

Мифы и легенды современного электропривода Myths and Legends of Modern Electric Drive System

Анучин А.С., к.т.н. Anuchin A., PhD.

Аннотация

Разобрано несколько устоявшихся заблуждений в области современного электропривода, которые в том или ином виде присутствуют в учебно-методической литературе разных авторов. Рассмотрен вопрос именования параметров ПИ-регулятора, произведено сравнение релейного и ПИ-регуляторов, векторного управления и прямого управления моментом, дана оценка эффективности матричных преобразователей и показано назначение емкости звена постоянного тока у традиционных ПЧ.

Annotation

This article deals about some preconceived misconception in modern electric drives which are currently presented in the textbooks of different authors. PI-controller parameters designation is substantiated, performance of hysteresis controller is compared with PI-controller, field oriented control is compared with DTC, efficiency of matrix converter is evaluated and the function DC-link capacitor is described.

Ключевые слова: устоявшееся заблуждение, ПИ-регулятор, релейный регулятор, прямое управление моментом, векторное управление, матричный преобразователь, емкость звена постоянного тока.

Keywords: preconceived misconception, PI-controller, hysteresis controller, field oriented control, DTC, matrix converter, DC-link capacitor.

Введение

Современный электропривод является достаточно точной наукой, где все явления определяются законами математики и физики. Однако в последнее время — 20 или 30 лет — появились серые области, которые используются для извлечения прибыли из среднестатистического потребителя электропривода. Часть мифов возникла благодаря заблуждениям ученых, часть — благодаря фальсификации или подгонке результатов исследований и выставлении не лучших решений в хорошем свете, часть — благодаря стараниям маркетологов, стремящихся любой ценой увеличить продажи оборудования конкретной компании.

Особенно эти явления заметны на территории бывшего СССР, где в прежние времена существовала развитая научно-методическая школа электропривода и явные заблуждения, будучи развенчанными, не проходили в массы. Сейчас из-за общего спада промышленности и объемов исследований в предметной области, а также благодаря появившемуся активному маркетингу, заблуждения проникают в нашу жизнь, являясь основанием для серьезных научных исследований, за которыми не стоит сколько-нибудь полезный экономический эффект.

Отдельного внимания заслуживают устоявшиеся утверждения, которые перестали быть актуальными из-за развития техники, но тиражируются на протяжении десятков лет из учебника в учебник.

Автор хочет сразу оговориться, что научные исследования критикуемые в статье по практическим признакам, несомненно, нужны с научной точки зрения. Они могут пригодиться в будущем, однако не следует скрывать явные недостатки, что обычно делают авторы работ.

В рамках данного доклада автор хочет рассмотреть всего несколько вопросов из

огромного списка, требующих разбора проблем.

Миф 1. ПИ-регулятор имеет два основных параметра — пропорциональный коэффициент и постоянная интегрирования

Этот миф происходит с тех давних времен, когда ПИ-регулятор реализовывался исключительно на операционных усилителях. У ПИ-регулятора нет постоянной интегрирования, есть интегральный коэффициент.

Если мы регулируем ток в Амперах в какой-либо электрической цепи, задавая задание питающего эту цепь напряжения в Вольтах, то пропорциональный коэффициент имеет размерность В/А, то есть Ом, интегральный коэффициент имеет размерность Ом/с, а дифференциальный коэффициент имеет размерность Ом*с. То есть говорить, что у ПИ-регулятора есть постоянная времени можно лишь тогда, когда он выполнен на операционном усилителе или на входе и выходе одинаковые размерности, но так бывает все реже и реже. С появлением микроконтроллеров, работающих с плавающей точкой, система управления может быть выполнена в физических единицах и постоянные времени исчезают как класс.

В качестве упражнения определите размерность коэффициента усиления тиристорного выпрямителя, если задание выходного напряжения поступает по CAN-сети.

Миф 2. Релейный регулятор быстрее ПИ-регулятора

Данное утверждение было справедливо, когда преимущественно использовались тиристорные преобразователи, а цифровые системы управления не обладали достаточной производительностью для реализации регуляторов предельного быстродействия [1, 2].

В самом деле, релейные регуляторы могли применяться только с относительно быстрыми силовыми преобразователями —

транзисторными. Для малых мощностей с аппаратными релейными регуляторами это давало на порядок большее быстродействие по сравнению с тиристорным электроприводом.

Применительно к асинхронному электроприводу для скачка задания тока от нуля до номинала требуется от 3 до 6 периодов ШИМ, чтобы преодолеть индуктивность обмоток при максимальном управляющем напряжении. То есть ПИ-регулятор большую часть времени находится в насыщении, а при подходе к заданному значению из него выходит. Только в этот момент он начинает проигрывать релейному регулятору, хотя сигнал уже находится в 5% от заданного значения (см. рис.1).

