ОБУЗДАНИЕ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ

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

Ключевые слова: моторный дроссель, дроссель dv/dt, дроссель du/dt, AC-дроссель, Elhand, синус фильтр, защита двигателя от перенапряжения, длина моторного кабеля, частота ШИМ, преобразователь частоты, инвертор.

Аннотация: 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 снижаются потери энергии при переключениях ключей, и появляется возможность увеличивать частоту ШИМ до 20 кГц, а это в свою очередь снижает уровень высших гармоник в выходном токе. Однако, как часто это бывает, улучшая одни параметры, мы ухудшаем другие и поэтому использование преобразователей частоты на IGBT транзисторах требует большой осторожности при выборе двигателей, моторных кабелей и дополнительного оборудования защищающего их. Электроприводы на базе IGBT транзисторов имеют более быстрое время нарастания выходного напряжения (50-400нс), по сравнению с силовыми ключами, используемыми ранее, например, у BJT 400-2000нс; у GTO 2000-4000нс, которое существенно увеличивает, при определенных условиях, разрушающее воздействие на изоляцию двигателя и силового моторного кабеля. Время нарастания напряжения на зажимах мотора теперь имеет большее влияние на переходный процесс, заставляя учитывать явление отраженной волны и его отрицательное влияние на изоляцию двигателя и кабеля.

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

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]*

I. Явление отраженной волны

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

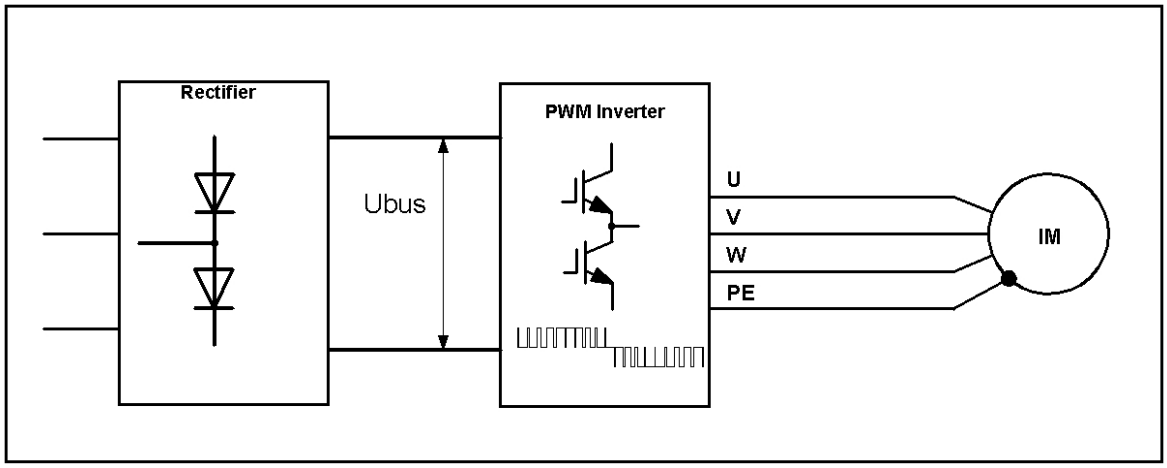
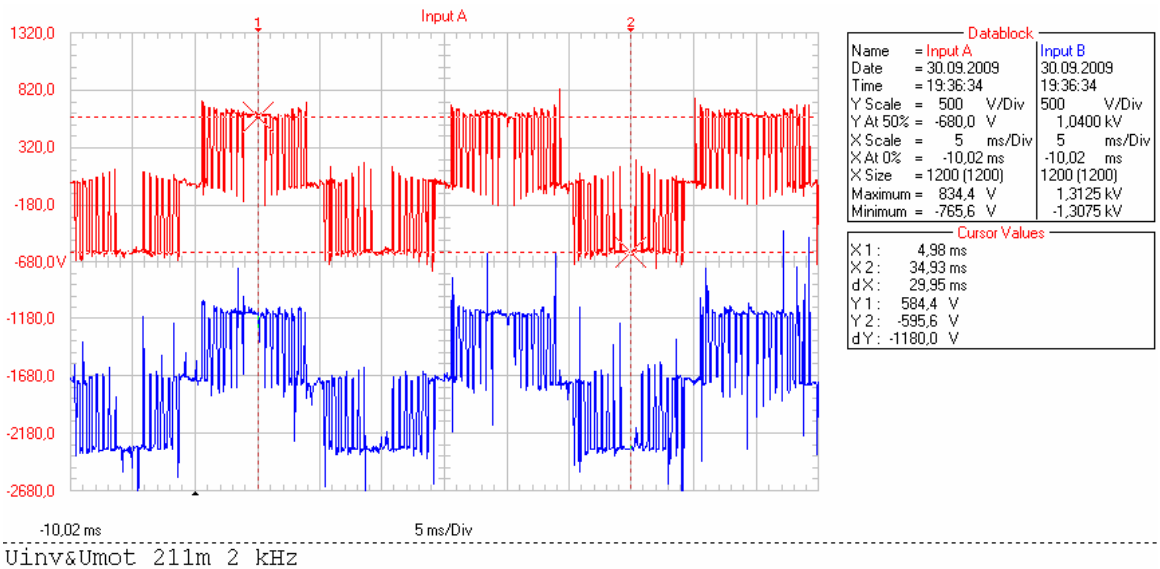


Рис.1. Структурная схема преобразователя частоты

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.



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

Импульсы напряжения передаются к зажимам двигателя по моторному кабелю. Пиковое напряжение импульса на выходе инвертора равно величине напряжения в контуре постоянного напряжения преобразователя частоты (Ubus). Время нарастания импульса напряжения и время его спада определяется типом выходных ключей GTO, BJT или IGBT который используется в инверторе напряжения [3].

Амплитуда импульса напряжения на зажимах мотора не обязательно равна напряжению Ubus, она зависит от динамических свойств цепи инвертор-кабель-мотор определенными временем нарастания выходного напряжения инвертора, параметрами кабельной линии, длиной кабеля, и параметрами электродвигателя.

На нижней осциллограмме рис.2 показана последовательность импульсов на зажимах мотора, в каждой точке переключения видны кратковременные пики напряжения, существенно превышающие напряжение в контуре постоянного напряжения (Ubus). Эти импульсы напряжения, следующие с высокой частотой, могут производить деструктивное воздействие на изоляцию двигателя.

Это явление выбросов напряжения иногда 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 Upeak=1360В или Upeak =2.43pu для IGBT инвертора 400V, 50Гц для которого

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

Общепринято обозначение характеризующее импульс перенапряжения pu=Upeak/Ubus.

Переходные процессы с влиянием 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 (pu=2) возможно на всех двигателях переменного тока при некоторой критической длине моторного кабеля независимо от типа переключающего ключа, используемого в

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

инверторе. Просто эта проблема обострилась с появлением на рынке IGBT транзисторов с очень малым временем переключения, так как критическая длина кабеля существенно снизилась до величин, которые чаще всего используются на практике.

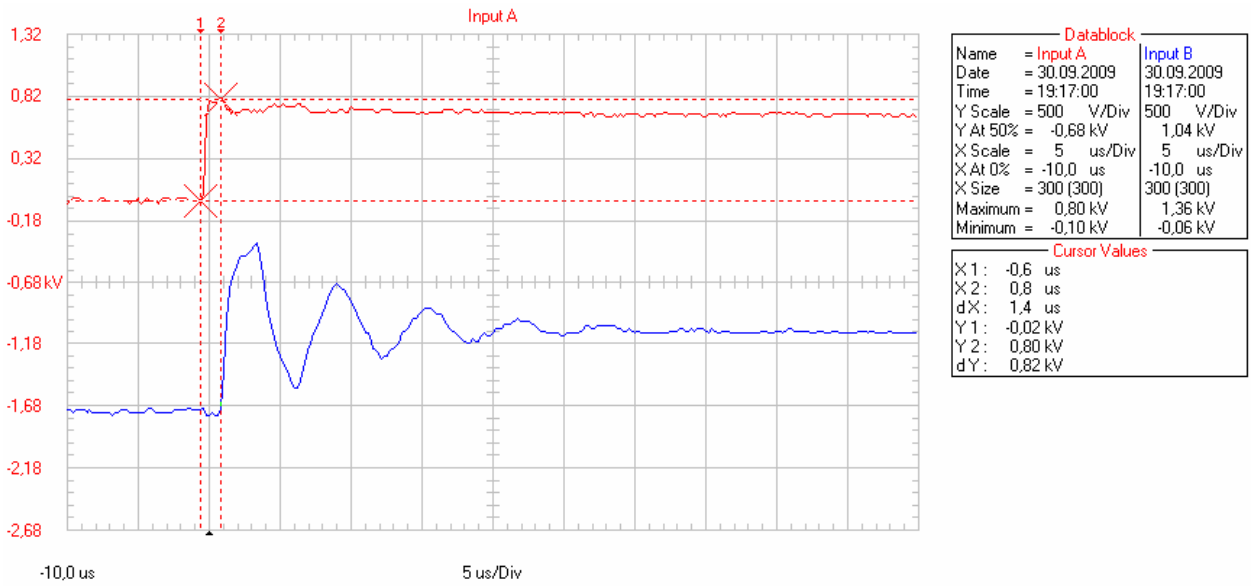


Рис. 3. Одиночный импульс выходного напряжения инвертора (верхняя осциллограмма) и напряжение на зажимах мотора (нижняя осциллограмма). Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

Для того, чтобы понять проблему являющуюся следствием эффекта отраженной волны нужно воспользоваться теорией электрических цепей в части цепей с распределенными параметрами.

