

Синус-фильтр

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

Ключевые слова: EF3LC, синус-фильтр, синусоидальный фильтр, выходной фильтр, output filters, sine wave output filter for motor drives, опции преобразователей частоты, Elhand, Элхэнд, Optima, Оптима, защита двигателя от перенапряжения, длина моторного кабеля, частота ШИМ, преобразователь частоты, инвертор.

Введение

Переход изготовителей 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 электрохимические 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 ВJT 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.

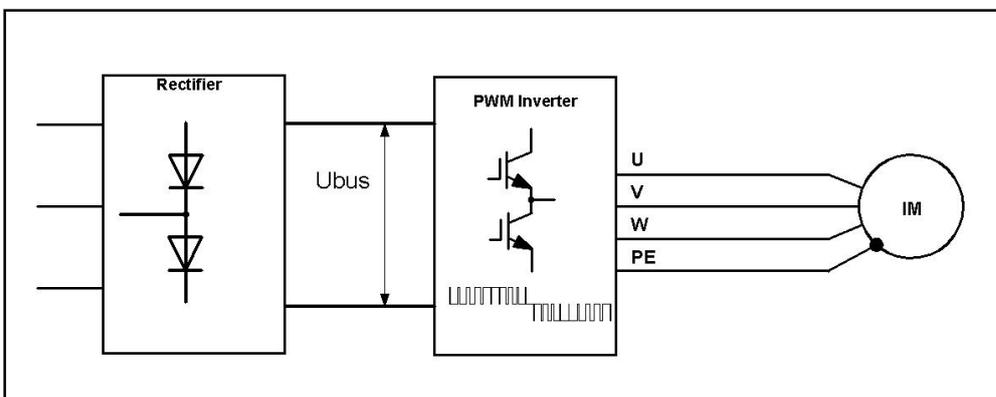
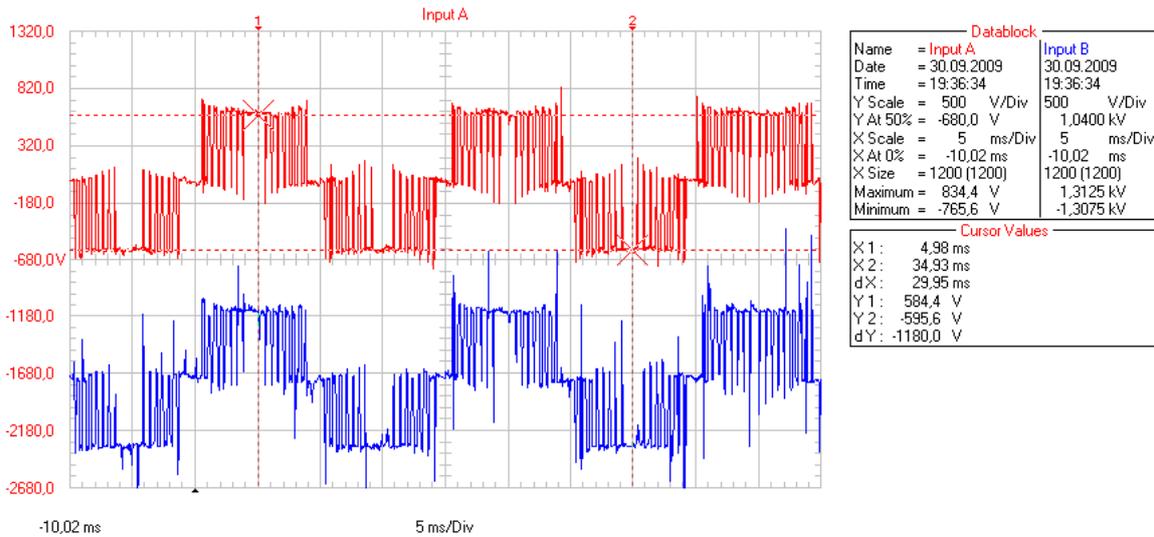
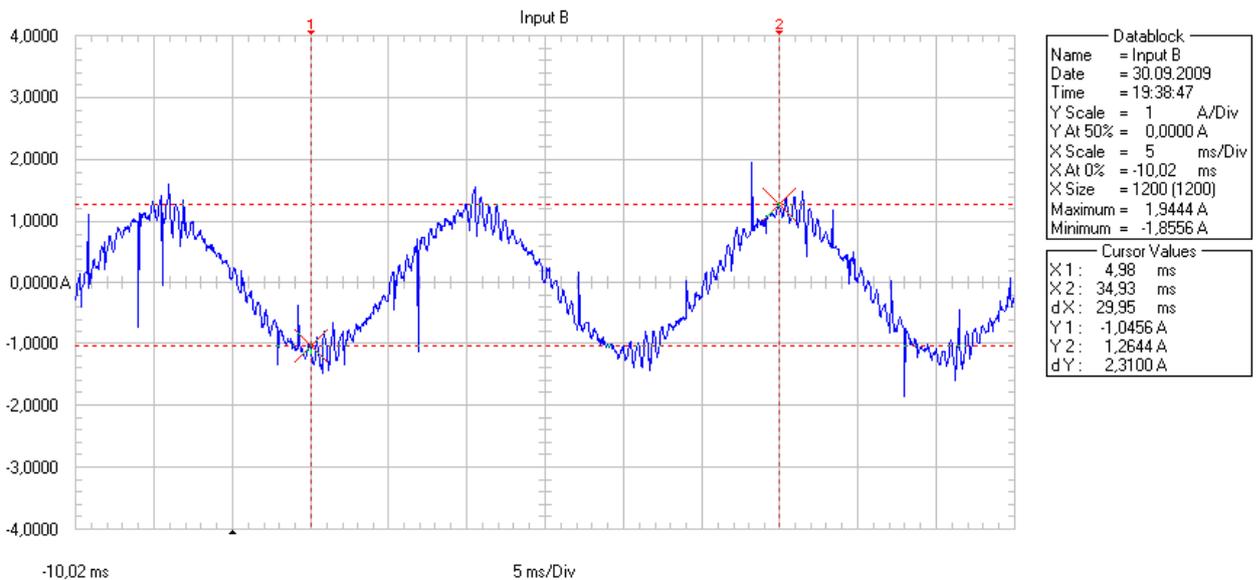


