639,93	807,00	68,30	1,14
	$f_{рез}=1500$ Гц $L=14$ мкГн $C=800$ мкФ	статическая	850,0	106,07	523,26	705,20	6,21	2,53
			1700,0	срыв	509,12			
		вентиляторная	185,3	494,97	353,55	454,50	9,64	0,67
синусоидальная ШИМ с предмодуляцией третьей гармонической несущей частоты	нет	статическая	3400,0	325,27	657,61	931,10	52,05	9,00
			6460,0	707,11	650,54	930,80	52,04	5,54
		вентиляторная	3443,0	325,27	657,61	931,10	52,05	7,35
	$f_{рез}=1500$ Гц $L=14$ мкГн $C=800$ мкФ	статическая	354,6	106,07	657,61	931,70	52,02	81,83
			850,0	91,92	650,54	846,20	5,03	4,17
		вентиляторная	1700,0	155,56	530,33	734,60	5,79	1,38
			352,5	91,92	650,54	897,30	4,74	12,01
			260,0	601,04	424,26	523,70	8,12	0,85

СШИМ БЕЗ СИНУСНОГО ФИЛЬТРА. ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА.

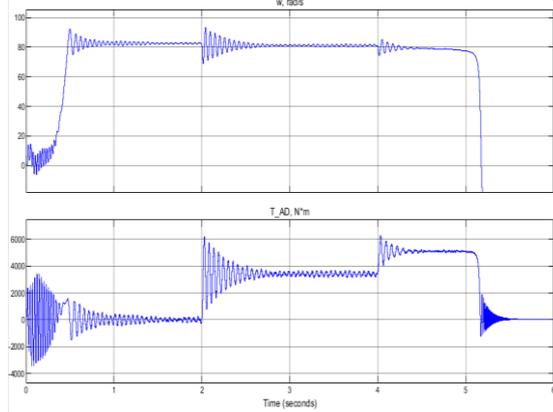


Рис. 8. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 8. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

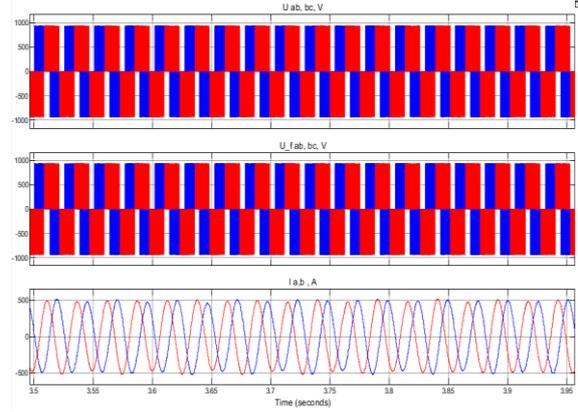


Рис. 9. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 9. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

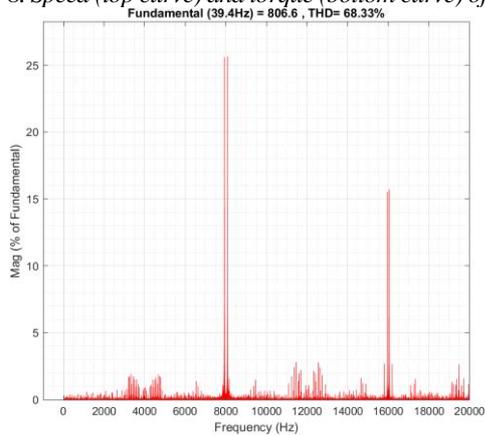


Рис. 10. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 10. Harmonic composition of the inverter voltage

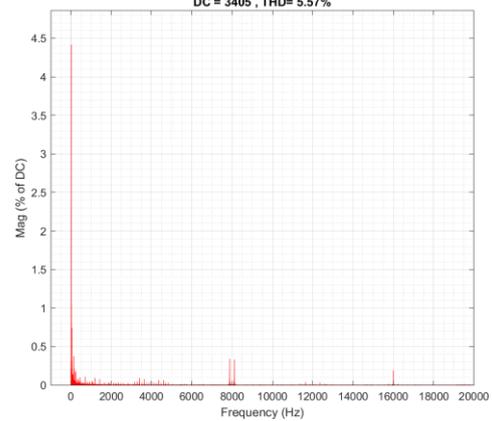


Рис. 11. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 11. Harmonic composition of the TAD9 torque

СШИМ С СИНУСНЫМ ФИЛЬТРОМ. ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА.

