

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Ярослав Чорник  
ELHAND TRANSFORMATORY

Задача современных приводных систем заключается в обеспечении процесса регулирования скорости вращения в широком диапазоне, а также возможности проведения более «плавного запуска» электромашин. На сегодняшний день самым простым решением данных задач является использование в качестве источника питания инвертора напряжения. Кроме явных преимуществ такого решения и растущей популярности его применения, необходимо также знать и те проблемы, которые могут возникнуть при использовании преобразователей частоты. Эти проблемы связаны с негативным влиянием инверторов на питающую сеть (высшие гармоники в токе питания – и, как следствие, рост потребляемой реактивной мощности) и на приводимый в движение двигатель (повышение уровня шума, дополнительные потери, ускорение процесса старения изоляции, эрозия подшипников).

Учитывая широкий спектр проблем, в статье рассматриваются только вопросы, связанные с одновременной работой инвертора и двигателя. Проблемы, а также паразитные явления, возникающие в таких системах, довольно часто недооцениваются. Данная статья позволит читателю оценить и осознать уровень существующих проблем, а также ознакомиться с их решениями, позволяющими снизить последствия воздействия инвертора на двигатель и кабель питания.

Принцип действия большинства используемых на сегодняшний день преобразователей частоты основан на широтно-импульсной модуляции выходных импульсов напряжения (PWM – Pulse Width Modulation; ШИМ – широтно-импульсная модуляция). Получаемое таким образом напряжение имеет форму последовательности импульсов с очень коротким временем нарастания (высокая крутизна фронта), напряжение не является синусоидальным. Для инвертора это является положительным фактором, поскольку переключение в течение короткого промежутка времени позволяет поддерживать уровень, при котором потери в преобразователе сведены к минимуму. Однако, крутизна нарастания напряжения ( $du/dt$ ) выходных импульсов, а также возрастающая частота переключения, используемая в инверторах, могут стать причиной возникновения паразитных явлений в кабеле двигателя и непосредственно в самом двигателе. Эти явления существенно влияют на сокращение долговечности двигателя и повышают вероятность аварии приводной системы в целом.

Наиболее часто возникающие проблемы:

- а) высокая скорость нарастания напряжения ( $du/dt$ )** – при небольшом расстоянии между инвертором и двигателем, высокая крутизна нарастания выходного напряжения инвертора (*рис.1.б*) негативно воздействует на изоляцию кабеля и его обмотку. В современных преобразователях показатели крутизны достигают отметки 10 и даже 12 [кВ/мкс], в то время как в двигателях допустимая крутизна нарастания напряжения не должна превышать 1 [кВ/мкс].
- б) перенапряжение на клеммах двигателя** – является результатом возникающих волновых явлений, которые иногда называют «Эффектом длинной линии электропередачи», «Эффектом отраженной волны» или «Эффектом стоячей волны». При длине кабеля ок. 10 [м] уже наблюдаются признаки эффекта. Основная коварность этих следующих с высокой частотой импульсов

перенапряжения заключается в том, что мотор «убивается» на протяжении длительного времени и часто выход из строя мотора не связывают с питанием его от ШИМ-инвертора. Мотор перематывают или устанавливают новый и все через некоторое время повторяется. Эквивалентную схему кабельной линии электропередачи можно представить в виде последовательного соединения паразитных емкостей и индуктивностей рассеивания кабельной линии (рис. 1.а):

