

## Дроссели du/dt

И. Морозов, ООО «ОПТИМА», Республика Беларусь [moroz@optima.by](mailto:moroz@optima.by)

**Ключевые слова:** ED3dU, Elhand, Элхэнд, Optima, Оптима, дроссель dv/dt, дроссель du/dt, AC-дроссель, 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 ШИМ (PWM) не формирует синусоидальное напряжение на выходе, а генерируют непрерывную последовательность импульсов синусоидальной ШИМ следующих с высокой частотой рис. 1., верхняя осциллограмма красного цвета рис. 2.

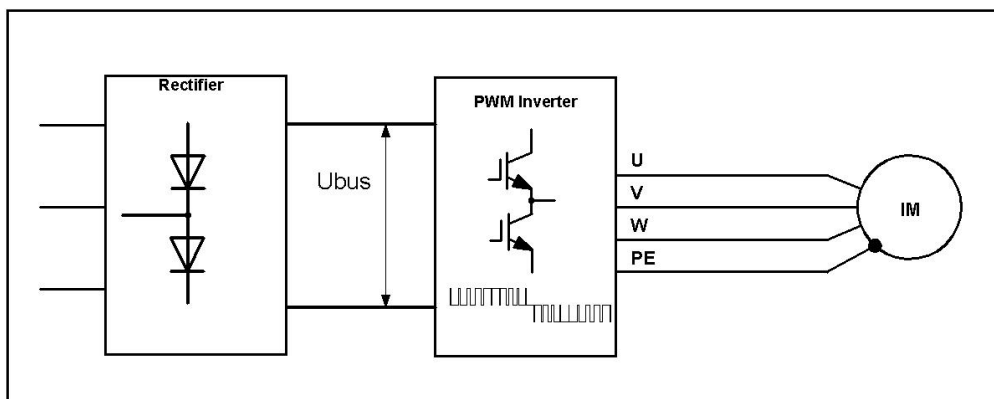
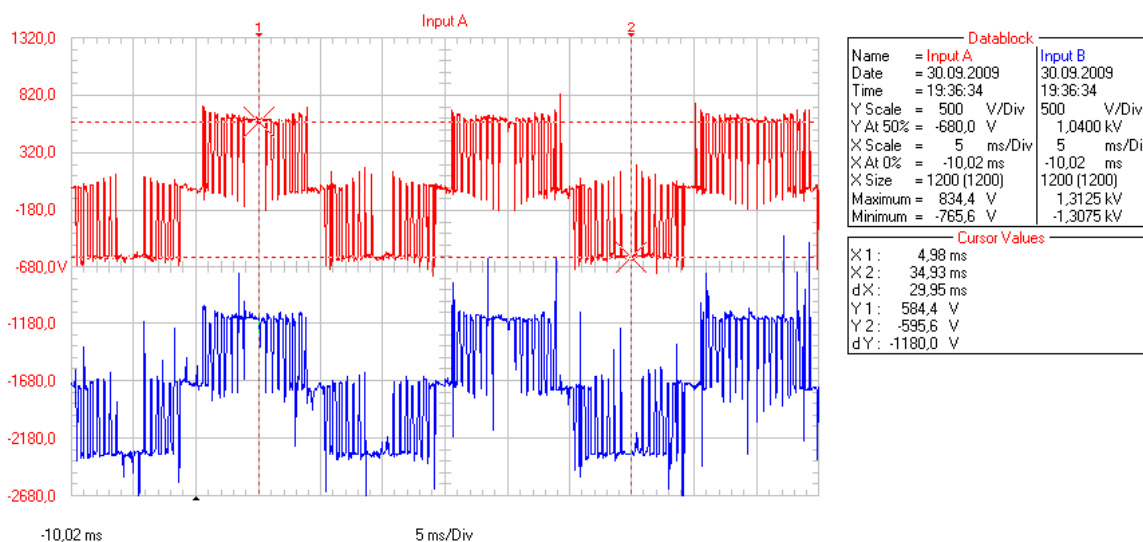