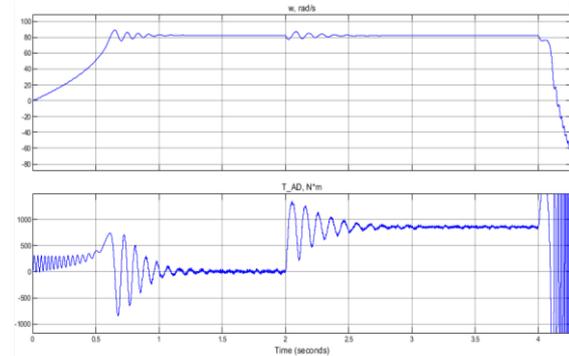


Рис. 12. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 12. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

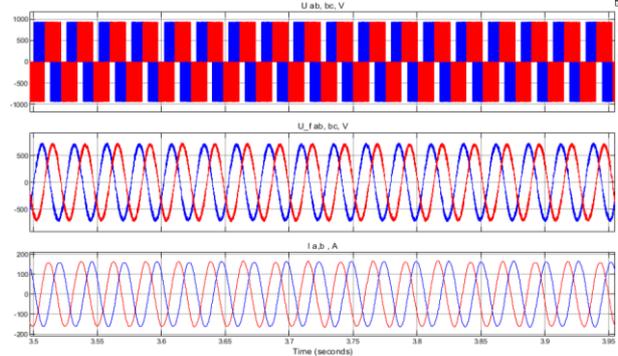


Рис. 13. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 13. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

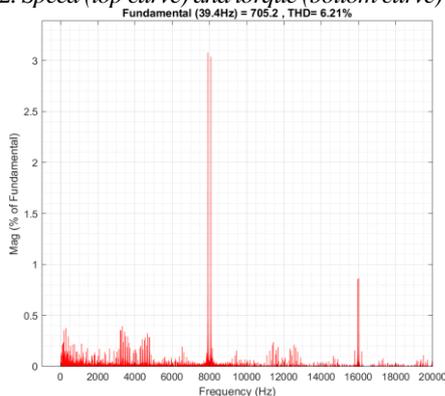


Рис. 14. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 14. Harmonic composition of the inverter voltage

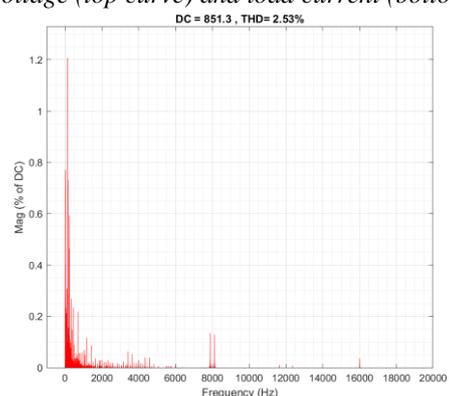


Рис. 15. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 15. Harmonic composition of the TAD9 torque

ПСШИМ БЕЗ СИНУСНОГО ФИЛЬТРА. ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА.

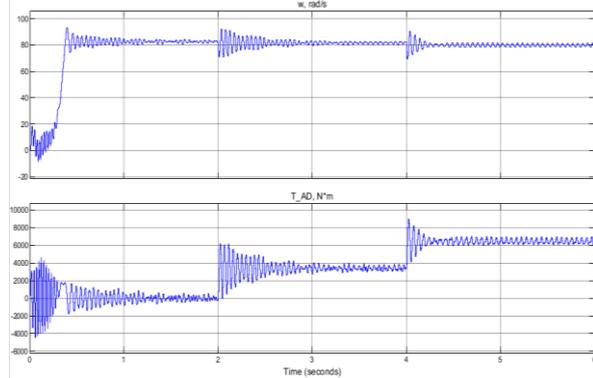


Рис. 16. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 16. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

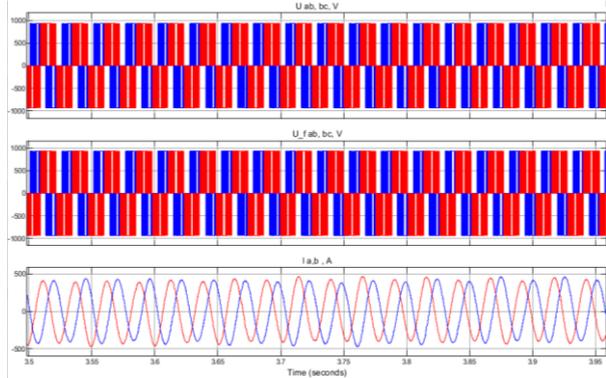


Рис. 17. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 17. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

