

Преобразователи частоты.

Основные сведения. Классификация. Выбор

Технические данные и возможности.

Основные технические данные и возможности преобразователей СК...:

1. Обеспечивают регулирование скорости вращения выходного вала двигателя вниз и вверх от номинальной:
 - 1.1. с постоянной величиной крутящего момента при регулировании вниз;
 - 1.2. с постоянной величиной передаваемой мощности при регулировании вверх;
2. Выходная мощность от 0,12 до 160,00 кВт;
3. Диапазон регулирования скорости вращения вала:
 - 3.1. двигателя в стандартном исполнении - до 20% ниже номинальной скорости;
 - 3.2. двигателя с принудительной вентиляцией – до 1 : 25 ниже номинальной скорости вращения;
 - 3.3. двигателя с принудительной вентиляцией и обратной связью по скорости от 0 до номинальной скорости вращения;
 - 3.4. регулирование скорости вверх от номинальной ограничено механической прочностью подшипникового узла и точностью балансировки ротора;
4. Погрешность установки скорости вращения без датчика скорости 0,5 % ;
5. Возможность установки шагового режима работы двигателя с датчиком положения;
6. Возможность формирования пусковых свойств в скалярном режиме и динамических свойств в векторном режиме управления асинхронным двигателем;
7. Возможность использования в многодвигательных системах. Подключение нескольких двигателей к одному преобразователю. Синхронизация работы нескольких двигателей (режим электронного вала).
8. Возможность интегрирования в промышленные сети.

Основные сведения.

Преобразователи частоты предназначены для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором¹.

По способу преобразования частоты, преобразователи подразделяются на непосредственные преобразователи частоты, состоящие из инвертора, преобразующего непосредственно синусоидальное напряжение промышленной частоты в переменное напряжение требуемой более низкой частоты, и преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока (ПЧПТ). В последних, синусоидальное напряжение промышленной частоты, с помощью управляемого или неуправляемого выпрямителя, сначала преобразуется в постоянное напряжение, затем инвертируется в переменное требуемой частоты (как, выше так и ниже от частоты сети) и амплитуды.

¹ Возможные применение преобразователей частоты шире, например: индукционные печи, синхронные двигатели.

Благодаря простоте силовых цепей и цепей управления наибольшее распространение нашли преобразователи со звеном постоянного тока и неуправляемым выпрямителем. Блок-схема силовой части преобразователя со звеном постоянного тока и неуправляемым выпрямителем, работающего на двигательную нагрузку показана на рис. 1.

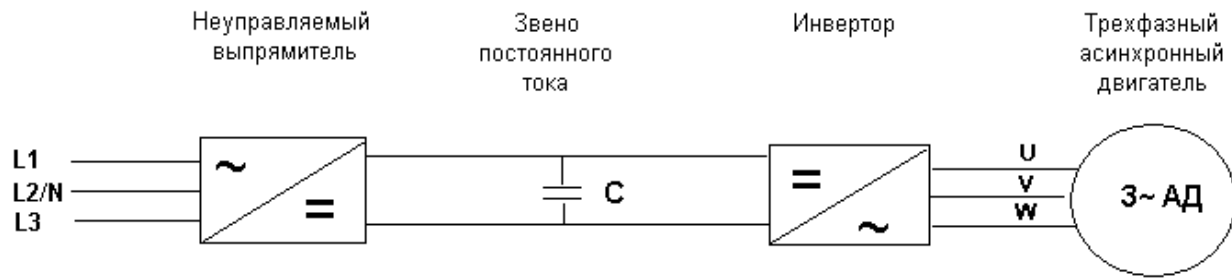


Рис. 1

Преобразователь состоит из неуправляемого выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме², сглаживающего конденсатора³, и инвертора.

Формирование величины выходного напряжения и его частоты производится инвертором, блок-схема которого показана на рис. 2.

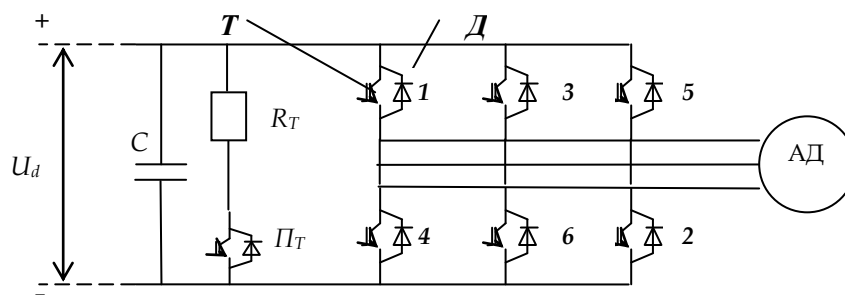


Рис. 2

Благодаря сравнительной простоте системы управления, переменное напряжение требуемой величины и частоты, близкое по форме к синусоидальной формируется применением метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 3. показано формирование выходного напряжения одной фазы инвертора U_f , при частоте управляющего сигнала U_y 50 Гц и частоте пилообразного опорного сигнала U_o 2000 Гц. Достижение гладкой синусоидальной формы применением метода ШИМ не возможно. Не синусоидальность в форме выходного напряжения является причиной не синусоидальности формы кривых токов и как следствие пульсаций момента на валу. При низкой выходной частоте (малых скоростях вращения ротора), и малой инерционности нагрузки, эти пульсации могут привести к прерывистому характеру вращения ротора и повышенному шуму. Особенно резко эти пульсации проявляются при низких значения несущей частоты менее 3 кГц. С увеличением значения несущей частоты до 16 кГц, формы кривых напряжений и токов сильнее приближаются к

² В случае однофазной сети, напряжение подводится к клеммам L1 и L1/N. При этом переключение с трехфазной схемы на однофазную производится автоматически.

³ Величина емкости конденсатор в цепи постоянного тока, подбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимую величину реактивного тока асинхронного двигателя.

синусоидальной, величины пульсаций момента уменьшаются, улучшаются шумовые характеристики.

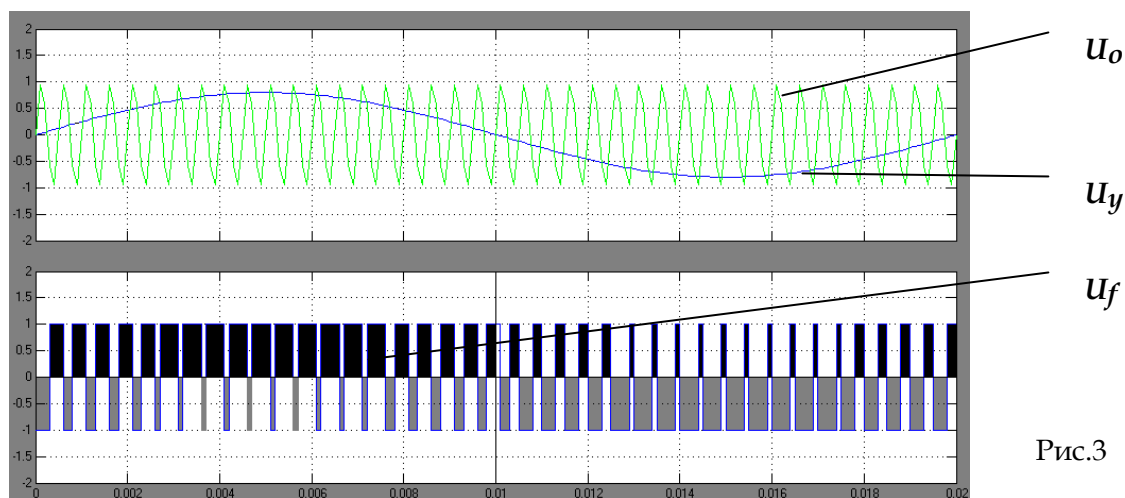


Рис.3

Возможность установки различных значений несущей частоты является одним из критериев выбора преобразователя.

Однако при высоких значениях несущей частоты проявляется ряд отрицательных эффектов. В первую очередь это связано с тем, что транзисторы T (Рис. 2) обычно типа IGBT (биполярные с изолированным затвором), обладают односторонней проводимостью, что приводит к необходимости шунтирования их диодами D , для обеспечения нормального протекания токов фаз. В определенные моменты времени ток фазы может протекать через диод D при открытом транзисторе T , что приводит к кратковременному образованию короткозамкнутых контуров и как следствие возникновение:

- перенапряжений в обмотках двигателя, ухудшающих условия работы изоляции;
- электромагнитного излучения высокой частоты, что может резко сказаться на работе радиотехнических устройств, установленных вблизи от преобразователя;
- дополнительных источников тепла, что приводит к необходимости установки дополнительных теплоотводящих элементов.

Формы входных напряжений и токов также отличаются от синусоидальной. Искажения формы входного напряжения определяются мощностью цепи, и резко проявляются при работе преобразователя на маломощную сеть. Искажения формы кривой тока, являются следствием принципа работы выпрямителя, и связаны с периодической перезарядкой конденсатора.

Ослабление отрицательного влияния данных факторов достигается применением входных фильтров и выходных дросселей. Наличие фильтров, дросселей, встроенных в преобразователь, или поставляемых совместно с преобразователем, второй критерий выбора преобразователя.

Наличие высших гармонических в кривых токов и напряжений предопределяет использование развитых средств измерений, мониторинга и защиты преобразователя. Наиболее точные измерения в преобразователях предполагают многократное измерение мгновенных значений токов и напряжений и следовательно точную регистрацию бросков

токов и напряжений, что обеспечивает наиболее полную защиту преобразователя от перенапряжений и сверхтоков.

Развитые средства измерений и контроль, как измеряемых, так и рассчитанных на их основе величин обеспечивают своевременное вмешательство в работу преобразователя и исключение выхода из строя как преобразователя, так и привода в целом, что также является критерием выбора преобразователя.

Выбор преобразователя частоты по мощности

Основная функция преобразователя эффективное управление асинхронным двигателем, в точном соответствии с требованиями технологического процесса, обеспечивая при этом заданный ресурс работы электродвигателя, самого преобразователя и электропривода в целом.

Управляемость, надежность, долговечность системы асинхронный двигатель-преобразователь частоты (АД-ПЧ), во многом определяется правильным выбором мощности преобразователя.

В качестве асинхронного двигателя в частотно-управляемом приводе, в основном, применяются стандартные асинхронные двигатели. Причем развитые средства автоматического определения параметров асинхронного двигателя (что является одним из критериев выбора преобразователя) позволяют присоединять к преобразователю двигатели разных производителей. При этом мощность преобразователя может быть, как выше, так и ниже мощности двигателя⁴.

При проектировании общепромышленных приводов асинхронный двигатель, как правило, рассчитывается по расчетной мощности нагрузки рабочей машины. Затем выбирается двигатель из стандартного ряда мощностью, которая равна, а чаще всего выше расчетной⁵. В этом случае, и при условии, что к приводу не предъявляются повышенные требования по динамике и перегрузочной способности (при спокойной нагрузке), возможно применение преобразователя меньшей мощности, но в пределах одной ступени стандартного ряда мощностей.

Выбор преобразователя частоты мощностью на одну ступень ниже мощности двигателя возможен и при работе двигателя на насосы и вентиляторы, т.е. механизмы с переменной нагрузкой и с малыми пусковыми моментами.

