

Ярослав Чорник, Мачей Хальтоф, Лешек Ясиньски
ELHAND Transformatory

Люблинец 2023

ФИЛЬТРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ КАК ЭФФЕКТИВНАЯ ЗАЩИТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТОЙ

Синопис: Системы высокочастотных приводов - это группа устройств, которые в последние годы наиболее сильно проявили свою присутствие на рынке нефти и газа. Повышение частоты выходного напряжения преобразователя позволяет регулировать скорость в более широком диапазоне. Это повышает эффективность и универсальность привода в целом, но в то же время создает дополнительные угрозы для изоляции силовых кабелей, повышающего трансформатора, а также самого двигателя. Синусоидальный фильтр становится важным компонентом такой системы для обеспечения защиты и надежности всего привода. В данной статье представлен анализ выбора компонентов LC синусоидального фильтра их параметров в зависимости от увеличения рабочей частоты и частоты переключения. Представлены результаты испытаний влияния этих параметров на работу фильтра и на форму сигнала выходного напряжения и коэффициент искажения THDu.

Ключевые слова: синусоидальные фильтры, высокочастотные приводы, высокоскоростные двигатели

1. Введение

Современные системы добычи нефти (ЭЦН - электроцентробежная насосная система (SP - Electrical Submersible Pumping System)) требуют использования высокоэффективных машин и оборудования, а также управления скоростью в широком диапазоне. Обычно они оснащаются двигателями с постоянными магнитами (PMM - Permanent Magnet Motor). В отличие от стандартных асинхронных двигателей, в двигателях PMM используются редкоземельные магниты для создания постоянного магнитного

поля ротора, что напрямую выражается в более высокой производительности и энергоэффективности, а также в более высокой удельной мощности и меньших размерах [1]. Эти двигатели чрезвычайно эффективны при работе на стандартных и более высоких скоростях 500 - 10000 об/мин, что применимо в пластах с низкой вязкостью и высоким расходом жидкости, а также на более низких скоростях 100 - 500 об/мин в пластах с высокой вязкостью и низким расходом жидкости. Необходимость в таком широком регулировании скорости

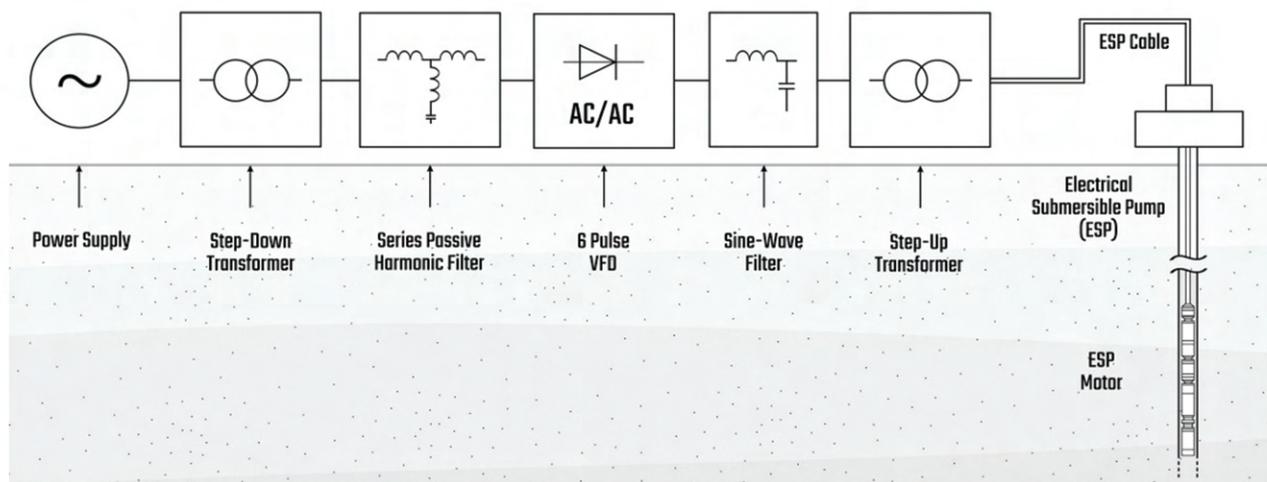


Рис. 1. Блок-схема системы электропитания систем добычи нефти ("ESP")[2].