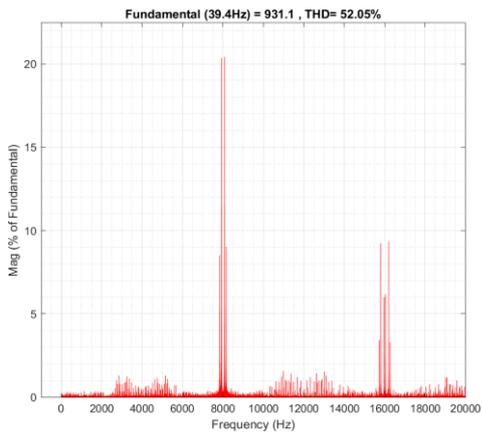


Рис. 18. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 18. Harmonic composition of the inverter voltage

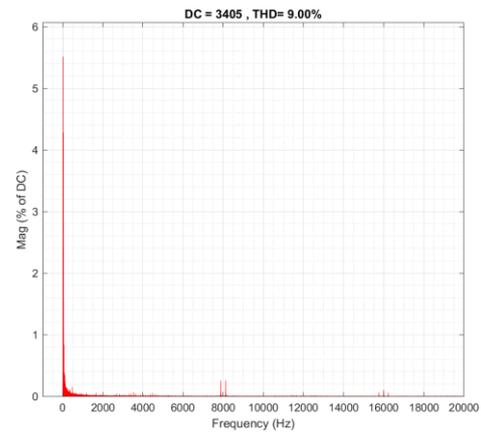


Рис. 19. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 19. Harmonic composition of the TAD9 torque

ПСШИМ С СИНУСНЫМ ФИЛЬТРОМ ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА.

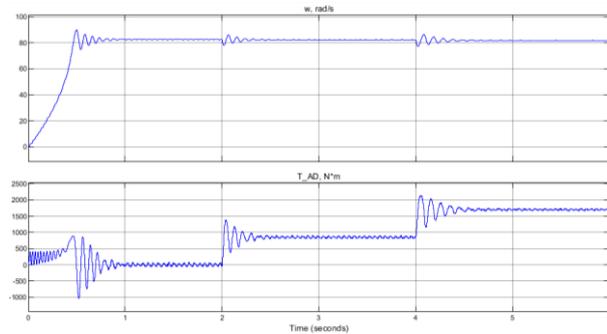


Рис. 20. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 20. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

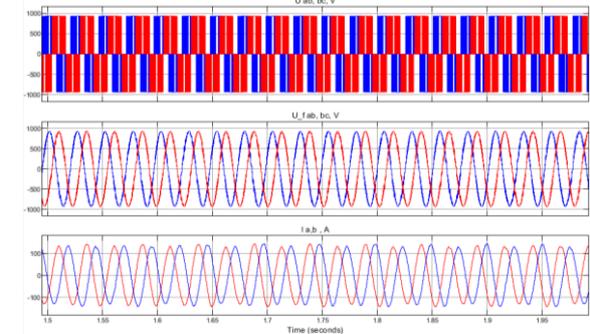


Рис. 21. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 21. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

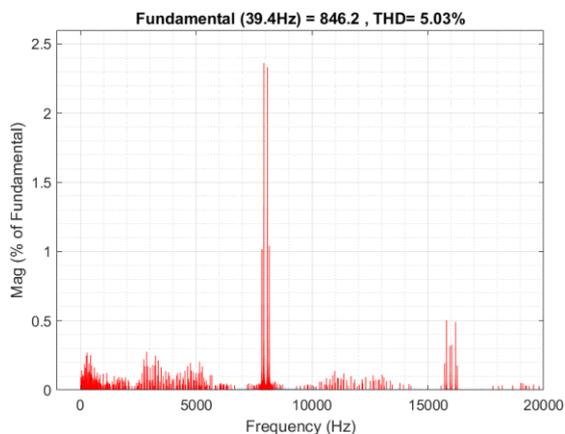


Рис. 22. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 22. Harmonic composition of the inverter voltage