Рис.1. Структурная схема преобразователя частоты



Uinv&Umot 211m 2 kHz

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



Imot 211m 2kHz

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 $U_{peak}=1360В$ или $U_{peak} = 2.43U_{DC}$ для IGBT инвертора 400V, 50Гц для которого

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

Общепринято обозначение характеризующее импульс перенапряжения $pu=U_{peak}/U_{bus}$. 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 ($pu=2$) 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.

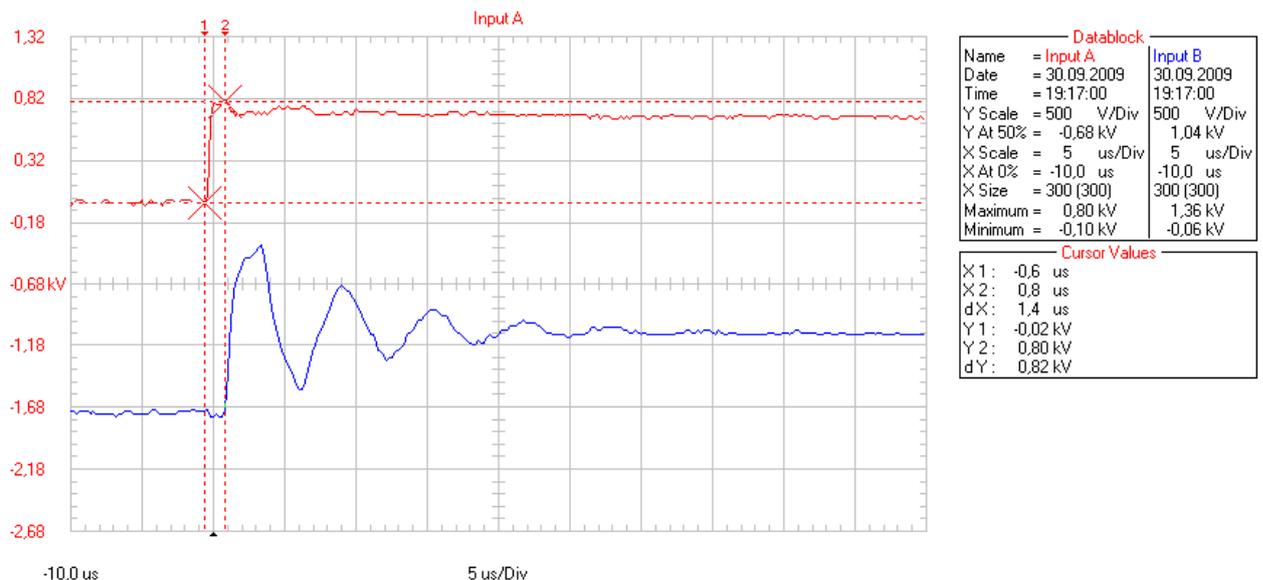


Рис. 4. Одиночный импульс выходного напряжения инвертора (верхняя осциллограмма) и напряжение на зажимах мотора (нижняя осциллограмма). Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