Рис.1. Структурная схема преобразователя частоты



U<sub>inv</sub> & U<sub>mot</sub> 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

Импульсы напряжения передаются к зажимам двигателя по моторному кабелю. Пиковое напряжение импульса на выходе инвертора равно величине напряжения в контуре постоянного напряжения преобразователя частоты (U<sub>bus</sub>). Амплитуда импульса напряжения на зажимах мотора не обязательно равна напряжению U<sub>bus</sub>, 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<sub>bus</sub>). Амплитуда импульса достигает **1313 В**, время нарастания напряжения при этом **1,2 мкс**. (допустимые значения для общепромышленного электродвигателя - **1000В, 2 мкс**). 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 еще заключается 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 называют "Эффектом длинной линии электропередачи", "Эффектом отраженной волны" или "Эффектом стоячей волны". На Рис. 3 показан одиночный импульс напряжения на зажимах двигателя, создавая неограниченную отраженную волну напряжения U<sub>peak</sub>=1360В или U<sub>peak</sub> =2.43U<sub>bus</sub> для IGBT инвертора 400V, 50Гц для которого

$$U_{bus} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{L1} = 2,34 U_{L1} = 2,34 * 231 \approx 54 IVDC$$

Общепринято обозначение характеризующее импульс перенапряжения  $\rho = U_{peak}/U_{bus}$ . Важно отметить, что переходные процессы с эффектом отраженной волны происходят в любом электроприводе, 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 ( $\rho=2$ ) 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. 4). Учитывая, что у современных ПЧ время нарастания импульса напряжения лежит в пределах 50-400нс критическая длина кабеля соответственно будет от 12 до 94 м.

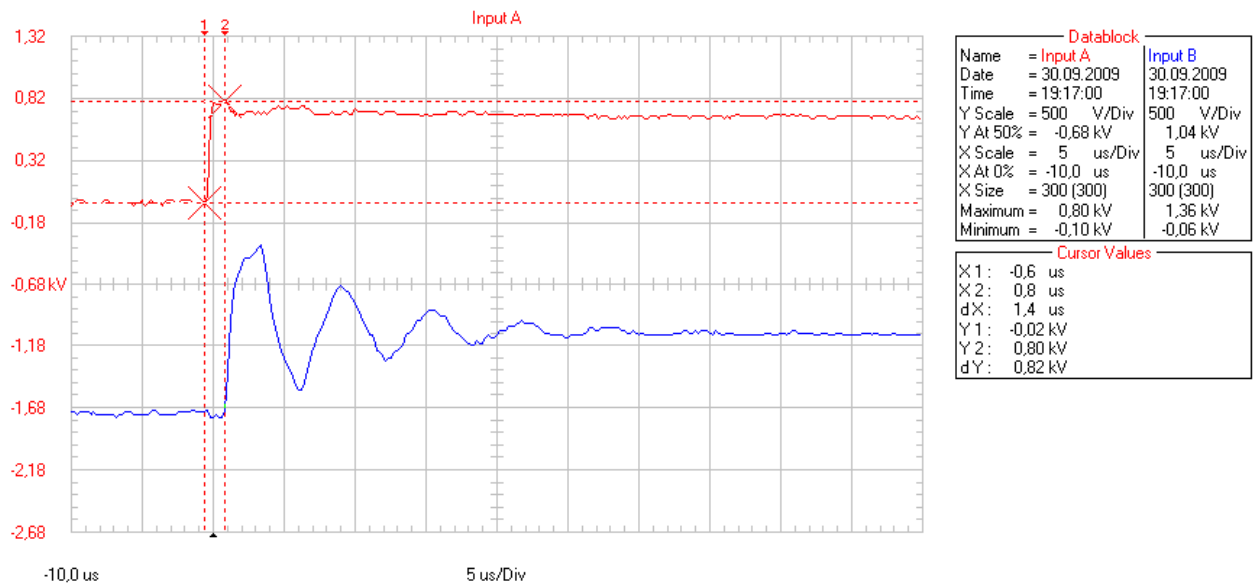


Рис. 3. Одиночный импульс выходного напряжения инвертора (верхняя осциллограмма) и напряжение на зажимах мотора (нижняя осциллограмма). Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