Электрические цепи с распределенными параметрами

Рассматривая электромагнитные процессы, происходящие в электрических (длинных) линиях, с помощью которых электрическая энергия или импульсные сигналы передаются на расстояние, необходимо иметь в виду, что магнитное и электрическое поля распределены по всей длине и превращение электромагнитной энергии в теплоту также происходит по всей длине линии. Таким образом, линия является цепью с распределенными параметрами [6]. Магнитный поток, который сцепляется с контуром тока, образуемым токоведущими проводниками, определяет индуктивность цепи. Емкость между проводами, а также емкости этих проводов по отношению к земле и другим соседним проводам определяют емкость цепи. Тепловые потери в проводах с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости обусловливают продольное активное сопротивление цепи. Наконец, несовершенство изоляции (проводимость изоляции и диэлектрические потери, возникающие в ней) определяет поперечную активную проводимость цепи.

Основываясь на теории длинных линий, считая, что длинная линия не имеет потерь $(r_0 \approx 0\ ;\ g_0 \approx 0)$, схема замещения рис. 4., напряжение на зажимах двигателя можно определить с помощью (1)

$$U_{mot} = (1+\Gamma)\, U_{bus} \qquad (1)$$

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

$$\Gamma = \frac{Z_{mot} - Z_0}{Z_{mot} + Z_0} \qquad (2)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \qquad (3)$$

Где

U_{mot} - напряжение на зажимах мотора;

U_{bus} - напряжение в контуре постоянного напряжения инвертора;

Γ - коэффициент отражения;

Z_{mot} - волновое сопротивление двигателя;

Z_0 - волновое сопротивление кабеля;

L_0 - индуктивность кабельной линии;

C_0 - емкость кабельной линии;

Коэффициент отражения может принимать значения $0 < \Gamma \leq 1.0$

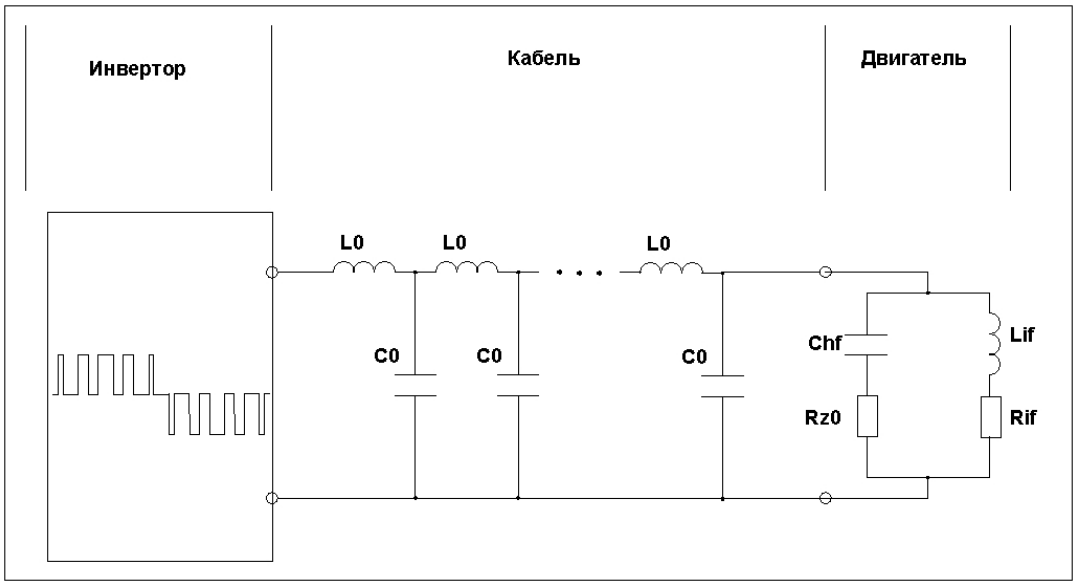


Рис. 4. Схема замещения кабельной линии и асинхронного двигателя

Кабель представляет однозначно измеряемое волновое сопротивление Zo посланной бегущей волне и определяется (3), зависит от индуктивности (L0) и емкости (C0) на единицу длины кабеля.

Параметры кабелей L0 и C0 меняются в зависимости от ассортимента проводов и конструкции кабеля, Z0≈80-180 Ом.

Волновое сопротивление асинхронного двигателя Zmot импульсам с быстрыми нарастающими фронтами нелегко измерить. Понимание того, как рассчитать волновое сопротивление двигателя не дает классическая схема замещения асинхронного двигателя. Требуется высокочастотная схема замещения асинхронного двигателя, Рис. 4. которая учитывает паразитные реактансы мотора [7]. Параметры Chf и Rz0 определяют высокочастотную составляющую модели двигателя; Lif и Rif – низкочастотную.

Экспериментальные результаты показывают, что для двигателя мощностью < 3,7кВт, волновое сопротивление составляет 2000-5000 Ом, у моторов 90кВт волновое сопротивление около 800 Ом, в то время как у двигателей 350кВт волновое сопротивление равно около 400 Ом.

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

Если волновое сопротивление кабеля не согласовано с волновым сопротивлением двигателя, отраженная волна напряжения будет присутствовать на зажимах двигателя. Подстановка Zmot и Zo в (2) дает *Г*≈0,95 для двигателей <3,7кВт, *Г*≈0,82 для двигателей 95кВт и *Г*≈0,6 для двигателей 350кВт. Теоретически импульс напряжения отраженной волны, исходя из (1), равен 1.95 pu для маломощных двигателей, 1.85 pu для двигателей средней мощности и 1.6 pu для мощных двигателей. Следует заметить, что мощные двигатели на практике подключаются кабелями соединенными параллельно, такое подключение дает снижение волнового сопротивления кабеля Z0, увеличивая коэффициент отражения до 0.9, и теоретически увеличивая перенапряжение до 1,9pu.

Факторами, влияющими на величину отраженной волны, являются [4]:

Волновое сопротивление кабеля и двигателя;

Нагрузка двигателя;

Длина кабеля;

Величина импульса напряжения на выходе инвертора;

Время нарастания импульса напряжения инвертора;

Частота импульсов ШИМ.

Рассогласование волнового сопротивления кабеля и волнового сопротивления двигателя, прежде всего, ответственно за величину перенапряжения на зажимах двигателя.

Время нарастания импульса напряжения на выходе инвертора, определяет критическую длину кабеля l_c, при которой теоретически можно рассчитать величину импульса напряжения по (1) . Если длина кабеля $< l_c$, то соответственно pu меньше чем рассчитанное по (1).

При длине кабеля $> l_c$ импульсы перенапряжения могут быть больше, чем рассчитанные по (1). Это связано с тем, что в модуляционном цикле ШИМ есть определенные участки, которые в комбинации с длиной кабеля могут привести к перенапряжению на зажимах мотора, больших чем теоретические 2 pu и достигать величин 3 - 4 pu. [5]. Такие участки ШИМ в литературе называют Double Pulsing (Двойная пульсация).

Вычислим критическую длину кабеля, используя анализ стоячей волны.

$$f_e = \frac{1}{\pi t_{rise}} \quad [\text{Гц}] \quad (4);$$

$$\lambda = \frac{c}{f_e} \quad [\text{м}] \quad (5);$$

$$l_c = 235{,}55(t_{rise}\, in\, \mu s) \quad [\text{м}] \quad (6),$$

где

f_e - частота синусоидального напряжения эквивалентная времени нарастания импульса напряжения;

c - скорость света $3\ x10^8$ м/с;

λ - длина волны;

l_c - критическая длина кабеля равная $\lambda/4$, когда импульс перенапряжения равен 2pu.

Напряжение на зажимах мотора увеличивается от 1.0 pu на выходе инвертора до 2 pu на зажимах двигателя при длине кабеля равной критической. На Рис. 5

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

изображена расчетная зависимость критической длины кабеля от времени нарастания напряжения на выходе инвертора. Для IGBT инверторов с временем нарастания в пределах 50-400 нс критическая длина кабеля не превышает 100 м. Напомним, что напряжение на зажимах статора, при этом будет равна 2pu (1120В для инвертора 400В, 50Гц). Учитывая тенденцию к уменьшению времени нарастания очевидна острота проблемы, при времени нарастания 50 нс, критическая длина кабеля снижается до 12 м., то есть уже при 12 метровом моторном кабеле возможны двукратные импульсы перенапряжения 1120В при допустимом уровне 1000В.