глубинных двигателей и насосов реализуется с помощью частотнорегулируемых преобразователей (ЧРП (VFD – Variable Frequency Drive)). Регулируя и управляя крутящим моментом, преобразователи частоты ЧРП защищают насосы и двигатели, снижая механические и токовые нагрузки при запуске, и адаптируют работу всего привода к динамически изменяющимся условиям нагрузки. Однако такая схема имеет и свои недостатки. Искаженное выходное напряжение преобразователя (ШИМ - широтно-импульсная модуляция (PWM – Pulse Width Modulation)) создает дополнительный риск для изоляции питающих кабелей, повышающего трансформатора и самого двигателя (рис.1). Двигатели ШИМ восприимчивы к гармоникам частоты коммутации, которые вызывают дополнительный нежелательный гистерезис магнитного потока и вихревые токи, увеличивая потери и температуру двигателя. Кроме того, роторы двигателей РММ чувствительны к высоким температурам. Повышенные термические режимы создают риск снижения крутящего момента и мощности двигателя, а в крайних случаях даже постоянного размагничивания ротора. Поэтому для устранения гармоник коммутации (ШИМ) используются синусоидальные фильтры, адаптированные для работы на более высоких частотах.

2. Питание, запуск и управление высокоскоростными двигателями РММ

Мощность двигателя прямо пропорциональна его скорости, поэтому неудивительно, что отрасли, для которых производительность и размеры машин имеют решающее значение, стремятся использовать высокоскоростные двигатели РММ. Запуск и управление этими двигателями обычно осуществляется с помощью ЧРП (двигатели РММ не имеют возможности прямого запуска от сети), а высокоскоростная работа требует регулируемого выходного напряжения с более высокой основной частотой (200 - 400 Гц). Более высокая основная частота вынуждает использовать более высокие частоты переключения инвертора для поддержания частотной модуляции m_f на необходимом уровне:

$$m_f = \frac{f_{\text{переключения}}}{f_{\text{основная}}} \quad (1)$$

Чем выше частота переключения относительно основной частоты, тем выше коэффициент модуляции и ниже THDu выходного напряжения, что облегчает отфильтровывание высших гармоник, возникающих из-за частоты переключения, из формы сигнала.

Например, форма волны 50 Гц, генерируемая с частотой переключения 2 кГц, имеет коэффициент модуляции 40. Однако при увеличении основной частоты до 200 Гц коэффициент модуляции падает до 10, а коэффициент THDu значительно увеличивается. Увеличение частоты переключения до 5 кГц (при 200 Гц) увеличивает коэффициент модуляции до 25 и улучшает THDu (рис. 2a,b,c). В реальных энергосистемах с повышенными значениями основной частоты стремятся получить коэффициент m_f не менее 20. Такое значение является минимально необходимым для обеспечения точности и удобства управления двигателем. При более низких значениях m_f (рис. 2b) THDu выходного напряжения высок, и гармоники низкого порядка трудно отфильтровать. Дополнительной сложностью при питании и управлении системами такого типа являются большие расстояния между преобразователем и двигателем, достигающие в некоторых случаях 2-3 км. Длинные силовые кабели вызывают падение напряжения, которое частично компенсируется изменением коэффициента трансформации повышающего трансформатора с регулирующими отводами [3] или, в некоторой степени, перемодуляцией выходного напряжения ЧРП. Избыточная модуляция позволяет среднеквадратичному значению напряжения подняться выше номинального [4]. С одной стороны, эта функция очень полезна, так как позволяет компенсировать падение напряжения (мощности) и, в некоторых случаях, может ускорить динамику реакции энергосистемы на поставленные условия работы. Однако, с другой стороны, сверхмодуляция оказывает пагубное влияние на содержание гармоник в выходной форме волны напряжения ЧРП и, следовательно, на содержание гармоник в токе, что приводит к увеличению пульсаций крутящего момента двигателя. Это связано с увеличением длительности (ширины) среднего импульса, что приводит к появлению гармоник низшего порядка в выходном сигнале, т.е. 5h, 7h и т.д., что увеличивает коэффициент искажения напряжения THDu (рис. 2d).