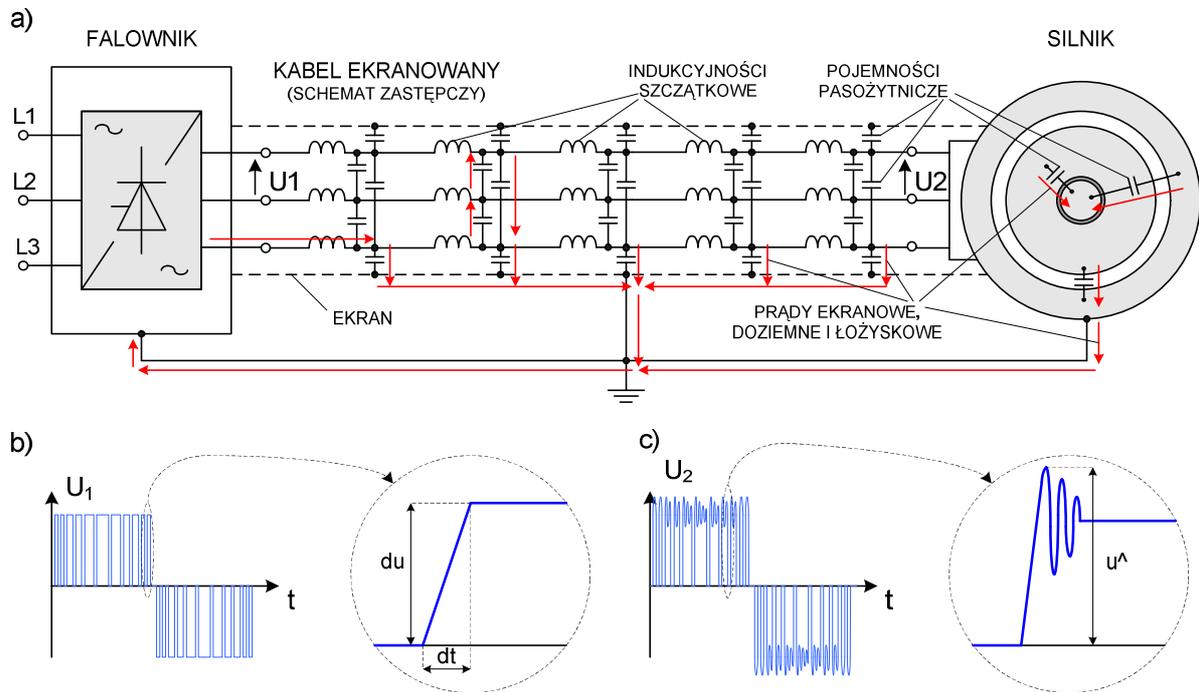


Рис. 1. а) схема приводной системы (инвертор – кабель – двигатель); б) крутизна нарастания выходного напряжения инвертора; с) перенапряжение на клеммах двигателя

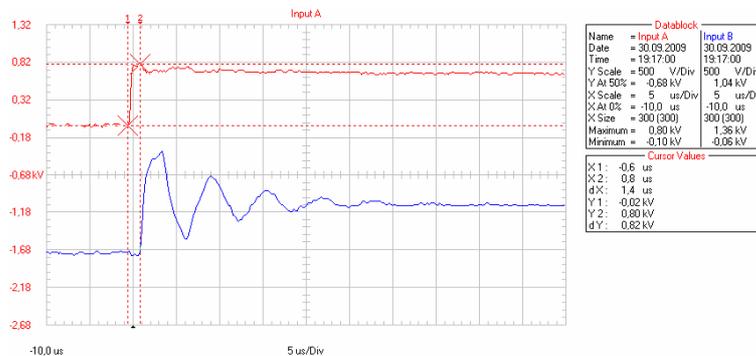


Рис. 2. Одиночный импульс выходного напряжения инвертора (верхняя осциллограмма) и напряжение на зажимах мотора (нижняя осциллограмма). Без дросселей. Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

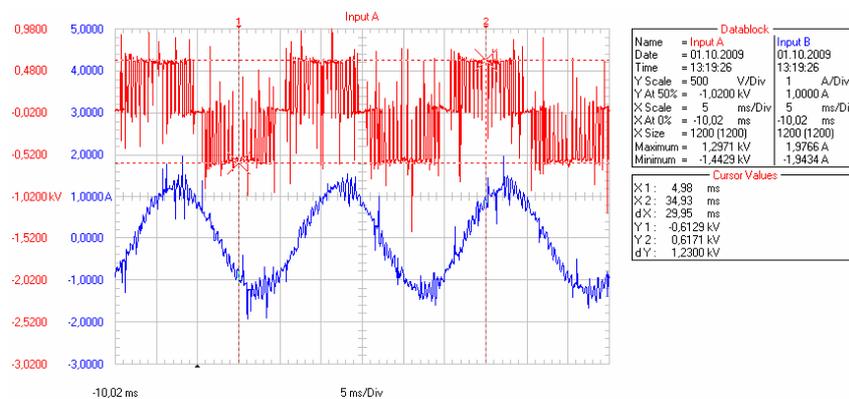


Рис. 3. Напряжение на моторе (верхняя осциллограмма) и ток (нижняя осциллограмма). Без дросселей. Длина кабеля 211м, частота ШИМ 2 кГц, преобразователь частоты 0,75 кВт, асинхронный двигатель 0,75 кВт, 2820 об/мин