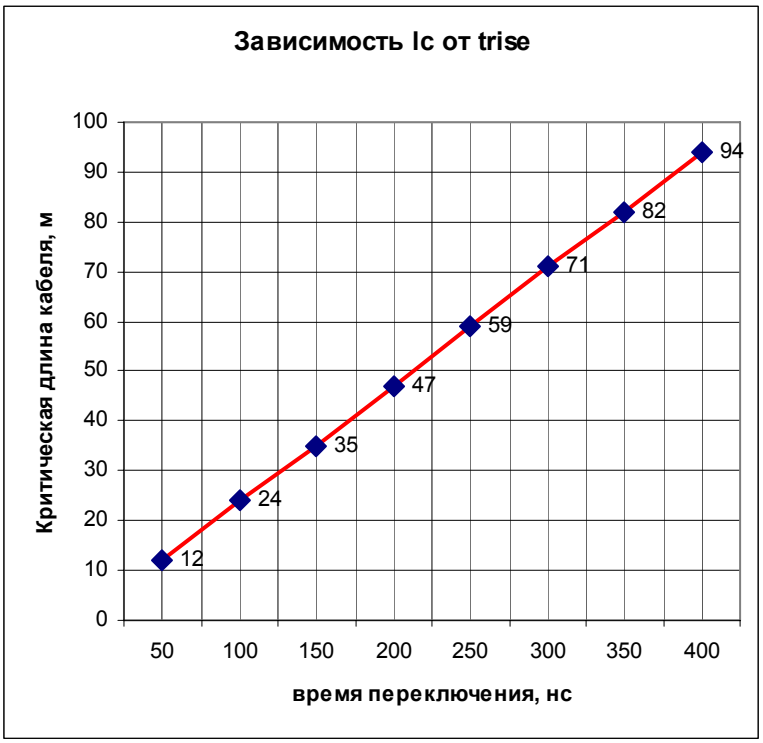


Рис. 5. Зависимость критической длины кабеля от времени нарастания напряжения на выходе инвертора

II. Способы борьбы с перенапряжением на зажимах двигателей вызванных эффектом отраженной волны

Есть четыре способа борьбы с перенапряжениями вызванными явлением отраженной волны:

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

1. Выбор линейного напряжения

Как отмечалось ранее, у маломощных двигателей коэффициент pu≈2, так как волновое сопротивление малых двигателей велико. Следовательно, их изоляция более всего подвержена отрицательному воздействию эффекта отраженной волны. Ситуация усугубляется тем, что у ПЧ малой мощности частота ШИМ максимальная (например для ПЧ VF-PS1, Toshiba: 0,75-15 кВт – 12кГц; 18,5-75

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

кВт – 4,0кГц; 90-630кВт – 2,5кГц), и, следовательно, количество импульсов перенапряжения в единицу времени также максимально. Поэтому, снизив входное линейное напряжение до 240В в трехфазных моделях ПЧ напряжение в контуре постоянного напряжения Ubus=325В, и, следовательно, при pu=2 импульс перенапряжения составит 650В. А значит, при данном решении можно использовать общепромышленные двигатели. Это решение требует дополнительных затрат так как подразумевает установку понижающего трансформатора 400//240В. Эффективным способом снижения напряжения Ubus является использование однофазных, по входному напряжению, инверторов. Основные игроки на рынке преобразователей частоты Toshiba, Allen Bradley, ABB, Hitachi, Mitsubishi, Fuji, INVT и другие выпускают однофазные преобразователи в диапазоне мощностей 0,25-2,2 кВт. Напряжение Ubus для однофазных инверторов составляет 216В, 2pu, соответственно 432В.

2. Выбор двигателя предназначенного для работы с преобразователем частоты

У частотных преобразователей с напряжением питания 400В напряжение Ubus=540В, следовательно, импульсы перенапряжения могут достигать примерно 1100В (при pu=2) напряжение импульса у специальных двигателей ограничено значением 1600В (*NEMA MG1 part 31).* Поэтому при использовании специального двигателя длина кабеля теоретически неограниченна, при условии, что pu<3. Стоимость специальных двигателей существенно выше чем общепромышленных, поэтому их использование должно быть экономически обосновано.

3. Ограничение длины моторного кабеля

Ограничение длины моторного кабеля является эффективным методом защиты двигателя. Если это возможно, то установка оборудования должна быть запроектирована таким образом, чтобы длина моторного кабеля была минимальной. С уменьшением времени нарастания напряжения на выходе IGBT инвертора это решение становиться трудно реализуемым.

4. Установка дополнительного оборудования

Основная масса преобразователей частоты в восточной Европе устанавливаются с целью энергосбережения на двигатели общепромышленного назначения, которые работают на производствах десятки лет. Расстояния от преобразователя частоты до двигателя часто бывает более 50 метров, так как ПЧ как правило устанавливаются в электрощитовой. В этой ситуации необходимо найти способ борьбы с явлением отраженной волны. Установка дросселей и фильтров на выходе преобразователей частоты это эффективный способ ограничения пиков напряжения допустимыми параметрами (1000В, 2мкс). Кроме ограничения параметров импульсов напряжения выходные устройства призваны снижать уровень гармоник напряжения и тока, подводимых к зажимам двигателя, поэтому ниже рассмотрены и эти аспекты.

Выходные устройства можно подразделить на:

1. Дроссели du/dt ;
2. Моторные дроссели;
3. Синус фильтры;
4. Фильтры, подключаемые к зажимам двигателя.

В этой статье освещены первые три устройства.

Несмотря на то, что дополнительные устройства несколько увеличивают стоимость внедрения преобразователя частоты, они будут, в конечном счете, защищать двигатель, исключив выход из строя двигателя и потерю

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

дорогостоящего времени простоя, а в некоторых случаях, например во взрывоопасных помещениях снизят вероятность возникновения аварии.

III. Устройства защиты от перенапряжения

Установка дополнительной индуктивности на выходе инвертора воздействует на каждый импульс перенапряжения, изменяя его в менее деструктивную форму с более медленным временем нарастания напряжения и возможно сниженной амплитудой. Резонансная частота цепи благодаря индуктивности, существенно снижается в соответствии с (7).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{reactor} C_{cable}}} \qquad (7)$$

Новая цепь увеличивает время нарастания напряжения, эффективно ограничивает амплитуду импульса перенапряжения на зажимах двигателя и увеличивает критическую длину моторного кабеля. Более медленное время нарастания снижает деструктивное влияние импульсов перенапряжения на изоляцию двигателя.

1. Дроссели du/dt

Одной из разновидностей выходных дросселей является дроссель du/dt (типа ED3dU-***/***, производитель Elhand transformatory, Польша). Напряжение короткого замыкание дросселей du/dt составляет 0,7-1,0%. Причем меньшие величины относятся к большим мощностям. Дроссель du/dt подсоединяется к клеммам инвертора или если это возможно к клеммам двигателя. На рис. 6. Изображены

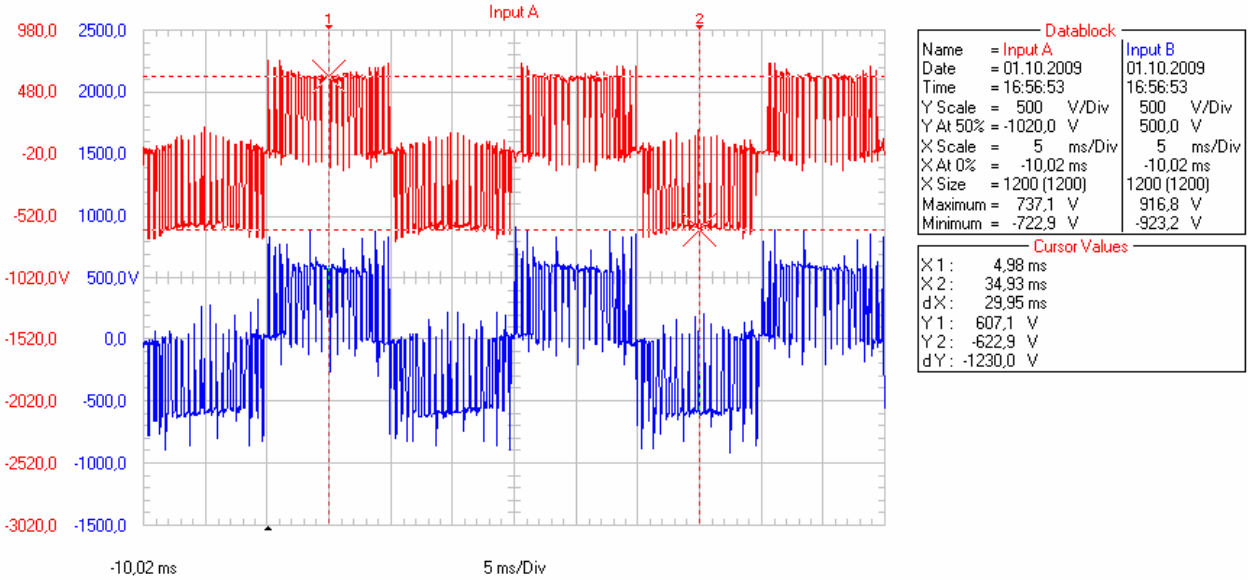


Рис.6. Напряжение на выходе инвертора и двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

напряжение на выходе инвертора 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.7 (кабель

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

211м, с дросселем du/dt) иллюстрирует эффективность работы дросселя.

