

МОЩНЫЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ

Беляев Д. В., Вейнгер А. М.
(Rockwell Automation, Москва),

Аннотация. Систематизированы известные положения и приведены результаты дополнительных исследований по проблеме электромагнитной совместимости мощного регулируемого электропривода переменного тока с питающей сетью.

Abstract. Known results and results of additional investigation are systematized dedicated to problem of electromagnetic compatibility of a powerful controlled AC drive with power supply system.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ В ОТНОШЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

Электромагнитная совместимость с питающей сетью является одним из определяющих факторов при выборе вида и параметров регулируемого электропривода переменного тока. Это относится, прежде всего, к электроприводам большой мощности. Не каждый регулируемый электропривод может работать в любой сети.

Особую роль этот фактор играет в СНГ по двум обстоятельствам. Во-первых, в течение десятилетий проводится техническая политика дробления мощности в сетях промышленных предприятий. При этом усиливается влияние возмущений в сети на регулируемые электроприводы и обратное влияние регулируемых электроприводов на смежные электроприёмники.

Во-вторых, в России и большинстве стран СНГ действует жёсткий стандарт по качеству напряжения в сетях, [1]. Он является даже более жёстким, чем Международный стандарт, [2].

Стандарты ограничивают нормальные и предельно допустимые изменения. Изменения должны быть в пределах нормальных с вероятностью 95 % для интервала времени 24 ч. Это означает возможность достаточно длительных предельных отклонений.

С учётом специфики стандартов, следует уточнить требования к регулируемому электроприводу:

1. Оборудование должно функционировать при предельных отклонениях в сети.
2. С другой стороны, регулируемый электропривод не должен вызывать отклонений в сети сверх нормально допустимых, по крайней мере, в установившихся режимах.

2. ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЕТИ НА ЭЛЕКТРОПРИВОД

2.1. Изменение модуля вектора напряжения в узле нагрузки

Этот вид возмущения имеет высокую вероятность. Возмущение может вызываться перегрузкой сети, прямым пуском мощного двигателя переменного тока, симметричным к.з. в сети.

Электропривод должен функционировать с полной нагрузкой при изменении модуля вектора питающего напряжения в пределах, определяемых Стандартом, 90-110 % номинального напряжения. В ряде применений оговариваются также расширенные пределы.

В массовых электроприводах запас по выходному напряжению ПЧ обычно невелик. Поэтому при пониженном напряжении сети напряжение статора оказывается также пониженным. Любой серийный двигатель переменного тока должен работать продолжительно с пониженным, в пределах Стандарта, напряжением статора. Но, естественно, он работает со сниженным магнитным потоком и повышенным током статора. Важно, чтобы ПЧ также обеспечивал повышенный продолжительный ток.

Кроме того, электропривод, по крайней мере, не должен отключаться при продолжительном снижении напряжения до 70-85 % номинального напряжения (уставки защиты минимального напряжения). Чтобы выполнить это условие, система регулирования электропривода должна автоматически снижать скорость при перегрузке по току статора в таком режиме.

И, наконец, электропривод не должен отключаться и в тех случаях, когда изменения напряжения в сети происходят скачкообразно. В этом отношении тяжёлым режимом является скачкообразное восстановление напряжения после его провала. На рис. 1 приведена осциллограмма процессов для асинхронного электропривода насоса (ПЧ на основе инвертора тока, с ШИМ выпрямителем и ШИМ инвертором).