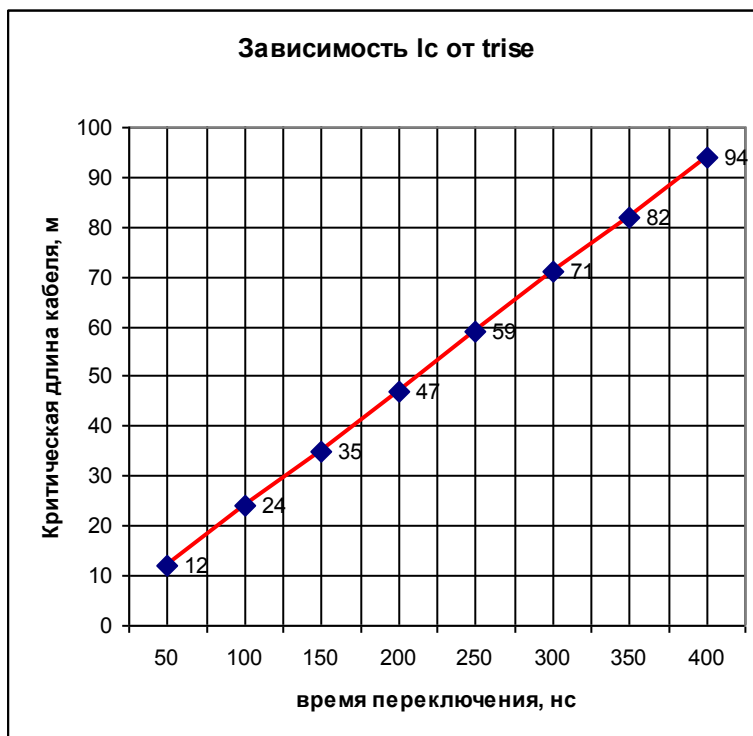


Рис. 4. Зависимость критической длины кабеля от времени нарастания напряжения на выходе инвертора

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

В данной работе рассматривается один из способов борьбы, а именно способ включения между преобразователем частоты и электродвигателем дросселя du/dt типа ED3dU. С остальными способами можно ознакомиться в статье ["Обуздание отраженной волны"](#)

Одной из разновидностей выходных дросселей является дроссель du/dt (типа ED3dU, производитель Elhand transformatory, Польша). Напряжение короткого замыкания дросселей du/dt составляет 0,7-1,0%. Причем меньшие величины относятся к большим мощностям. Дроссель du/dt подсоединяется к выходным клеммам ПЧ. На рис. 5. Изображены