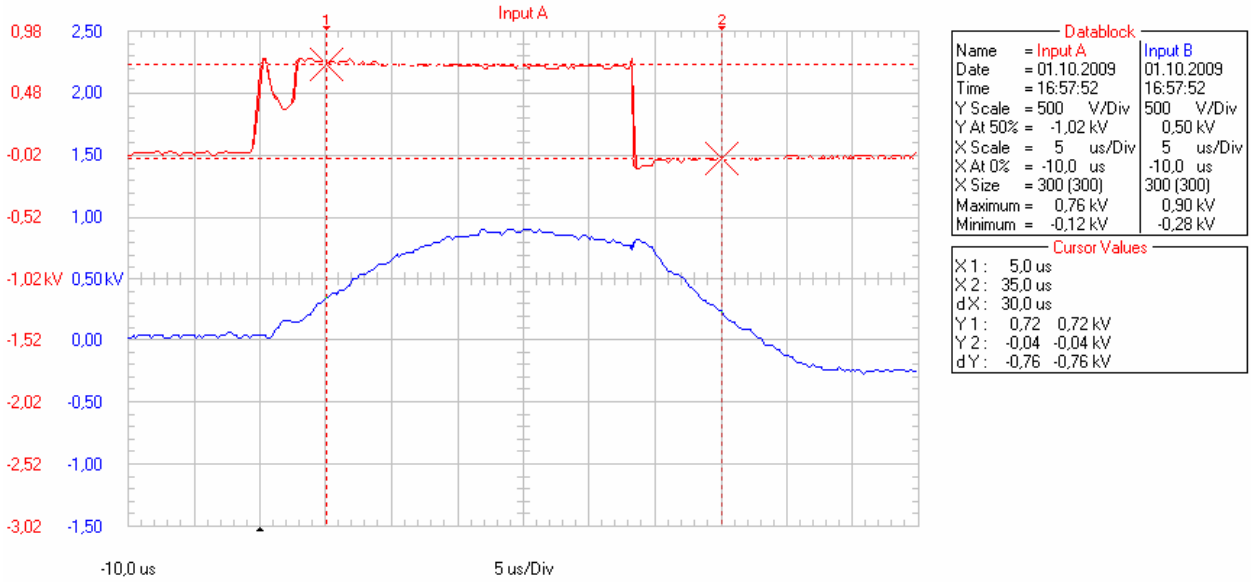
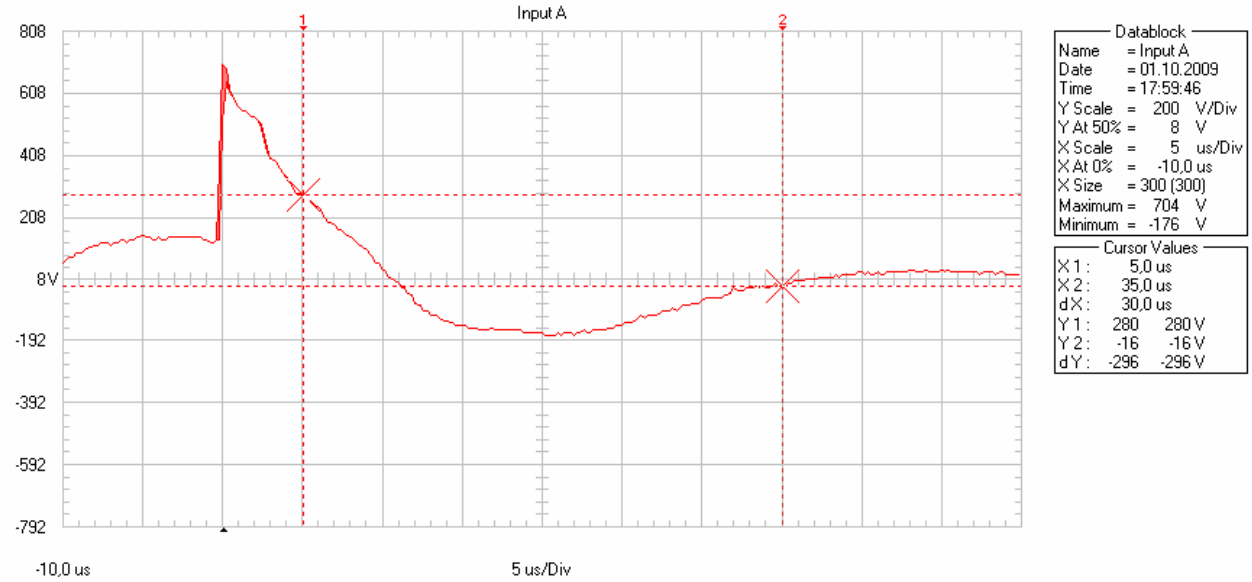


Рис. 7. Одиночные импульсы напряжения на выходе инвертора и двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

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



Udrdu/dt

Рис. 8. Одиночный импульс напряжения на одной из обмоток дросселя du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А), длина кабеля 211м

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

На рис. 9. изображены осциллограммы напряжения и тока двигателя. На рис. 10, 11 спектры тока и напряжения. Анализировать качество напряжения и тока двигателя будем с помощью следующих индикаторов указанных в графиках спектров справа:

Fund	-частота основной гармоники;
RMS	– среднее квадратичное значение измеряемой величины;
Peak	– Максимальная величина измеряемой величины;
DC	– Постоянная составляющая в измеряемой величине
$THDr,\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} Y_n^2}}{RMS} x100$	– Коэффициент нелинейных искажений (RMS), Yn – n-ная гармоника измеряемой величины;
$THDr,\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} Y_n^2}}{Y_1} x100$	- Коэффициент нелинейных искажений (Fund), Yn – n-ная гармоника измеряемой величины;
$KFact = \frac{\sum_{n=1}^{N} (In*n)^2}{\sum_{n=1}^{N} In^2}$	- Весовой коэффициент гармоник в измеряемой величине
$CF = \frac{Peak}{RMS}$	- Коэффициент формы

Уровень высших гармоник при использовании дросселя *ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)* несколько ниже, чем в схемах без дросселя см. таблицу №1,2. 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. Основное предназначение дросселей du/dt это ограничение параметров импульсов напряжения 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, рекомендуется оснащать дросселями du/dt частотно регулируемые системы управления при длине моторного кабеля более 12м (см. рис. 5).

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

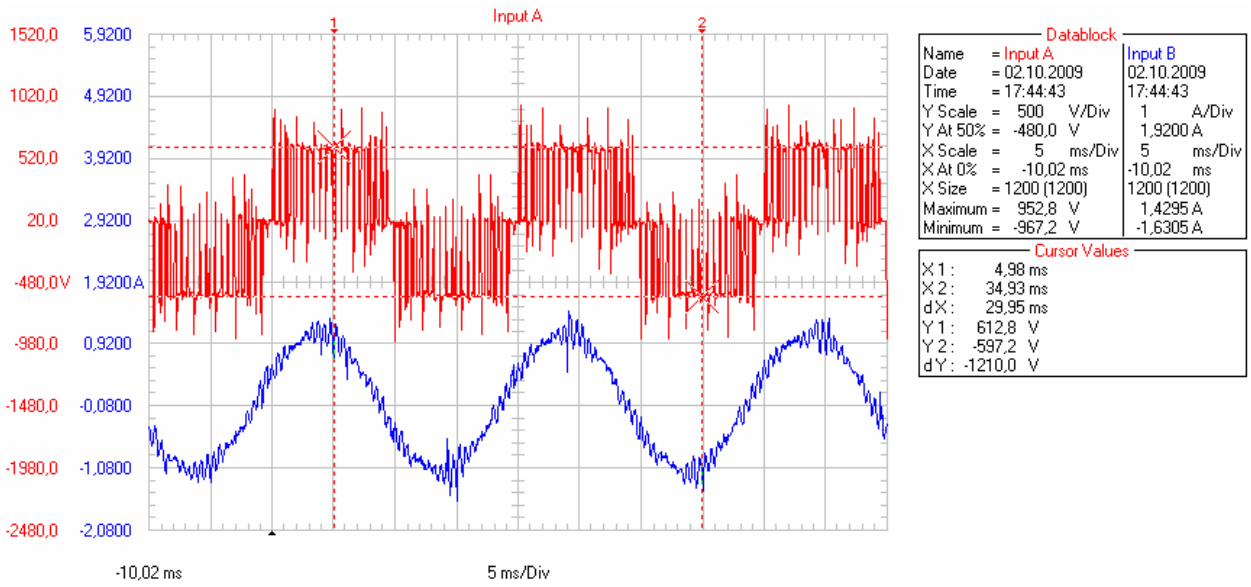


Рис.9. Напряжение на зажимах двигателя и ток двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