3. Выбор параметров фильтра для работы на более высоких частотах

Синусоидальные фильтры, предназначенные для более высоких частот (200 - 400 Гц), служат, по сути, для тех же целей, что и их аналоги для сетевых частот. Они удаляют более высокие гармоники, связанные с частотой переключения, производя почти синусоидальную форму напряжения и тока. Различие возникает в выборе параметров LC, резонансной частоты, частоты переключения и конструкции дросселя. Выбор индуктивности L является ключевым, поскольку любое дополнительное сопротивление вызывает дополнительное падение напряжения и уменьшает ток, текущий в цепи, тем



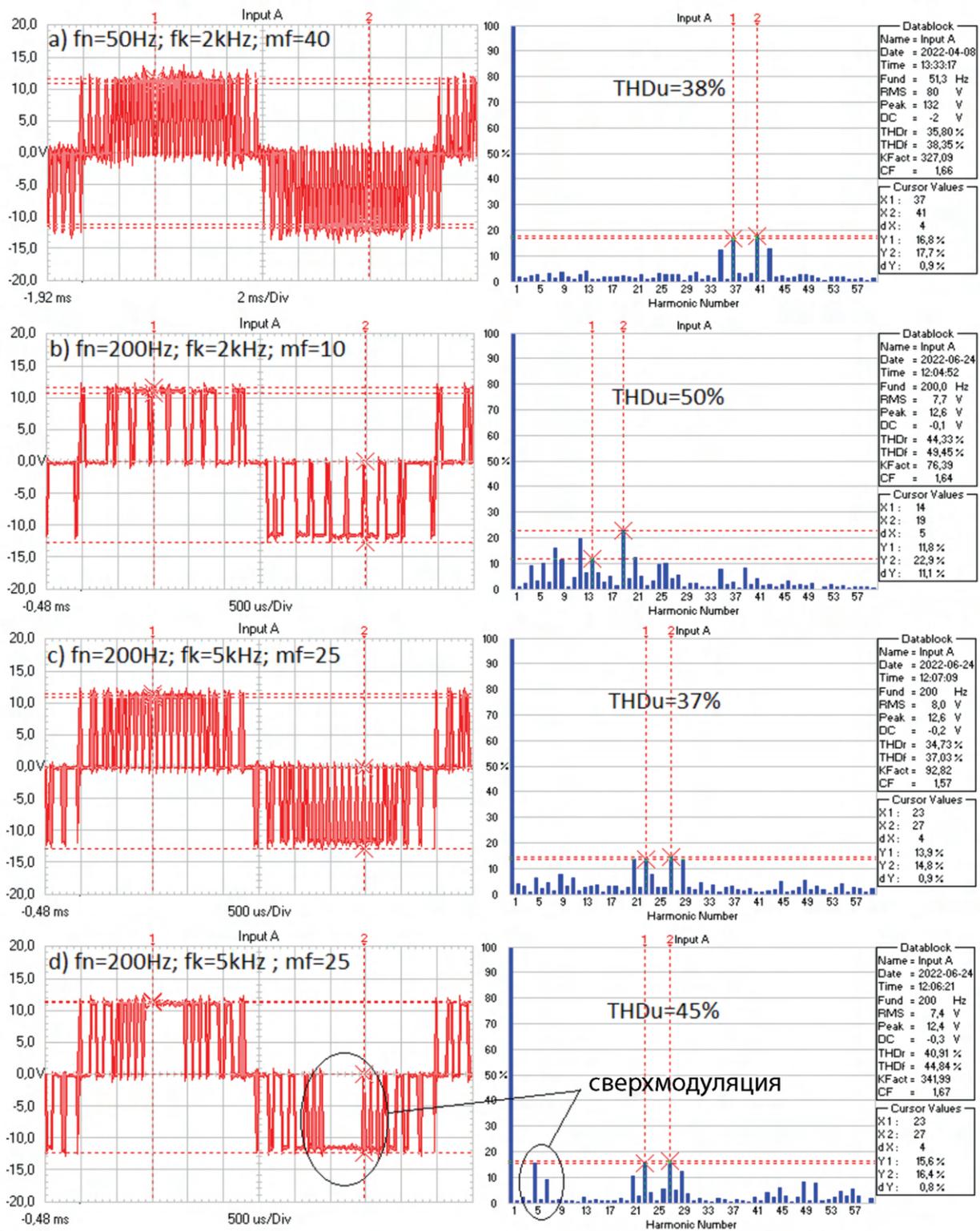


Рис. 2. Осциллограммы и распределение гармоник выходного напряжения при различных рабочих и коммутационных частотах [2].