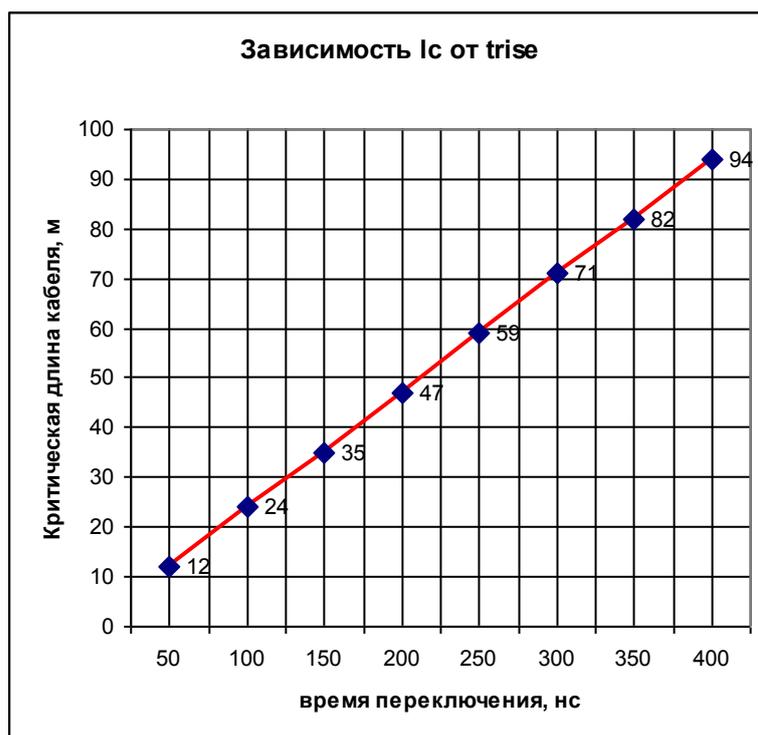


Рис. 5. Зависимость критической длины кабеля от времени нарастания напряжения на выходе инвертора

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 синус-фильтра типа **EF3LC**. С остальными способами можно ознакомиться в статьях ["Обуздание отраженной волны"](#), ["Дроссели du/dt"](#), ["Моторные дроссели"](#)

Синус-фильтр типа **EF3LC** компании Elhand Transformatory, Польша полностью снимает рассматриваемую проблему, создаваемую ШИМ инвертором. На рисунках 6, 7, 8 этот факт иллюстрируется. Уровень гармоник напряжения на зажимах двигателя удалось снизить до THDf=6,8%, KFact=7,70. Из оставшихся высших гармоник доминирует 20 (1000Гц). В спектре тока выделяются 3, 20 и 21 гармоники.

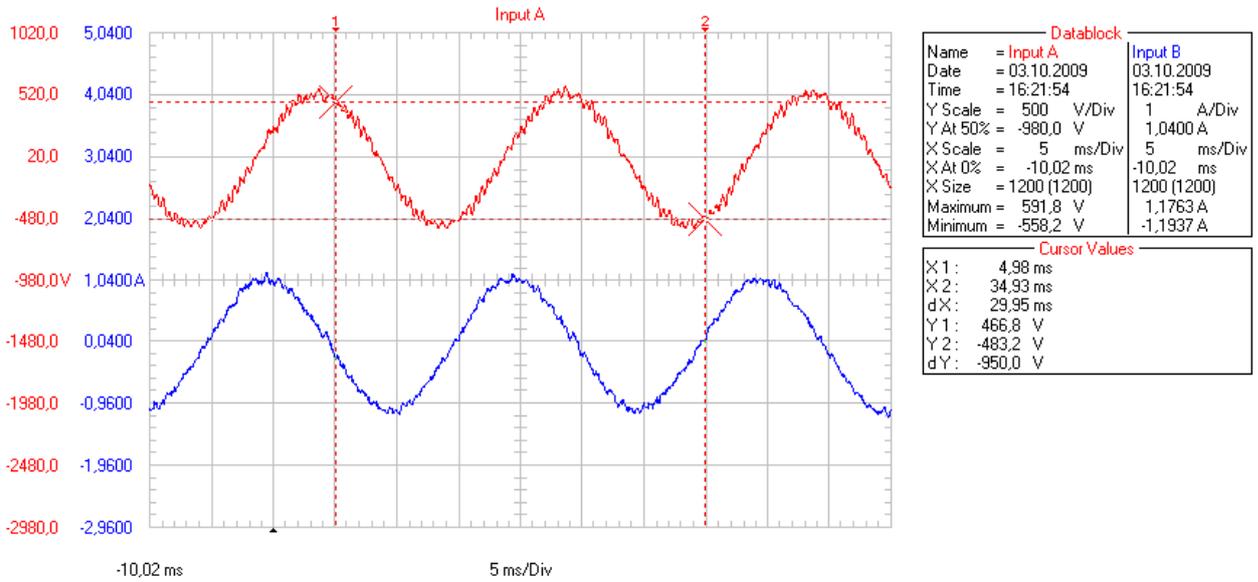


Рис. 6. Напряжение двигателя (верхняя осциллограмма) и ток двигателя(нижняя осциллограмма). Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