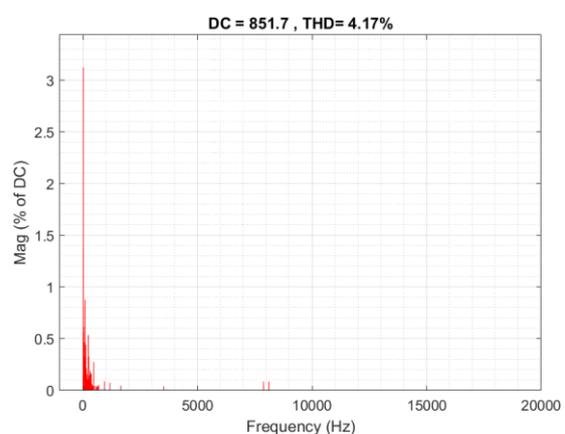


Рис. 23. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 23. Harmonic composition of the TAD9 torque

СШИМ С СИНУСНЫМ ФИЛЬТРОМ. ВЕНТИЛЯТОРНАЯ НАГРУЗКА.

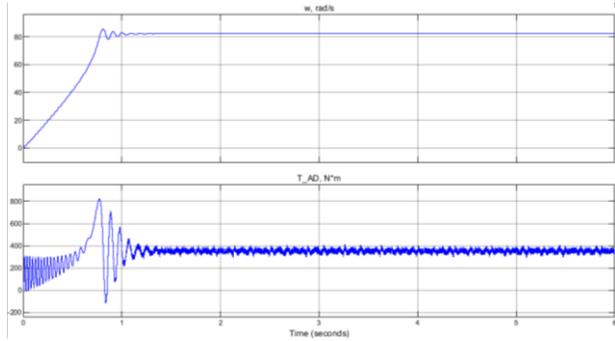


Рис. 24. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 24. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

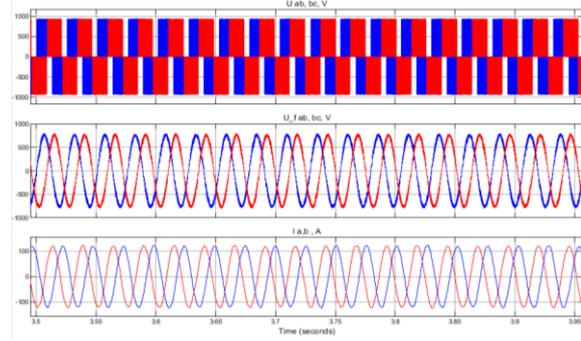


Рис. 25. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 25. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

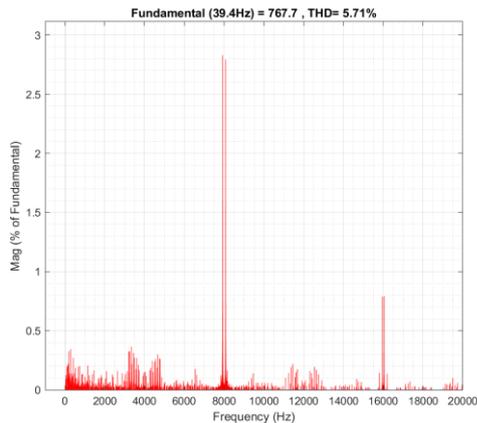


Рис. 26. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 26. Harmonic composition of the inverter voltage

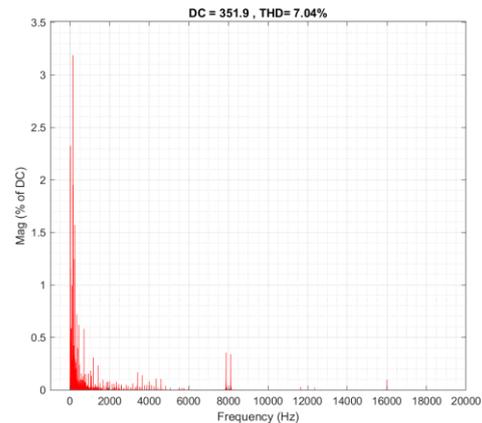


Рис. 27. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 27. Harmonic composition of the TAD9 torque

ПСШИМ С СИНУСНЫМ ФИЛЬТРОМ. ВЕНТИЛЯТОРНАЯ НАГРУЗКА.