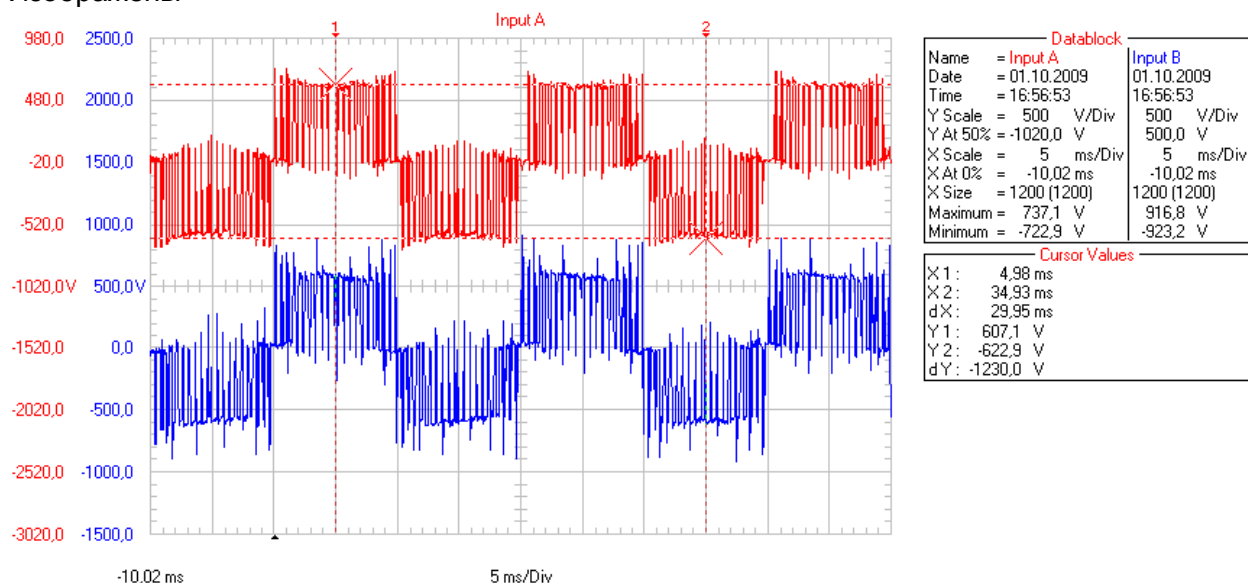
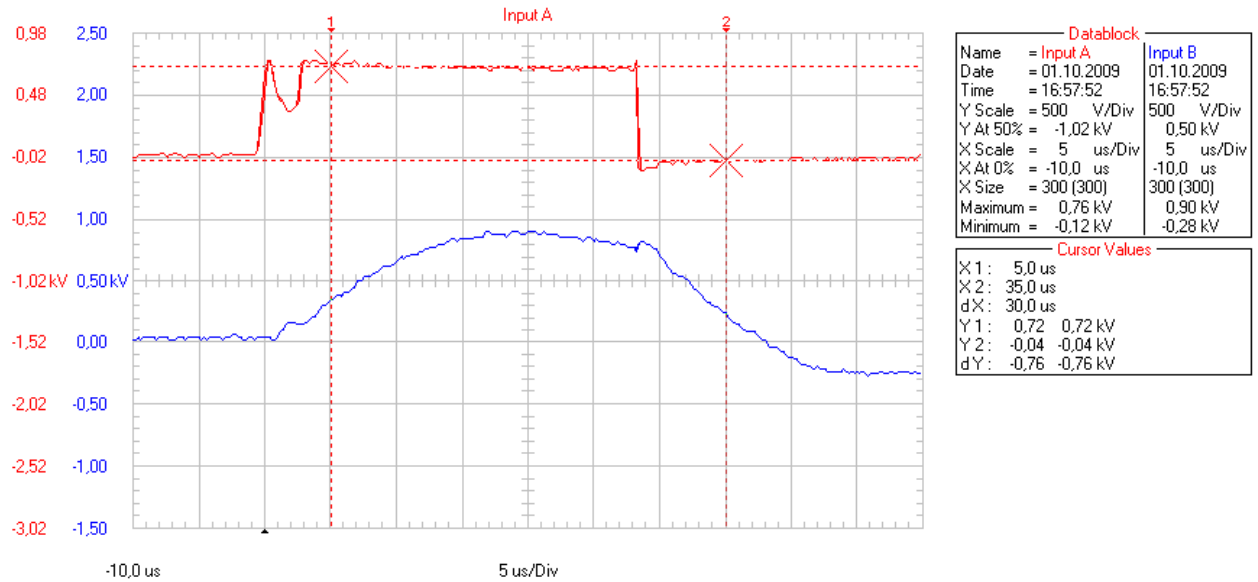


Рис.5. Напряжение на выходе инвертора и двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