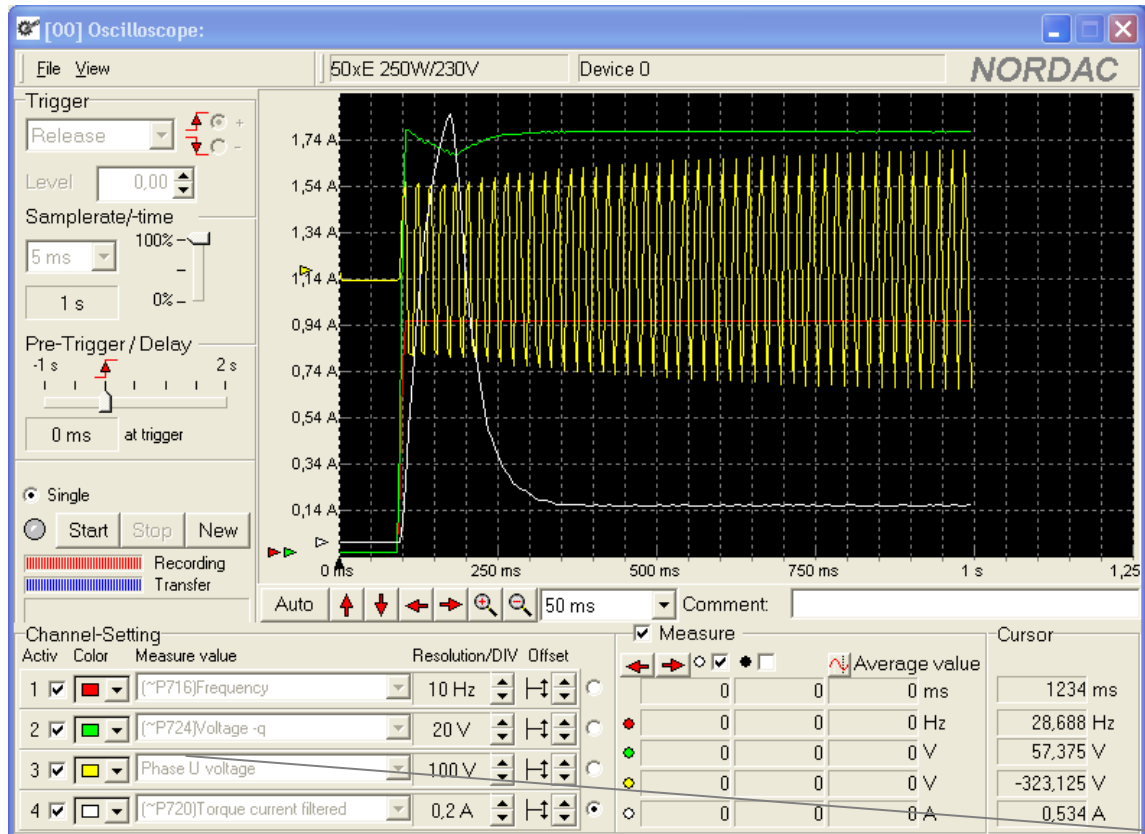
Перегрузочная способность преобразователя, при этом, должна быть не ниже 150% ⁶. В этом случае настройки преобразователя позволяют обеспечить плавное, регулируемое формирование пусковых свойств с токами, не превышающими максимально допустимые токи преобразователя и с выводом двигателя на рабочий режим.

⁴ Мощность преобразователя частоты, приводимая в каталогах, соответствует мощности 4-х полюсного двигателя.

⁵ Т. е. двигатель работает с меньшим, чем номинальный, моментом на валу и, следовательно, меньшим током. Рекомендуется получить подтверждение производителя.

⁶ Рекомендуется получить подтверждение производителя.

При питании двигателя от преобразователя частоты характер и величины бросков пусковых токов и моментов напрямую зависит от установленной скорости нарастания частоты и напряжения питания, момента инерции, и статического момента нагрузки.



Frequency -- выходная частота преобразователя;
 Voltage - q -- напряжения по осям -q;
 Torque current filtered -- активный ток статора.
 Phase U voltage - напряжение на фазе U.

Рис.4

Осциллограмма пуска асинхронного двигателя мощностью 250 Вт без нагрузки с установленным временем разгона 0 сек.

Осциллограмма пуска асинхронного двигателя мощностью 250 Вт без нагрузки с установленным временем разгона 0,5 сек показаны на рис. 5

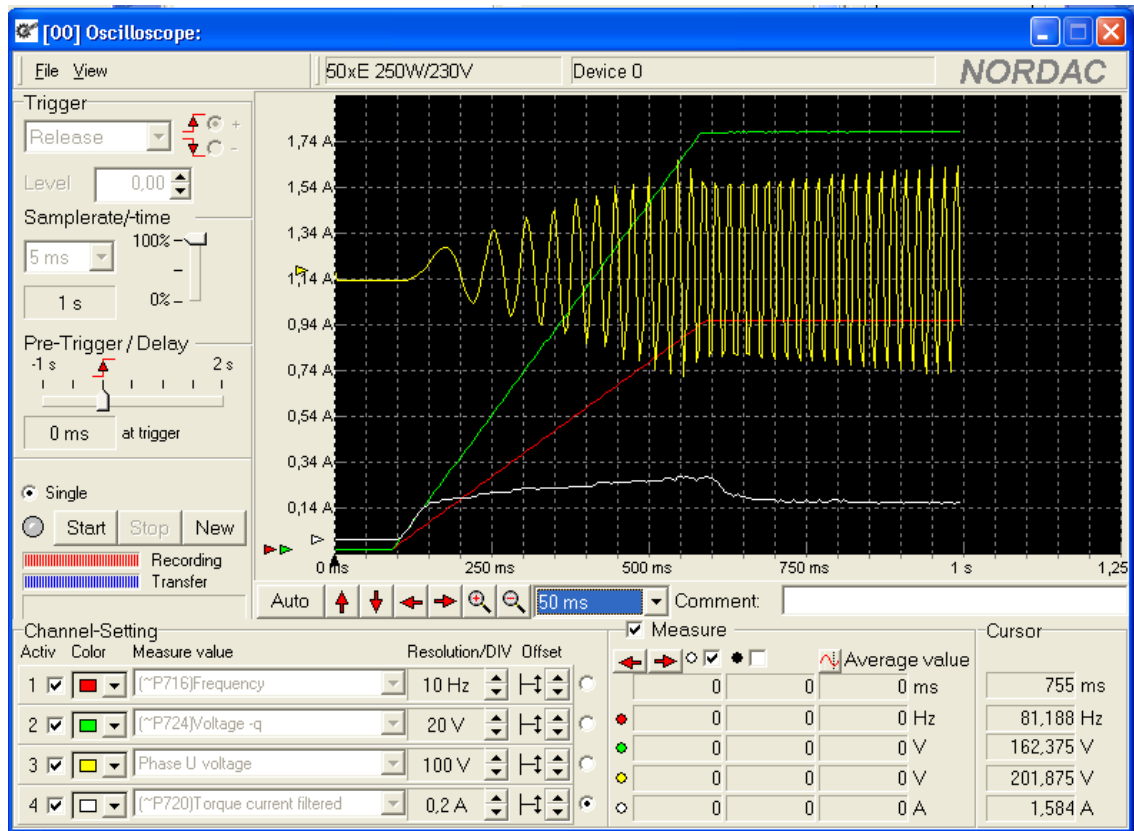


Рис.5

Из осциллограмм⁷ видно, что только за счет установки скорости нарастания частоты и напряжения удается практически исключить броски пусковых токов⁸.

Если к приводу предъявляются повышенные требования по пусковым характеристикам или жесткие требования по динамике (например, ограниченное время разгона или торможения, частые включения и т.д.), преобразователь выбирается на большую мощность, но, в пределах до трех ступеней стандартного ряда.

Силовые транзисторы преобразователя рассчитаны на длительную безаварийную работу, при номинальных токах. Допустимое превышение токов, как правило, составляет 150-200% от, номинального тока в пределах 30-60 сек. Если, эти пределы превышаются, преобразователь, в соответствии с логикой работы программного обеспечения увеличивает время протекания динамических процессов.

⁷ Осциллограммы получены на осциллографе, встроенном в программное обеспечение по настройке преобразователей частоты производства Getriebebau Nord.

⁸ Возможности формирования пусковых свойств двигателя, преобразователем частоты значительно шире.

При этом особое внимание следует уделить, пределам срабатывания защитных цепей преобразователя. В противном случае преобразователь не сможет обеспечить достаточную защиту двигателя.

Однако, оптимальным, конечно, является равенство мощностей асинхронного двигателя и преобразователя частоты, при равенстве (или некотором превышении) номинальных значений выходного тока преобразователя и тока двигателя.

При работе преобразователя с несколькими параллельно подключенными двигателями, рекомендуется выбирать преобразователь мощностью, которая равна или больше суммарной мощности двигателей и, с номинальным током, превышающим сумму номинальных токов всех двигателей не менее чем на 25%.

Выбор преобразователя частоты по заданным характеристикам привода

Требования, предъявляемые к электроприводу технологическим процессом, это точность и диапазон регулирования технологического параметра, связанного некоторой зависимостью с скоростью электродвигателя, поддержание заданной величины момента на валу в заданных пределах, качество переходных процессов при пуске и изменениях технологического параметра (преодоление статических и динамических моментов, время разгона и торможения, величин бросков тока в заданных пределах и т. д.), контроль и преодоление сбоев и аварийных ситуаций. Управляемость асинхронного двигателя, работающего от преобразователя частоты со звеном постоянного тока, достигается одновременным регулированием напряжения и частоты питания. Изменение частоты питания в процессе регулирования скорости вращения асинхронного двигателя приводит к изменению, электромагнитных характеристик асинхронного двигателя (падений напряжений на индуктивных сопротивлениях, токов, потоков, потокосцеплений), и в общем случае, величины электромагнитного момента. Степень и пределы изменения этих характеристик определяют качество статических и динамических показателей двигателя и, следовательно, зависят от требований предъявляемых к поведению привода в целом. Современные преобразователи частоты, осуществляющие, так называемое, векторное управление двигателем, обеспечивают высокое качество как, статических, так и динамических показателей привода.

Асинхронный двигатель представляет собой сложный, динамичный, нелинейный объект управления.

Поэтому управление асинхронным двигателем предполагает: контроль выходных параметров асинхронного двигателя (скорость вращения, момент); воздействие через регуляторы на входные параметры (напряжение, частота), с целью обеспечения качества регулирования; при поддержании заданного внутреннего параметра (потокосцепления статора, ротора).

Контроль состояния выходных и внутренних параметров двигателя, возможен системой магнитных, электронных и электромеханических датчиков. Поскольку стоимость таких датчиков достаточно велика, целесообразным оказывается осуществление этого контроля косвенным путем, через сравнительно просто измеряемые величины (токов и напряжений фаз) и расчетом управляющих величин по записанной в памяти процессора математической модели (наблюдающее устройство) асинхронного двигателя.

В простейшем случае, это задающее устройство, обеспечивающее линейную зависимость $U / f = U_H / f_H = const$ нарастания частоты и амплитуды напряжения, где U_H, f_H - номинальные значения напряжения и частоты двигателя соответственно⁹. При управлении асинхронным двигателем по линейному закону $U / f = U_H / f_H = const$, перегрузочная способность двигателя снижается с уменьшением выходной частоты. Пусковой момент двигателя практически равен нулю.

Из расчетных механических характеристик видно, при уменьшении скорости вращения двигателя, в соответствии с законом $U / f = U_H / f_H = const$,

перегрузочная способность двигателя уменьшается.

На рисунке характер изменения момента сопротивления на валу при вентиляторной нагрузке показан штрихпунктирной линией. Сплошными линиями показано семейство механических характеристик двигателя при различных выходных частотах преобразователя.

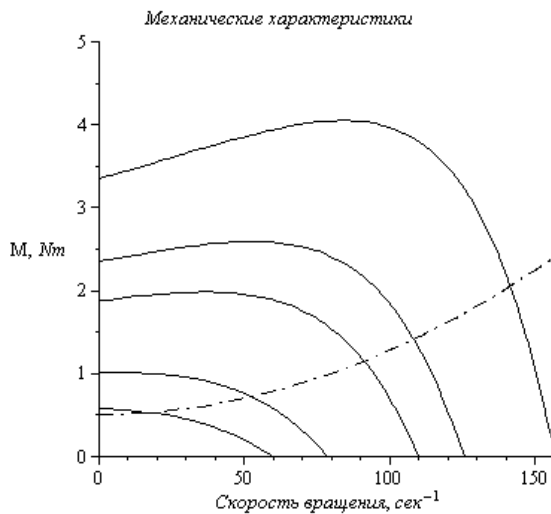


Рис. 6

Преобразователи с линейной зависимостью $U / f = U_H / f_H = const$, целесообразно применять:

- для регулирования скорости вращения двигателей, работающих на вентиляторную нагрузку $M_c \cong \Omega^2$ (Ω - скорость вращения ротора);

- для управления синхронными двигателями;

- для управления несколькими асинхронными двигателями, подключенными параллельно к одному преобразователю частоты.

Для обеспечения необходимой величины пускового момента двигателя при постоянной нагрузке на валу, в преобразователях с линейной зависимостью U / f предусматривается задание минимального значения выходной частоты f_{min1} и соответствующего ему минимального значения выходного напряжения U_{min1} , при которых осуществляется пуск двигателя.

Регулирование скорости асинхронного двигателя ниже номинальной, производится по заданному линейному закону управления U / f .

Регулирование скорости асинхронного двигателя выше номинальной возможно при сохранении постоянной мощности на валу. Перегрузочная способность асинхронного

⁹ Преобразователи с разомкнутой системой управления.

двигателя и его допустимый момент на валу, при этом, уменьшается, примерно, обратно пропорционально частоте.

