

Моторные дроссели

И. Морозов, ООО «ОПТИМА», Республика Беларусь moroz@optima.by

Ключевые слова: ED3S, моторный дроссель, выходной дроссель, опции преобразователей частоты, Elhand, Элхэнд, Optima, Оптима, АС-дроссель, защита двигателя от перенапряжения, длина моторного кабеля, частота ШИМ, преобразователь частоты, инвертор.

Введение

Переход изголовителей преобразователей частоты (ПЧ) к IGBT транзисторам (биполярный транзистор с изолированным затвором), используемых в инверторах напряжения связан с тем, что IGBT транзисторы имеют меньшее время переключения, чем предшественники. В связи с этим, с одной стороны снижается потеря мощности при переключениях ключей, с другой -- появляется возможность увеличения несущей частоты синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) до 20 кГц, а это в свою очередь снижает уровень высших гармоник в выходном токе, а следовательно снижаются потери в электродвигателе и улучшаются его электромеханические характеристики. Однако улучшение важнейших параметров ПЧ приводит к возникновению некоторых эффектов, которые необходимо учитывать при выборе электродвигателей, моторных кабелей и дополнительного оборудования защищающего их. ПЧ на базе IGBT транзисторов имеют более быстрое время нарастания выходного напряжения (50-400нс), по сравнению с силовыми ключами, используемыми ранее, например, у BJT время нарастания --400-2000нс; у GTO--2000-4000нс. Чем меньше время нарастания тем, при определенных условиях, больше разрушающее воздействие на изоляцию двигателя и силового моторного кабеля оказывают импульсы напряжения следующие с высокой частотой. Время нарастания напряжения на зажимах электродвигателя теперь имеет большее влияние на переходный процесс, заставляя учитывать явление отраженной волны и его отрицательное влияние на изоляцию двигателя и моторного кабеля.

Изучая проблему, и предлагая пути ее решения, мы руководствовались требованиями NEMA (National Electrical Manufacturers Association) в части предельных параметров напряжения на зажимах электродвигателя:

NEMA MG1 part 30: Низковольтные общепромышленные двигатели:

Максимальное импульсное **напряжение 1000В**; минимальное **время нарастания напряжения 2мкс.** [1]

NEMA MG1 part 31: Низковольтные двигатели предназначенные для работы с преобразователями частоты:

Максимальное импульсное **напряжение 1600В**; минимальное время **нарастания напряжения 0,1 мкс** [2]

Явление отраженной волны

Инвертор напряжения ПЧ с использованием технологии синусоидальной ШИМ (PWM) не формирует синусоидальное напряжение на выходе, а генерируют непрерывную последовательность импульсов ШИМ следующих с высокой частотой рис. 1., верхняя осциллограмма красного цвета рис. 2.

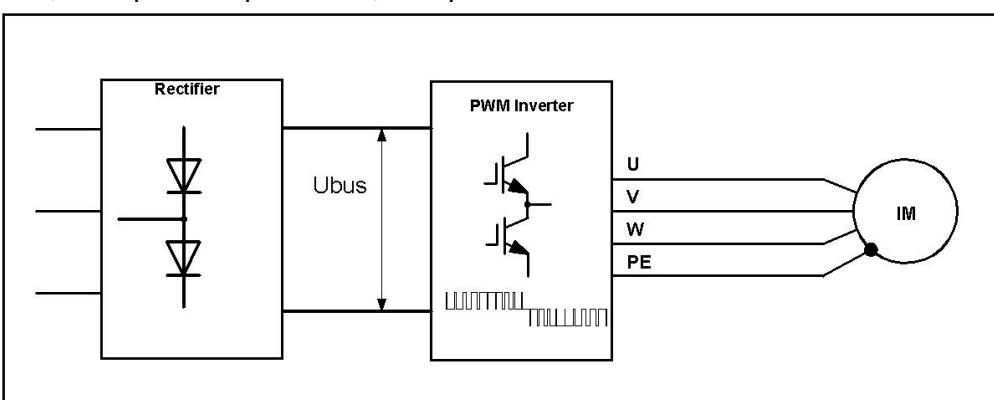


Рис.1. Структурная схема преобразователя частоты

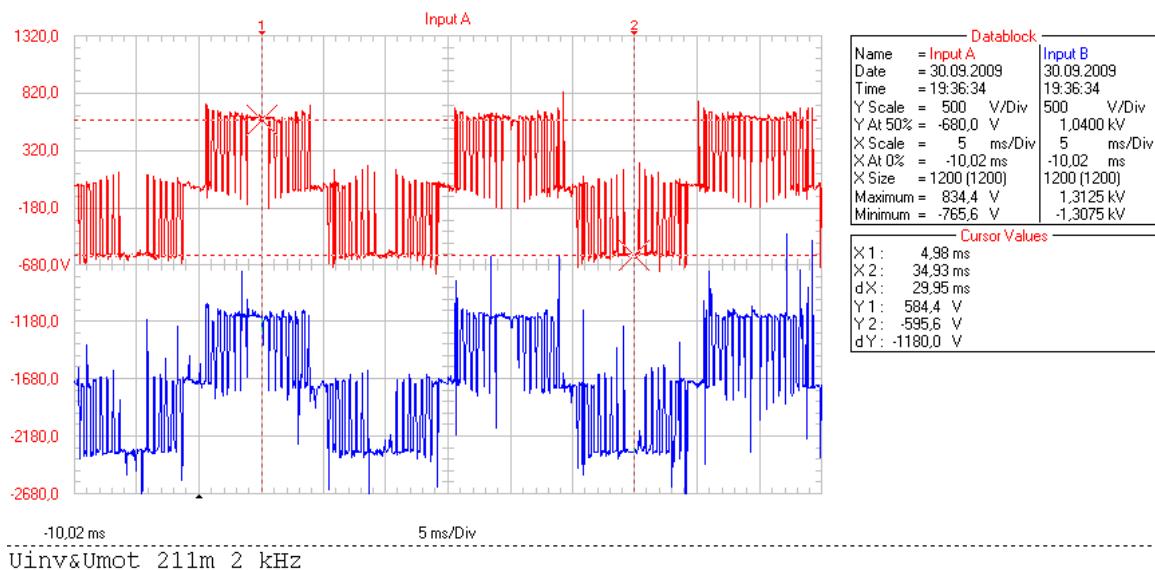


Рис. 2. Выходное напряжение инвертора и напряжение на зажимах мотора. Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