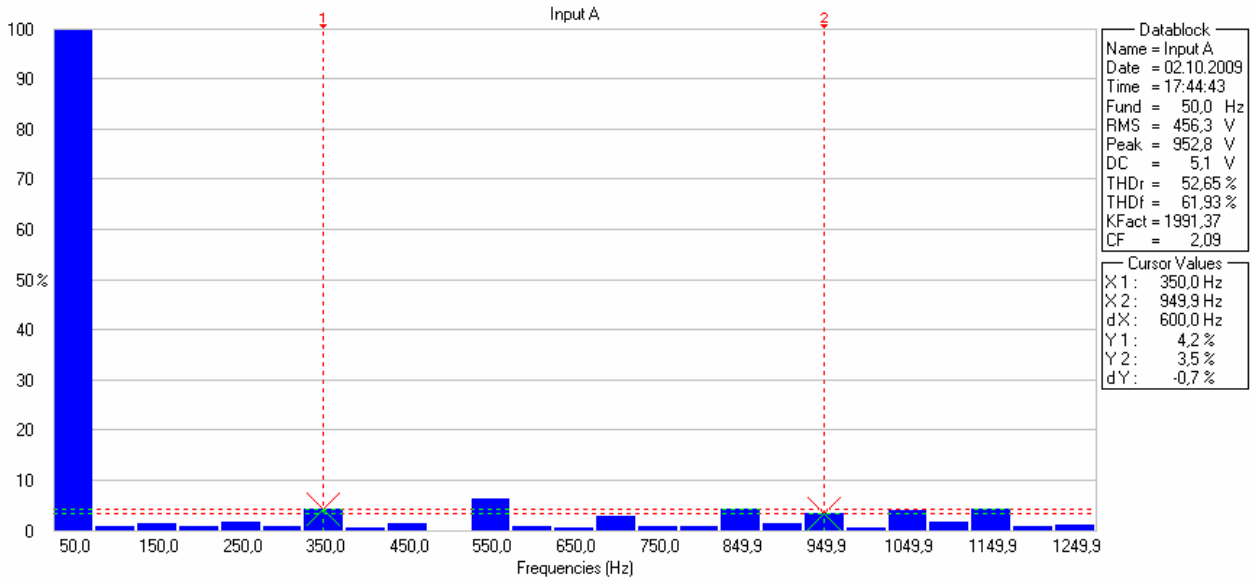


Рис. 10. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

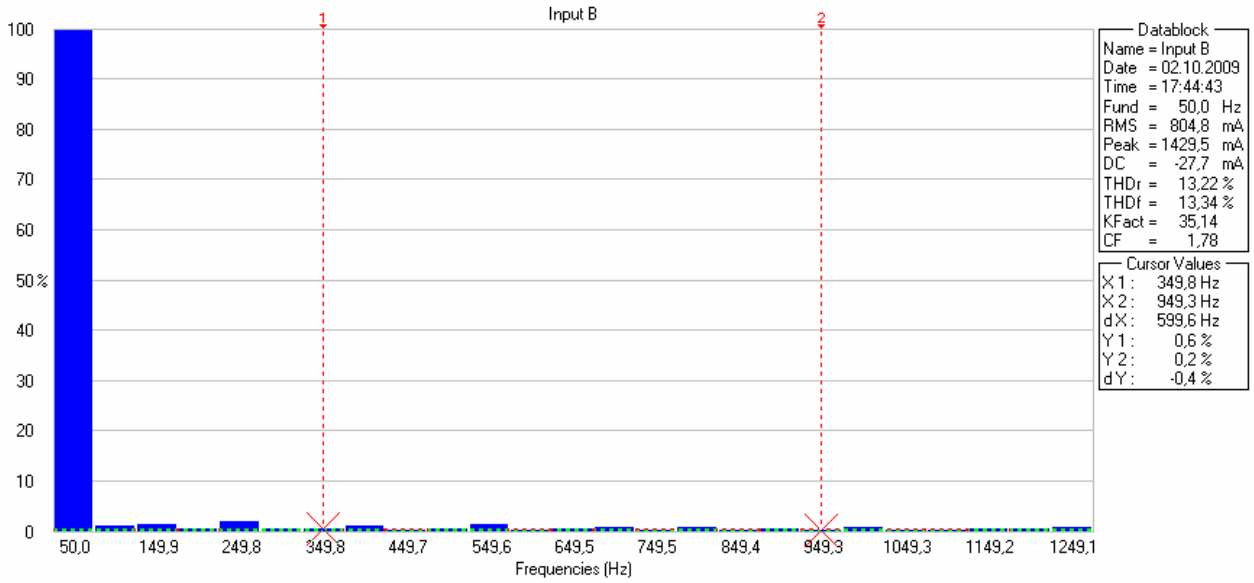


Рис. 11. Спектр тока двигателя. Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

2. Моторные дроссели

Моторные дроссели компании Elhand Transformatory типа *ED3S-***/****, (uk= 3-8,0%) кроме эффективного корректирования параметров импульсов напряжения на зажимах двигателя см. рис.12,13, дополнительно, улучшают синусоидальность тока и напряжения мотора см. рис. 14-16. Так коэффициент нелинейных искажений тока, в схеме с моторным дросселем, THDf=4,53%, в то время как в схеме без дросселя THDf=15,51%. В месте 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.

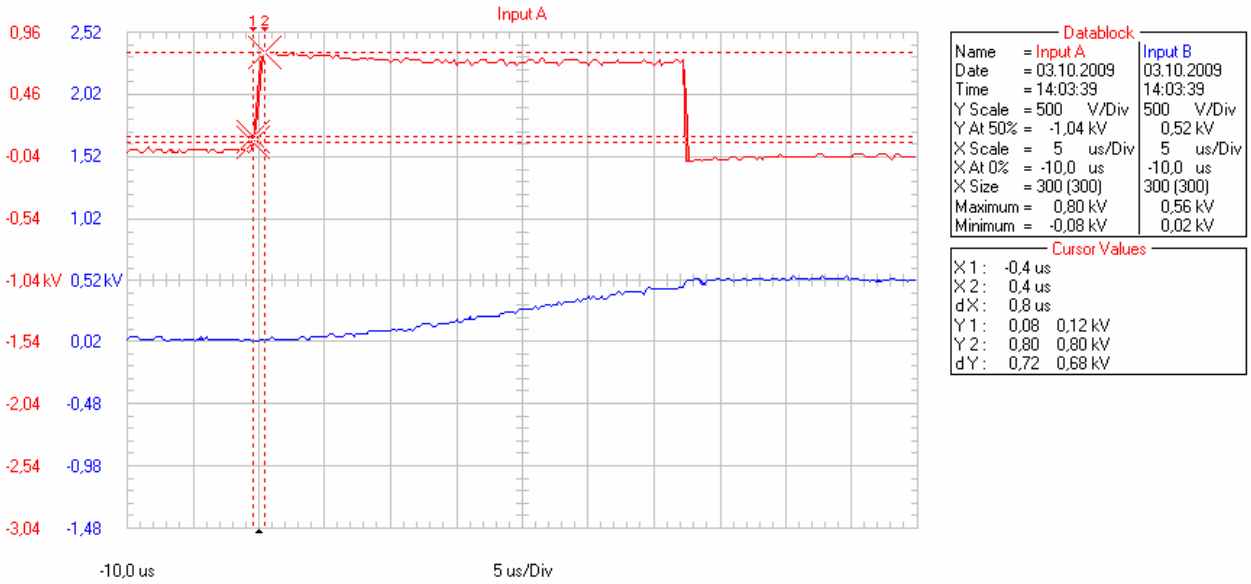


Рис.12. Одиночный импульс напряжения на выходе инвертора и двигателя.

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

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

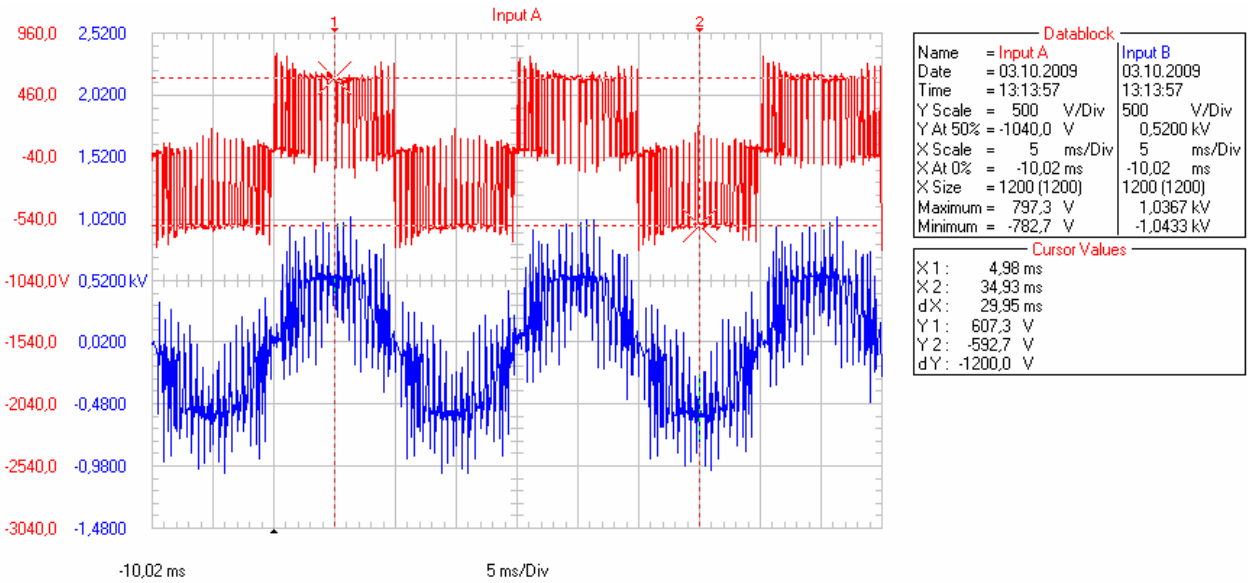


Рис. 13. Напряжение на выходе инвертора и двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