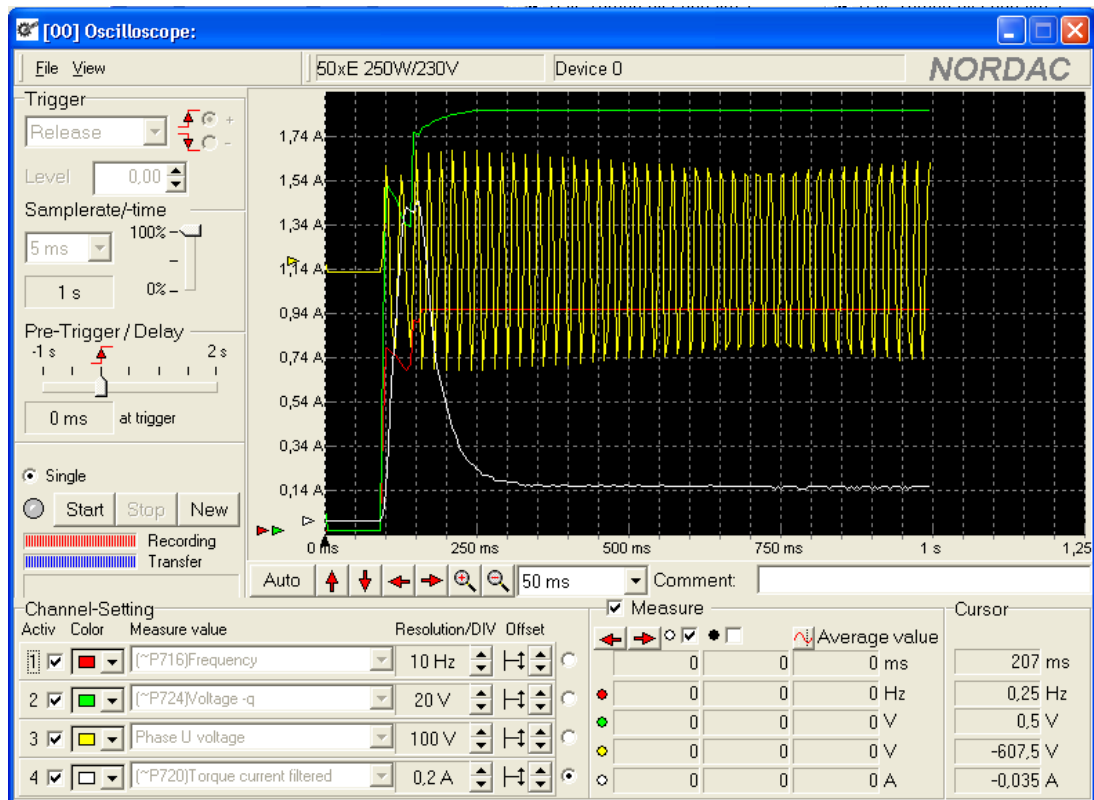
Стандартные средства мониторинга и защиты асинхронного двигателя, предусматривают:

- с целью предотвращения перегрева двигателя из-за ухудшения теплоотвода при низких скоростях¹⁰, установку ограничения по минимальному значению выходной частоты $f_{\min 0}$, при достижении которой, преобразователь или вырабатывает нулевую частоту (двигатель останавливается), или вырабатывает частоту обратного направления $-f_{\min 0}$ (двигатель изменяет направление вращения);

- ограничение по максимальному значению выходной частоты¹¹ f_{\max} , определяемого механической прочностью вращающихся частей двигателя и подшипников.

Стандартное средство защиты преобразователя аппаратная токовая отсечка. При превышении бросков токов 1,5 – 2,0 кратных значений от номинального скорость нарастания частоты и амплитуды напряжения, установленного в задающем устройстве уменьшается, соответственно возможно увеличение времени пуска.

Рис. 7



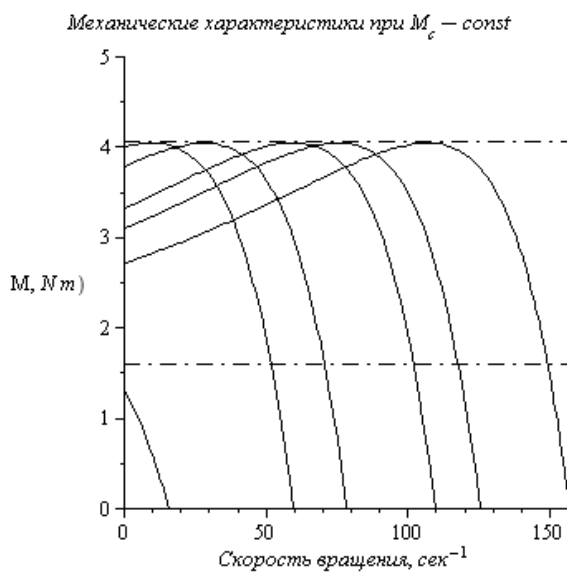
Осциллограмма пуска асинхронного двигателя мощностью 250 Вт без нагрузки с установленным временем разгона 0 сек. Ток отсечки установлен равным номинальному току двигателя¹²

¹⁰ Для двигателей с независимой вентиляцией данное ограничение отсутствует.

¹¹ Для преобразователей, максимальная выходная частота которых достигает 200 Гц и выше.

При необходимости поддержания перегрузочной способности двигателя при уменьшении скорости вращения используются преобразователи, обеспечивающие линейный закон $E / f = E_H / f_H = const$, где E_H, f_H - номинальные значения напряжения за активным сопротивлением статора и частоты двигателя соответственно. При этом, с уменьшением скорости вращения двигателя, выходное напряжение преобразователя частоты формируется таким образом, чтобы обеспечить компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении статора. Зависимость величины падения напряжения на активном сопротивлении статора от частоты, в общем случае носит нелинейный характер.

Из расчетных механических характеристик видно, при уменьшении скорости вращения двигателя, в соответствии с законом $E / f = E_H / f_H = const$,



перегрузочная способность двигателя сохраняется.

На рисунке характер изменения момента сопротивления на валу при постоянной нагрузке показан штрихпунктирной линией.

Сплошными линиями показано семейство механических характеристик двигателя при различных выходных частотах преобразователя.

Рис. 8

В серийных преобразователях, в которых реализован данный закон управления, зависимость выходного напряжения $U + I_1^* R_1 / f$ (I_1^* – относительное значение тока статора), от частоты линеаризуется, и задается дополнительными точками соответствующих значений U_n, f_n , что позволяет обеспечить сохранение перегрузочной способности в диапазоне изменения частоты до 10 : 1, при отсутствии требования по точности регулирования. При требовании по точности установки скорости вращения до $\pm 10\%$ диапазон регулирования не превышает 3 : 1.

К ограничению по применимости таких преобразователей частоты относится и не возможность работы в области малых частот (см. сноску 9). В области малых частот (при частоте примерно 10 раз ниже номинальной) двигатель перестает вырабатывать момент,

¹² Осциллограммы, показанные на рис. 4 получены при установленном значении тока отсечки равным 1,5 кратной величине номинального тока двигателя

достаточный для преодоления момента сопротивления на валу. Устранение этого ограничения достигается некоторым превышением напряжения питания¹³, над напряжением, рассчитанным из условия $U + I_1^* R_1 / f$, в области малых частот, что позволяет увеличить диапазон регулирования в 2 – 3 раза.

Данные преобразователи, дешевые, простые и широко применяются в электроприводе с невысокими требованиями к точности и ограниченном диапазоне регулирования. При подключении двигателя к этим преобразователям нужно указывать только номинальные величины напряжения и схемы соединения, правильно настроить стандартные средства мониторинга и защиты. Некоторую трудность представляет настройка линеаризованных характеристик.

Расчетные механические характеристики при законе управления $U + I_1^* R_1 / f$ и повышенным напряжением в области малых частот.

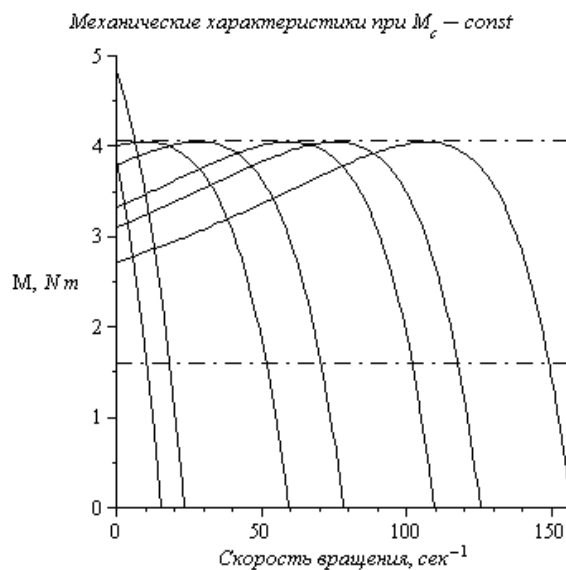


Рис. 9

Высокое качество статических и динамических показателей асинхронного частотно-управляемого привода можно получить применением преобразователей, в которых формирование величин выходного напряжения и частоты обеспечивается обратными связями по току, скорости вращения и моменту двигателя.

В современных преобразователях работающих по замкнутой системе векторного управления¹⁴ точность установки скорости вращения определяется долями процента¹⁵ с

¹³ Превышение напряжения ограничено максимально допустимым значением напряжения питания двигателя и устойчивостью его работы.

¹⁴ Для работы с синхронными двигателями и в многодвигательном режиме в преобразователях предусматривается отключение векторного управления.

¹⁵ При управлении без датчика скорости. Если обратная связь по скорости формируется с использованием внешнего электронного или электромагнитного датчика, точность установки скорости вращения определяется техническими характеристиками датчика.

практически неограниченным диапазоном регулирования¹⁶, при заданном качестве динамических процессов.

Асинхронный двигатель как объект регулирования представляет собой сложную систему, электромагнитный момент на валу, которого определяется всеми его параметрами.

В общем случае все параметры асинхронного двигателя переменные величины.

Величины индуктивностей обмоток зависят от степени насыщения магнитной системы.

Величины взаимных индуктивностей магнитно-связанных обмоток зависят от пространственного расположения осей обмоток. Активные сопротивления обмоток статора и ротора изменяются в процессе работы из-за нагрева. На величину активного сопротивления короткозамкнутого ротора влияет эффект вытеснения тока.

Напряжения, токи и потокосцепления двигателя характеризуются как величиной (эффективным значением), так и пространственным расположением, т.е. являются величинами векторными, направление которых определяет величину электромагнитного момента.

В зависимости от степени и полноты учета этих факторов преобразователи¹⁷ общепромышленного применения, подразделяются на¹⁸:

- преобразователи с системой скалярного управления и;
- преобразователи с системой векторного управления;

В преобразователях с системой скалярного управления в качестве переменных обратных связей, сигналов управления и заданных характеристик используются эффективные значения.

Преобразователи с системой скалярного управления, по существу, подобны преобразователям с законом управления $E / f = E_H / f_H = const$.

Но, если, в преобразователях с разомкнутой системой управления, для получения приемлемых характеристик двигателя, зависимость E / f задается некоторой эмпирической функцией, то в преобразователях с замкнутой системой управления эта зависимость формируется с помощью обратной связи по реальным величинам тока и активного сопротивления статора, с введением дополнительных функциональных алгоритмов управления¹⁹.

¹⁶ Диапазон регулирования при заданной точности определяется:

- способом определения скорости двигателя: датчиком скорости или расчетом в математической модели;
 - количеством параметров двигателя, используемых в математической модели;
 - точностью контроля изменений параметров при работе двигателя
- и ограничен:

- устойчивостью замкнутой системы управления;
- максимально допустимыми значениями частоты, напряжения, токов и нагрева двигателя.

¹⁷ Преобразователи с замкнутой системой управления.

¹⁸ По внешним признакам о принадлежности преобразователя к той или иной группе можно судить по количеству параметров асинхронного двигателя, необходимых для корректной работы преобразователя. В современных преобразователях векторного типа внутренние параметры асинхронных двигателей определяются встроенными средствами преобразователя.

¹⁹ В современных преобразователях обратные связи и расчетные блоки собраны на основе быстродействующих электронных компонент. Измерение, обработка и передача информации происходит в реальном времени.

Один из вариантов реализации обратной связи по току статора приведен на функциональной схеме, показанной на рисунке 10.