самым уменьшая мощность, поставляемую на двигатель. Следует отметить, что падение напряжения пропорционально реактивности дросселя и, следовательно, частоте:

$$u_x[\%] = \frac{I_N X_L \sqrt{3}}{U_N} 100\% \quad (2)$$

где:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (3)$$

Стандартные синусоидальные фильтры, используемые на частоте сети, имеют реактивное сопротивление в диапазоне от 6% до 12%, в зависимости от используемой частоты коммутации. Если, например, стандартный фильтр используется в схеме с повышенной частотой: 300 Гц, реактивное сопротивление увеличится в шесть раз. Означает реактивное сопротивление от 36% до 72%, в этом случае фильтр полностью теряет свою функциональность из-за огромного падения напряжения. То же самое справедливо и для емкостной части фильтра. Емкостной ток, потребляемый конденсатором в системе 300 Гц, будет

в шесть раз больше, чем в системе 50 Гц, поскольку он также пропорционален частоте:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = U_C \omega C = U_C 2\pi f C \quad (4)$$

Ограничение емкостного тока очень важно, так как он создает дополнительную нагрузку на преобразователь. Как видно, стандартные сетевые синусоидальные фильтры не подходят для прямого использования в высокочастотных системах. Подходящие индуктивность и емкость образуют низкочастотный синусоидальный фильтр с резонансной частотой:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Значение резонансной частоты должно быть соответствующим образом выбрано по отношению к рабочей частоте и частоте коммутации, отделяя полосу пропускания от полосы затухания и формируя коэффициент затухания фильтра соответствующим образом (рис. 3). Чем выше произведение LC, тем ниже резонансная частота фильтра, что, в свою очередь, означает более высокий коэффициент демпфирования для данной частоты переключения.

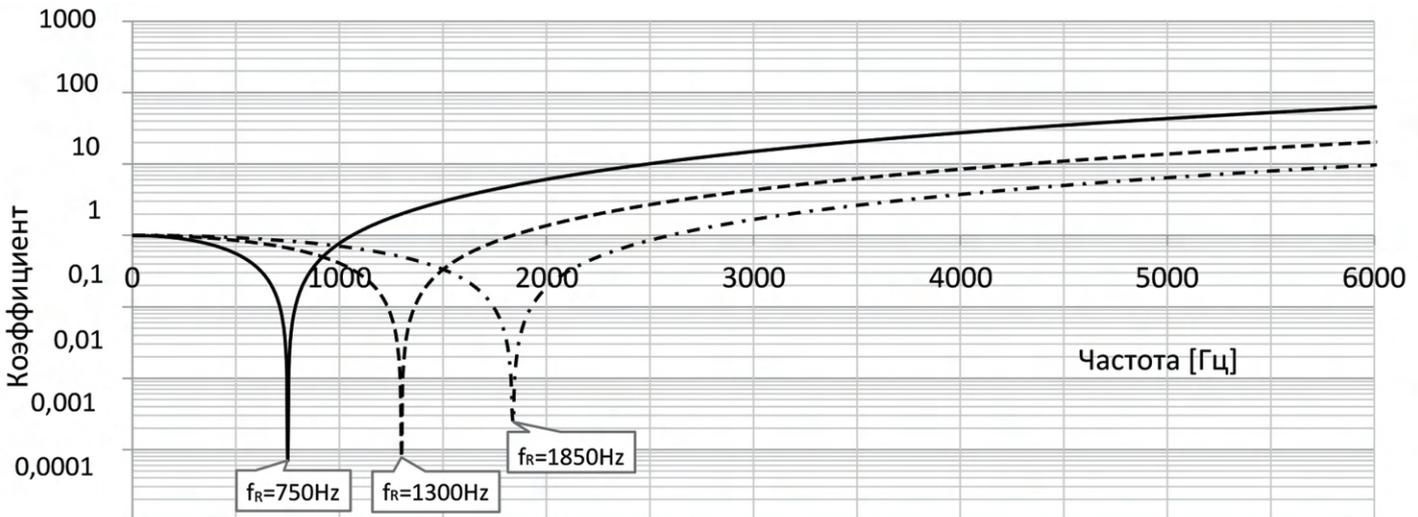


Рис. 3. Примеры частотных характеристик LC-фильтра для различных резонансных частот [2].



4. Switching frequency selection - why increase it?

Выбор частоты переключения в высокочастотных системах является довольно сложным вопросом. Как было показано ранее, увеличение частоты переключения улучшает коэффициенты и THDu выходного напряжения.