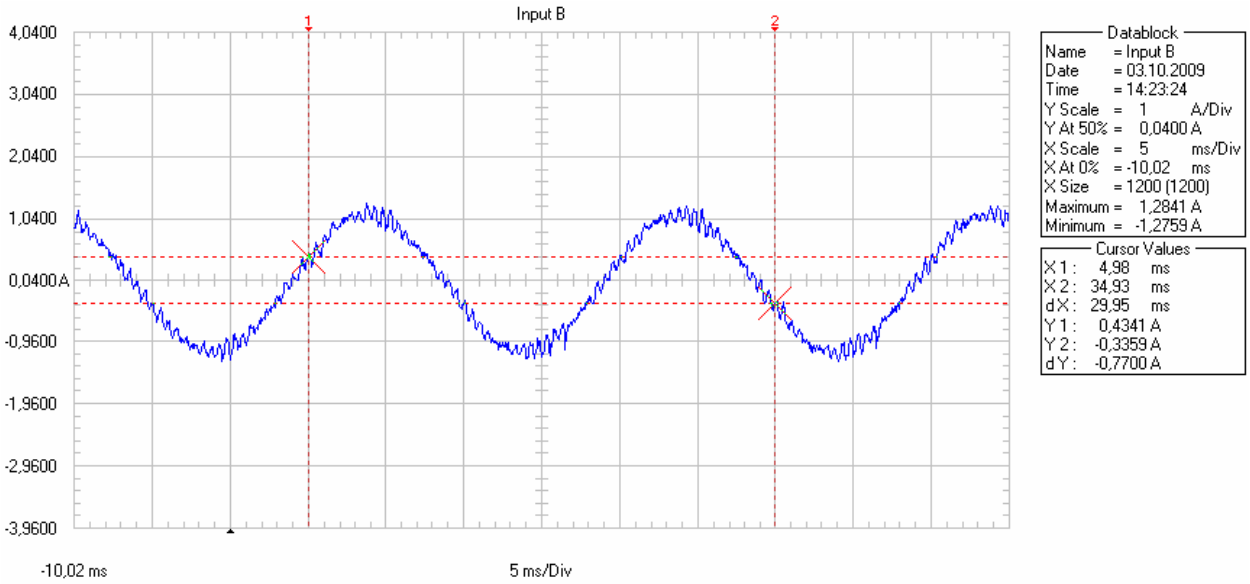


Рис. 14. Ток двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

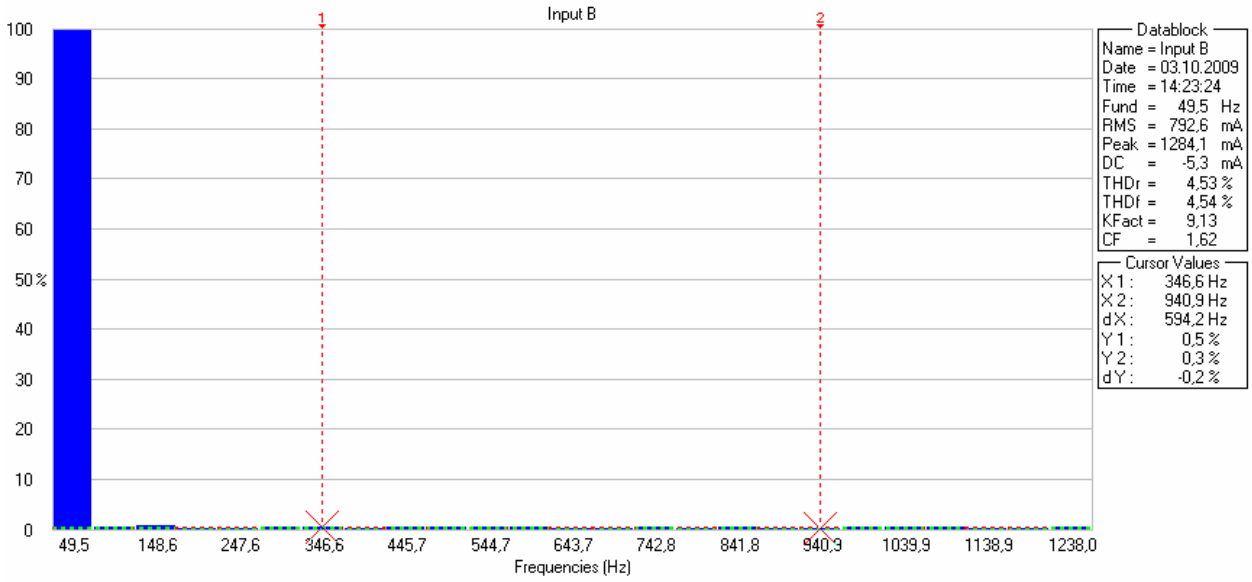


Рис. 15. Спектр тока двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А) Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

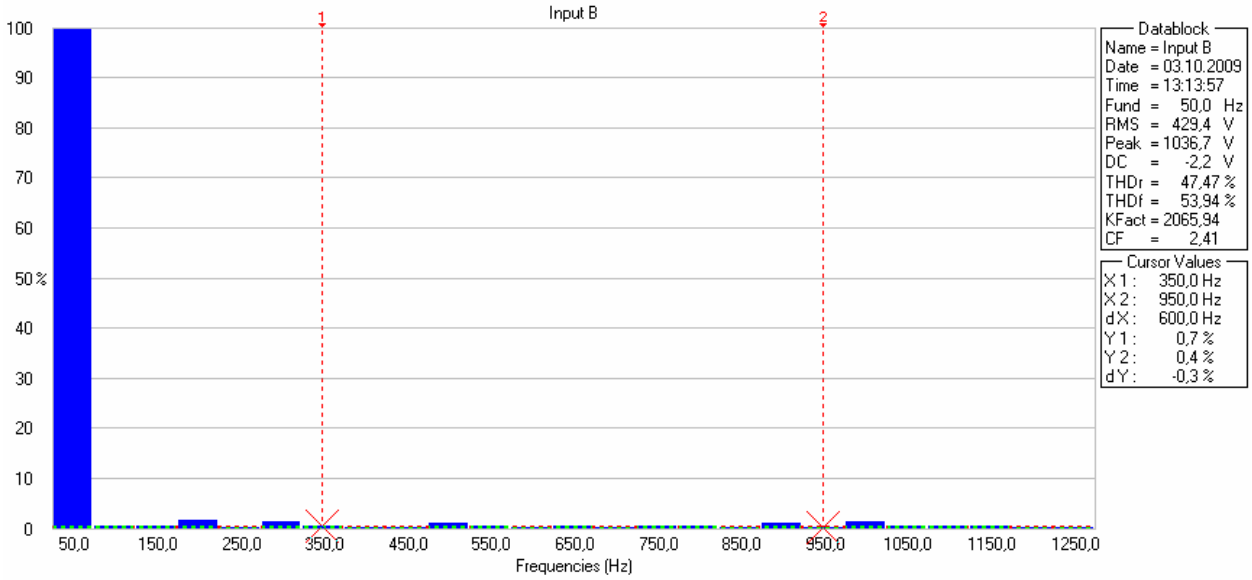


Рис. 16. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,5 (22,4мГн, 2,5А). Инвертор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

При увеличении частоты ШИМ уменьшается уровень гармоник напряжения. рис. 17, 18 при этом уровень гармоник тока остается примерно на том же уровне до частоты 5кГц, затем незначительно увеличивается.

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

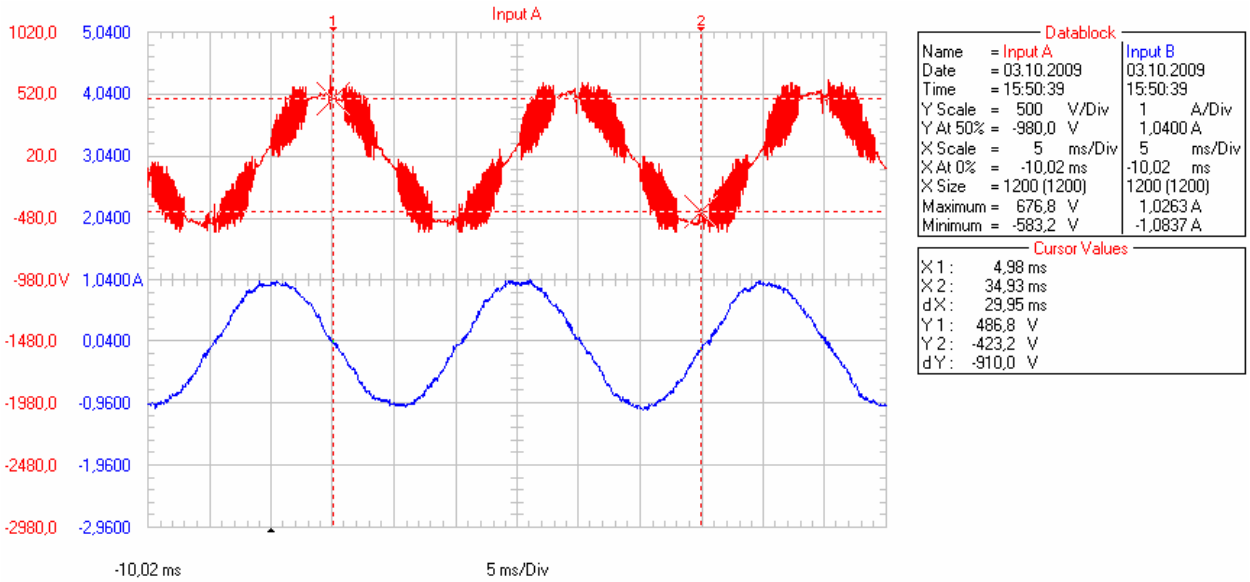


Рис. 17. Напряжение и ток двигателя. Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,1 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 10кГц, длина кабеля 211м