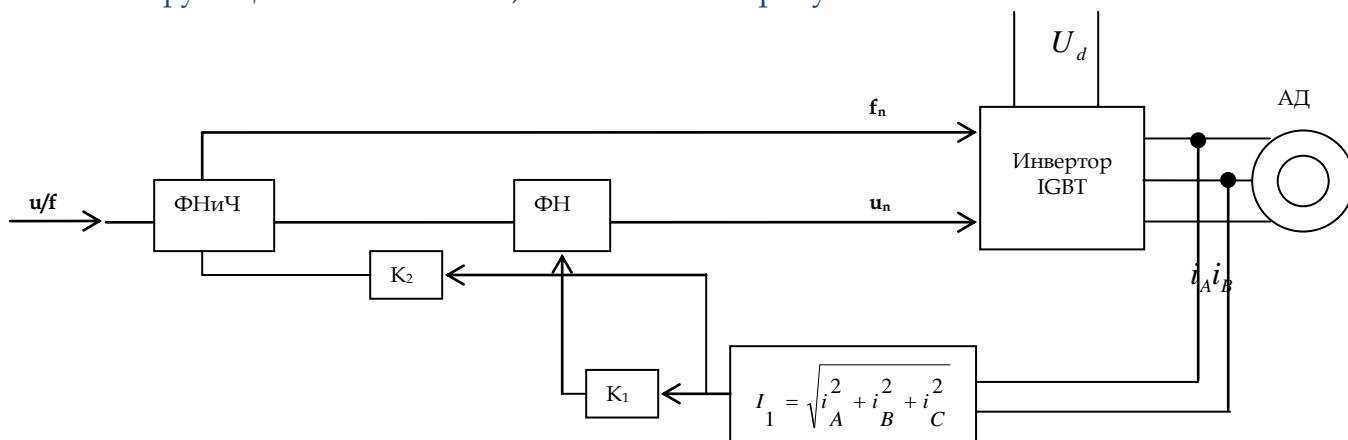
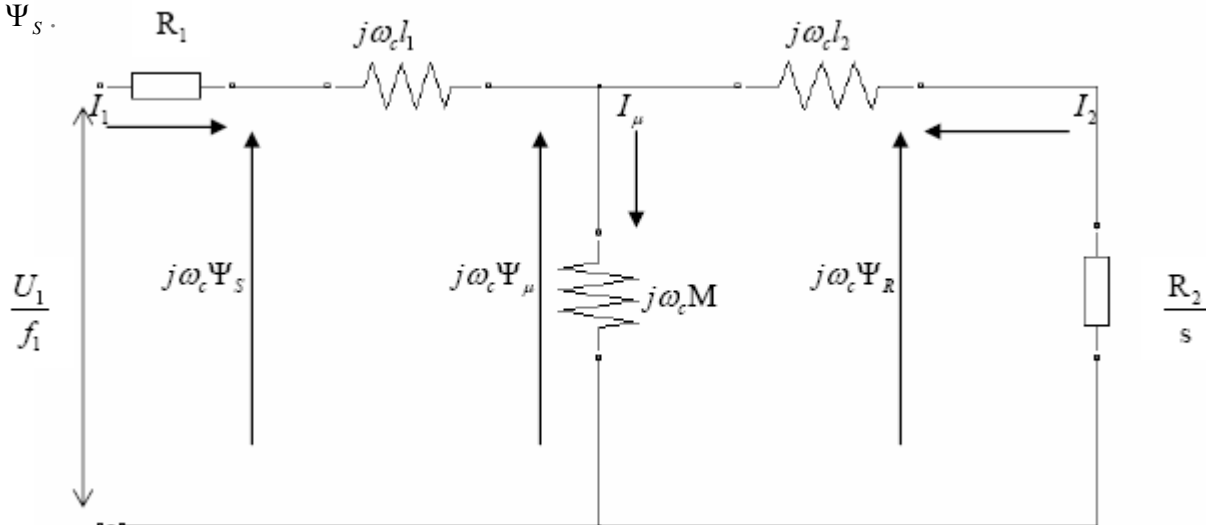


Рис. 10

При регулировании частоты вниз от номинальной, формирователь напряжения ФН формирует напряжение равное сумме сигналов задания напряжения u , потупившего от датчика интенсивности и сигнала пропорционального величине тока статора I_1 с коэффициентом усиления K_1 . Как правило, коэффициент усиления задается равным величине активного сопротивления статора.

Дополнительную функцию регулирования можно получить, формированием обратной связи по каналу с коэффициентом усиления K_2 . По мере увеличения тока статора (при увеличении нагрузки на валу) канал задает одновременное увеличение напряжения и частоты, что приводит к стабилизации скорости вращения вала.

С точки зрения физических процессов, протекающих в асинхронном двигателе, поддержание постоянства напряжения за активным сопротивлением статора, означает поддержание постоянной величины потокосцепления обмотки статора Ψ_s .



Если коэффициент усиления задать равным

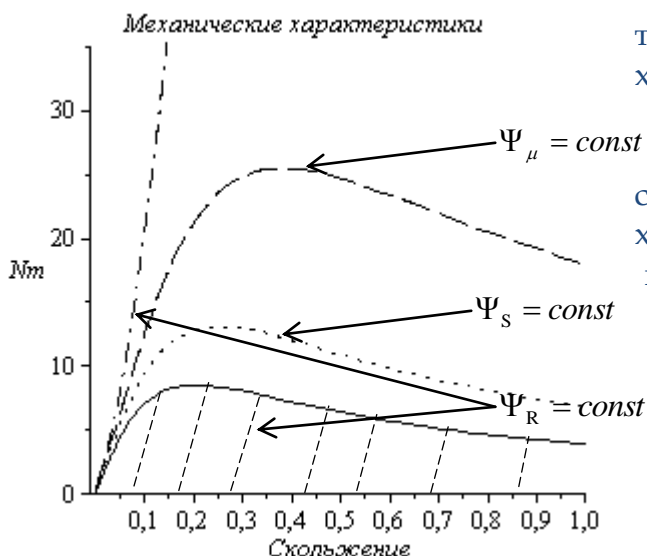
$$K_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega_c \cdot l_1)^2} \quad (a)$$

где l_1 - индуктивность рассеяния обмотки статора, то по мере регулирования частоты, постоянным будет поддерживаться потокосцепление контура намагничивания Ψ_μ .

Если коэффициент усиления задать равным

$$K_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega_c \cdot l_1 + \omega_c \cdot l_2)^2} \quad (б)$$

где l_2 - индуктивность рассеяния обмотки ротора, то по мере регулирования частоты, постоянным будет поддерживаться потокосцепление ротора Ψ_R .



Чем больше коэффициент усиления, тем жестче механические характеристики, и следовательно, выше точность установки скорости вращения. На рисунке 12 показано семейство механических характеристик при поддержании потокосцепления ротора Ψ_R , Ψ_μ и Ψ_s . Сплошной линией показана естественная механическая характеристика

Рис. 12

В преобразователях с системой скалярного управления, в зависимости от величины момента нагрузки и характера его изменения, применяются и другие соотношения зависимости напряжения и частоты, обеспечивающие компенсацию падения напряжения на индуктивных сопротивлениях обмоток статора и ротора. Однако, заметного увеличения диапазона регулирования или снижения статической погрешности они не дают.

Существенное улучшение статических и динамических свойств привода обеспечивают преобразователи с векторной системой управления. При заданной точности $\pm 0,5\%$, без внешнего датчика скорости диапазон регулирования достигает до 100:1. С датчиком

скорости диапазон регулирования достигает 500:1, причем статическая погрешность определяется погрешностью датчика.

В качестве переменных обратных связей, сигналов управления и заданных характеристик при векторном управлении используются мгновенные значения измеряемых величин, напряжений, токов, потокосцеплений.

Так же как и в преобразователях с системой скалярного управления принципом регулирования, определяющим диапазон и погрешность, является поддержание постоянным одного из потокосцеплений: статора, цепи намагничивания или ротора.

Но в отличие от систем скалярного управления использование мгновенных значений, позволяет поддерживать не только эффективное значение потокосцеплений, и их пространственное расположение, но и изменять углы между векторами токов и потокосцеплений. При этом появляется возможность задания режимов работы с максимальным моментом, с минимальным активным током и т.д.²⁰

В современных преобразователях из-за относительной простоты системы управления, в основном, используется управление с поддержанием постоянным потокосцепления ротора.

Основой для проектирования систем векторного управления является уравнения равновесия напряжений электромагнитных цепей асинхронного двигателя,

$$\vec{U}_1 = R_1 \vec{I}_1 + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_1 \quad (\text{в})$$

$$0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_2 \quad (\text{г})$$

где потокосцепления, функция токов и индуктивных сопротивлений

$$\vec{\Psi}_{1,2} = f(i_A(t), i_B(t), i_C(t), i_a(t), i_b(t), i_c(t), l, L, M, \gamma_R(t)) \quad (\text{д})$$

Использование уравнений, описывающих реальный асинхронный двигатель в системе управления, предполагает определение точных значений параметров асинхронного двигателя и контроль их изменений в процессе работы. Поэтому в преобразователях частоты предусматриваются алгоритмы, автоматического определения и адаптации величин параметров асинхронного двигателя, входящих в уравнения, реальным условиям работы.

и выражение для определения электромагнитного момента

$$M_{\text{в}} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \left| \vec{\Psi}_2 \times \vec{I}_1 \right| = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \left| \Psi_2 \cdot I_1 \cdot \sin(\alpha_{\Psi_2} - \alpha_{i_1}) \right| \quad (\text{е})$$

²⁰ См. инструкции по эксплуатации.

где α_{ψ_2} и α_{ψ_i} - углы между векторами потокосцепления ротора и тока статора, и осью фазы.

А обмотки статора соответственно. Из выражения электромагнитного момента видно, что если потокосцепление поддерживать постоянным и в динамических режимах, то изменение момента будет точно следовать за изменениями тока статора.

Для упрощения системы управления уравнения асинхронного двигателя с помощью матрицы замены переменных:

$$[\Pi(t)] = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \cos(\vartheta_1) & \frac{2}{3} \cos(-\vartheta_1 + \rho) & \frac{2}{3} \cos(\vartheta_1 + \rho) & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} \sin(\vartheta_1) & \frac{2}{3} \sin(-\vartheta_1 + \rho) & -\frac{2}{3} \sin(\vartheta_1 + \rho) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3} \cos(\vartheta_2) & \frac{2}{3} \cos(-\vartheta_2 + \rho) & \frac{2}{3} \cos(\vartheta_2 + \rho) \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{3} \sin(\vartheta_2) & \frac{2}{3} \sin(-\vartheta_2 + \rho) & -\frac{2}{3} \sin(\vartheta_2 + \rho) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \quad (\text{ж})$$

приводятся к виду:

$$\begin{aligned} R_1 i_X(t) - \omega_c ((L_1 + l_1) i_Y(t) + M i_Y(t)) + (L_1 + l_1) \left(\frac{d}{dt} i_X(t) \right) + M \left(\frac{d}{dt} i_X(t) \right) - U_d &= 0 \\ R_1 i_Y(t) + \omega_c ((L_1 + l_1) i_X(t) + M i_X(t)) + (L_1 + l_1) \left(\frac{d}{dt} i_Y(t) \right) + M \left(\frac{d}{dt} i_Y(t) \right) + U_q &= 0 \\ R_2 i_x(t) + \left(-\omega_c + p \left(\frac{d}{dt} \gamma_R(t) \right) \right) (M i_Y(t) + (l_2 + L_2) i_y(t)) + M \left(\frac{d}{dt} i_X(t) \right) + (l_2 + L_2) \left(\frac{d}{dt} i_x(t) \right) &= 0 \\ R_2 i_y(t) + \left(\omega_c - p \left(\frac{d}{dt} \gamma_R(t) \right) \right) (M i_X(t) + (l_2 + L_2) i_x(t)) + M \left(\frac{d}{dt} i_Y(t) \right) + (l_2 + L_2) \left(\frac{d}{dt} i_y(t) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$U_d = \sqrt{2} U_{1m} \sin(\alpha_{\psi_R})$$

$$U_q = \sqrt{2} U_{1m} \cos(\alpha_{\psi_R})$$

где U_{1m} - амплитудное значение напряжения питания; α_{ψ_R} -- угол между осью x вращающейся системы координат и вектором потокосцепления ротора.

Поскольку в системе уравнений (3) величины напряжений и токов постоянные величины, при условии постоянства угла α_{Ψ_R} (т. е. в момент измерений), то управление сводится к оперированию постоянными величинами.

При условии поддержания потокосцепления ротора, данная система уравнений позволяет формировать схему управления с двумя независимыми каналами регулирования: канал регулирования значения потокосцепления ротора, составляющей напряжения U_d , и канал регулирования активного тока статора, образующего момент, составляющей напряжения U_q . Тем самым, обеспечиваются высокие динамические характеристики асинхронного двигателя, сопоставимые с показателями двигателей постоянного тока, и дополнительные функциональные возможности управления. Обратные преобразования задаются в виде:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R}) U_d + \sin(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R}) U_q \\ \cos\left(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R} - \frac{2}{3}\pi\right) + \sin\left(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R} - \frac{2}{3}\pi\right) U_q \\ \cos\left(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R} - \frac{4}{3}\pi\right) + \sin\left(\omega_c t - \alpha_{\Psi_R} - \frac{4}{3}\pi\right) U_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (и)$$

На осциллограммах показаны напряжения, и токи статора при пуске асинхронного двигателя с установленным временем разгона 0,2 сек. С начальными значениями U_d и U_q равными нулю.