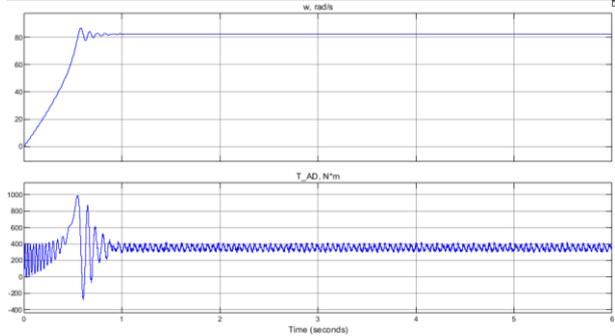


Рис. 28. Скорость (вверху) и момент (внизу) ТАД9
Fig. 28. Speed (top curve) and torque (bottom curve) of TAD9

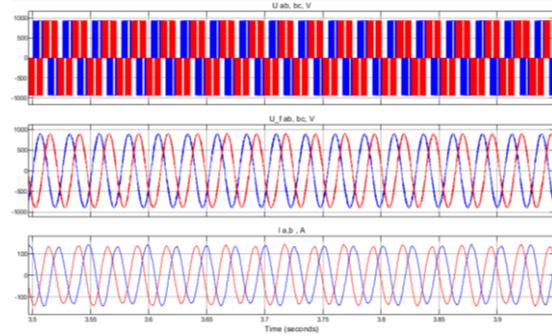


Рис. 29. Напряжение (вверху) и ток нагрузки (внизу)
Fig. 29. Voltage (top curve) and load current (bottom curve)

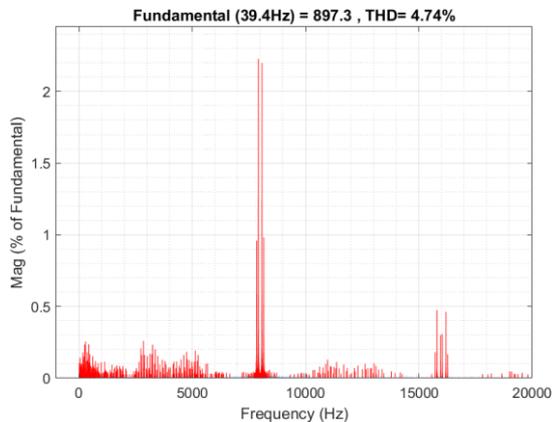


Рис. 30. Гармонический состав напряжения АИН
Fig. 30. Harmonic composition of the inverter voltage

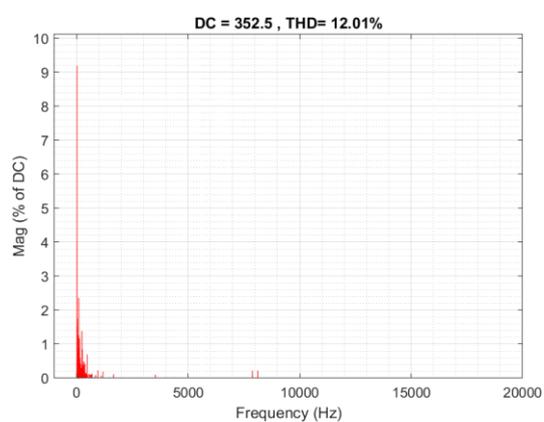


Рис. 31. Гармонический состав момента ТАД9
Fig. 31. Harmonic composition of the TAD9 torque

Результаты моделирования работы электропривода под управлением СШИМ с вентиляторной нагрузкой представлены на рисунках 24-27. Аналогичные результаты для случая использования ПСШИМ представлены на рисунках 28-31. Отмечается, что применение синусного фильтра критически снижает перегрузочную способность приводного двигателя в каждом случае: на 64,3% для случая СШИМ, и на 89,8% для случая ПСШИМ. При этом THD_U в обоих случаях остается в пределах 6%. В 10 раз снижается THD_U при использовании синусного фильтра по сравнению с его отсутствием.

Выводы. В результате сравнения установлено, что применение ПСШИМ без использования фильтрового оборудования позволяет увеличить амплитуду 1-ой гармонической составляющей напряжения инвертора на 13,4% по сравнению с классической СШИМ. При этом также снижается на 16% коэффициент искажений кривой напряжения THD_U .

Введение предмодулирующего воздействия в алгоритм СШИМ совместно с использованием синусного фильтра обеспечивает повышение действующего значения выходного напряжения инвертора на 46% по сравнению с классической СШИМ с фильтром при вентиляторной нагрузке. При статической нагрузке использование ПСШИМ позволяет повысить действующее значение выходного напряжения инвертора на 4%. В тех же условиях обеспечивается поддержание коэффициента искажения кривой напряжения в пределах 5%. Колебания момента приводного двигателя во всех режимах работы под нагрузкой пренебрежимо малы.