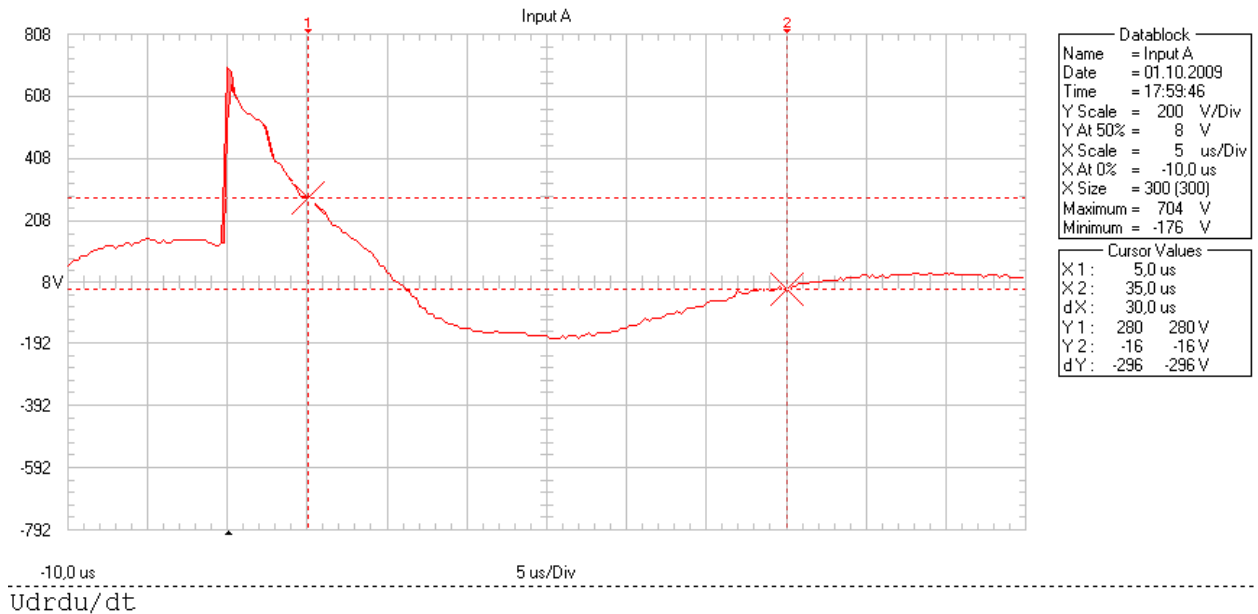
напряжение на выходе ПЧ и напряжение на зажимах двигателя. Амплитуда выбросов напряжения составляет 923В (допустимый импульс 1000В). На рис. 7 изображены одиночные импульсы на выходе инвертора и на зажимах двигателя. Скорость нарастания напряжения на зажимах двигателя составляет 20 мкс (допустимо 2 мкс). Сравнение рис. 3 (кабель 211 м, без дросселя) и рис.6 (кабель 211м, с дросселем du/dt) иллюстрирует эффективность работы дросселя.



**Рис. 6.** Одиночные импульсы напряжения на выходе инвертора и двигателя. Дроссель  $du/dt$  типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

Дроссель  $du/dt$  ограничивает амплитуду и время нарастания импульса напряжения до допустимых NEMA MG1 part 30 величин, а следовательно появляется возможность использовать преобразователь частоты для работы совместно с общепромышленным электродвигателем.

На рис.8. изображен единственный импульс падения напряжения на одной из обмоток дросселя  $du/dt$ . Изображение показывает качество работы дросселя на высоких частотах.



**Рис. 7.** Одиночный импульс напряжения на одной из обмоток дросселя  $du/dt$  типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А), длина кабеля 211м

На рис. 9. изображены осциллограммы напряжения и тока двигателя. На рис. 10, 11 спектры тока и напряжения.