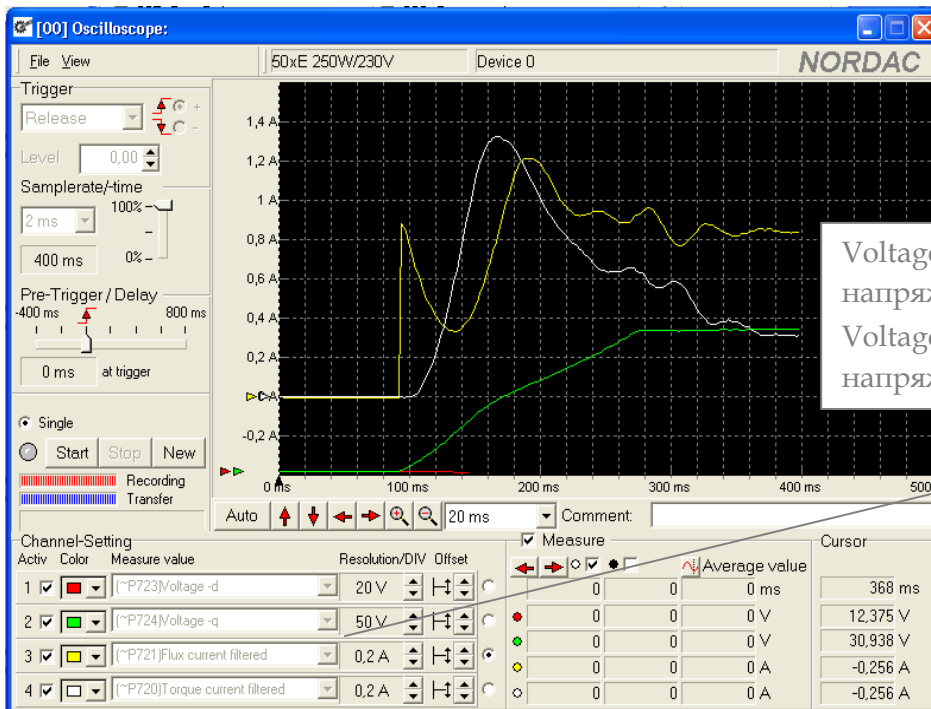


Рис. 13

С начальными значениями $U_d = 14, V$ и $U_q = \sqrt{U_1^2 - U_d^2}$.

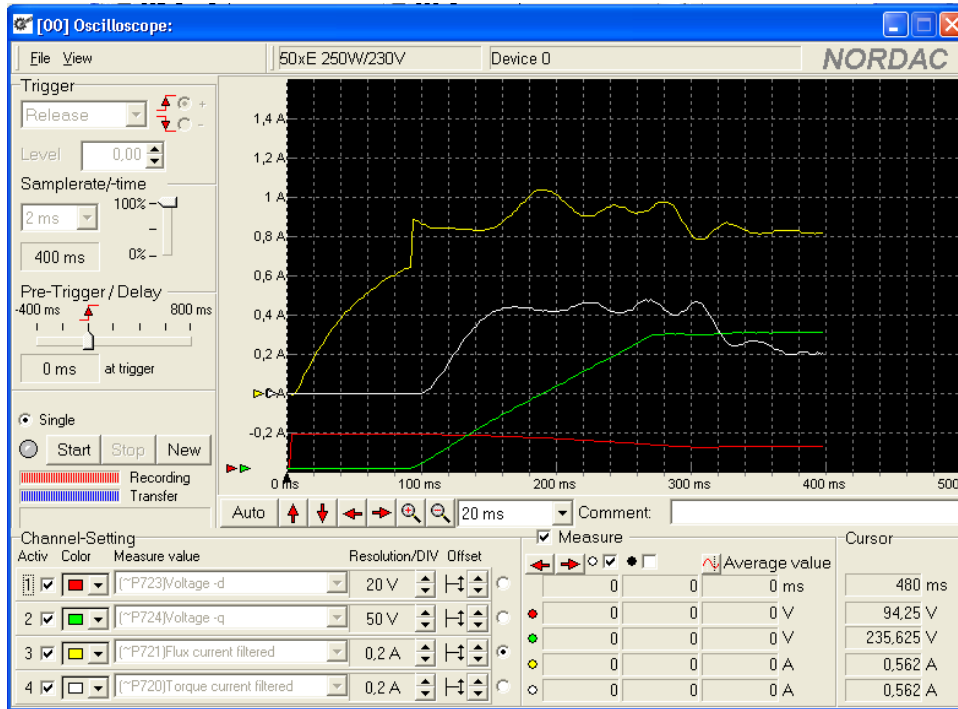


Рис. 14

С начальными значениями $U_d = 28, V$ в течение 0,1 сек.

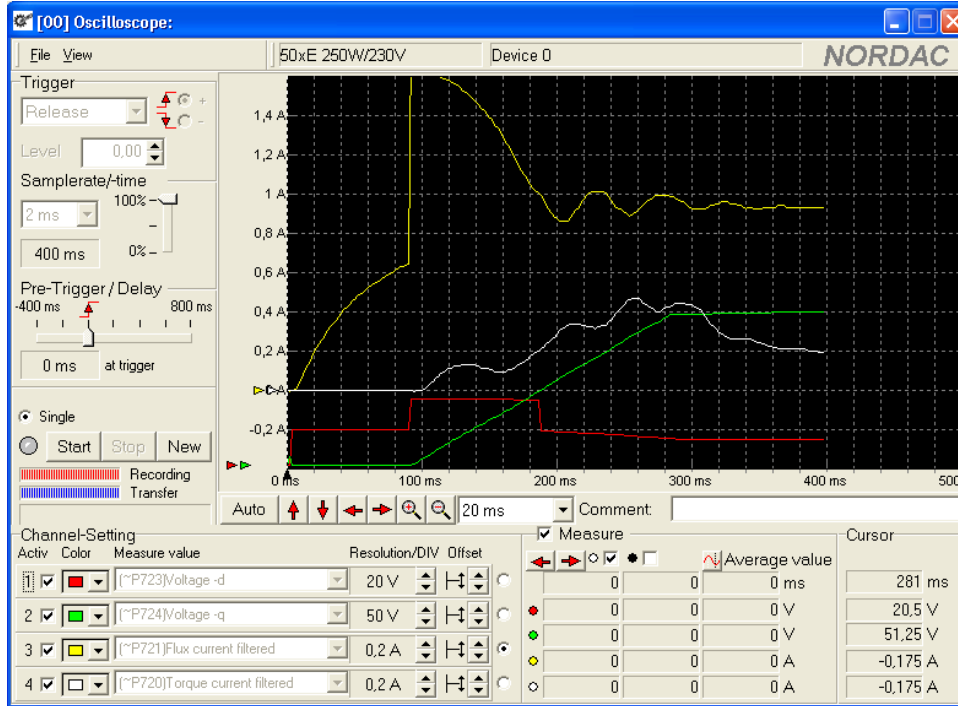


Рис. 15

С начальными значениями $U_q = 8, V$

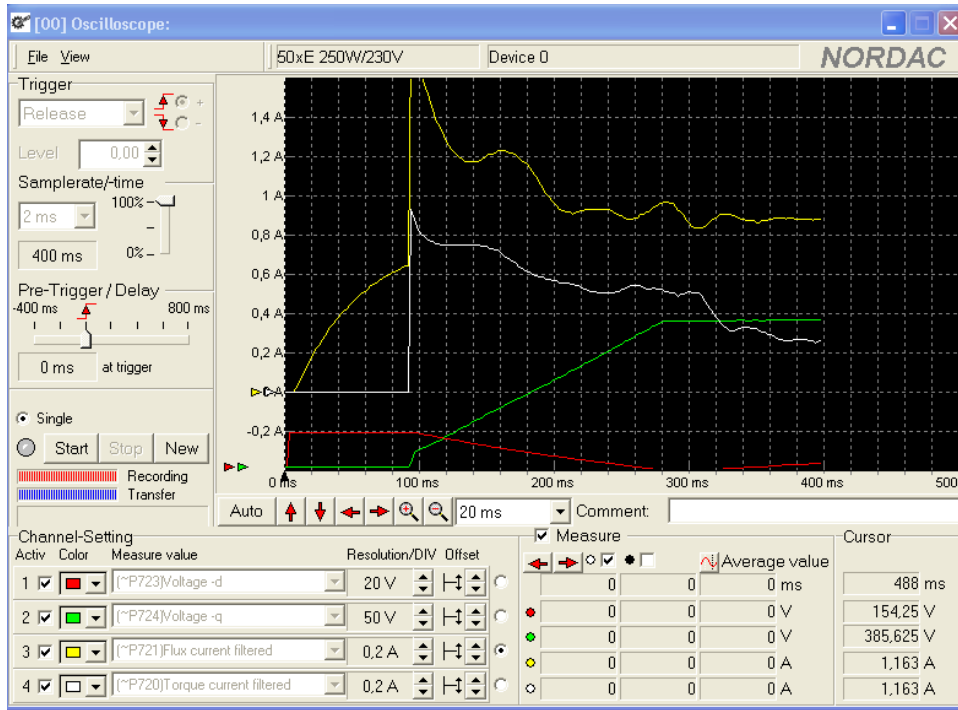
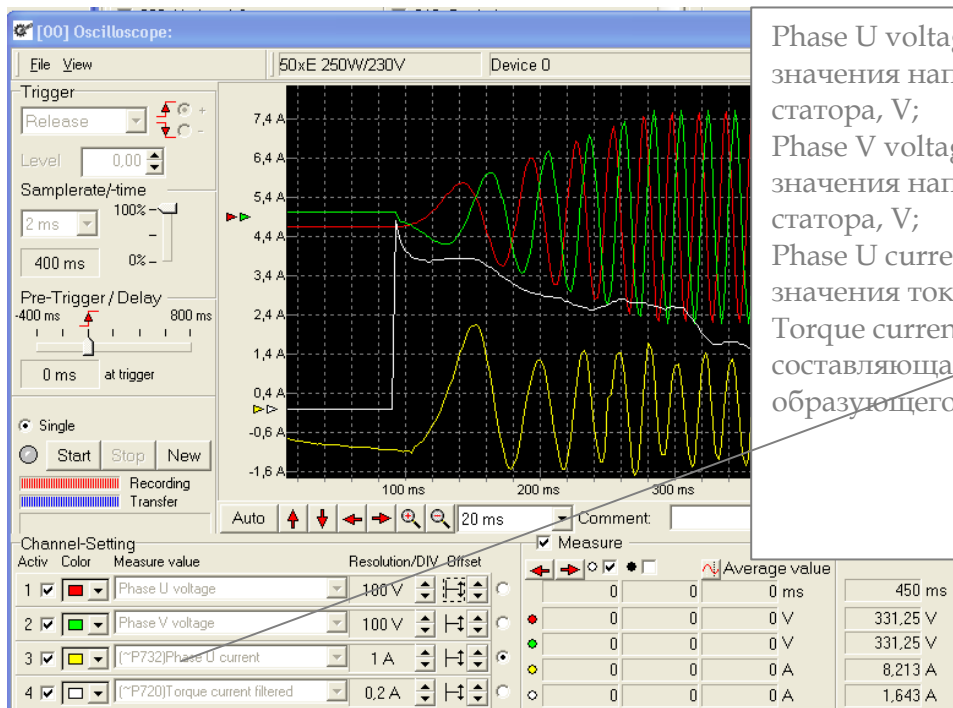


Рис. 16

Как видно из осциллограмм преобразователи с векторной системой управления обладают широкими функциональными возможностями формирования пусковых свойств двигателя. В преобразователях предусмотрены также функции задания необходимых динамических характеристик торможения за заданный период времени, формирования динамики привода при резких изменениях момента и скорости.

На осциллограммах рис. 17 показаны реальные значения напряжений фаз и тока, соответствующие установкам рис. 16



Phase U voltage – мгновенные значения напряжения фазы U статора, V;
 Phase V voltage – мгновенные значения напряжения фазы V статора, V;
 Phase U current – мгновенные значения тока фазы U статора, A;
 Torque current filtered – составляющая тока статора, образующего момент.

Рис. 17

Настройка и параметрирование

Наличие большого числа функциональных параметров, необходимых для полного учета особенностей работы привода в различных применениях, может привести к затруднениям при поиске и установке именно тех параметров, установка и диагностика которых необходима для конкретного применения.

Упрощение, в такой ситуации достигается применением в программе нескольких команд фильтрации и сортировки.