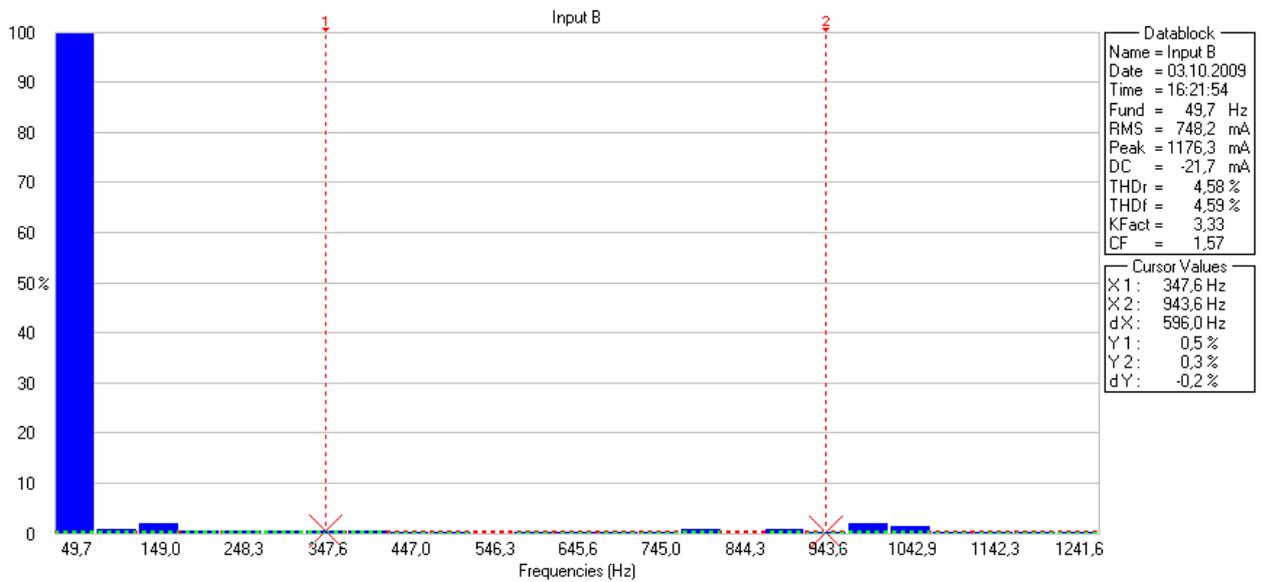


Рис. 7. Спектр тока двигателя. Синус фильтр типа ED3SIN30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

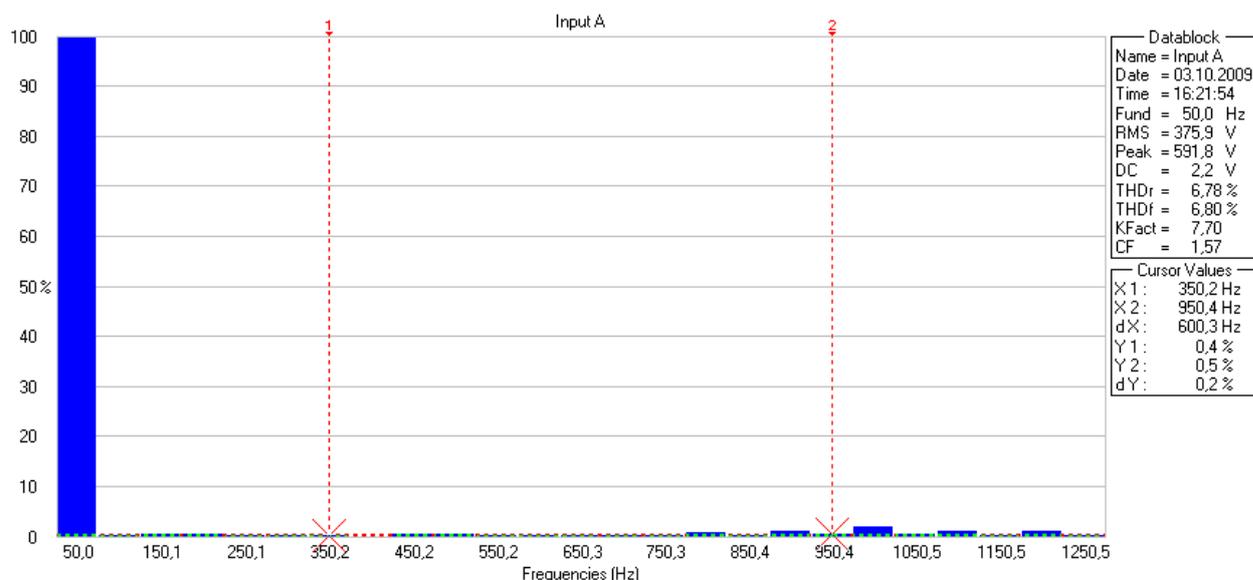
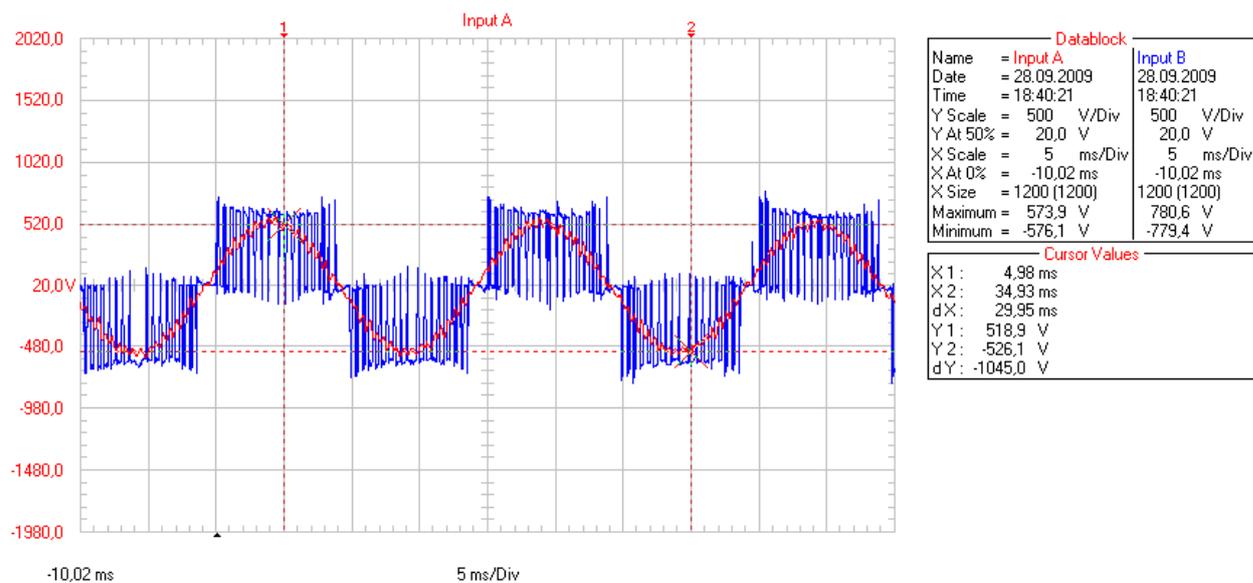