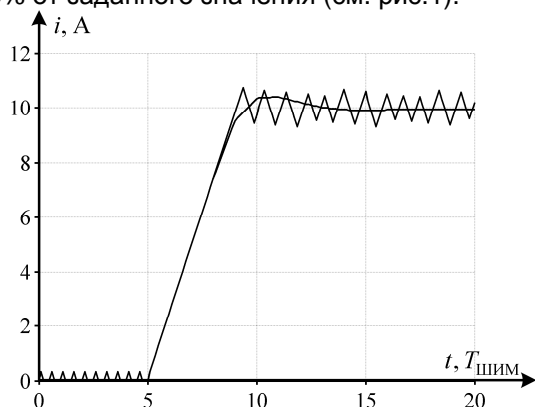


Рис. 1. Сравнение работы релейного и ПИ-регулятора

Небольшое преимущество имеется у релейного регулятора только в момент изменения задания, так как отработка управляющего воздействия и переключение выхода не связано с началом очередного периода ШИМ (происходит на более высокой частоте для цифровых релейных систем).

Развитие методов регулирования с предельным быстродействием позволит комбинировать релейный и непрерывный режим, обеспечив большую скорость реакции на изменение задания.

Миф 3. Система прямого управления моментом быстрее системы векторного управления

Данный миф относится к маркетинговым. Каждая компания, продвигая на рынок свое оборудование, старается показать его лучшие стороны.

Для систем векторного управления регулирование момента осуществляется ПИ-регулированием тока по моментобразующей оси. В режиме прямого управления моментом релейный регулятор момента устанавливает напряжение инвертора, которое приведет к скорейшему изменению момента двигателя.

И в том и другом случаях изменение момента связано с нарастанием тока по оси, перпендикулярной потокосцеплению ротора, для векторного управления и по оси, перпендикулярной потокосцеплению статора, для прямого управления моментом. Скорость нарастания тока в обоих случаях определяется отношением разности напряжения инвертора и ЭДС к

индуктивностям рассеяния и почти одинакова для этих двух способов регулирования. Если ПИ-регулятор настроен на режим предельного быстродействия, то разницы в темпе нарастания тока и момента не будет. Для обычной настройки ПИ-регулятора тока также попадет в насыщение при скачке задания в 100% и ожидать существенного снижения быстродействия нельзя.

В качестве примера искажения свойств конкурирующих систем можно привести [3]. Так, на слайде 31 на регулирование момента в системе векторного управления уходит приблизительно 25 периодов ШИМ, что говорит о совершенно неправильной настройке ПИ-регулятора тока, дезинформируя об истинном быстродействии данного способа регулирования.

Миф 4. Для работы системы прямого управления моментом не требуется датчик положения ротора

Миф возник из-за того, что наблюдатель потокосцеплений статора и момента, построенный в статорных величинах и стационарной системе координат, связанной с неподвижными обмотками статора, не содержит скорости или положения, а состояние машины полностью определено через напряжения и токи фаз.

Далее обычно следует оговорка, что для работы такого наблюдателя необходимо «точное знание активного сопротивления статора», иначе система будет неработоспособной из-за накапливающейся ошибки интегрирования при расчете потокосцеплений статора.

«Точное знание активного сопротивления» включает в себя еще и все нелинейности инвертора, смещения и погрешности датчиков тока и напряжения звена постоянного тока. То есть «точного знания» не может быть на практике. Несколько лучше система работает, если активное сопротивление в модели принять меньше реального, а с большим модельным сопротивлением система разваливается.

В [4] для обеспечения работоспособности системы прямого управления моментом со всеми видами имеющихся погрешностей в наблюдателе предлагается исключать ошибку интегрирования, фильтруя постоянную составляющую, что не способствует работоспособности системы на малых скоростях. На ненулевых скоростях поведение системы не отличается от работы системы векторного управления с оценкой ЭДС. Представленные на рис. 2 механические характеристики, хоть и отличаются в деталях, весьма похожи.

Основной проблемой классической модели асинхронного двигателя является то, что она работоспособна только при точных знаниях всех параметров и управляющих воздействий. Однако если мы где-то ошибаемся, требуется корректирующий сигнал — скорость или положение. Определить положение или ско-

рость можно только имея дополнительные данные, например, ЭДС, и для малых скоростей круг замкнулся. Хотя есть принципиальная возможность определения положения по магнитной анизотропии ротора, данная технология пока применяется в промышленности только для синхронных машин [5].

Необходимо сделать оговорку, что в мифах 3 и 4 рассмотрена система прямого управления моментом, описанная в открытой литературе. Автор не может сказать, как именно реализована данная система у компании АВВ и какие свойства она имеет.