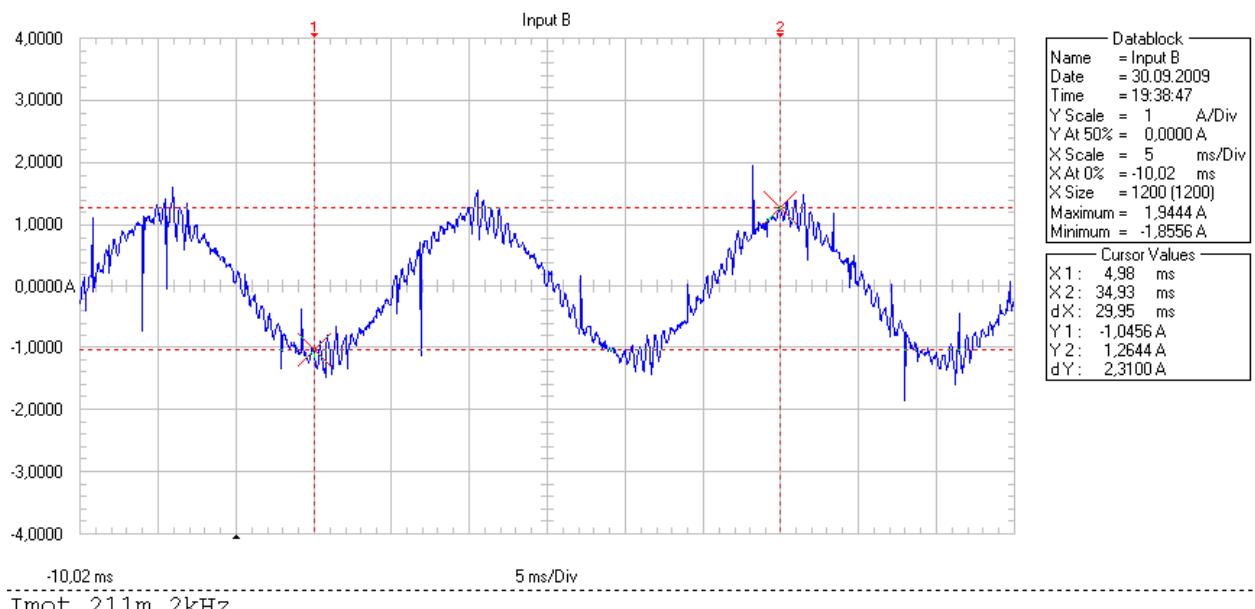


Рис. 3. Выходной ток инвертора. Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

Ток, благодаря синусоидальной ШИМ, при этом, близок к синусоидальному рис. 3. Импульсы напряжения с выхода ПЧ передаются к зажимам двигателя по моторному кабелю. Пиковое напряжение импульса на выходе инвертора равно величине напряжения в контуре постоянного напряжения преобразователя частоты (U_{bus}). Амплитуда импульса напряжения на зажимах мотора не обязательно равна напряжению U_{bus} , она зависит от динамических свойств системы инвертор-кабель-мотор, а также от времени нарастания выходного напряжения инвертора. Динамические свойства системы инвертор-кабель-мотор определяются параметрами кабельной линии и электродвигателя и в значительной степени длиной кабеля.

На нижней осциллограмме рис.2 показана последовательность импульсов на зажимах мотора (длина кабеля 211 м), в каждой точке переключения ключей видны кратковременные пики напряжения, существенно превышающие напряжение в контуре

постоянного напряжения (U_{bus}). Амплитуда импульса достигает **1313 В**, время нарастания напряжения при этом **1,2мкс.** (допустимые значения для общепромышленного электродвигателя - **1000В, 2мкс**). Эти импульсы напряжения, следующие с высокой частотой (до 20кГц), приводят к постепенному разрушению изоляции двигателя. Изоляция стареет и электродвигатель через некоторое время выходит из строя. Проблема заключается еще и в том, что выход из строя электродвигателя происходит не сразу после внедрения преобразователя частоты, а по истечению некоторого времени. И выход его из строя обслуживающим персоналом не связывается с негативным воздействием на него преобразователя частоты.

Явление в результате которого на статорной обмотке электродвигателя появляются импульсы перенапряжения одно из названий: "Эффект длинной линии электропередачи", "Эффект отраженной волны" или "Эффект стоячей волны". На Рис. 4 показан одиночный импульс напряжения на зажимах двигателя, создавая неограниченную отраженную волну напряжения $U_{peak}=1360\text{V}$ или $U_{peak} =2.43\text{ri}$ для IGBT инвертора 400V, 50Гц для которого

$$U_{bus} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{L1} = 2,34 U_{L1} = 2,34 * 231 \approx 541\text{VDC}$$

Общепринято обозначение характеризующее импульс перенапряжения $r_i=U_{peak}/U_{bus}$. Важно отметить, что переходные процессы с эффектом отраженной волны происходят в электроприводе с любым видом силовых ключей инвертора, использующем ШИМ технологию, и зависят от несущей частоты ШИМ. Они не зависят от выходной номинальной частоты инвертора. Важно понять, что двукратное перенапряжение на зажимах двигателя ($r_i=2$) возможно на всех двигателях переменного тока при некоторой **критической длине моторного кабеля** независимо от типа переключающего ключа, используемого в инверторе. Для "медленного" ключа критическая длина моторного кабеля будет одна, для "быстрого" ключа - другая. Эта проблема обострилась с появлением на рынке "быстрых" IGBT транзисторов с очень малым временем переключения, так как критическая длина кабеля существенно снизилась до величин, которые чаще всего используются на практике (Рис. 5). Учитывая, что у современных ПЧ время нарастания импульса напряжения лежит в пределах 50-400нс критическая длина кабеля соответственно будет от 12 до 94 м.