Уровень высших гармоник при использовании дросселя *ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)* несколько ниже, чем в схемах без дросселя, но в целом достаточно высок. В спектре напряжения и тока присутствуют как четные, так и нечетные гармонические составляющие. Наиболее сильными в спектре являются 7, 11, 14, 17, 21, 23, 40 гармоники. Поэтому основным предназначение дросселей *du/dt* является ограничение параметров импульсов напряжения на обмотках статора электродвигателя до допустимых значений (1000В, 2мкс). При использовании дросселей *du/dt* компании *Elhand transformatory* длину моторного кабеля можно увеличить до 200м при питании общепромышленного асинхронного двигателя от ПЧ. Учитывая тенденции к уменьшению времени нарастания напряжения, а также то, что производители ПЧ не приводят в технической документации этого ключевого параметра, рекомендуется оснащать дросселями *du/dt* частотно регулируемые системы управления при длине моторного кабеля более 12м (см. рис. 4).

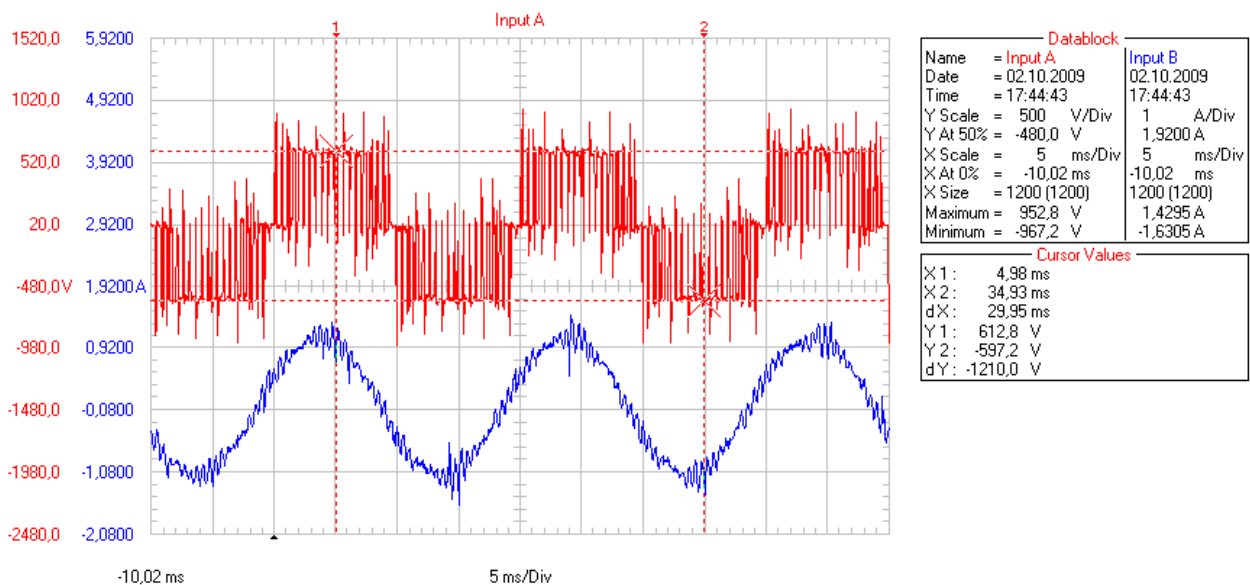


Рис.9. Напряжение на зажимах двигателя и ток двигателя. Дроссель *du/dt* типа *ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)* на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