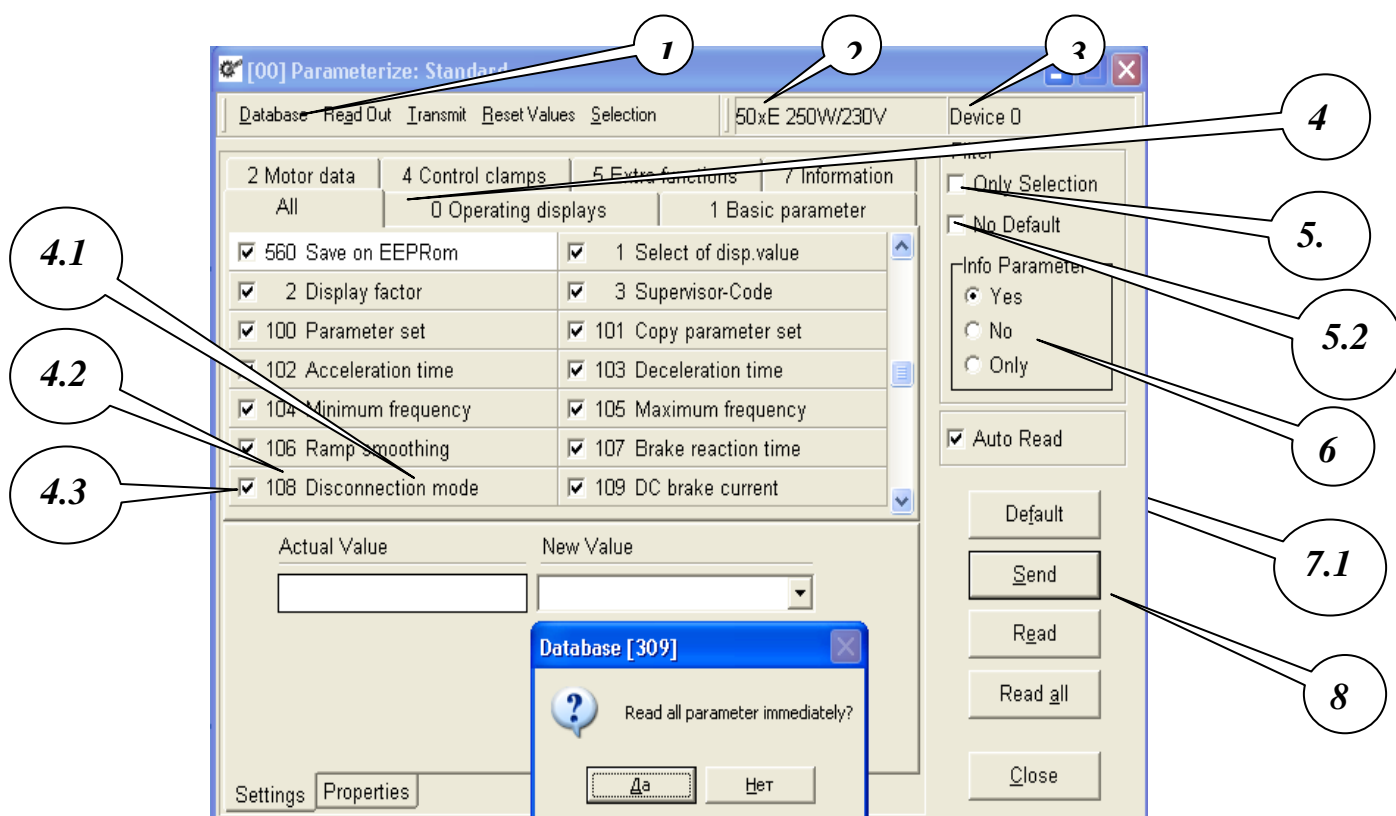


Рис. 18

Это **во-первых**, разбивка параметров на функциональные группы, отображаемые на различных вкладках 4:

- All вкладка установка/изменение всех параметры (All);
- 0 установка/изменение рабочих параметры (0 Operating displays)
- 1 установка/изменение основных параметры (1 Basic parameter)
- 2 установка/изменение данных двигателя (2 Motor data);

²¹ На примере программы Nordcon. Подробнее [Компьютерная программа Nordcon](#)

- 3 установка/изменение параметров регулирования скорости вращения (при наличии обратной связи по скорости) (3 Control parameters)²²
- 4 установка/изменение параметров клемм управления (4 Control clamps)
- 5 параметров специальных функций (5 Extra functions)
- 6 установка/изменение параметров позиционирования (при наличии обратной связи по позиции) (6 Positioning)
- 7 установка/изменение информационных параметров (7 Information).

Каждый функциональный параметр на вкладке, задан наименованием (4.1), условным номером (4.2) и логическим полем (4.3), позволяющим выделить данный параметр.

Во-вторых, возможностью фильтрации выделенных функциональных параметров (отображения только тех параметров, в полях (4.3) которых установлена галочка) с помощью, установки галочки в поле (5.1).

Групповое выделение функциональных параметров удобно производить с помощью команд меню Выборка (Selection) строки меню.

В-третьих, фильтрацией параметров, установленных по умолчанию (параметры установленные по умолчанию не отображаются) с помощью установки галочки в поле (5.2) Не по умолчанию (No Default).

В-четвертых, фильтрацией информационных параметров, с помощью группы переключателей (6).

В-пятых, фильтрацией параметров, относящихся к работе Наблюдателя²³, с помощью установки значений 0, 1 или 2 параметра

Диагностика и отладка значений параметров

Встроенный в программное обеспечение осциллограф²⁴ показан на рис. 19.

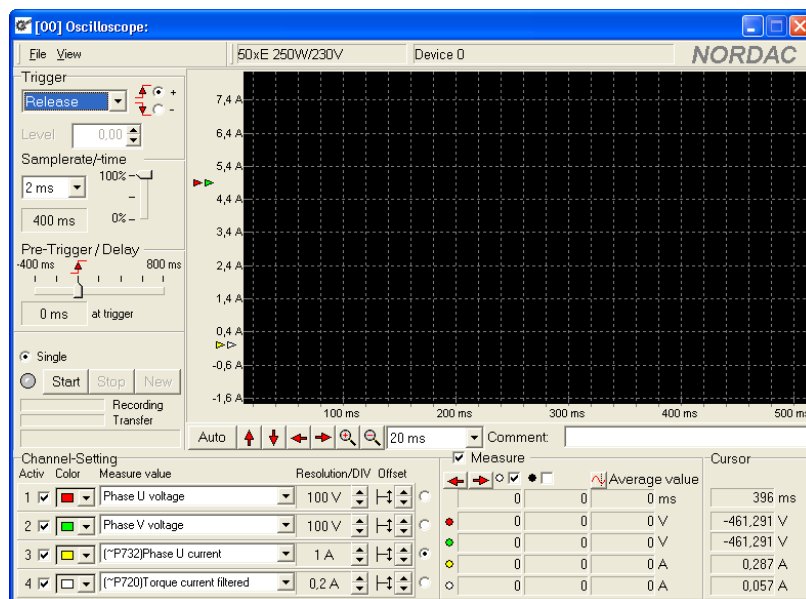


Рис. 19

²² Вкладки 3 и 6 отображаются только при подключенных устройствах обратных связей по скорости или положению.

²³ Наблюдатель – математическая модель, идентифицирующая объект управления, в данном случае асинхронный двигатель.

²⁴ Меню Устройства (Device) ➔ Осциллограф(Oscilloscope)

Осциллограф является наиболее универсальным индикаторным прибором для визуализации и исследования процессов (медленных и быстрых), протекающих в преобразователе. Если учесть, что активный ток статора в масштабе равен электромагнитному моменту асинхронного двигателя, то можно сказать, что осциллограф является незаменимым средством при настройке электродвигателя на заданные статические и динамические показатели.

Процесс осциллографического измерения состоит из двух этапов: процесса записи измеряемых величин в память; и передачи/вывода на экран осциллографа. Управление инициализацией (переводом в ждущий режим) производится кнопками, показанными на рис. 20.

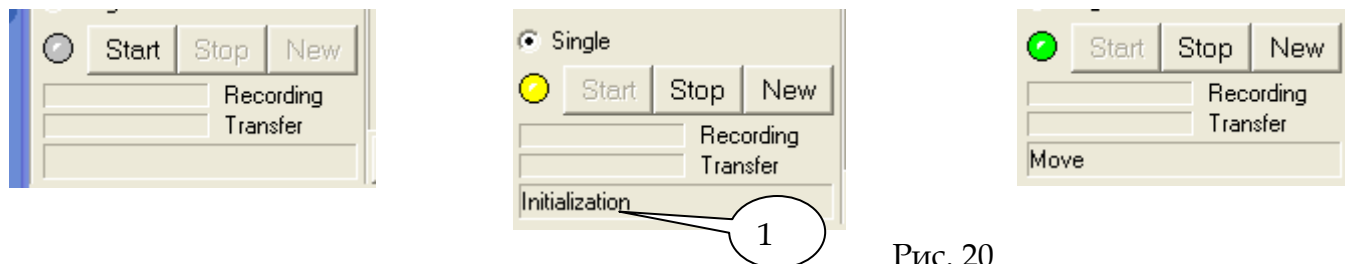


Рис. 20

Назначения кнопок следующие;

Start – осциллограф инициализируется и переводится в ждущий режим. Начало записи и передача данных, происходит при выполнении условий, заданных на панели ‘Trigger’.

Текущее состояние осциллографа выводится в поле 1;

Stop – остановить запись и перевести осциллограф в ждущий режим. При повторном нажатии кнопки Start запись и передача продолжают;

New - новая запись. Остановить запись, очистить память.

В полях Recording (запись) и Transfer (передача) отображается процесс записи и передачи данных.

Панель ‘Trigger’ служит для задания условий, при выполнении которых начинается запись, передача и вывода на экран осциллографа измеряемых величин.

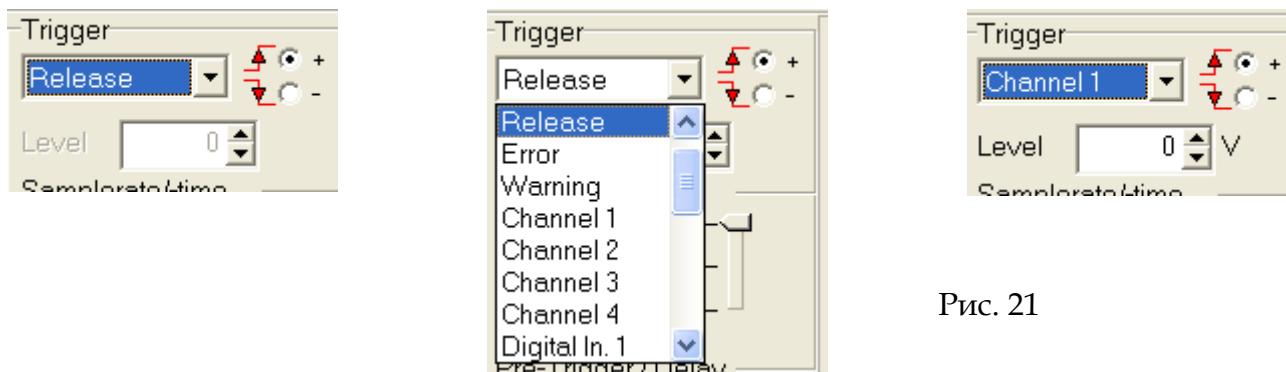


Рис. 21

Событие или конкретный канал, на который ставится условие, выбирается из выпадающего списка:

No trigger – без условия, по нажатии кнопки Start;

Release – по возникновению события. Например, при нажатии кнопки ‘Пуск’ панели управления преобразователем.

Error – по возникновении ошибки в процессе работы²⁵.

Warning – по возникновении предупреждений о возможных неисправностях в работе;

Channel 1...4 – по возникновении события в одном из каналов, по которым производится измерение;

Канал, по которому должно производиться измерение устанавливается на панели 'Chanel-Setting'

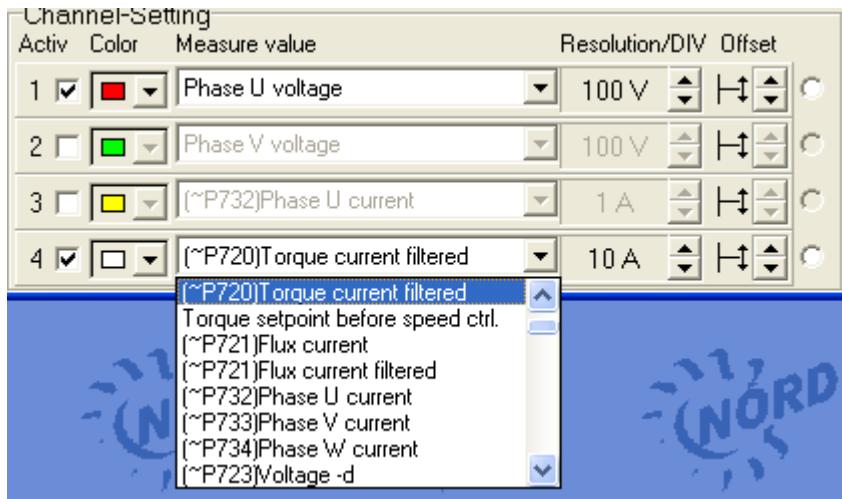


Рис. 22

На экран осциллографа выводятся только значения тех каналов в полях столбца 'Activ', которых стоят галочки (рис. 21).