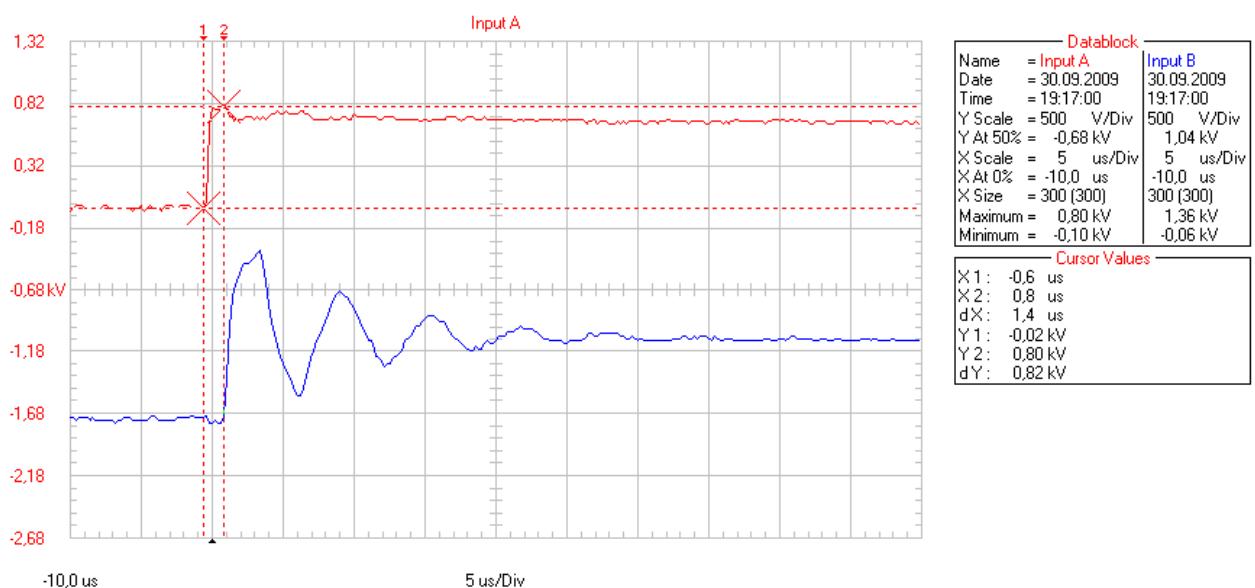


Рис. 4. Одиночный импульс выходного напряжения инвертора (верхняя осциллографма) и напряжение на зажимах мотора (нижня осциллографма). Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

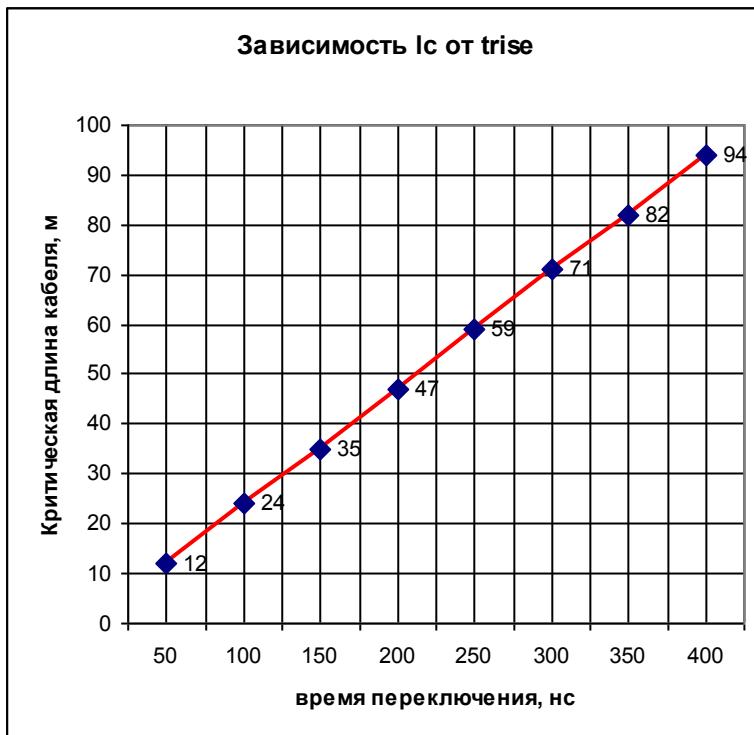


Рис. 5. Зависимость критической длины кабеля от времени нарастания напряжения на выходе инвертора

Способы борьбы с перенапряжением вызванных эффектом отраженной волны и временем нарастания импульса напряжения на зажимах двигателей

Существует четыре способа борьбы с проблемами вызванными явлением отраженной волны:

- 1) ограничение амплитуды напряжения и времени его нарастания на зажимах двигателя с помощью выходных дросселей или фильтров;
- 2) использование специальных двигателей предназначенных для питания от преобразователей частоты;
- 3) сокращение длины кабеля;
- 4) изменение линейного напряжения инвертора с 400В на 240В;

В данной работе рассматривается один из способов борьбы, а именно способ включения между преобразователем частоты и электродвигателем моторного дросселя типа **ED3S**. С остальными способами можно ознакомиться в статьях "[Обуздание отраженной волны](#)", "[Дроссели du/dt](#)".

Одной из разновидностей выходных дросселей являются моторные дроссели компании **Elhand Transformatory** типа **ED3S**, ($uk = 3-8,0\%$) кроме эффективного корректирования параметров импульсов напряжения на зажимах двигателя см. рис. 6, 7, 8 дополнительно, улучшают синусоидальность тока и напряжения мотора см. рис. 8-11. Так коэффициент нелинейных искажений тока, в схеме с моторным дросселем, $THDf=4,53\%$, в то время как в схеме без дросселя $THDf=15,51\%$. Вместе с тем уровень гармоник напряжения на зажимах двигателя остается достаточно высоким $THDf=53,9\%$. В спектре напряжения присутствуют как четные, так и нечетные гармонические составляющие. Нечетные гармоники 7, 11, 14, 17, 21, 23, практически полностью подавлены дросселем, четные гармоники несущественно изменились, наиболее сильными остались 4, 6, 10, 18, 20, 40.