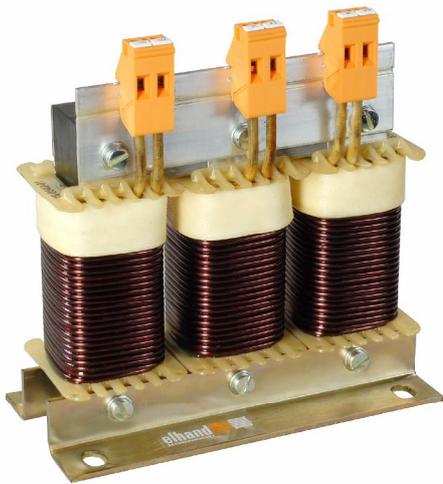
Даже при невысокой индуктивности последовательность импульсов напряжения высокой крутизны приводит к возникновению перенапряжения (рис.1.с). С увеличением длины кабеля повышается его результирующая индуктивность, а усиливающиеся волновые явления и перенапряжение могут повредить изоляцию двигателя. Величина перенапряжения на обмотках двигателя может достигать величины более 1000В (Рис. 2,3). В то время как допустимое значение перенапряжения для низковольтного двигателя общепромышленного назначения ограничено величиной 1000В; минимальное время нарастания напряжения 2 мкс. (NEMA MG1 part 30).

- с) **дополнительные потери в двигателе и кабеле питания** – высшие гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в кабеле питания, сердечнике двигателя и обмотке, особенно в «беличьей клетке» ротора. Это снижает КПД двигателя и приводной системы в целом. Дополнительные потери – это выделяемое тепло. Потери приводят к повышению температуры двигателя и кабеля, ускоряют процесс старения изоляции, значительно сокращая тем самым срок их службы. Надежность системы снижается.
- д) **экранный, подшипниковый ток и токи утечки на землю** –Высокочастотные составляющие схемы замещения асинхронных двигателей и паразитные емкости кабеля питания относятся к тем параметрам, которые практически всегда остаются в стороне, т.е. не учитываются при сетевом питании. Значения этих емкостей находятся в пределах от нескольких до десятка с лишним [нФ] и для потребителей не имеют существенного значения. Проблема появляется только при питании двигателей от ШИМ-инверторов. При высокой частоте переключений результирующее реактивное сопротивление паразитных емкостей кабеля и двигателя уменьшается. Чем меньше значение результирующего реактивного сопротивления, тем большее количество тока проходит через паразитные емкости. Значения паразитного экранного, подшипникового тока и тока утечки на землю суммируются с соответствующей нагрузкой преобразователя (рис.1.а), что в критической ситуации (например, при применении длинных кабелей) может привести к необходимости изменения мощности инвертора и сечения кабеля питания.
- е) **эмиссия электромагнитных помех** – выходной сигнал напряжения ШИМ-инвертора состоит из основной гармоники (Гц), полосы несущей частоты (кГц) и гармоник высшего порядка (МГц), возникающих вследствие быстрого переключения транзисторных ключей. Именно последний диапазон частот отвечает за эмиссию электромагнитных помех. Данные помехи расходятся равномерно во всех направлениях, а кабель двигателя вместе с ШИМ-

инвертором является основным источником электромагнитных помех всей системы автоматики машины.

- f) **создание высокого уровня шума** – кроме вышеперечисленных негативных результатов проявления высших гармоник в выходном напряжении инвертора, остается еще проблема шума. Гармоники с более высокой частотой приводят к возникновению свиста и «треска» двигателя, что влияет на комфорт обслуживания приводной системы.

Действие всех вышеописанных явлений можно ограничить или предотвратить путем использования соответствующих дросселей или фильтров. Фирма ELHAND TRANSFORMATORY предлагает: дроссели du/dt; моторные дроссели, и синус-фильтры, позволяющие устранить или ограничить проблемы описанные выше тем самым повысив надежность и долговечность приводной системы:



Дроссели du/dt (ED3dU)

**Дроссели du/dt (ED3dU)** – эффект их действия проявляется в ограничении крутизны фронта импульсов перенапряжения и их амплитуды на зажимах асинхронного двигателя, а также в уменьшении негативного воздействия токовых помех см. рис.4, 5. Успешно подавляют электромагнитные помехи в диапазоне частот от 1 до 30 МГц. Данные дроссели особо эффективны при небольшой длине кабеля питания и низкой частоте переключений. Дроссели ограничивают крутизну нарастания напряжения в несколько раз (сравните Рис. 2 и Рис.4) и являются тем необходимым минимумом, который должен обеспечить пользователь для работы приводной системы.