В связи с тем, что отказаться от использования фильтрового оборудования в системах подчиненного регулирования невозможно, следует более подробно остановиться на сравнении режимов работы с применением синусного фильтра на выходе ПЧ. Общие выводы из проведенного исследования:

1. Применение алгоритма ПСШИМ приводит к снижению амплитуд высших гармонических составляющих линейного напряжения автономного инвертора.
2. Применение пассивных средств подавления искажений кривых напряжения, рассчитанных на резонансные частоты $f_{рез} \ll f_{ШИМ}$, приводит к значительному (в 6-10 раз) уменьшению искажений выходного напряжения автономного инвертора независимо от используемого типа ШИМ.
3. Применение пассивных средств подавления искажений кривых напряжения приводит к критическому снижению амплитуды напряжения, которое обуславливает снижение перегрузочной способности асинхронного двигателя.
4. Для компенсации критического снижения напряжения необходимо повысить напряжение конденсатора DC-шины преобразователя частоты. Рекомендуется применение активных выпрямителей [20].
5. С целью снижения амплитуды токов приводного двигателя в переходных режимах применить систему управления асинхронным двигателем, обеспечивающую высокую динамику управления.

Применение синусного фильтра приводит к снижению напряжения на выводах статорных обмоток приводного двигателя, в связи с чем снижается его перегрузочная способность. Для компенсации падения напряжения на синусном фильтре необходимо повышать напряжение DC-шины преобразователя частоты. В переходных режимах работы электропривода резкое увеличение тока нагрузки приводит к критическому снижению напряжения на обмотках приводного двигателя и его опрокидыванию. Снижение токов приводного двигателя в этих режимах может быть обеспечено системой управления электроприводом.

Результаты исследования могут быть применены для оценки качества выходного напряжения автономных инверторов, а также в исследованиях тяговых электроприводов. Предлагается проанализировать работу модели с использованием синусного фильтра более высокого порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. / Шрейнер Р.Т. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. / Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т.; Под ред. д-ра техн. наук проф. Р.Т. Шрейнера – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
3. Татаринов Д.Е. Обеспечение электромагнитной и электромеханической совместимости в электротехнических комплексах с асинхронными электроприводами: дис. ... канд. технич. наук, СПб, 2017, 160 с.
4. Akhmetov Z., Hammami M., Grandi G., Ruderman A. On PWM Strategies and Current THD for Single- and Three-Phase Cascade H-Bridge Inverters with Non-Equal DC Sources // *Energies*. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 17.
5. Toso F., Favato A., Torchio R., Alotto P., Bolognani S. Continuous Control Set Model Predictive Current Control of a Microgrid-Connected PWM Inverter // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2021. – Т. 36, № 1. – С. 415-425.
6. Huang Y.L., Xu Y.X., Zhang W.T., Zou J.B. PWM Frequency Noise Cancellation in Two-Segment Three-Phase Motor Using Parallel Interleaved Inverters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2019. – Т. 34, № 3. – С. 2515-2525.
7. Huang Y., Walden J., Foote A., Bai H., Lu D. G., Jin F. N., Cheng B. Analytical Characterization of CM and DM Performance of Three-Phase Voltage-Source Inverters Under Various PWM Patterns // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – Т. 36, № 4. – С. 4091-4104.
8. Jung J.H., Ku H.K., Im W.S., Kim J.M. A Carrier-Based PWM Control Strategy for Three-Level NPC Inverter Based on Bootstrap Gate Drive Circuit // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – Т. 35, № 3. – С. 2843-2860.

9. Васильев Б.Ю. Обеспечение режима перемодуляции и повышение эффективности преобразования энергии в силовых автономных инверторах электроприводов // *Электричество*. – 2015. – Т. 6. – С. 47-55.
10. Li H., Wu W. M., Huang M., Chung H. S. H., Liserre M., Blaabjerg F. Design of PWM-SMC Controller Using Linearized Model for Grid-Connected Inverter With LCL Filter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – Т. 35, № 12. – С. 12773-12786.
11. Jing T., Radionov A., Maklakov A., Gasiyarov V. Research of a Flexible Space-Vector-Based Hybrid PWM Transition Algorithm between SHEPWM and SHMPWM for Three-Level NPC Inverters // *Machines*. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 12.
12. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е., Мардашов Д.В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // *Электротехника*. – 2020. – Т. 4. – С. 14-23.
13. Santra S.B., Mohanty S.K. An improved selective harmonics elimination technique for PV assisted single phase grid-tied PWM inverter // *Compe-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – 2020. – Т. 39, № 2. – С. 379-394.
14. Козярук А.Е., Камышьян А.М. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // *Записки Горного Института*. – 2019. – Т. 239. – С. 576-582.
15. Пустоветов М.Ю. Расчет параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров в частотно-регулируемом электроприводе // *Вестник ДГТУ*. – 2012. – Т. 3 (64). – С. 56-64.
16. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. № 4. – С. 87-95.
17. Серов Н.А., Калачиков П.Н., Пронин М.В. Электротрансмиссии самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 136 т // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2005. № 5. – С. 22-25.
18. Васильев Б.Ю., Григорьев П.С. Ресурсосберегающая электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2019. № 2. – С. 15-21.
19. Vasilev B.U., Grigorev P.S., Mardashov D.V. RESOURCE-saving electromechanical transmission of the mining truck // *International conference on information technologies in business and industries, ITBI 2019 / SERIES J. O. P. C.* – Т. 4 – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – С. 052028.
20. Васильев Б.Ю., Шпенст В.А., Калашников О.В., Ульянов Г.Н. Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электропитания промышленных электротехнических комплексов // *Записки горного института*. – 2018. № 229. – С. 41-49.