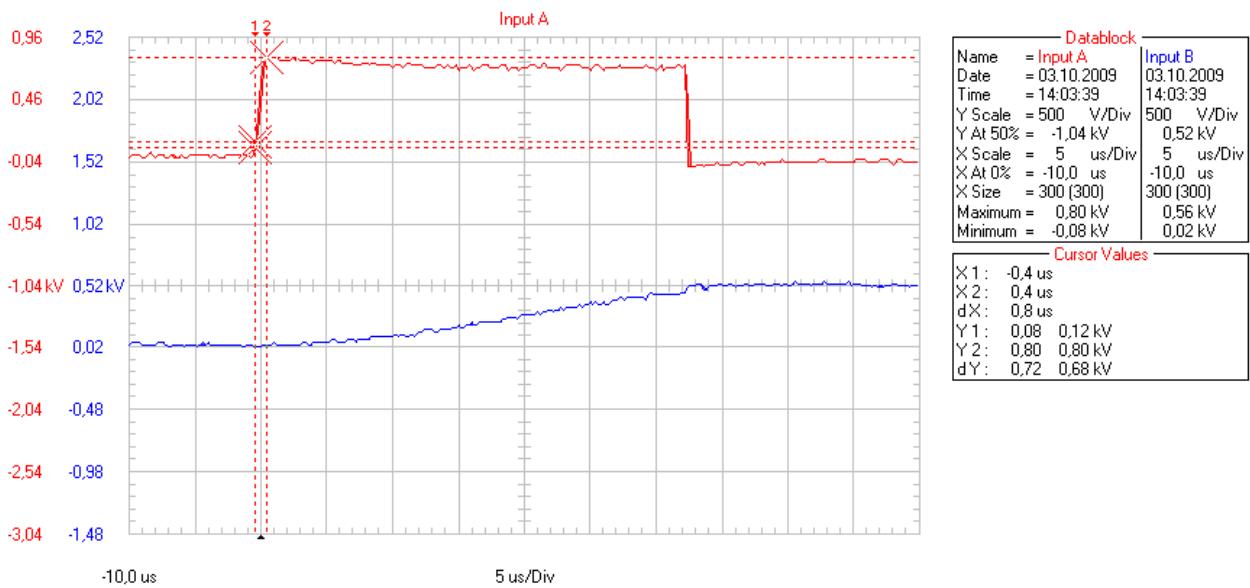


Рис.6. Одиночный импульс напряжения на выходе инвертора и двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

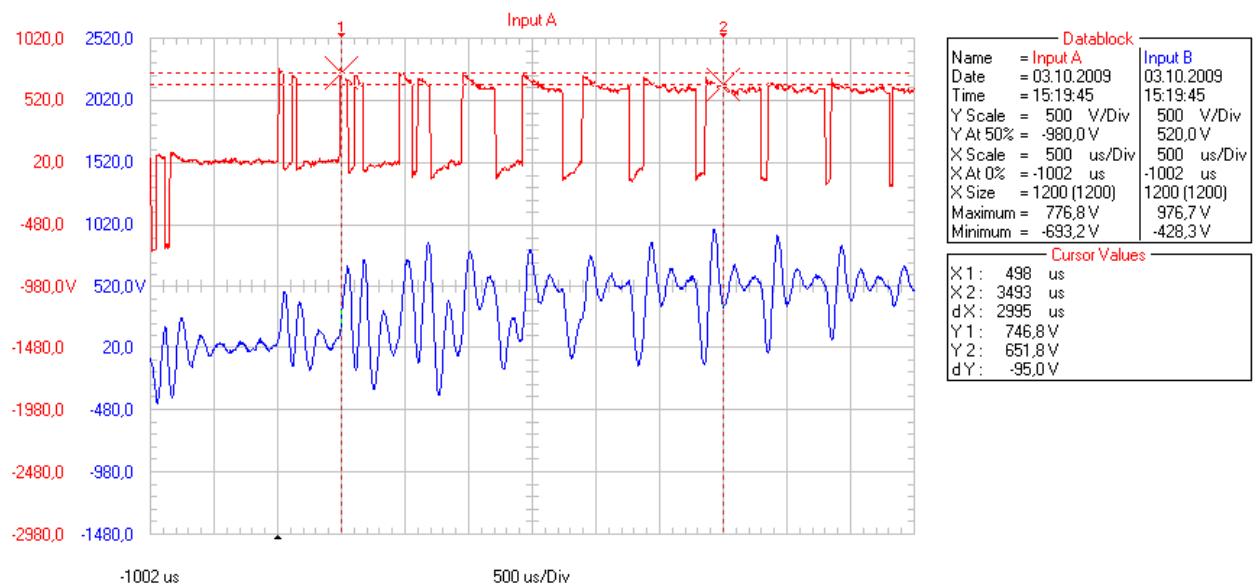


Рис.7. Напряжение на выходе инвертора и на обмотках двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

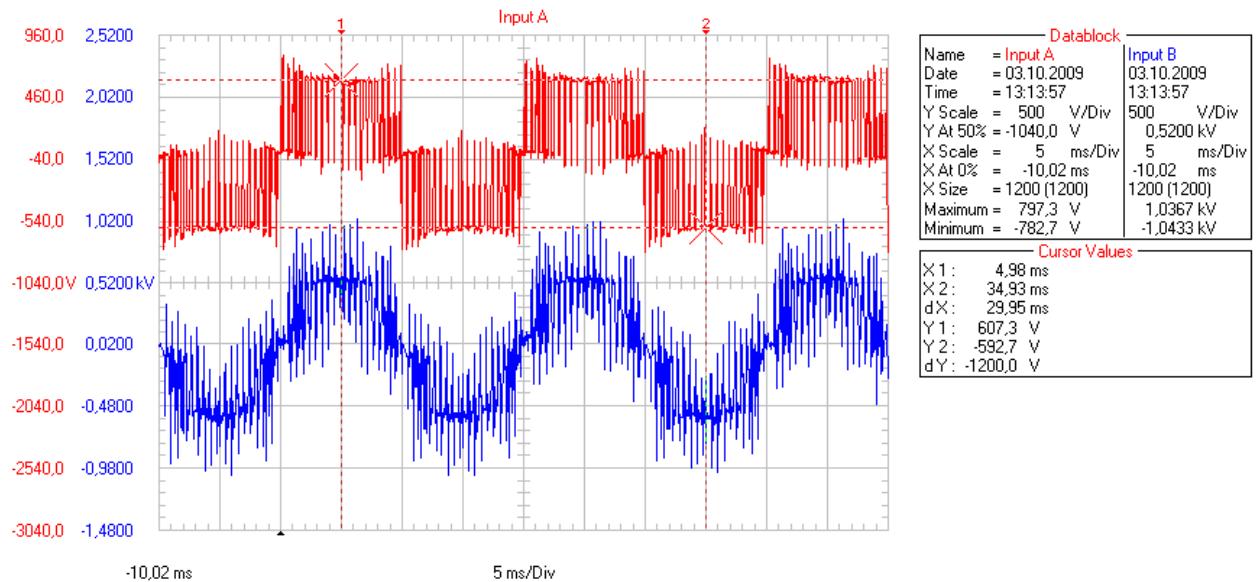


Рис. 8. Напряжение на выходе инвертора и двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