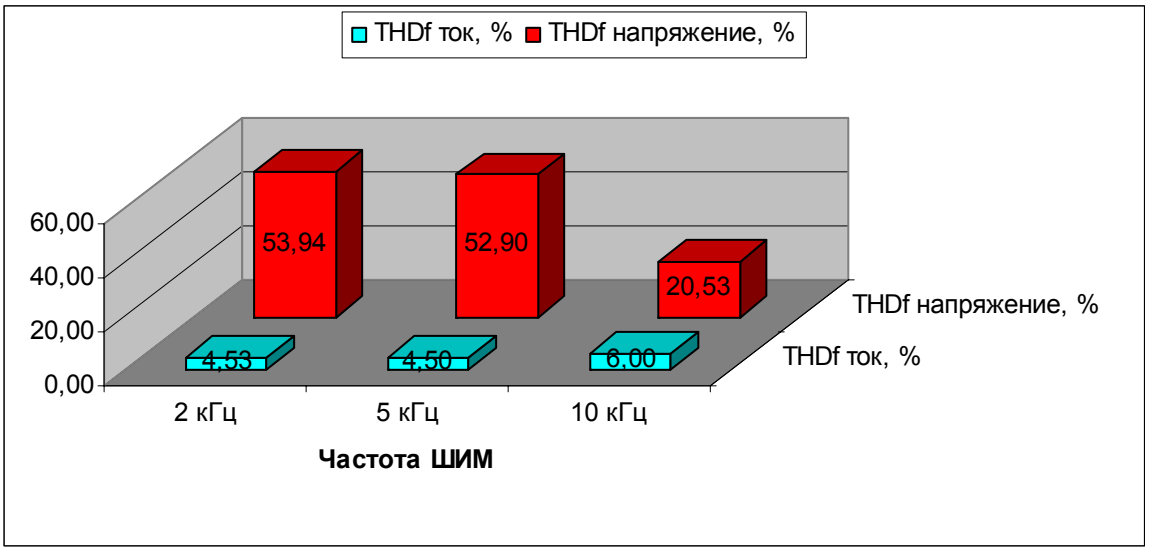


Рис. 18. Зависимости THDf тока и напряжения от частоты ШИМ. Двигатель 0,75 кВт, преобразователь частоты 0,75 кВт, моторный дроссель на выходе

3. Синус фильтры

Следующим устройством, которое оптимально снимает рассматриваемую проблему ШИМ инвертора, является синус фильтр производитель Оптима, Республика Беларусь типа *ED3SIN***/***/****, состоящий из дросселя и конденсаторов. На рисунках 19, 20, 21 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 выделяется 3, 20 и 21 гармоники.

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

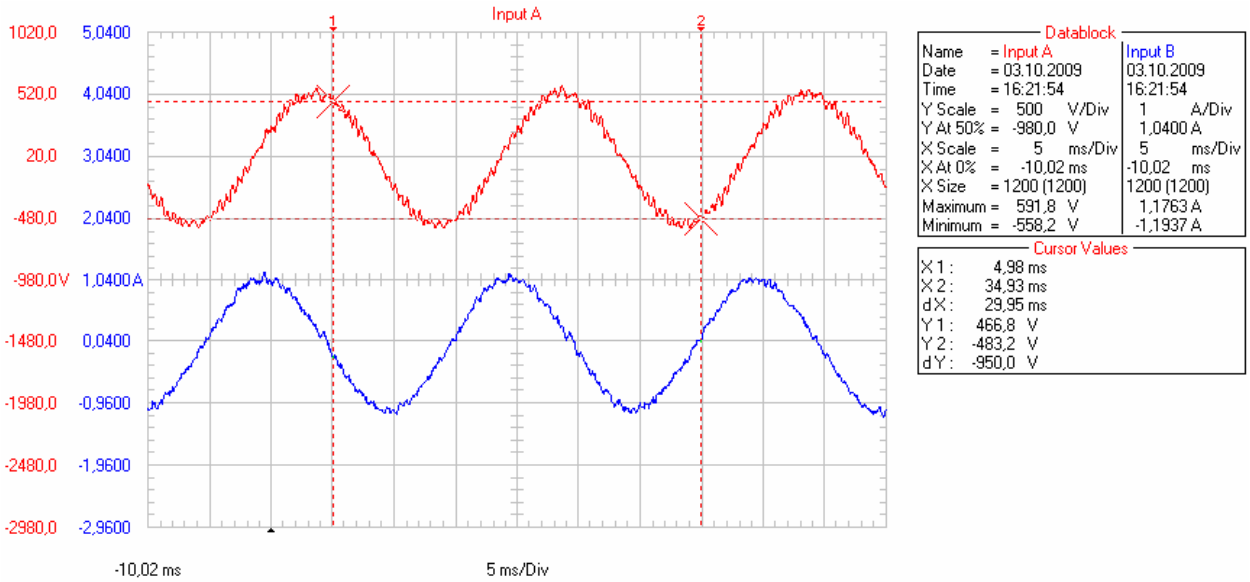


Рис. 19. Напряжение двигателя (верхняя осциллограмма) и ток двигателя(нижняя осциллограмма). Синус фильтр типа ED3SIN30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

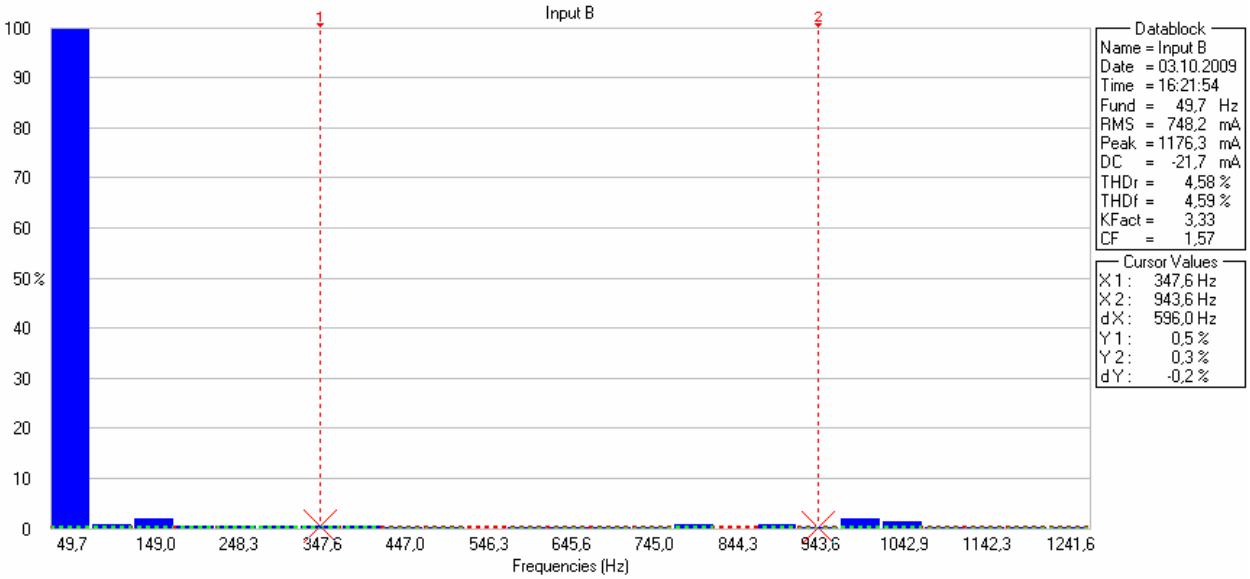


Рис. 20. Спектр тока двигателя. Синус фильтр типа ED3SIN30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

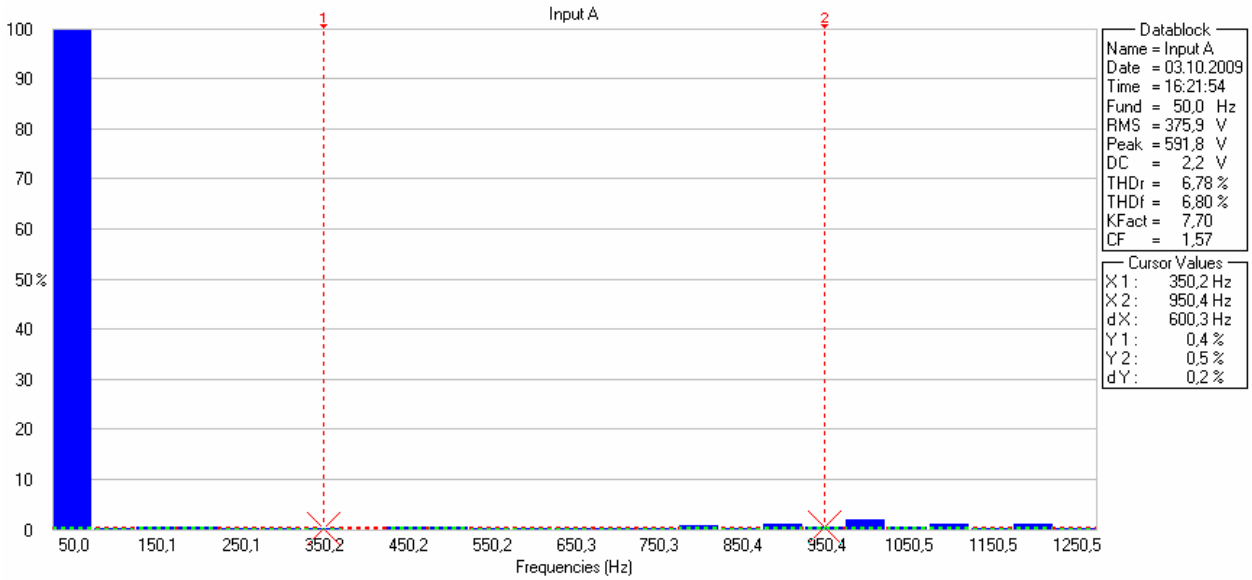


Рис. 21. Спектр напряжения на зажимах двигателя. Синус фильтр типа ED3SIN30/2,1/1,41(30мГ, 2,1А, 1,41мкФ) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

При повышении частоты ШИМ до 5кГц снижает уровень гармоник напряжения (≈70%) и тока (≈30%) рис.22. Дальнейшее увеличение частоты ухудшает форму напряжения. Форма тока, при этом остается практически неизменной.