Vadim A. Shpenst¹, Dr. Sc. (Engineering), Professor, **Pavel S. Grigorev**^{2,*}, Postgraduate student

¹Saint Petersburg Mining University, 199106, Russia, St Petersburg, Str. 21st Line2

*E-mail: p.grigorjew2012@yandex.ru

THE STUDY ON INTERACTION OF PWM ALGORITHMS AND THE SINE-WAVE FILTER IN THE THREE PHASE INVERTER OF THE MINING TRUCK

Abstract: This paper deals with the issue of the interaction of pulse-width modulation algorithms with a sine-wave filter as a part of a traction electric drive of a mining truck. Using the automatic control theory methods, the sine filter parameters are calculated to suppress the higher harmonic components of the voltages of an autonomous inverter. To ensure the effective suppression of higher harmonics, the modulation frequency is determined. An imitation model of the inverter part of the AC traction electric drive of the 90-t BELAZ dump truck was created. The simulation was carried out in the Matlab / Simulink environment. As a result, the effective reduction of the higher voltage harmonics amplitudes is provided by the selection of the sine filter resonant frequency at 5 or more times lower than the modulation frequency of the inverter. The interaction of sinusoidal pulse-width modulation with a sine filter allows to reduce the distortion of the inverter output voltage down to 10%. The use of pre-modulation by the third harmonic of the pulse-width modulation carrier frequency in conjunction with a sine-wave filter ensures the distortion of the autonomous inverter voltage curve within 8%. The use of a sine-wave filter leads to a decrease in the voltage at the terminals of the drive motor stator windings, and therefore its overload capacity is reduced. With the aim of the voltage drop compensation across the sine-wave filter, the frequency converter DC-bus voltage must be increased. A sharp increase in the load current leads to a critical decrease in the voltage on the drive motor stator windings and can cause machine overturning in transient operating modes of the electric drive. Reduction of the drive motor currents in these modes can be provided by the electric drive control system. The results can be used to assess the quality of stand-alone inverters output voltages, as well as in studies of traction electric drives.

Keywords: pulse-width modulation, PWM, sinusoidal PWM, PWM with pre-modulation, autonomous voltage inverter, sine-wave filter, higher harmonics, traction electric drive, mining truck.