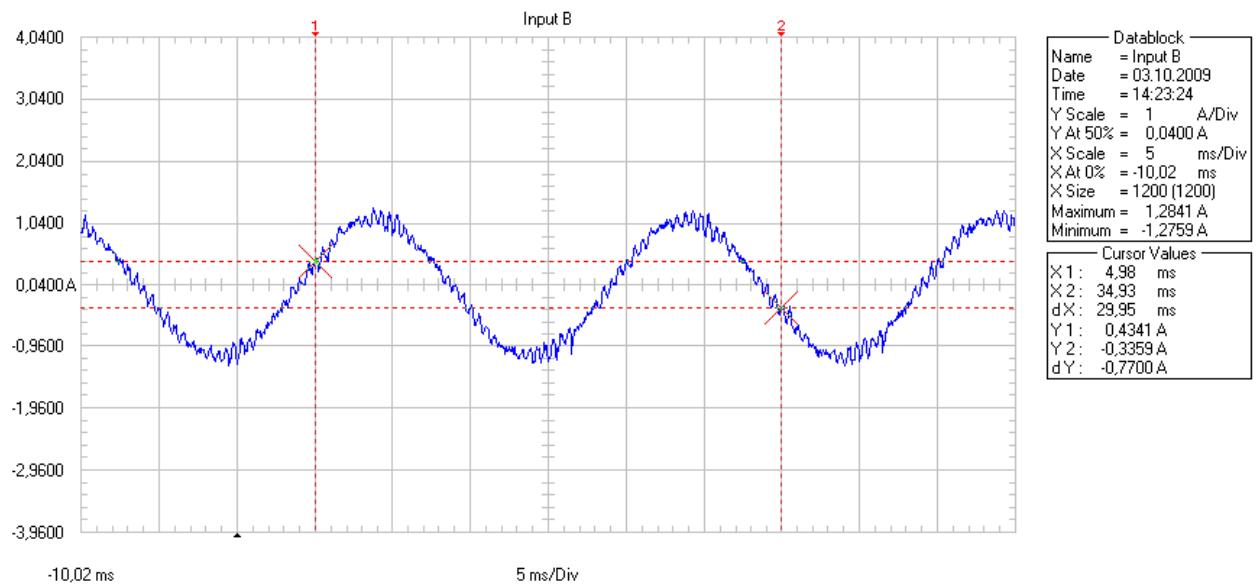


Рис. 9. Ток двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

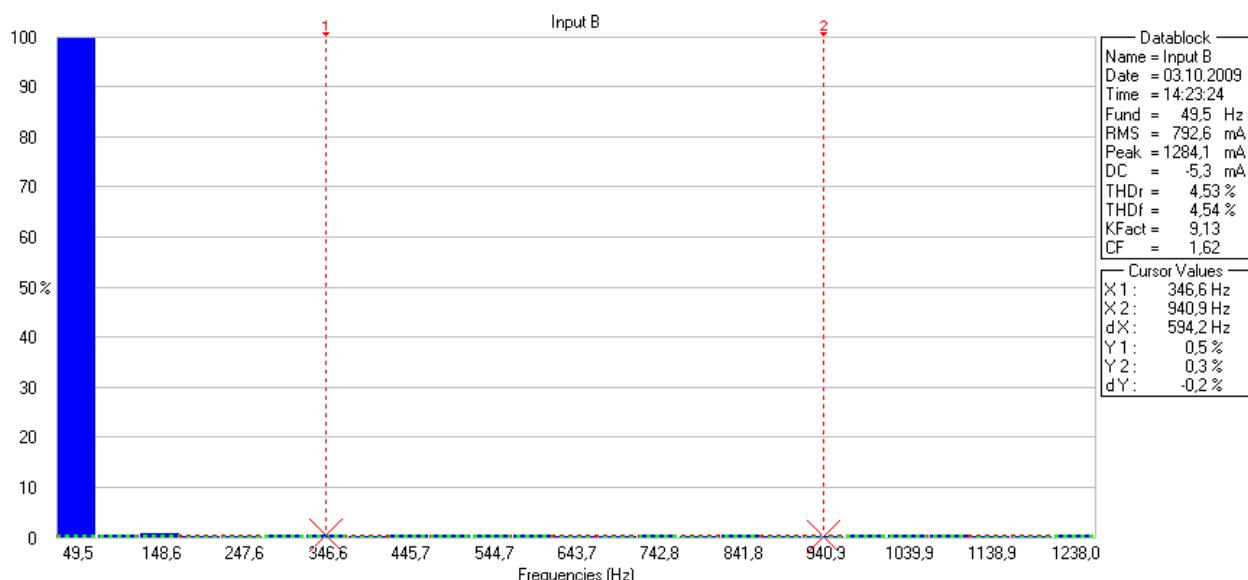


Рис. 10. Спектр тока двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

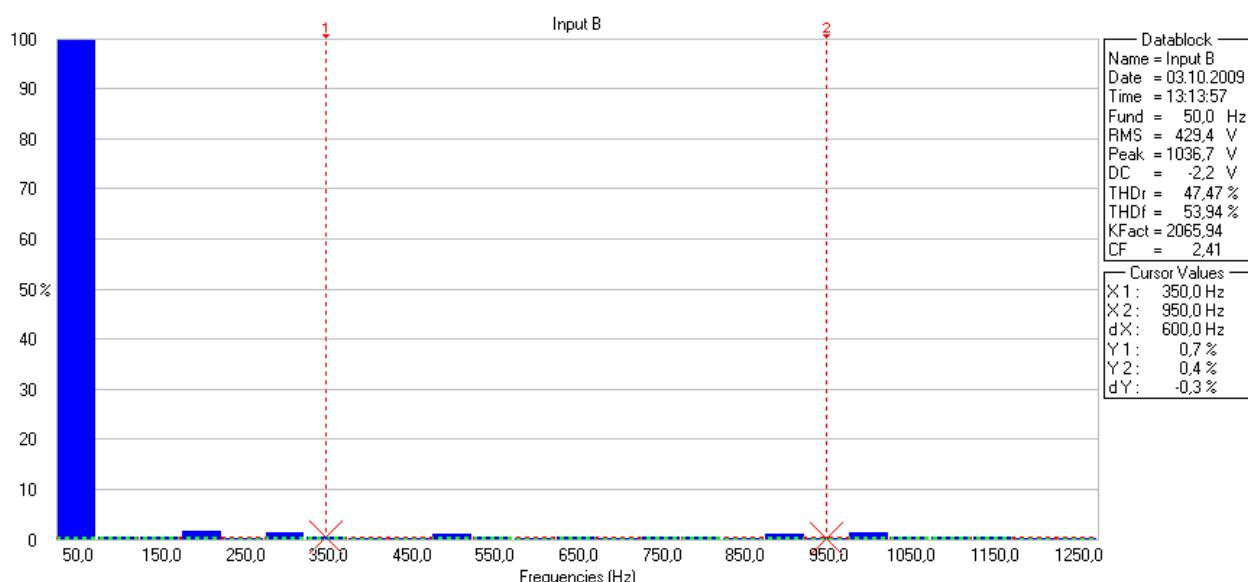


Рис. 11. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

При увеличении частоты ШИМ уменьшается уровень гармоник напряжения. рис. 12, 