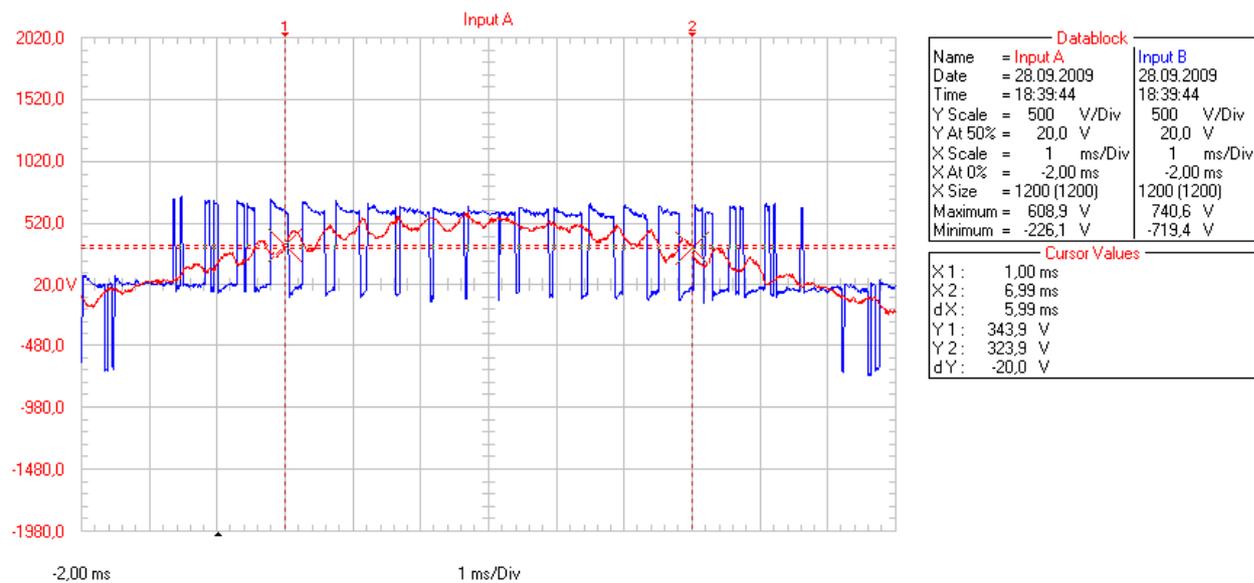
Рис. 8. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Синус фильтр типа ED3SIN30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

Форма напряжения на моторе- практически чистая синусоида рис. 9, 10.



Uinv & Umot

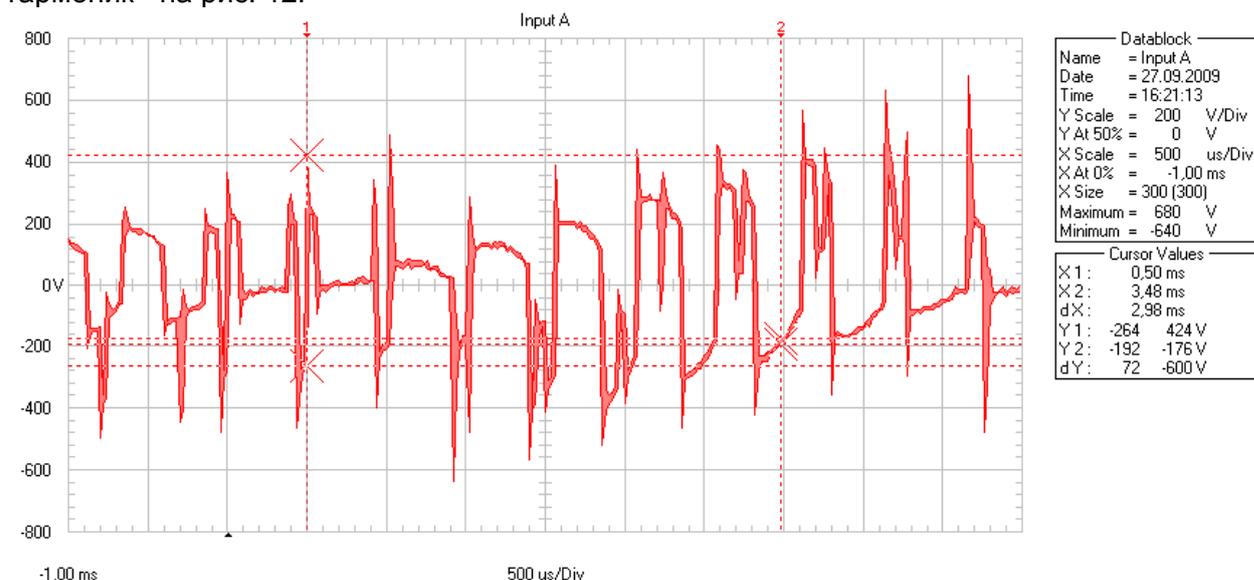
Рис. 9. Напряжение на обмотках двигателя (красная осциллограмма) и напряжение на выходе инвертора (синяя осциллограмма). Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м