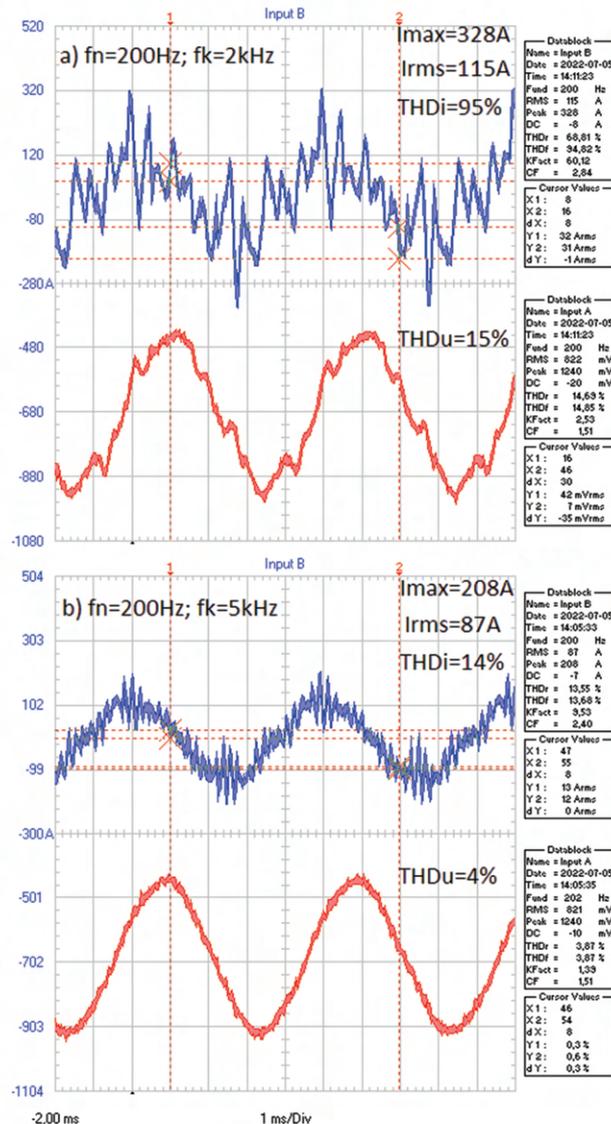


Рис. 4. Осциллограммы емкостного тока и выходного напряжения фильтра EF3LC-415A 400В 200Гц для различных частот [2].

Однако это также имеет свои негативные последствия в виде дополнительных тепловых потерь в конвертере, поэтому производители конвертеров неохотно идут на его увеличение. Тем не менее, в случае необходимости использования синусоидальных фильтров на выходе преобразователя, мы получаем дополнительные аргументы в пользу увеличения этой частоты коммутации.

Одной из причин является среднееквадратичное значение емкостного тока (4). Величина этого тока зависит не только от основной частоты, но и от частоты коммутации (рис. 4). Чем выше частота переключения, тем меньше амплитуда гармоник и тем меньше среднееквадратичное и максимальное значение емкостного тока. Меньшие амплитуды гармонического тока оказывают значительное влияние на уменьшение размеров дросселя фильтра и улучшение условий его работы (снижение потерь и шума). Меньшее значение емкостного тока фильтра также означает меньшую нагрузку на преобразователь, поэтому это в некоторой степени уравнивается увеличением дополнительных потерь преобразователя от частоты коммутации. Другой причиной увеличения частоты переключения является коэффициент искажения выходного напряжения THDu. Здесь проблема очевидна, проще и дешевле отфильтровать сигнал, который изначально менее искажен. Можно сравнить осциллограммы выходного напряжения преобразователя без фильтра и после применения фильтра для частот коммутации 2 кГц и 5 кГц (рис. 2b и 2c и рис. 4a и 4b). При частоте коммутации 2 кГц фильтр улучшает коэффициент THDu примерно в три раза со значения 50% до 15%. Для сравнения, тот же фильтр при частоте коммутации 5 кГц снижает THDu с 37% до менее чем 4% (т.е. более чем в 9 раз). Влияние частоты коммутации на емкостной ток и на искажение выходного напряжения фильтра также показано в таблице 1. Эти результаты ясно показывают, что более высокая частота коммутации также оставляет большой простор для оптимизации фильтра в плане использования меньшей индуктивности и (или) меньшей емкости, что позволяет уменьшить падение напряжения и емкостной ток. Как видно из приведенного выше анализа и измерений, использование синусоидального фильтра в высокочастотной системе может снизить искажения выходного напряжения преобразователя THDu даже менее чем до 5%. Эти условия близки к сетевому питанию, что является большим облегчением и для повышающего трансформатора, и для силового кабеля, и особенно для двигателя РММ. Синусоидальный фильтр сглаживает синусоиду выходного напряжения за счет искаженного емкостного тока. Емкостной ток складывается с реальным током нагрузки фильтра, поэтому фильтр берет на себя дополнительные потери, связанные с частотой переключений, которые происходили бы в трансформаторе, кабеле и двигателе