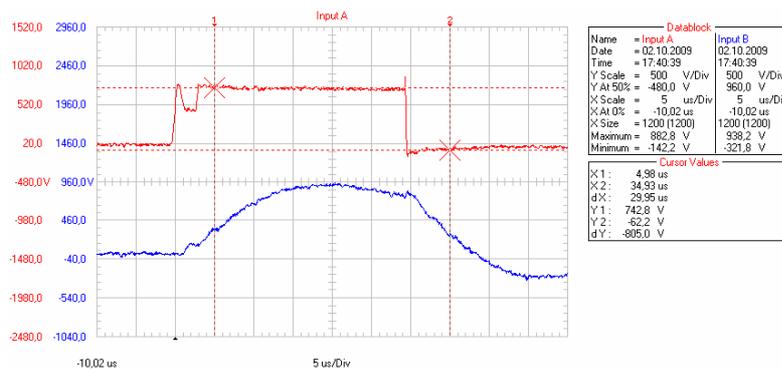


Рис.4. Одиночные импульсы напряжения на выходе инвертора (верхняя осциллограмма) и двигателя (нижняя осциллограмма). Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

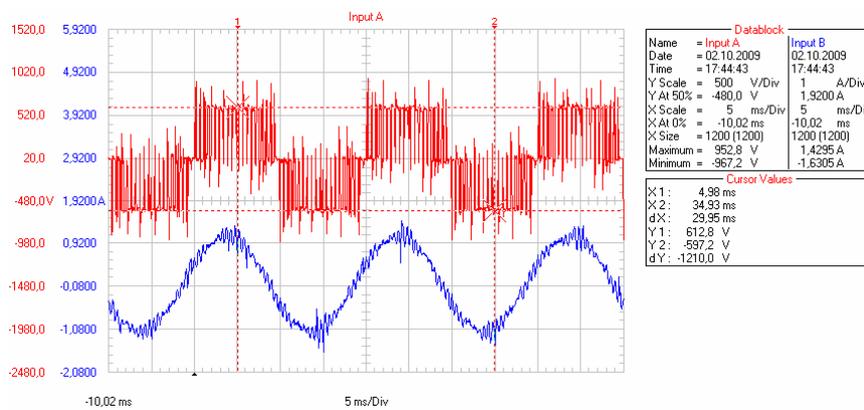


Рис.5. Напряжение на зажимах двигателя (верхняя осциллограмма) и ток двигателя (нижняя осциллограмма). Дроссель du/dt типа ED3dU-2,58/2,1 (2,58мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м



Моторные дроссели (ED3S)

**Моторные дроссели (ED3S)** – в отличие от дросселей du/dt имеют более высокую индуктивность, и как следствие более результативно компенсируют емкость между фазовыми проводниками, а также между проводниками и потенциалом земли. Очень эффективно ограничивают крутизну нарастания напряжения и уменьшают амплитуду перенапряжений на клеммах двигателя (рис. 6,7). Моторные дроссели исключают электромагнитные помехи в широком диапазоне частот и снижают потери энергии в кабеле и двигателе. К тому же они эффективно снижают уровень шума двигателя.