13 при этом уровень гармоник тока остается примерно на том же уровне до частоты 5кГц, затем незначительно увеличивается.

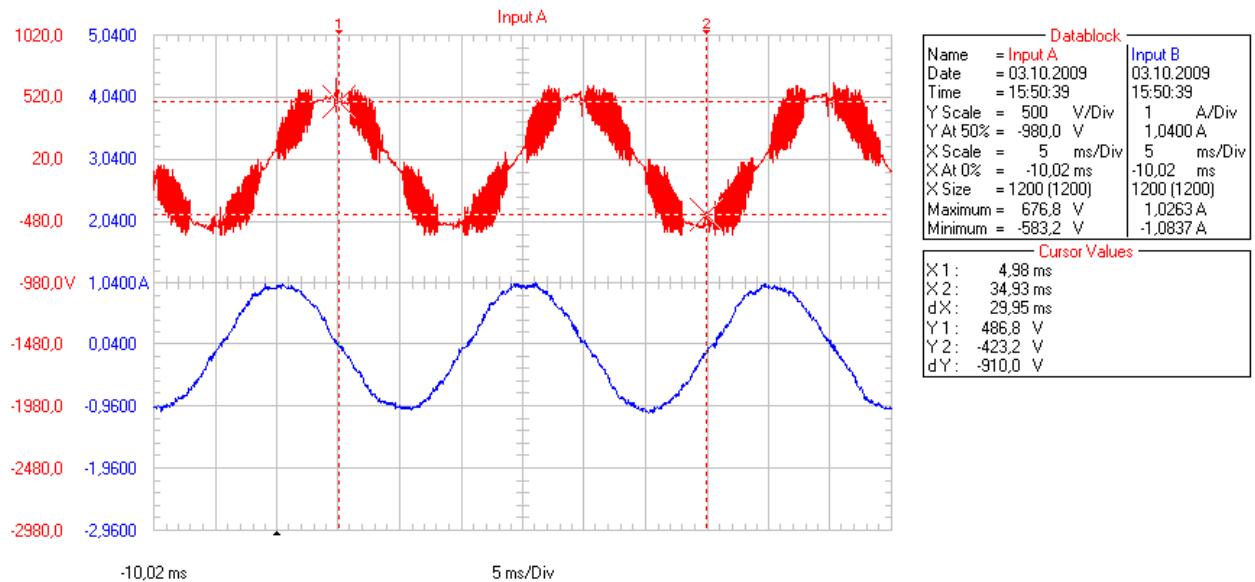


Рис. 12. Напряжение и ток двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,1 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 10кГц, длина кабеля 211м

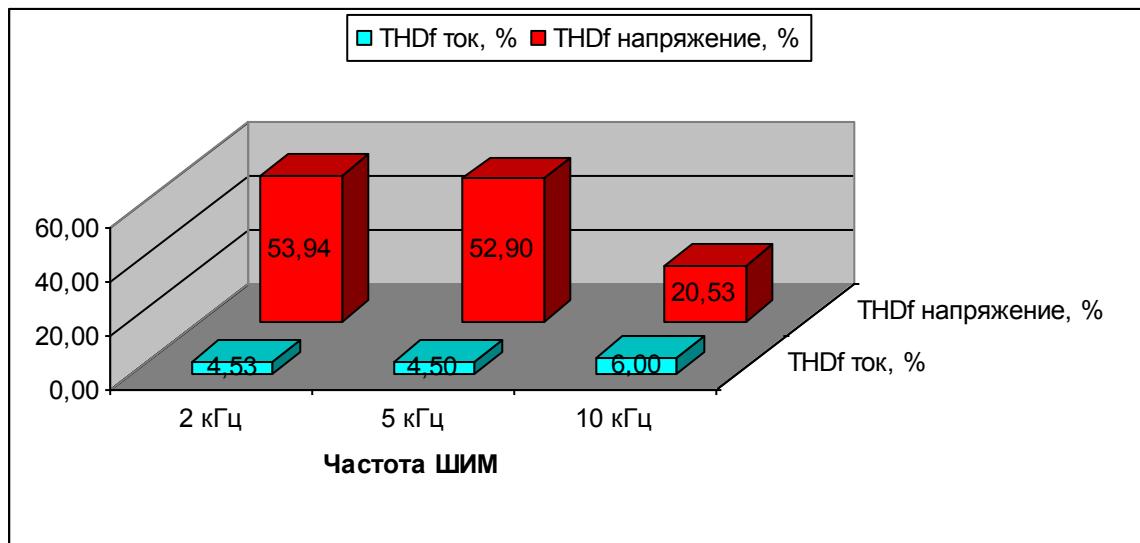
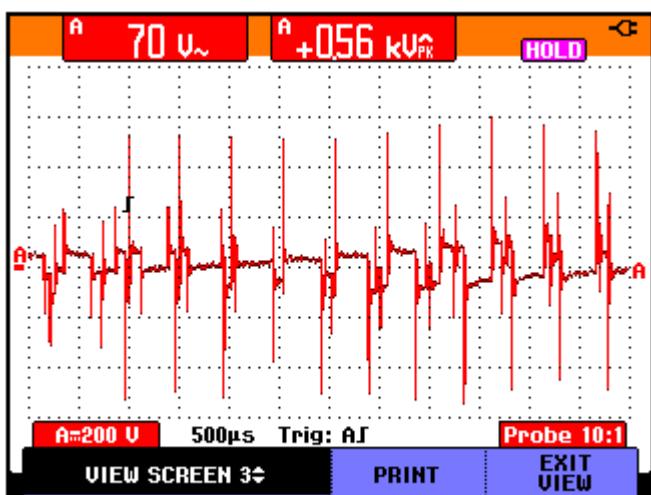