Таблица 1. Измерения искажений емкостного тока и выходного напряжения фильтра EF3LC-415A 400 В 200 Гц в зависимости от частоты коммутации [2].

f _n	f _k	Емкостной ток			THDu
		I _{CRMS}	I _{CMAx}	THD _{ic}	
Гц	кГц	А	А	%	%
200	2	115	328	95	14,9
200	3	101	272	59	8,7
200	4	93	232	38	7,6
200	5	87	208	24	3,9
200	6	83	198	14	3,2

Влияние искажения тока на работу и конструкцию магнитных элементов фильтра огромно. Дополнительные потери из-за паразитных явлений в них обуславливают необходимость использования многоселевых конструкций и ограничений уровня индукции в сердечнике. Это уменьшает потери на вихревые токи в сердечнике и обмотках, создаваемые потоком, связанным с зазорами, известным как поток рассеяния (Fringing Flux) [5]. Используя более высокую частоту коммутации, мы уменьшаем искажения тока и, следовательно, получаем эффект уменьшения потерь и размера фильтра. Поэтому выбор частоты коммутации в системах такого типа является компромиссом между стоимостью и возможностью ограничить дополнительные потери в преобразователе, возникающие в результате увеличения частоты коммутации, и стоимостью и эффектами пассивной фильтрации, которая необходима при питании двигателей ПММ.

5. Итог

Эффект от установки синусоидальных фильтров в высокочастотных системах с высокоскоростными и мощными двигателями ПММ более выражен, чем при использовании традиционных асинхронных двигателей сетевой частоты. Следует помнить, что в таких системах синусоидальный фильтр является улучшением условий эксплуатации и повышает надежность не только самого двигателя, но и других компонентов системы привода, т.е. повышающего трансформатора или силового кабеля. Фильтр устраняет два самых больших риска, влияющих на надежность и срок службы всей системы привода, а именно искажение напряжения,

полностью устраняя резкое повышение напряжения, которое является прямой угрозой для изоляции, и снижая дополнительные тепловые потери, возникающие как в результате протекания искаженного магнитного потока в сердечниках, так и искаженного тока в рабочих обмотках. С другой стороны, частота коммутации важна для выбора пассивных фильтров и других компонентов в высокочастотных системах. При выборе частоты коммутации следует учитывать влияние на характеристики пассивных компонентов, ток емкостного фильтра, а также эффективность и производительность системы в целом.

6. Литература

- [1]. J. F. Gieras „Permanent magnet motor technology: design and application” 3rd ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010.
- [2]. ELHAND Transformatory Sp. z o.o. - Исследования материалы и исследования, Люблинец, 2022.
- [3]. T. Orłowski & L. Jasinski „Application of New Generation Transformer Harmonic Filter Hybrid Solution To Reduce Footprint and Operating Cost at the well site” ADIPEC - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, November 2019.
- [4]. X. Guo, M. He, and Y. Yang, “Over modulation strategy of power converters: A review,” IEEE Access, 2018.
- [5]. J. Czornik, M. Haltof (‘Влияние фильтров гармоник на улучшение характеристик электроэнергии в точке подключения’ Электротехническое обозрение, № 3, 2020).

Авторы

Магистр наук Ярослав Чорник

j.czornik@elhand.pl

Доктор наук Мачей Хальтоф

m.haltof@elhand.pl

Магистр наук Лешек Ясиньски

l.jasinski@elhand.pl

ELHAND Transformatory Sp. z o.o.

ул. Кльонова 60, 42-700, Люблинец, Польша

Статья написана в рамках проекта POIR-03.02.01-24-0007-18 под названием. “Внедрение технологии производства улучшенных фильтров гармоник, интегрированных с маслонаполненными трансформаторами”.