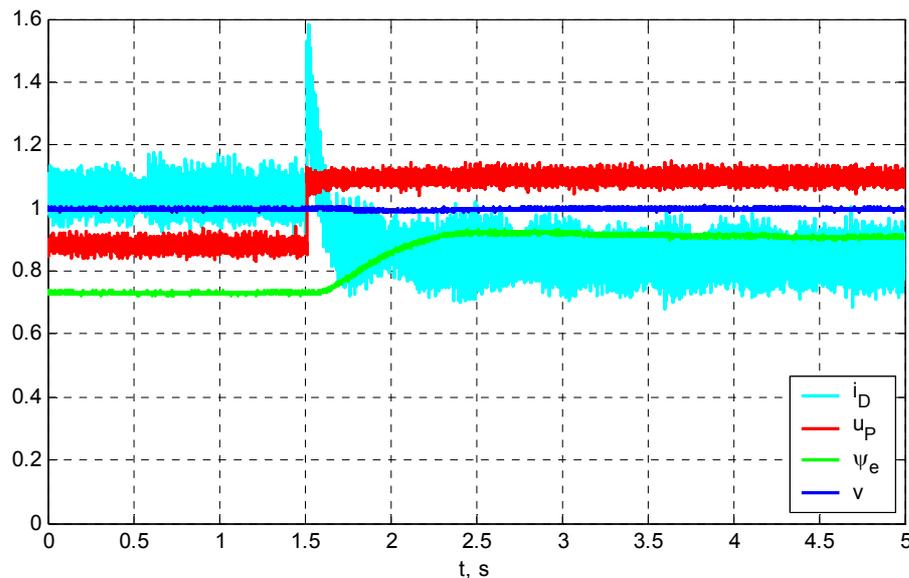


Рис. 1. Процессы при скачкообразном восстановлении напряжения сети

Зарегистрированные переменные (относительные значения): i_D – выпрямленный ток, u_P – напряжение на шинах узла нагрузки (модуль изображающего вектора), ψ_e – поток ротора (модуль изображающего вектора), v – скорость.

После скачкообразного восстановления напряжения выпрямленный ток быстро нарастает. Под действием регулятора выпрямленного тока и регулятора скорости выпрямленный ток снижается, скорость восстанавливается. Под действием регулятора потока нарастает магнитный поток ротора. В данном случае изменения скорости незаметны из-за большой электромеханической постоянной времени привода.

Следует отметить, что при недостаточном быстродействии регулятора тока возможно отключение электропривода максимальной-токовой защитой мгновенного действия во время нарастания тока после скачка напряжения сети.

При снижении напряжения сети ниже уставки защиты минимального напряжения, защита отключает электропривод. Если требуется, осуществляется самозапуск после восстановления напряжения. Современные системы управления обеспечивают подхват вращающегося двигателя, даже асинхронного двигателя с затухшим потоком ротора.

2.2. Искажение питающего напряжения

Такое искажение вызывается как работой самого регулируемого электропривода, так и смежными электроприёмниками.

Во многих случаях отдельная секция шин распределительного устройства используется только для питания регулируемых электроприводов. В этих случаях данная секция рассматривается как автономная система, на которую не распространяются требования

Стандарта в отношении качества напряжения. В таких случаях искажения напряжения особенно значительны.

Влияние искажений на регулируемый электропривод наименее существенно в случае неуправляемого диодного выпрямителя на стороне сети в ПЧ на основе ИН с ШИМ (гл. 4).

В случае управляемого преобразователя на стороне сети, как в ИН с ШИМ, так и в ИТ с ШИМ, искажения напряжения влияют на электропривод через систему управления указанного преобразователя. Управляющие импульсы силовых полупроводниковых приборов синхронизированы с питающим напряжением. Искажения питающего напряжения воздействуют на синхронизацию.

Один из методов синхронизации – использование, вместо напряжений, сигналов эквивалентных потокосцеплений. Например, используется вектор:

$$\Psi_P = \frac{\Omega_b}{p} \mathbf{e}_P = \frac{\Omega_b}{p} (\mathbf{u}_L + R_P \mathbf{i}_L) + L_P \mathbf{i}_L.$$

Здесь R_P и L_P – эквивалентное сопротивление и эквивалентная индуктивность источника по отношению к зажимам, с которых снимается обратная связь по напряжению. В интегрированном сигнале высшие гармоники существенно подавлены. При таком подходе имеется возможность исключить дополнительно влияние гармоник от данного электропривода.

Общее свойство достаточно совершенных систем управления – возможность работы от сети даже при высоком содержании высших гармоник в напряжении.

3. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА СЕТЬ

Влияние на сеть существенно зависит от вида ПЧ, точнее, от вида выпрямителя в ПЧ. Рассматриваются наиболее распространённые виды:

- диодный выпрямитель в ПЧ на основе инвертора напряжения (ИН) с ШИМ;
- тиристорный выпрямитель в ПЧ на основе инвертора тока (ИТ) с ШИМ;
- ШИМ выпрямитель с входным LC фильтром в ПЧ на основе ИН с ШИМ;
- ШИМ выпрямитель в ПЧ на основе ИТ с ШИМ.

3.1. Реактивная мощность, потребляемая от сети

Реактивная мощность, потребляемая электроприводом, повышает потери в сети. Изменения реактивной мощности вызывают изменения напряжения в узле нагрузки, от которого питается электропривод.

Электроприводы с диодным выпрямителем на входе ПЧ и электроприводы с ШИМ выпрямителем имеют благоприятные характеристики в отношении потребляемой реактивной мощности. Эта мощность невелика.

Более заметна реактивная мощность, потребляемая электроприводом на основе ИТ с ШИМ, с тиристорным выпрямителем на входе ПЧ. Однако, при нагрузке насосно-вентиляторного типа специальные меры обеспечивают потребление реактивной мощности в пределах $Q_1 = (0.25-0.35) \cdot S_N$, где S_N – номинальная полная мощность двигателя. Потребляемая реактивная мощность сравнительно невелика, она не превышает реактивную мощность, потребляемую асинхронным двигателем, питаемым непосредственно от сети. И что ещё важнее, реактивная мощность изменяется в узких пределах.