Uinv & umot

Рис. 10. Напряжение на обмотках двигателя (красная осциллограмма) и напряжение на выходе инвертора (синяя осциллограмма). Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

Напряжение на одной из обмоток моторного дросселя показано на рис. 11. Спектр гармоник - на рис. 12.



Udr sin 2kHz 12m

Рис. 11. Напряжение на обмотке дросселя. Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м

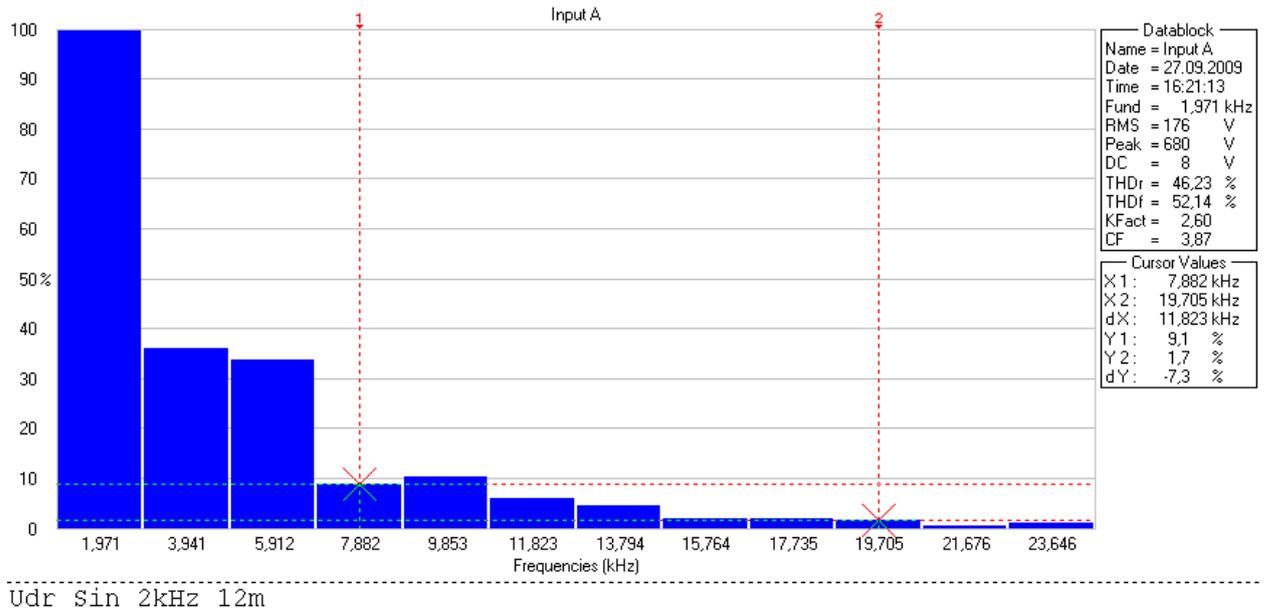


Рис. 12. Спектр напряжения на обмотке дросселя. Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м

Осциллограммы токов в линейном и фазном проводах конденсаторной группы показаны на рис. 13, 15. Спектры этих токов изображены на рис. 14, 16.