Поля столбца 'Color' служат для установки цвета линий осциллограмм.

Измеряемая величина по данному каналу выбирается из выпадающего списка (см. сноску 21).

Разрешение по каналу, и его расположение на экране осциллографа задается значениями 'Resolution' и 'Offset'.

Digital In. 1...12 – по возникновении события в одном из цифровых входов.

Analog In. 1...2 – по возникновении события в одном из аналоговых входов.

Уровень сигнала и направление (нарастание или снижение), при которых наступает событие, устанавливаются в полях 'Level' и '+,-' соответственно (рис. 21).

На панели 'Sample rate/-time' устанавливаются время дискретизации (1) и общее время записи (2).

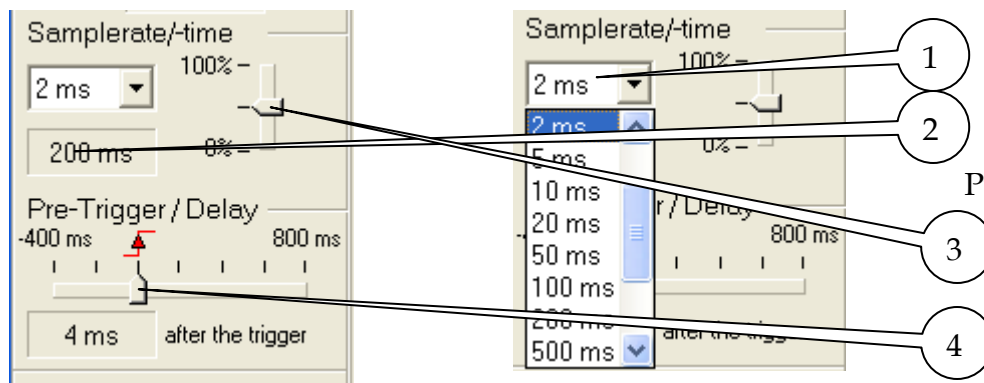


Рис. 23

²⁵ Список ошибок и причины их возникновения приводятся в инструкциях по эксплуатации.

Время записи (2) можно увеличить или уменьшить ползунком (3).
 Ползунком (4) можно задать время опережения или запаздывания начала записи относительно наступления события по каналу (если это физически возможно).

Мониторинг и отладка управляющих команд

Связь преобразователя частоты с распределенной системой автоматизации и управления технологическим процессом осуществляется посредством сетевых средств. Управление преобразователем, при этом, обеспечивается циклической передачей наборов команд в соответствии с принятым протокол, и через физический интерфейс. В зависимости от задач управления, управляющая программа может состоять из десятков, сотен и тысяч подпрограмм реагирующих на ту или иную ситуацию в технологическом цикле.

Полезным средством исследования реакции электропривода, и отладки подпрограмм управляющей программы, может стать интерфейс 'Macros', реализованный в компьютерной программе Nordcon.

Интерфейс предусматривает циклическую передачу команд, организованных в виде подпрограмм и выполняемых под управлением операционной системы компьютера, преобразователю частоты.

Удобным может оказаться и возможность запуска процедур мониторинга и диагностики электроприводов, работающих под управлением компьютера в начале или в процессе работы.

Оперативное управление приводом по протоколу USS (интерфейс RS 485) осуществляется программой визуального набора и запуска командных строк 'Macros', структура программной панели которой показана на рис. 24

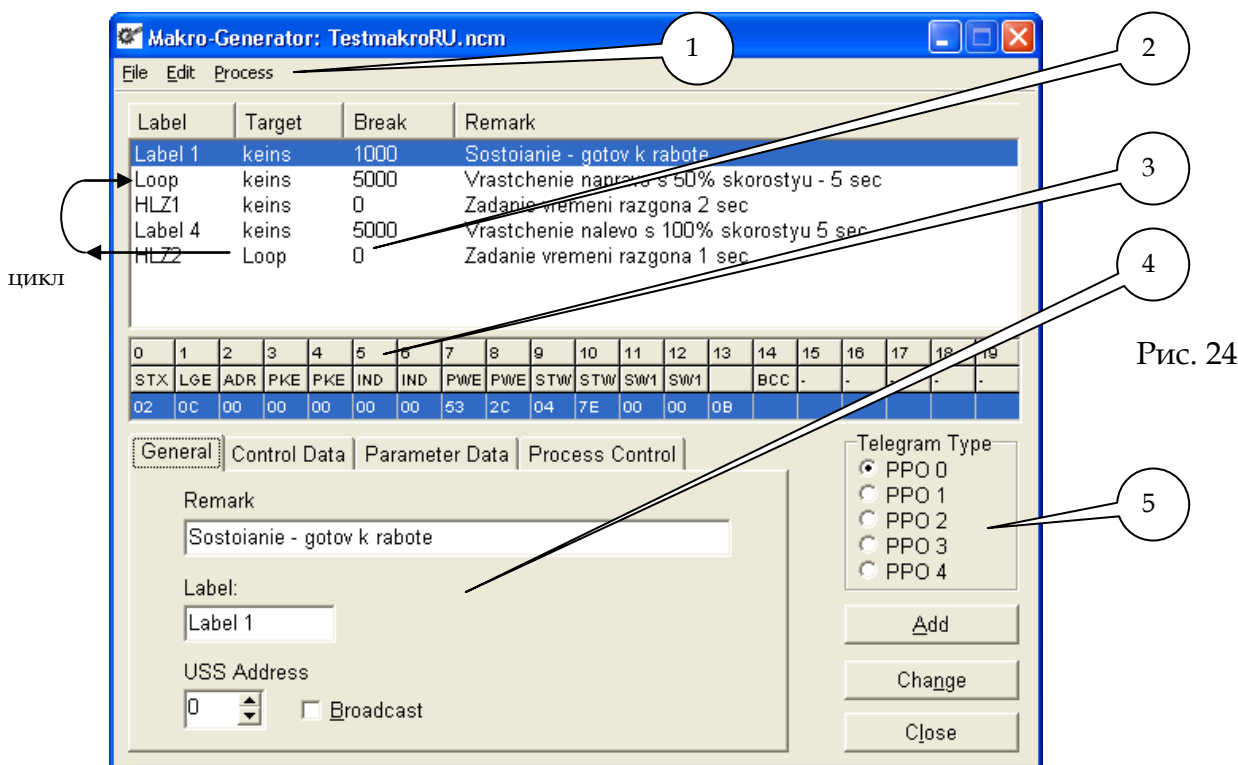


Рис. 24

Программная панель программы 'Macros'²⁶ состоит из строки меню (1), окна визуализации программной процедуры в командных строках (2), окна визуализации структуры командной строки в символах протокола (3), панели управления набором командных строк (4), панели задания типа командной строки переменной длины (5). Кнопки Add (Добавить), Change (Изменить) и Close (Закреть) служат для добавления новой строки, фиксации внесенных изменений в командную строку и закрытия окна соответственно.

Запуск, останов и выполнение программной процедуры в пошаговом режиме осуществляется командами меню Process ⇒ Start, Stop и Single Step соответственно.

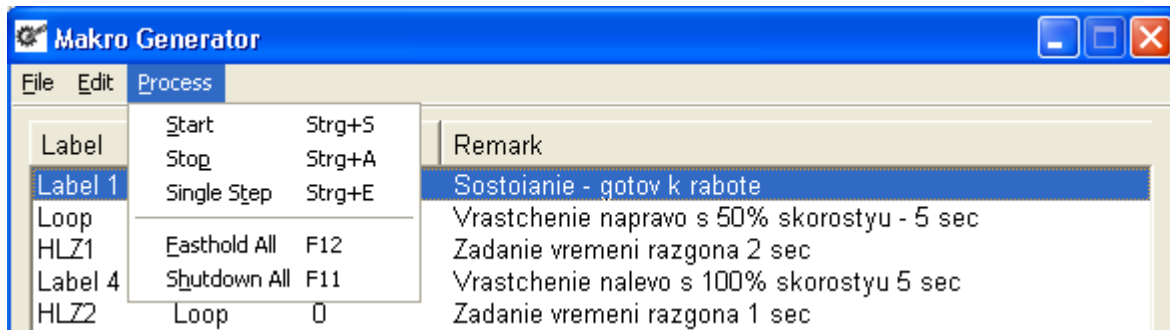


Рис. 25

Панель управления набора командных строк (в зависимости от заданного типа, длины строки число вкладок разное) состоит из 4-х вкладок:

- General (рис. 24). Вкладка служит для ввода в поля:
 Remark - описания командной строки;
 Label - метки командной строки;
 USS Address - адрес преобразователя в сети;
 Broadcast - галочка в логическом поле устанавливает режим «только передача», ответа от преобразователя не требуется.
- Control Data (рис. 26). Вкладка служит для ввода в поля:

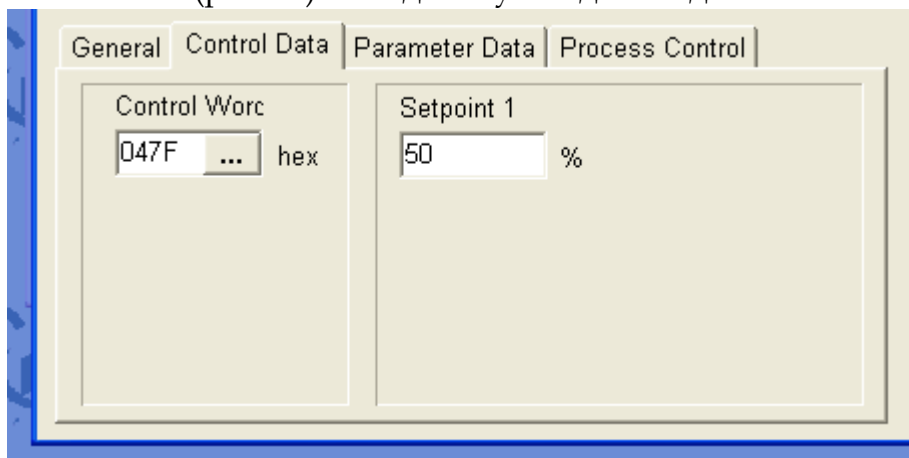


Рис. 26

²⁶ Программа активизируется при установке параметров с номерами 513 (допустимое время задержки приема/передачи), и 509 (источник командных строк - USS).

Control Word - задания команды в виде слова управления в формате шестнадцатеричного числа. Слово управления может быть введено в поле записью или набором битов управления при нажатии на кнопку (рис. 27).

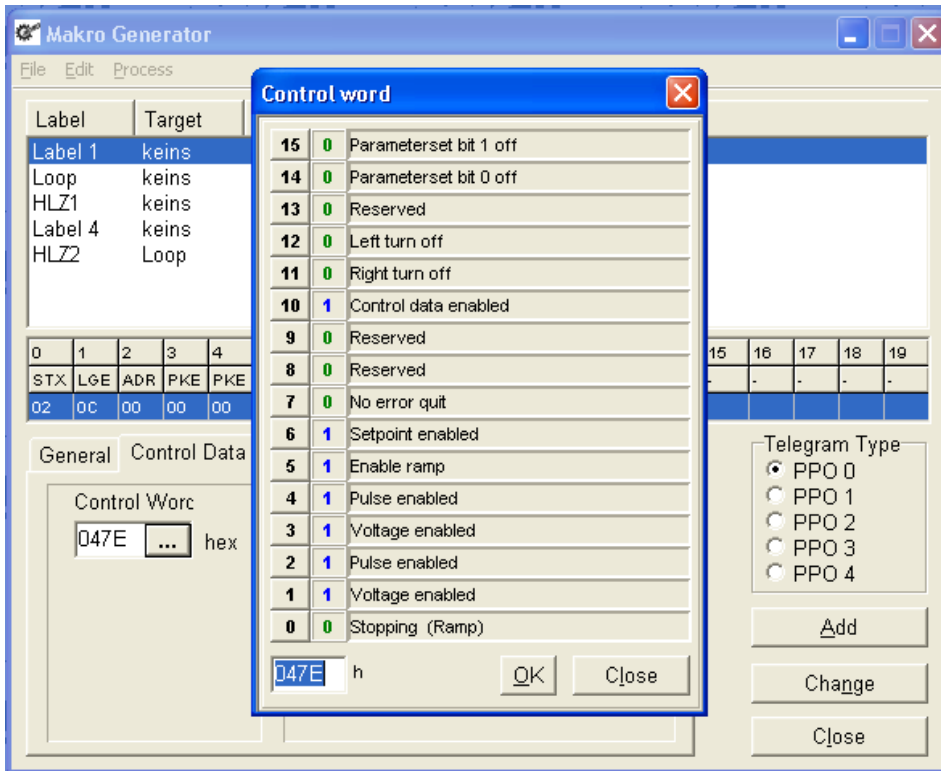


Рис. 27

Бит управления вводится нажатием на соответствующую кнопку с номером бита.