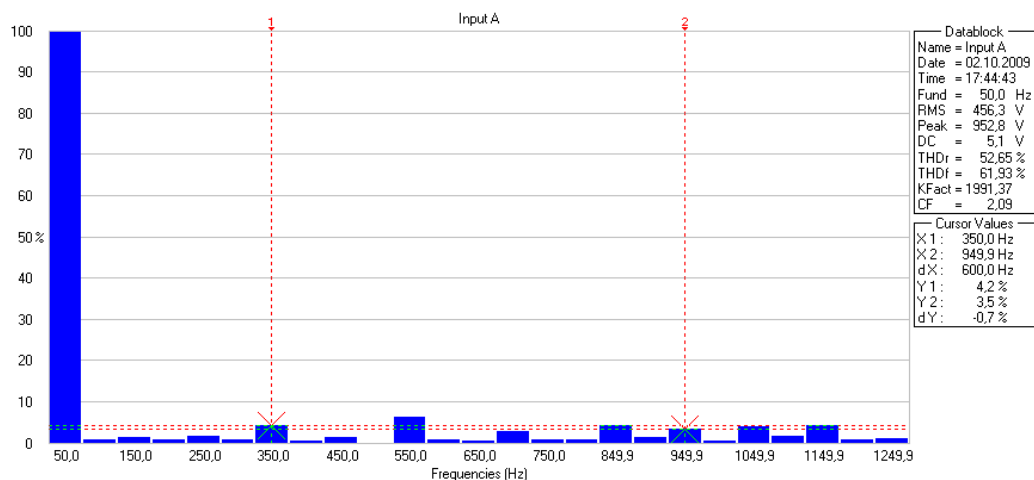


Рис. 10. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Дроссель *du/dt* типа *ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)*. Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

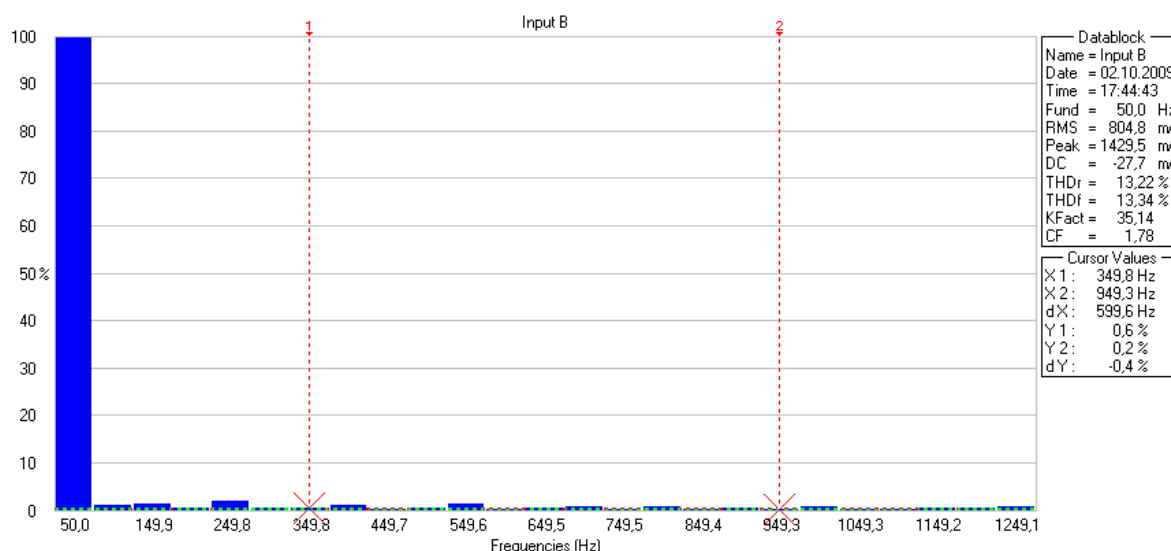


Рис. 11. Спектр тока двигателя. Дроссель  $du/dt$  типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

## ВЫВОДЫ

1. Рассогласование волнового сопротивления кабеля и 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. Основное предназначение дросселей  $du/dt$  это ограничение параметров импульсов напряжения до допустимых значений (1000В, 2мкс). При использовании дросселей  $du/dt$  компании Elhand transformatorу длину моторного кабеля можно увеличить до 200м при питании общепромышленного асинхронного двигателя от ПЧ. Это самый экономичный способ борьбы с эффектом отраженной волны.

## 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