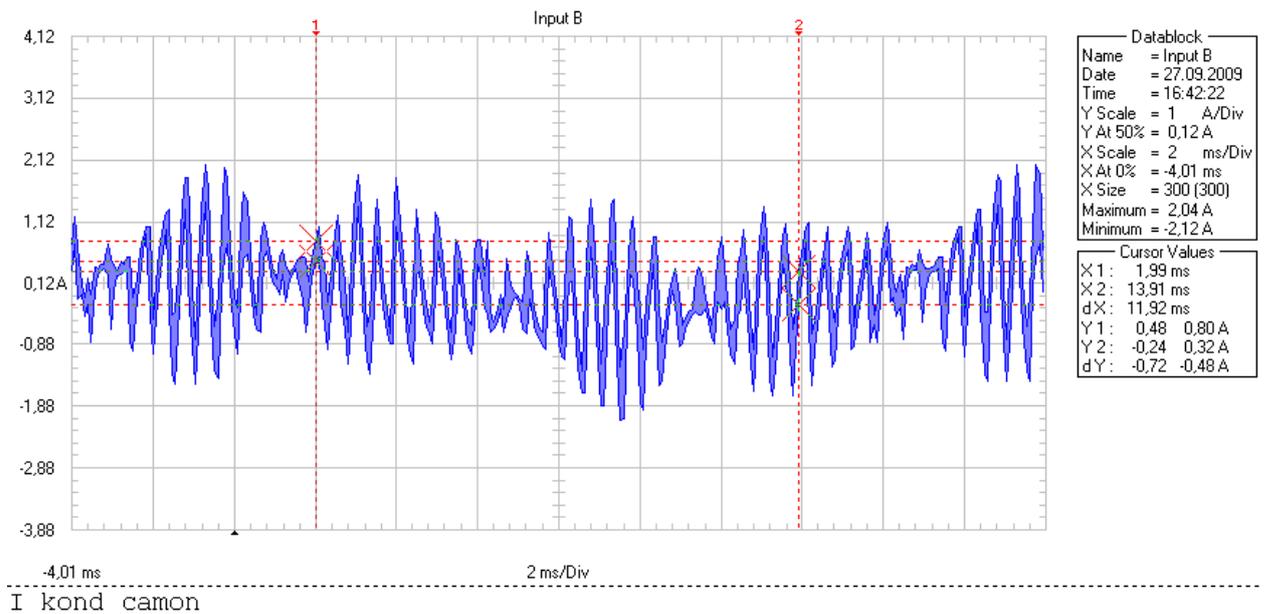
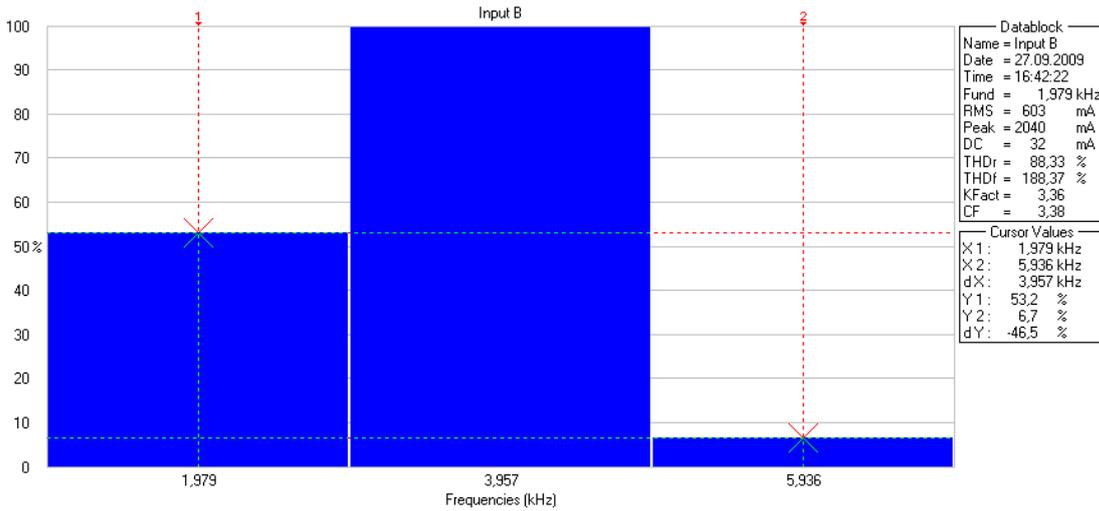
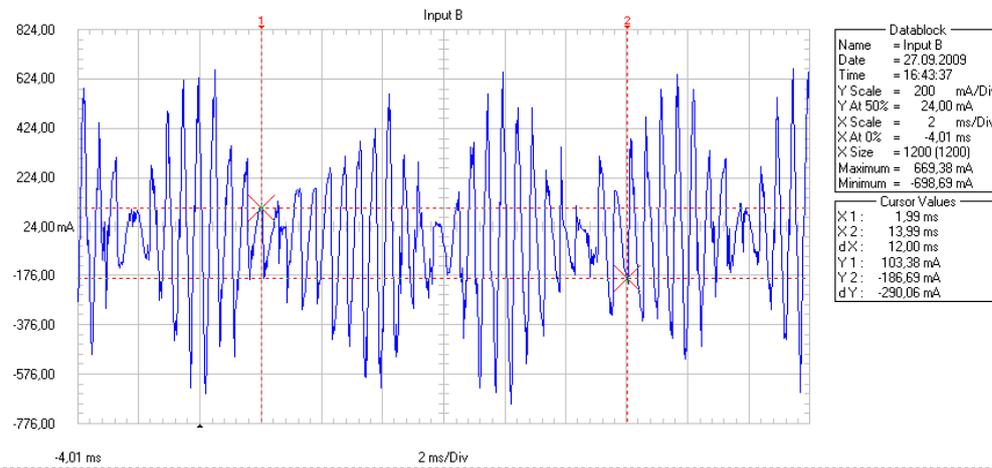