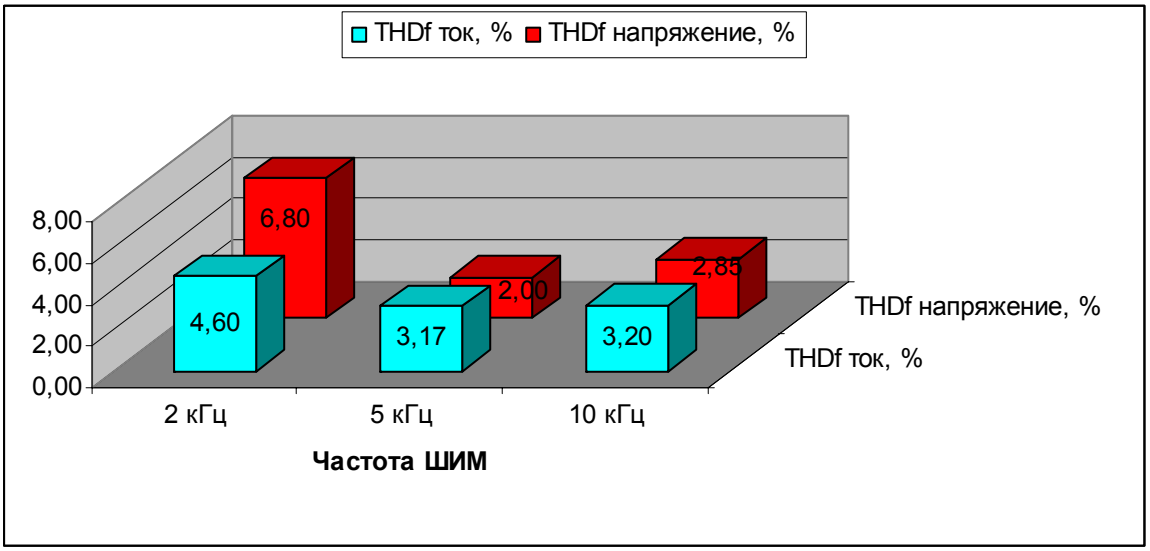


Рис. 22. Зависимости THDf тока и напряжения от частоты ШИМ. Двигатель 0,75 кВт, преобразователь частоты 0,75 кВт, синус фильтр на выходе.

4. Сравнение выходных устройств

В таблицы №1,2 сведены индикаторы, характеризующие качество синусоиды напряжения и тока двигателя. На рис. 23. изображены графики важнейшего индикатора THDf. Из графика следует, что инвертор, благодаря синусоидальной ШИМ способен при частоте ШИМ 2 кГц обеспечить синусоидальность тока THDf=15,51%, при этом ни о какой синусоидальности напряжения говорить не приходится. Потому, что уровень основной гармоники соизмерим с уровнем

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

высших гармоник. Введение в цепь двигателя дросселя du/dt приводит к незначительному снижению THDf% тока и напряжения. Введение моторного дросселя в цепь двигателя корректирует THDf% тока до 4,53%, при этом THDf напряжения снижается до 53,9%. При подключении синус фильтра THDf тока снижается незначительно, по сравнению со схемой с моторным дросселем. Вместе с тем уровень гармоник напряжения THDf снижается значительно до 6,8%. Напряжение и ток практически синусоидальны. Необходимо отметить, что при переходе от схемы с моторным дросселем к схеме с синусоидальным фильтром синусоидальность тока практически не изменилась.

Таблица №1

Индикаторы тока двигателя	**RMS, мА**	**Peak, мА**	**DC, мА**	**THDr, %**	**THDf, %**	**Kfakt**	**CF**
Без дросселей	817	1944,4	-9,9	15,32	15,51	91,16	2,38
С дросселем du/dt, ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)	804,8	1429,5	-27,7	13,22	13,34	35,14	1,78
С моторным дросселем ED3S-22,4/2,1 (22,4мГн, 2,1А)	792,6	1284,1	-5,3	4,53	4,54	9,13	1,62
С моторным дросселем ED3S-30/2,1 (30мГн, 2,1А)	747,7	1256,3	-16,8	9,52	9,56	23,01	1,68
С синус фильтром ED3SIN-22,4/2,1/1,41 (22,4мГн, 2,1А, 1,41мкФ)	790,3	1206,3	-18	5,29	5,29	5,33	1,53
С синус фильтром ED3SIN-30/2,1/1,41 (30мГн, 2,1А, 1,41мкФ)	747,2	1086,3	-18,1	3,17	3,17	2,87	1,45

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

Таблица №2

Индикаторы напряжения двигателя	RMS, В	Peak, В	DC, В	THDr, %	THDf, %	Kfakt	CF
Без дросселей	N	N	N	N	N	N	N
С дросселем du/dt, ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А)	456,3	952,8	5,1	52,65	61,93	1991,37	2,09
С моторным дросселем ED3S-22,4/2,1 (22,4мГн, 2,1А)	429,4	1036,7	-2,2	47,47	59,94	2065,94	2,41
С моторным дросселем ED3S-30/2,1 (30мГн, 2,1А)	415,5	996,7	-4,2	35,51	39,98	1494,27	2,4
С синус фильтром ED3SIN-22,4/2,1/1,41 (22,4мГн, 2,1А, 1,41мкФ)	376	586,8	2,8	11,06	11,13	18,95	1,56
С синус фильтром ED3SIN-30/2,1/1,41 (30мГн, 2,1А, 1,41мкФ)	375,9	591,8	2,2	6,78	6,8	7,7	1,51

N – не удалось снять спектрограмму из-за высокого уровня гармоник

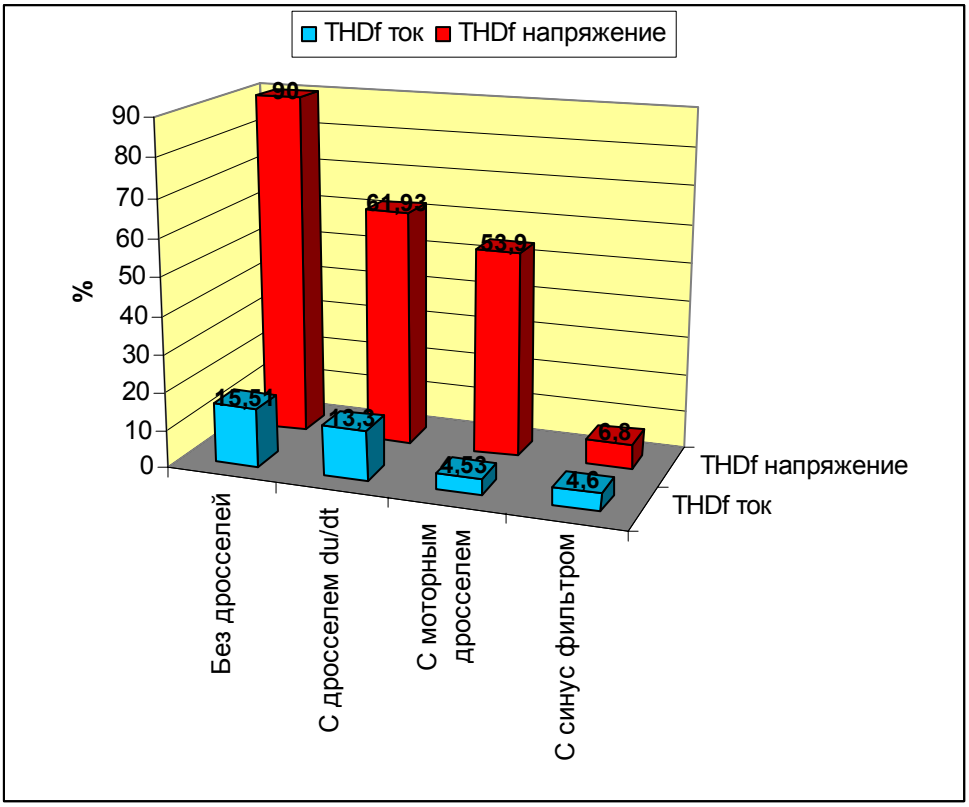


Рис. 23. Зависимости THDf тока и напряжения от устройства на выходе. Двигатель 0,75 кВт, преобразователь частоты 0,75 кВт.

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.

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 transformatory длину моторного кабеля можно увеличить до 200м при питании общепромышленного асинхронного двигателя от ПЧ. Это самый экономичный способ борьбы с эффектом отраженной волны.

5. 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;

6, 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.

7. При проектировании систем автоматизации рекомендуется использовать, однофазные по входу, преобразователи частоты для питания двигателей до 2,2кВт исключив тем самым необходимость защищать двигатель от импульсов перенапряжения.

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

[3] Skibinski, G., Evon. S., Kempkes D., “Riding the Reflected Wave – IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations,” IEEE IAS-Petroleum&Chemical Industry Conference, Philadelphia, PA., Sep. 23-25, 1996 pp. 75-84

[4] Skibinski, G., “Technical Report on Reflected Wave Impact On Motors and Cables,” Allen Bradley Drives Division, Dec. 1995

[5] G. Skibinski, J. Erdman, and J. Pankau, “Assessing AC Motor Dielectric Withstand Capability to Reflected Voltage Stress using Corona Testers,” IEEE IAS Conference Proceedings, 1996, pp. 694-702

[6] М.П. Батура, А.П. Кузнецов, А.П. Курулев «Теория электрических цепей, Минск «Вышэйшая школа» 2007

[7] G. Skibinski, R. Kerman, D. Leggate, J. Pankau, D. Schlegel, “Reflected Wave Modeling Techniques for PWM AC Motor Drives,” 0-7803-4343-3/98/$10.00(c)1998 IEEE

©МОРОЗОВ И.М., 2009 г.