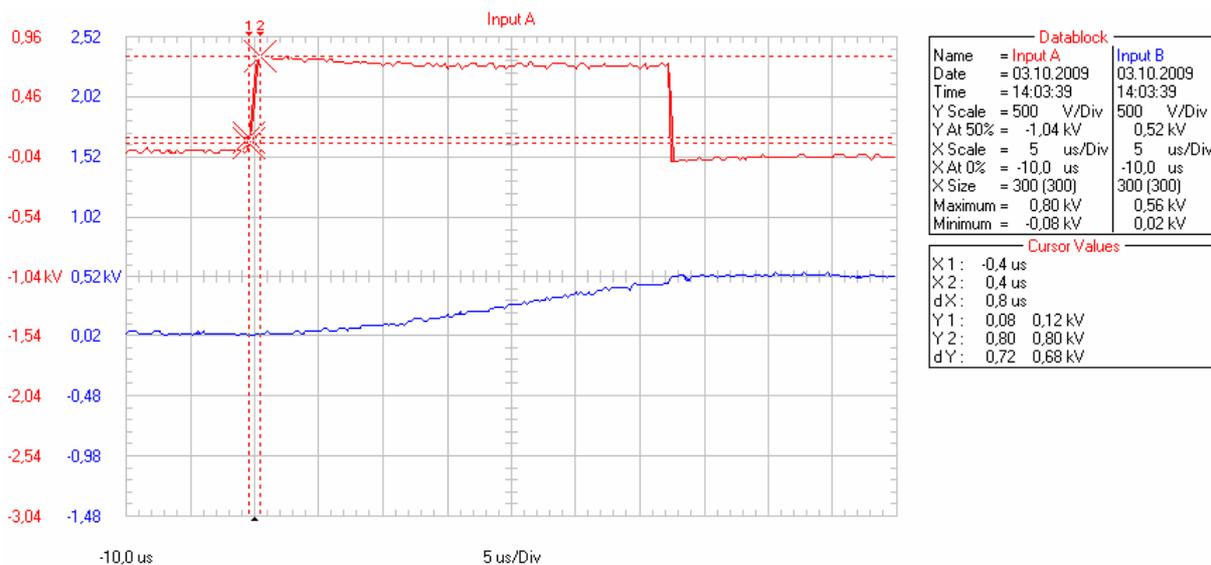


Рис.6. Одиночные импульсы напряжения на выходе инвертора (верхняя осциллограмма) и двигателя (нижняя осциллограмма). Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,1 (22,4 мГн, 2,1А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

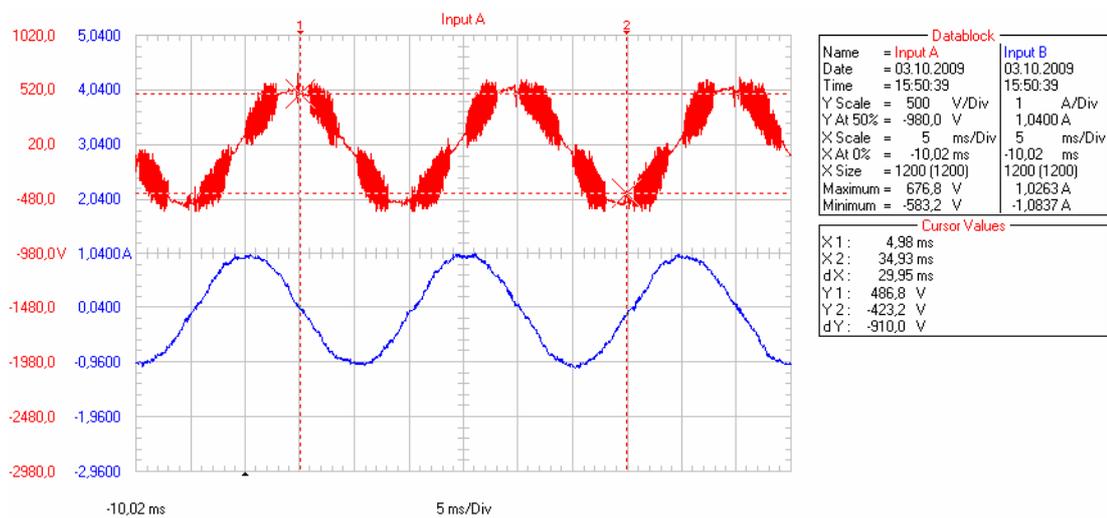


Рис. 7. Напряжение (верхняя осциллограмма) и ток двигателя (нижняя осциллограмма). Моторный дроссель типа ED3S-22,4/2,1 (22,4мГн, 2,5А) на зажимах инвертора 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 10кГц, длина кабеля 211м



Синус фильтры (EF3LC)

**Синус фильтры (EF3LC)** – меняют импульсное напряжение инвертора ШИМ на синусоидальное напряжение (рис. 8,9), эффективно ограничивают или полностью ликвидируют все вышеперечисленные паразитные явления. Коэффициент искажения  $THD_U$  выходного напряжения фильтров типа EF3LC меньше 5%, поэтому условия работы двигателей аналогичны тем, что и при сетевом питании. Ток и напряжение являются синусоидальными, поэтому проблем с крутизной нарастания напряжения и перенапряжением на клеммах двигателя не возникает. Дополнительные потери в кабеле и двигателе, а также электромагнитные помехи сведены к минимуму, а систему в целом отличает электромагнитная совместимость. Чаще всего синусоидальные фильтры применяются при длинных

кабельных соединениях (позволяя использовать при этом неэкранированный кабель, который намного дешевле) и в приводных системах во взрывоопасных помещениях (поскольку исключают риск возникновения перенапряжения на клеммах двигателя). Наличие фильтров необходимо также в случае параллельной работы сразу нескольких двигателей, приводимых в движение от одного инвертора, а также при модернизации приводных систем старого типа, в которых привод и двигатель не были приспособлены к работе с инвертором.