Рис. 13. Ток в линейном проводе конденсатора. Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м



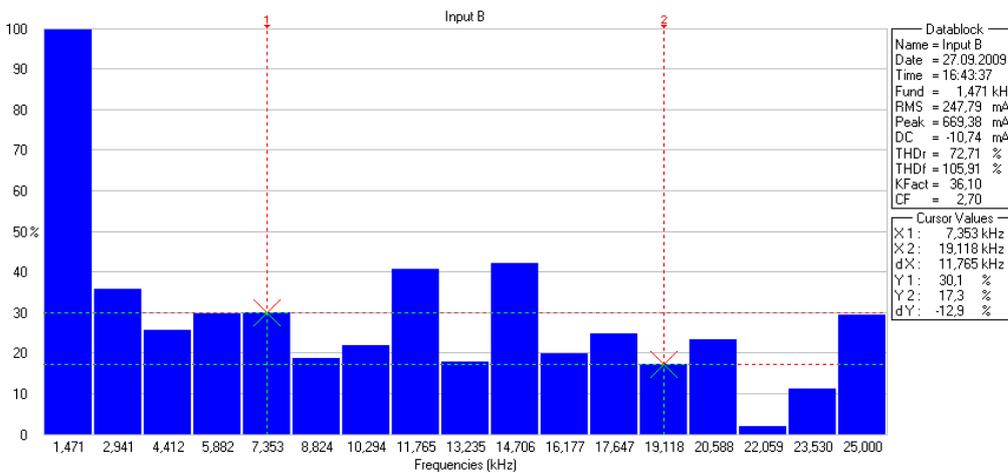
Ikond camon

Рис. 14. Спектр тока в линейном проводе конденсатора. Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м



Ikond D 2kHz 12m

Рис. 15. Ток в фазном проводе конденсатора. Синус фильтр типа EF3LC 30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м



Ikond D 2kHz 12m

Рис. 16. Спектр тока в фазном проводе конденсатора. Синус фильтр типа EF3LC

30/2,1/1,41 (30мГ, 2,1А, 1,41мкФ), инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 11м

При повышении частоты ШИМ до 5кГц снижает уровень гармоник напряжения и тока рис.9. Дальнейшее увеличение частоты ухудшает форму напряжения. Форма тока, при этом остается практически неизменной.

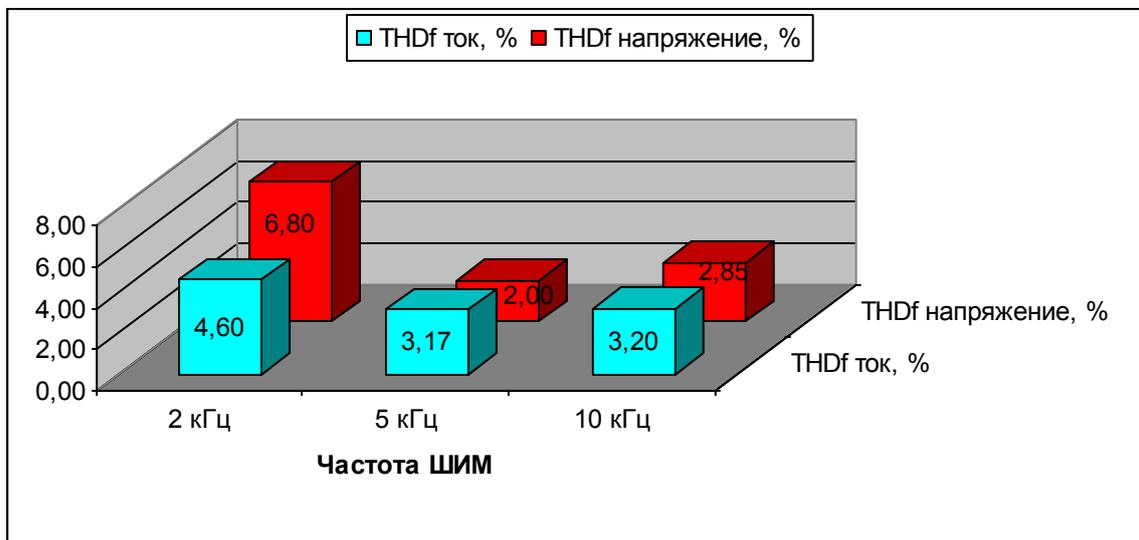


Рис. 17. Зависимости THDf тока и напряжения от частоты ШИМ. Двигатель 0,75 кВт, преобразователь частоты 0,75 кВт, синус фильтр на выходе.

ВЫВОДЫ

1. Существенное отличие волнового сопротивления кабеля от волнового сопротивления двигателя, прежде всего, ответственно за величину перенапряжения на зажимах двигателя.
2. Время нарастания импульса напряжения на выходе инвертора, определяет критическую длину кабеля.
3. 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.
4. Синус-фильтры существенно снижают уровень гармоник напряжения, делая практически идеальными синусоиды тока и напряжения. Синус фильтры рекомендуется применять при длинах кабелей более 200 м до 1000м и для 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