Назначение бит следующее:

- 0 – останов (S – образная кривая);
- 1 и 3 – напряжение включено;
- 2 и 4 – частота включена;
- 5 – ускорение по заданной кривой;
- 6 - установленная частота достигнута;
- 7 – режим сброса ошибки;
- 8 и 9 – зарезервировано;
- 10 - управление данными разрешено;
- 11 – запрет правого вращения;
- 12 – запрет левого вращения;
- 13 – зарезервировано;
- 14 и 15 – определяют номер активного набора параметров:

15	0	Parameterset bit 1 off
14	0	Parameterset bit 0 off

Набор параметров 1

15	0	Parameterset bit 1 off
14	1	Parameterset bit 0 on

Набор параметров 2

15	1	Parameterset bit 1 on
14	0	Parameterset bit 0 off

Набор параметров 3

15	1	Parameterset bit 1 on
14	1	Parameterset bit 0 on

Набор параметров 4

Set point 1 – устанавливает ограничение величины выходной частоты преобразователя в % от максимальной частоты. Момент достижения этой частоты преобразователь сообщает управляющей программе.

-Parameter Data. Вкладка служит для ввода в поля значений параметров (рис. 28):

Рис. 28

Parameter No – номер параметра;

Parameter Index – индекс параметра;

Parameter Value – значение параметра;

Resolution – разрешение;

Order – команда, назначающая действие над параметром. Команда выбирается из выпадающего списка:

Без команды

Запрос значения параметра

Изменить значение параметра 16 бит

Изменить значение параметра 32 бит

Запрос элемента описания

Изменение элемента описания

Запрос массива значений параметров

Изменить массив значений 16 бит

Изменить массив значений 32 бит

Запрос числа элементов массива

Рис. 29

- Process control. Вкладка служит для ввода в поля (рис. 30):

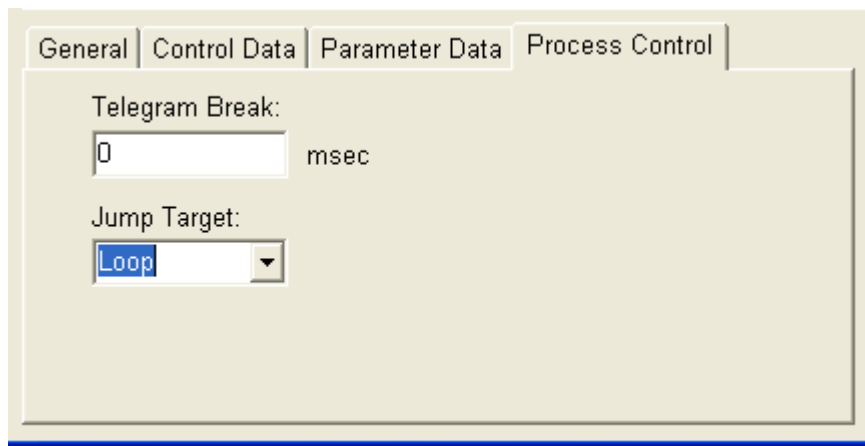


Рис. 30

Telegram Break – назначает время выполнения команды в msec, по истечении которого происходит переход к следующей строке программной процедуры; Jump Target – позволяет выбрать метку из выпадающего списка меток, введенных в процедуру для организации цикла. На рисунке 24 метка Loop.

Средства формирования управляющих алгоритмов

Управление преобразователем посредством сетевых средств позволяет стыковать преобразователь с промышленными информационными сетями, учитывающими большое количество технологических факторов. Значение сигнала управления преобразователем, при этом, определяется в процессе решения некоторой математической функции, переменными в которой являются сигналы от различных датчиков контроля технологического процесса.

В приложениях, с заранее заданной нагрузочной диаграммой или при необходимости регулирования в зависимости от небольшого количества технологических факторов, удобным может оказаться управление преобразователем посредством многофункциональных аналоговых и цифровых входов и выходов.

С помощью входов и выходов, при поступлении сигналов от датчиков, возможно изменение направления вращения, пуск и остановка по заданным кривым, переключение на предварительно заданные скорости вращения, для обеспечения заданной точности остановки, за заданное время.

Встроенный в аналоговый вход ПИД-регулятор с возможностью задания пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, позволяет управлять преобразователем в зависимости от технологического фактора: давления, температуры, расхода, напора и т.д.

Масштабирование, калибровка и фильтрация позволяют производить тонкую настройку входа на сигнал управления.

Наличие нескольких идентичных наборов параметров с возможностью переключения в on-line режиме по цифровым входам позволят формировать сложные нагрузочные диаграммы для решения практических задач автоматизации технологического оборудования.

Примерный перечень функций, задающих режимы работы преобразователя, при поступлении сигнала на аналого-цифровой вход приведен в таблице²⁷

Таблица

функция	описание	взаимодействие с другими параметрами
Аналоговые функции		
выкл.	вход не активен	-
задание частоты	преобразователь вырабатывает частоту, соответствующую величине поступившего на вход сигнала	Соответствие между величиной сигнала и частотой задается: - пределами изменения сигнала входа. Например, если входной сигнал является напряжением, $0 \div 10$ В или $-10 \div 10$ В; - указанием, как следует поступить преобразователю, если сигнал находится вне установленных пределов. Например, остановить двигатель или изменить направление вращения; - установкой величин сигнала, соответствующих минимально и максимально допустимым частотам; - установкой фильтра входного сигнала.
Задание максимально допустимой величины активного тока	при превышении установленного значения преобразователь снижает выходную частоту	Изменяет предустановленную в функциональном параметре величину максимально допустимого активного тока.
задание PID регулирования	создает контур ПИД регулирования заданной величины выходной частоты.	Корректная работа ПИД регулятора предполагает задание: - предустановленной выходной частоты в функциональном параметре; - пропорциональной (П), интегральной (И), и дифференциальной (Д) составляющих регулятора; - указанием, как следует поступить преобразователю, если сигнал регулятора находится вне,

²⁷ На примере SK 500E

		установленных в функциональных параметрах пределов минимально и максимально допустимых значений. Например, остановить двигатель или вырабатывать минимально допустимую частоту.
задание суммирования	преобразователь вырабатывает частоту, равную сумме заданной в функциональном параметре, и частоты, соответствующей величине поступившего на вход сигнала	Задание предустановленной выходной частоты в функциональном параметре.
задание вычитания	преобразователь вырабатывает частоту, равную разности заданной в функциональном параметре, и частоты, соответствующей величине поступившего на вход сигнала	Задание предустановленной выходной частоты в функциональном параметре.
задание произведения	преобразователь вырабатывает частоту, равную произведению заданной в функциональном параметре, и частоты, соответствующей величине поступившего на вход сигнала	Задание предустановленной выходной частоты в функциональном параметре.
задание момента на валу	при активации функции преобразователь запоминает текущее значение момента на валу. При последующих пусках преобразователь вырабатывает напряжение и частоту, соответствующую записанному в память моменту.	Изменяет предустановленную в функциональном параметре величину момента.

задание PI_D регулирования по технологическому фактору	создает контур ПИ_D регулирования по текущему значению технологического фактора (давление, напор, положение компенсирующего валика, и.т.д.)	Корректная работа ПИ_Д регулятора предполагает задание: - предустановленной уставки по технологическому фактору; - пропорциональной (П), интегральной (И) составляющих регулятора; - дифференциальной составляющей, в виде допустимых максимальных отклонений; - минимальной величины отклонений технологического фактора для сглаживания возможных колебаний.
Цифровые функции		
задание направления вращения	задает допустимое направление вращения	Изменяет предустановленное в функциональном параметре направление вращения двигателя.
задание реверса	изменяет направление вращения вала двигателя	
задание приращения на фиксированные частоты до 5	преобразователь вырабатывает частоту, равную сумме текущей частоты и заданной в функциональном параметре фиксированной частоты	Задание предустановленной фиксированной частоты в функциональном параметре. Количество функциональных параметров и соответствующих им фиксированных частот до 5.
задание бита 0,1, определяющего активный набор параметров	преобразователь переключается на соответствующий набор параметров	Задание второго бита 1,0 на другом аналого-цифровом входе.
задание режима останова	преобразователь останавливает двигатель	Задание параметров останова
сброс ошибки	преобразователь переходит в активный режим после аварийной остановки	Установка параметров автоматического перезапуска.

Дополнительные функциональные возможности

Функция автоматического перезапуска.

Полезная возможность при работе преобразователя от маломощной цепи с просадками или временным отключением напряжения. При активации функции преобразователь

пытается перезапустить двигатель через некоторый промежуток времени после срабатывания защитных цепей. Время перезапуска и число попыток перезапуска задается. При высоко инерционной нагрузке и при кратковременном пропадании напряжения (в случае, если за время отключения двигатель не успевает остановиться) преобразователь автоматически рассчитывает текущую скорость от которой и начинает возврат к рабочей скорости.

Функция компенсации скольжения

При активации функции преобразователь поддерживает постоянной скорость вращения при колебаниях момента на валу.

Функция задания момента на валу

При активации функции преобразователь запоминает момент на валу. При последующих пусках преобразователь вырабатывает напряжение и частоту, соответствующую записанному в память моменту.

Функция пропуска резонансных частот

Полезная функция если при пуске или останове технологического механизма возможно возникновение вибрации и резонанса на некоторых частотах. При этом возможно задание как частоты, так и ширины резонансной зоны.

Функция задания задержки при работе двигателя с электромагнитным тормозом.

При активации функции преобразователь в течении заданного времени вырабатывает частоту, равную минимальной, способствующую корректной работе электромагнитного тормоза при пуске и останове.

Выбор преобразователя по условиям окружающей среды

Стандартные преобразователи частоты предназначены для работы в условиях промышленного производства при:

- высоте установки не более 1000 м;
- температуре не более 40°C;
- влажности не более 60%.

В условиях превышения приведенных значений, допускается применение преобразователей при снижении мощности, тока и напряжения на величины, определяемые поправочными коэффициентами²⁸.

Степень защиты преобразователей, как правило, IP20, поэтому требуются дополнительная защита от попадания пыли, грязи и т.д. Функции защиты преобразователей возлагаются на специальные электрические щиты, в которых они устанавливаются. Для корректной работы преобразователей должна быть обеспечена

²⁸ Значения поправочных коэффициентов приводятся в руководствах

свободная вентиляция воздуха. Преобразователи частоты очень чувствительны к вибрациям и ударным нагрузкам, неустойчивы к действию химически активных сред. Отдельную группу представляют преобразователи частоты с степенью защиты IP55 и выше. Спроектированные изначально для установки непосредственно на двигателях²⁹, для решения задач управления многодвигательными системами³⁰, преобразователи намного устойчивее к вибрациям, ударам. Покрытые соответствующими материалами они могут быть установлены в помещениях с агрессивными средами. Диапазон рабочих температур значительно шире (от -20⁰С и до 60⁰С).

Они не требуют дополнительной защиты (электрические щиты), что может оказаться, в определенных случаях экономически выгодным решением.

Степень защиты IP66 (попадание пыли внутрь преобразователя исключено), совместно с применением соответствующих конструкционных и лакокрасочных материалов придает преобразователям свойства пожара- и взрывобезопасности³¹.

²⁹ Преобразователи можно устанавливать отдельно от двигателя с помощью установочных наборов.

³⁰ Управление несколькими двигателями от стандартного преобразователя предполагает прокладку силовых кабелей питания от преобразователя к всем управляемым двигателям. При этом приходится учитывать длину кабеля, падение напряжения на его активном сопротивлении и т.д. При применении распределенной системы, с управлением каждого двигателя от своего преобразователя, к системе двигатель + преобразователь необходимо проложить только сетевые шины.

³¹ Параметры соответствия нормам приводятся в документации по эксплуатации.