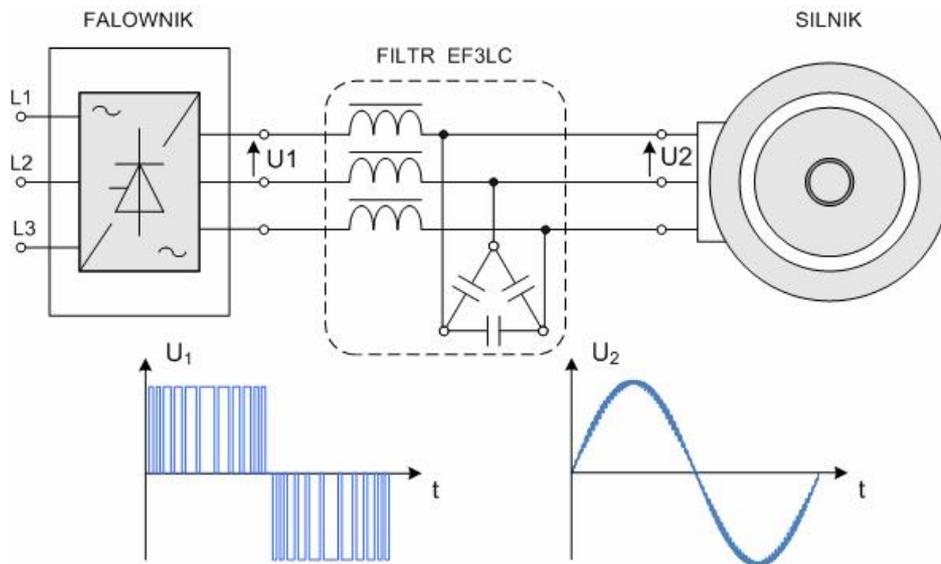


Рис. 8. Блок-схема приводной системы с фильтром EF3LC

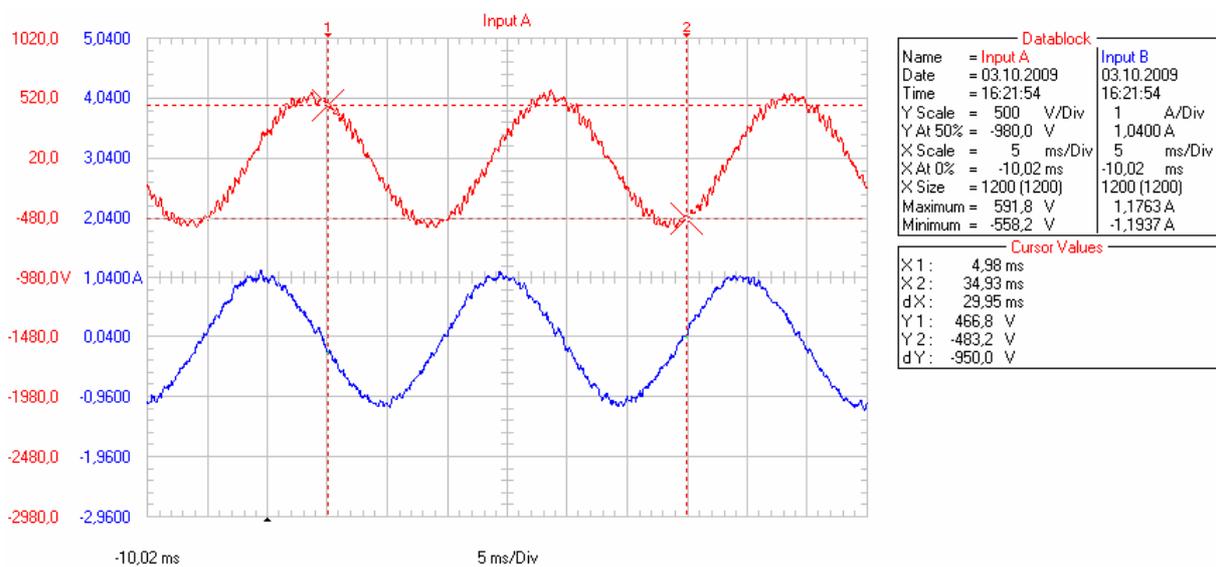


Рис.9. Напряжение на моторе (верхняя осциллограмма) и ток двигателя (нижняя осциллограмма) на зажимах инвертора синус фильтр. Мотор 0,75кВт, 400В, 50Гц; ШИМ 2кГц, длина кабеля 211м

Табл. 1. Рекомендуемый подбор выходных дросселей или синус- фильтров при питании от ШИМ- инверторов, в зависимости от параметров системы и условий работы:

Условия работы Частота переключений	Длина кабеля двигателя			Питание ответственных систем	Параллельная работа двигателей	Двигатели во взрывоопасных помещениях
	< 30 [м]	30 [м] – 100 [м]	> 100 [м]			
≤ 2,5 [кГц]	ED3dU ED3S EF3LC	ED3dU ED3S EF3LC	EF3LC	EF3LC	EF3LC	EF3LC
2,5 – 8 [кГц]	ED3dU ED3S EF3LC	ED3S EF3LC	EF3LC			
8 – 16 [кГц]	ED3S EF3LC	EF3LC	EF3LC			

ED3dU – ограничительный дроссель du/dt; ED3S – моторный дроссель; EF3LC – синус-фильтр

Учитывая частоту переключений, длину кабеля питания между преобразователем и двигателем, а также место установки привода, необходимо выбрать оптимальное решение не только с точки зрения стоимости системы в целом, но и с точки зрения затрат при ее эксплуатации, ее надежности и периода эксплуатации. Очень часто первоначальные затраты позволяют достичь большой экономии в дальнейшем, поскольку всегда можно подсчитать потери в результате возможных аварий и простоя приводимого в действие оборудования. Важно, чтобы уже на этапе проектирования были учтены все факторы, определяющие надлежащую работу, безаварийность и энергосбережение электропривода.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. Морозов: Обуздание отраженной волны.