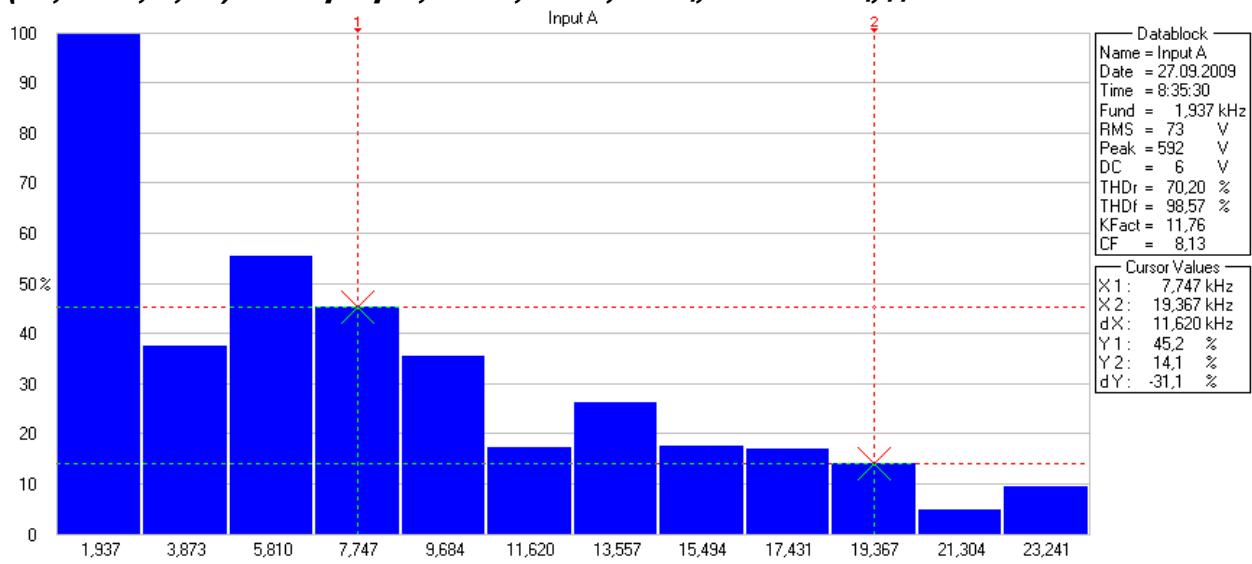
Рис. 13. Зависимости THDf тока и напряжения от частоты ШИМ. Двигатель 0,75 кВт, преобразователь частоты 0,75 кВт, моторный дроссель на выходе

На рис. 14 показана осциллограмма напряжения на одной из обмоток моторного дросселя при частоте ШИМ 2 кГц. Кроме основной гармоники (2 кГц, регулярные короткие импульсы амплитудой около 500В) присутствуют кратные гармоники рис. 15. Наиболее сильные из них это 2, 3, 4 и 5. Причем самая большая из высших гармоник 3 (6кГц).



Umotdr

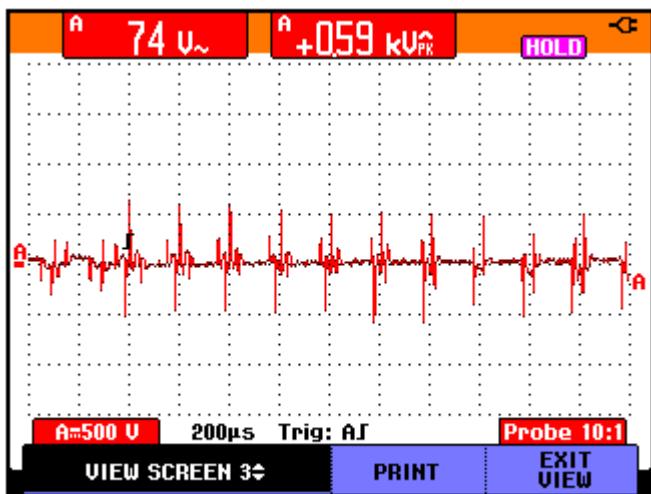
Рис. 14. Напряжение на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м



Umotdr 500mks

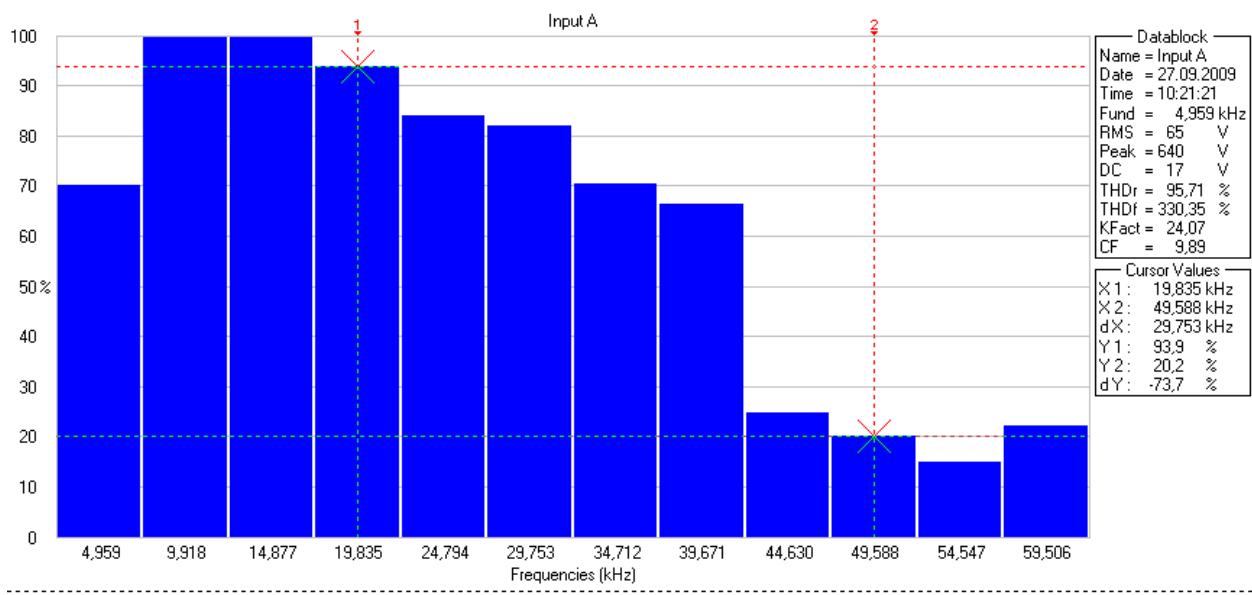
Рис. 15. Спектр напряжения на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