3.2. Искажение напряжения в узле нагрузки от работы электропривода

Потребляемые электроприводом токи отличаются от синусоидальных. Это вызывает искажение напряжения в точке общего присоединения. Стандартами нормируется как коэффициент искажения напряжения K_{UH} , так и коэффициенты гармоник напряжения K_{Un} . Нормально допустимое значение коэффициента искажения: $K_{UH} = 0.05$. Нормально допустимые значения коэффициентов гармоник по

Международному стандарту IEC 61000-2-12 $K_{Un.Intl}$ и по Российскому стандарту ГОСТ 13109-97 $K_{Un.Rus}$ показаны на рис. 2. Эти данные относятся к сетям 6-20 кВ.

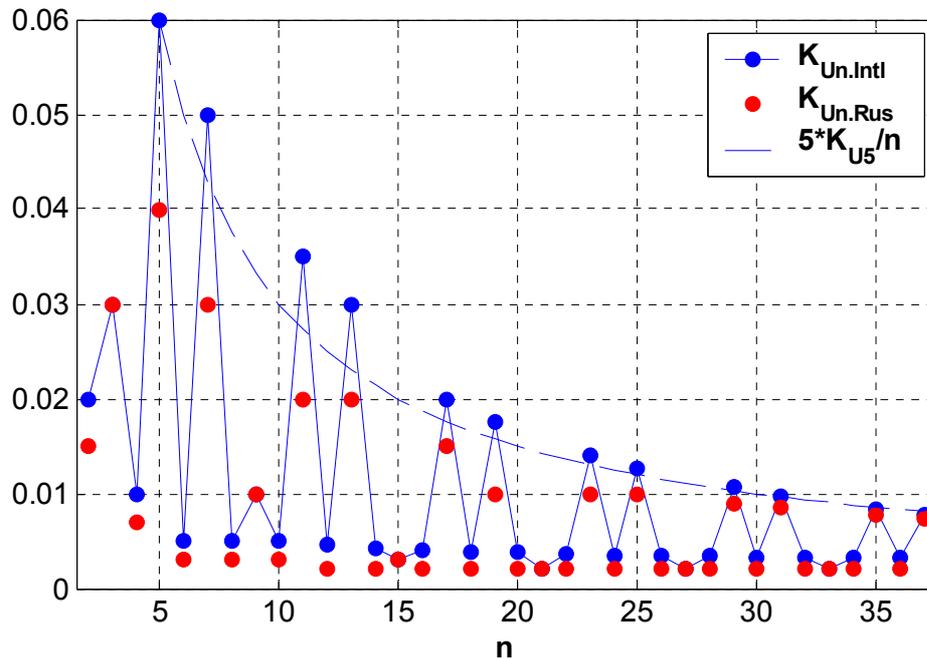


Рис. 2. Нормально допустимые значения коэффициентов гармоник

Проведен анализ условий выполнения требований Российского стандарта для различных видов выпрямителя на входе ПЧ. В таблице показана минимально необходимая мощность к. з. на шинах узла нагрузки S_{sc} , отнесенная к номинальной полной мощности двигателя S_N .

Вид выпрямителя	S_{sc}/S_N	
	Один привод	k приводов
Диодный 6-пульсный	40	$40 \cdot k$
Диодный 12-пульсный	26	$26 \cdot k$
Диодный 36-пульсный	20	$20 \cdot k$
Тиристорный 18-пульсный	50	$50 \cdot \sqrt{k}$
ШИМ выпрямитель ПЧ на основе ИТ, ШИМ выпрямитель с входным фильтром ПЧ на основе ИН	14	$14 \cdot \sqrt{k}$

Следует отметить, что ограничение по коэффициенту искажения играет роль только для 6-пульсных выпрямителей. В остальных случаях определяющими являются ограничения по коэффициентам гармоник. Несколько неожиданный результат – использование многопульсного диодного выпрямителя не даёт существенного эффекта по коэффициентам гармоник. В отношении Международного стандарта эффект вообще отсутствует, что иллюстрируется пунктирной кривой на рис. 2. Наиболее благоприятна ситуация для ШИМ выпрямителя ПЧ на основе ИТ и для ШИМ выпрямителя с входным фильтром ПЧ на основе ИН; такой электропривод может питаться даже от источника соизмеримой мощности.