- [2] Й.Ластовецкий: «Магнитные элементы в приводных системах». Варшава. WNT 1982 / J. Łastowiecki : „*Elementy magnetyczne w układach napędowych*”. Warszawa, WNT 1982.
- [3] С.Пируг: «Энергоэлектроника». Краков. Издательство Горно-металлургической Академии 2006 / S.Piróg : „*Energoelektronika*”. Kraków, Wydawnictwa AGH 2006.
- [4] М.Трайдос, Р.Пастушка, И.Сосновский: «Значение емкости кабеля в системах питания индукционных двигателей на базе преобразователей частоты». ZP-ME №:74/2006 / M.Trajdos, R.Pastuszka, I.Sosnowski : „*Znaczenie pojemności kabla w układach zasilających silniki indukcyjne za pośrednictwem przekształtników częstotliwości*”. ZP-ME Nr:74/2006.
- [5] В.Беркан, П.Мазурек, А.Михальский, А. Пытляк, Г.Свѐнтек : «Анализ тока питания и тока утечки в защитных проводах преобразователя частоты с транзисторным инвертором в приводной системе переменного тока ». PIE 2003 / W. Berkan, P. Mazurek, A. Michalski, A. Pytlak, H. Świątek : „*Analiza prądów zasilania i prądów upływu w przewodach ochronnych przekształtnika częstotliwości z falownikiem tranzystorowym w układzie napędowym prądu przemiennego*”. PIE 2003.
- [6] П.Зентэк «Подшипниковый ток и ток заземления в приводных системах, запитываемых от инверторов ШИМ». ZP-ME №:74/2006 / P. Zientek : „*Prądy łożyskowe i prąd uziomu w układach napędowych zasilanych z falowników PWM*”. ZP-ME Nr:74/2006.
- [7] П.Зентэк «Влияние выходных параметров инверторов ШИМ и кабеля питания на паразитные явления в индукционных двигателях». ZP-ME №: 71/2005P. / Zientek : „*Wpływ parametrów wyjściowych falowników PWM i kabla zasilającego na zjawiska pasożytnicze w silnikach indukcyjnych*”. ZP-ME Nr: 71/2005.