Article info: received May 11, 2021

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-60-70

REFERENCES

1. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty. / Shrejner R. T. – Eka-terinburg: URO RAN, 2000. – 654 s.
2. Aktivnye preobrazovateli v reguliruemym el-ektroprivodax peremennogo toka. / Efimov A. A., Shrejner R. T.; Pod red. d-ra texn. nauk prof. R. T. Shrejnera – Novouralsk: Izd-vo NGTI, 2001. – 250 s.
3. Tatarinov D.E. Obespechenie elektromagnitnoj i elektromexanicheskoj sovmestimosti v elektro-texnicheskix kompleksax s asinxronnymi elektro-privodami: dis. ... kand. texnich. nauk, SPb, 2017, 160 s.
4. Akhmetov Z., Hammami M., Grandi G., Ruderman A. On PWM Strategies and Current THD for Single- and Three-Phase Cascade H-Bridge Inverters with Non-Equal DC Sources // *Energies*. – 2019. – T. 12, № 3. – C. 17.
5. Toso F., Favato A., Torchio R., Alotto P., Bo-lognani S. Continuous Control Set Model Predictive Current Control of a Microgrid-Connected PWM In-verter // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2021. – T. 36, № 1. – C. 415-425.
6. Huang Y.L., Xu Y.X., Zhang W.T., Zou J.B. PWM Frequency Noise Cancellation in Two-Segment Three-Phase Motor Using Parallel Interleaved Inverters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2019. – T. 34, № 3. – C. 2515-2525.
7. Huang Y., Walden J., Foote A., Bai H., Lu D. G., Jin F. N., Cheng B. Analytical Characterization of CM and DM Performance of Three-Phase Voltage-Source Inverters Under Various PWM Patterns // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – T. 36, № 4. – C. 4091-4104.
8. Jung J.H., Ku H.K., Im W.S., Kim J.M. A Carrier-Based PWM Control Strategy for Three-Level NPC Inverter Based on Bootstrap Gate Drive Circuit // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – T. 35, № 3. – C. 2843-2860.
9. Vasilev B.Yu. Obespechenie rezhima pere-modulyacii i povyshenie effektivnosti preobrazovaniya energii v silovyx avtonomnyx invertorax elektroprivodov // *Elektrichestvo*. – 2015. – T. 6. – C. 47-55.
10. Li H., Wu W. M., Huang M., Chung H. S. H., Liserre M., Blaabjerg F. Design of PWM-SMC Controller Using Linearized Model for Grid-Connected Inverter With LCL Filter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. – T. 35, № 12. – C. 12773-12786.

11. Jing T., Radionov A., Maklakov A., Gasiyarov V. Research of a Flexible Space-Vector-Based Hybrid PWM Transition Algorithm between SHEPWM and SHMPWM for Three-Level NPC Inverters // *Machines*. – 2020. – T. 8, № 3. – C. 12.
12. Vasilev B.Yu., Kozyaruk A.E., Mardashov D.V. Uvelichenie koefficienta ispolzovaniya avtonomnogo invertora pri prostranstvenno-vektornom upravlenii // *Elektrotexnika*. – 2020. – T. 4. – C. 14-23.
13. Santra S.B., Mohanty S.K. An improved selective harmonics elimination technique for PV assisted single phase grid-tied PWM inverter // *Compel-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – 2020. – T. 39, № 2. – C. 379-394.
14. Kozyaruk A.E., Kamyshyan A.M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektromexanicheskoj transmissii karernogo avtosamosvala // *Zapiski Gornogo Instituta*. – 2019. – T. 239. – C. 576-582.
15. Pustovetov M.Yu. Raschyot parametrov i kompyuternoe modelirovanie sinusnyx filtrov v chastotno-reguliruemom elektroprivode // *Vestnik DGTU*. – 2012. – T. 3 (64). – C. 56-64.
16. Pustovetov M.Yu. Opyt razrabotki sinus-filtra dlya silovoj sxemy chastotno-reguliruemogo asinxronnogo elektroprivoda // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universite-ta*. – 2014. № 4. – C. 87-95.
17. Serov N.A., Kalachikov P.N., Pronin M.V. El-ektrotransmissii samosvalov BelAZ gruzo-podyomnostyu 136 t // *Gornoe oborudovanie i el-ektromexanika*. – 2005. № 5. – C. 22-25.
18. Vasilev B.Yu., Grigorev P.S. Resursosbe-regayushhaya elektromexanicheskaya transmissiya kar-ernogo samosvala // *Gornoe oborudovanie i elek-tromexanika*. – 2019. № 2. – C. 15-21.
19. Vasilev B.U., Grigorev P.S., Mardashov D.V. RESOURCE-saving electromechanical transmission of the mining truck // *International conference on information technologies in business and industries, ITBI 2019 / SERIES J. O. P. C.* – T. 4 – Novosibirsk: Insti-tute of Physics Publishing, 2019. – C. 052028.
20. Vasilev B.Yu., Shpenst V.A., Kalashnikov O.V., Ulyanov G.N. Obespechenie energeticheskoy razvyazki elektroprivodov i setej elektrosnabzhe-niya promyshlennyx elektrotexnicheskix kompleksov // *Zapiski gornogo instituta*. – 2018. № 229. – C. 41-49.

Библиографическое описание статьи

Шпенст В.А., Григорьев П.С. Исследование взаимодействия алгоритмов ШИМ с синусным фильтром в трехфазном инверторе карьерного самосвала // *Горное оборудование и электромеханика* – 2021. – № 3 (155). – С. 60-70.

Reference to article

Shpenst V.A., Grigorev P. S. The study on interaction of PWM algorithms and the sine-wave filter in the three phase inverter of the mining truck. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, no.3 (155), pp. 60-70.