Помимо канонических гармоник, входные токи регулируемого электропривода содержат составляющие, частота которых не кратна частоте основной гармоники, так называемые интергармоники. Эти составляющие проходят через ПЧ из цепи статора. Особенно существенно это проявлялось в ПЧ на основе циклоконвертера; это –

практически неизлечимый недостаток данного вида ПЧ. Но и в современных ПЧ с ШИМ это явление полностью не устранено. Входные токи электропривода и напряжения на шинах узла нагрузки, строго говоря, не являются периодическими процессами из-за интергармоник. В качестве примера на рис. 3 показан спектр отклонения напряжения в узле нагрузки от работы электропривода на основе инвертора тока, с ШИМ выпрямителем и входным фильтром. Кратность мощности короткого замыкания в этом примере составляет $S_{sc}/S_N = 15$. Показана именно часть спектра с интергармониками. В этом диапазоне частоты зарегистрирован вообще сплошной спектр, характерный для непериодического процесса.

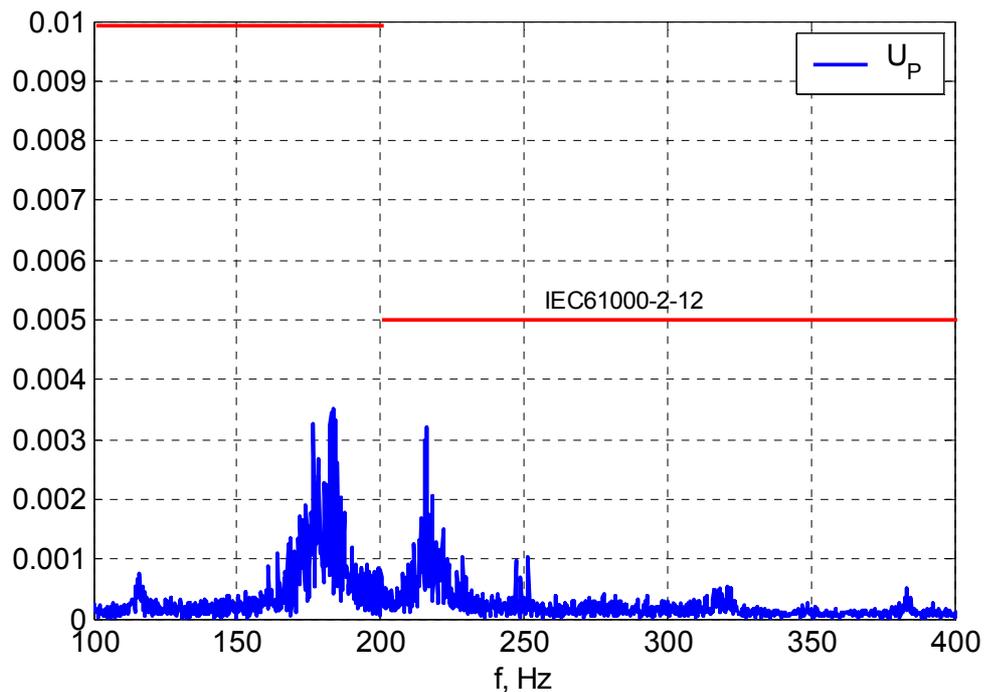


Рис. 3. Часть спектра напряжения в узле нагрузки

Международным стандартом IEC61000-2-12, в рекомендательном порядке, ограничиваются коэффициенты интергармоник напряжения в точке общего присоединения. Они приравниваются к последующим чётным гармоникам. Ограничения эти показаны на рис. 3. В данном примере имеет место примерно 1.5-кратный запас по отношению к ограничениям, и это – при исключительно слабой сети. Тем не менее, это явление нежелательно. Определённые перспективы для существенного подавления интергармоник открывают усовершенствованные методы модуляции инвертора.

4. ВЫВОД

Условия электромагнитной совместимости с питающей сетью во многом определяют выбор вида и параметров мощного регулируемого электропривода переменного тока. В ряде случаев эти требования влияют на выбор системы электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Межгосударственный Стандарт ГОСТ 13109-1997. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.- Переиздание, январь 2002.

[2] International Standard IEC 61000-2-12. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part -12-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems.- 2003.04.



Беляев Дмитрий Валентинович,
Закончил МИФИ в 1983 году, с 1994 года – сотрудник
Rockwell Automation. Менеджер по продажам, мощный
электропривод. 167 реализованных проектов на основе
высоковольтного регулируемого электропривода.



Вейнгер Александр Меерович,
доктор техн. наук, профессор, автор и соавтор 4 книг,
более 190 опубликованных статей и докладов, более 60
изобретений в области автоматизированного
электропривода и смежных областях; в настоящее время –
консультант по мощным электроприводам, регион EMEA,
компания Rockwell Automation.