На рис. 16 показана осциллограмма напряжения на одной из обмоток моторного дросселя при частоте ШИМ 5 кГц. Кроме основной гармоники (5 кГц, регулярные короткие импульсы амплитудой около 500В) присутствуют кратные гармоники рис. 17. Наиболее сильные из них это 2-8. Причем вторая, третья, четвертая, пятая и шестая гармоники (10, 15, 20, 25, 30 кГц) по величине больше первой гармоники (5 кГц). Этот эффект, на наш взгляд вызван резонансными явлениями на этих частотах.



Umotdr 5kHz 12m

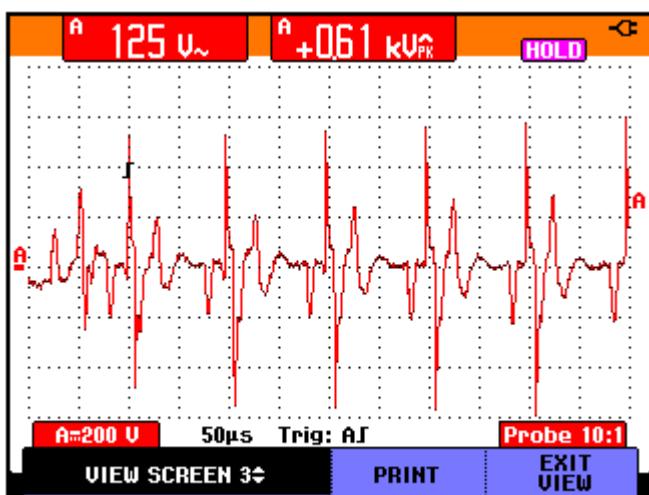
Рис. 16. Напряжение на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4МГц, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 5кГц, длина кабеля 211м



Umotdr 5kHz 12m

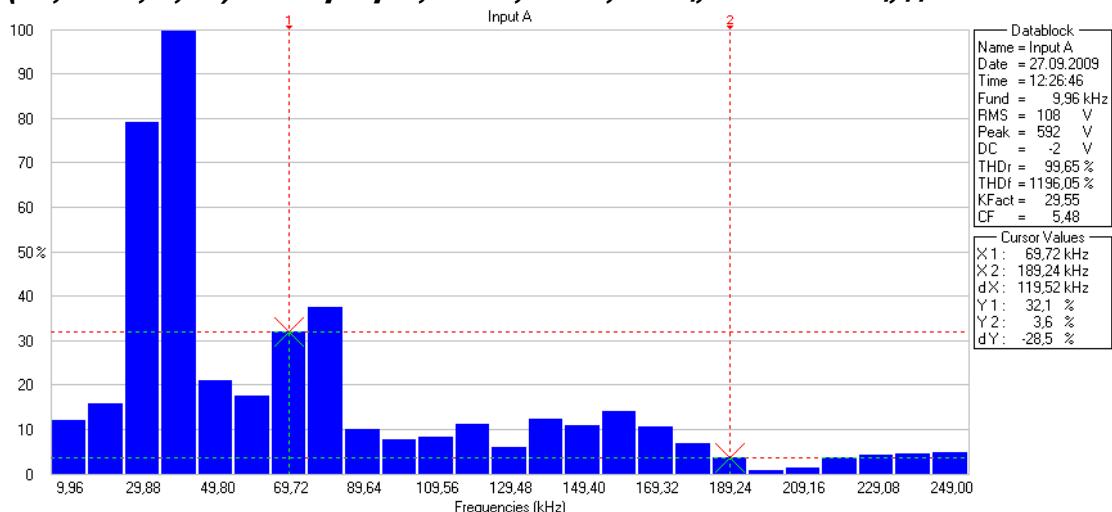
Рис. 17. Спектр напряжения на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4МГц, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 5кГц, длина кабеля 211м

На рис. 18 показана осциллограмма напряжения на одной из обмоток моторного дросселя при частоте ШИМ 10 кГц. Кроме основной гармоники (10 кГц, регулярные короткие импульсы амплитудой около 500В) присутствуют кратные гармоники рис. 17. Наиболее сильные из них это 2-8. Причем вторая, третья, четвертая, седьмая и восьмая гармоники по величине больше первой гармоники (10 кГц). Этот эффект, на наш взгляд вызван резонансными явлениями на этих частотах.



Umotdr 10kHz 12m

Рис. 18. Напряжение на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4МГц, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 10кГц, длина кабеля 211м



Umotdr 10kHz 12m

Рис. 19. Спектр напряжения на обмотке моторного дросселя типа ED3S-22,4/2,5 (22,4МГц, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 10кГц, длина кабеля 211м

ВЫВОДЫ

- Существенное отличие волнового сопротивления кабеля от волнового сопротивления двигателя, прежде всего, ответственно за величину перенапряжения на зажимах двигателя.
- Время нарастания импульса напряжения на выходе инвертора, определяет критическую длину кабеля.
- В случае питания общепромышленного двигателя от IGBT инвертора начиная с 12 метров моторного кабеля нужно принимать меры по ограничению параметров импульсов напряжения до допустимых значений 1000В, 2мкс.
- Моторные дроссели, кроме выполнения функций дросселя du/dt , существенно улучшают синусоидальность тока, снижая уровень высших гармоник, и практически не уступают синус фильтрам по этому показателю. Моторные дроссели рекомендуется ставить на двигатели ответственных механизмов или двигателей находящихся во взрывоопасной зоне;

Источники

- [1] NEMA Recommended Motor-Generator Standards, MG 1-1993 Revision 1 Part 30 Section IV, "Standard MG 1 Motors," Paragraph 30.02.2.9, Voltage Stress
- [2] NEMA Recommended Motor-Generator Standards, MG 1-1993 Revision 1 Part 31 Section IV, "Definite Purpose Inverter Fed Motors," Paragraph 31.40.4.2, Voltage Spikes