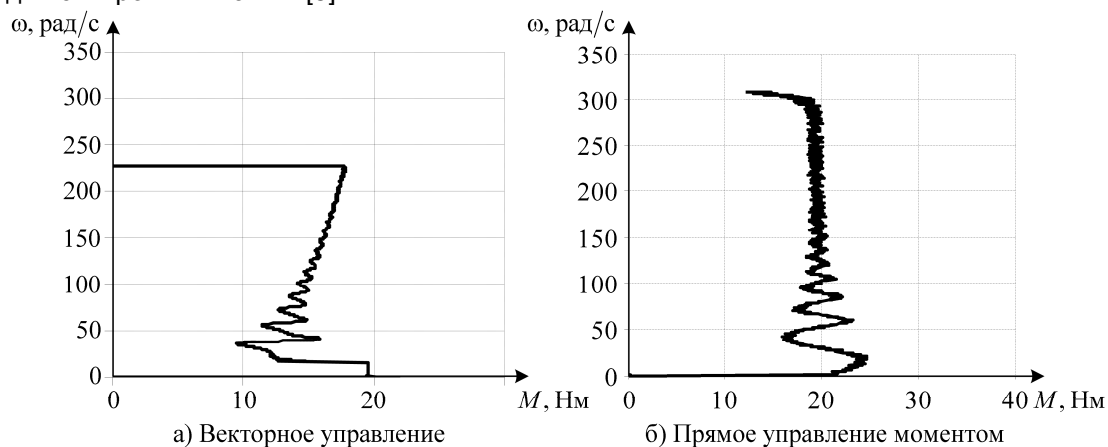


Рис. 2. Сравнение работы систем векторного управления и прямого управления моментом без датчика положения ротора

Миф 5. НПЧ имеет больший КПД, чем двухзвенный ПЧ за счет однократного преобразования энергии

Данный миф родился в эпоху, когда НПЧ были тиристорными. По сути, они такими и остались, хотя появились опытные образцы транзисторных матричных преобразователей. Действительно тиристорный НПЧ имеет КПД выше, обычного современного общепромыш-

ленного ПЧ, построенного по схеме «выпрямитель – инвертор», однако энергетика определяется поведением всего объекта. Так, гармонические искажения выходного напряжения и токов в транзисторном НПЧ вызывают дополнительные потери, а использование двигателя до частот 25 Гц тоже не идет на пользу энергетике комплектного электропривода.

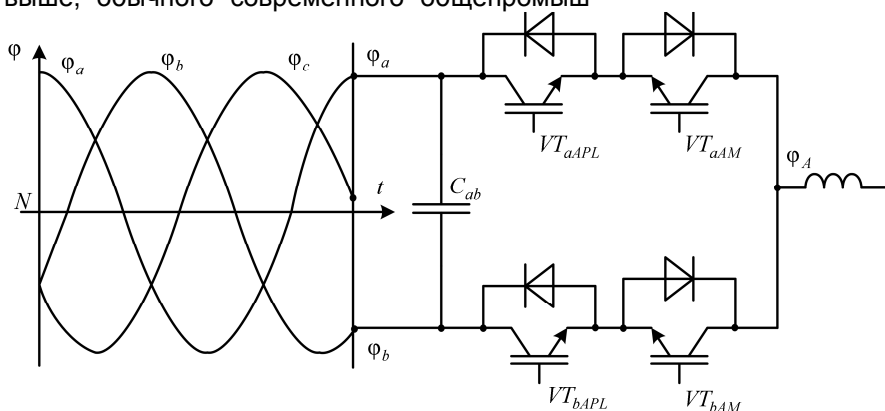


Рис. 3. Схема подключения фазы НПЧ для текущего состояния питающей сети

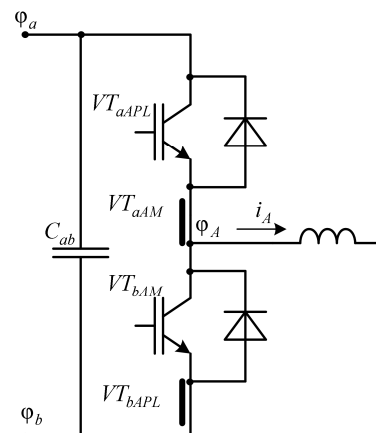


Рис. 4. Преобразование схемы НПЧ к стойке инвертора

С появлением транзисторных НПЧ были устранены недостатки тиристорных по форме входного и выходного токов, однако главное преимущество высокого КПД преобразователя исчезло. Рассмотрим схему транзисторного НПЧ, чтобы разобраться в причинах снижения КПД. Каждая фаза сети подключается через полностью управляемый ключ, состоящий из двух последовательных транзисторов, к каждой фазе двигателя [6].

Если нарисовать для какого-то момента времени состояние сети и работающие в этом состоянии транзисторы (рис. 3), то с включенными транзисторами VT_{aAM} и VT_{bAPL} схема пре-

образуется в изображенную на рис. 4, которая напоминает нам стойку обычного инвертора.

НПЧ при этом не является однозвенным. На самом деле выпрямитель «спрятался» в инвертор в виде ключей VT_{aAM} и VT_{bAPL} и стал управляемым. Таким образом, от сети до фазы двигателя ток проходит путь через один из транзисторов и один параллельный диод. В двухзвенном ПЧ со звеном постоянного тока этот же путь лежит через диод выпрямителя и транзистор инвертора. Но схема с НПЧ будет иметь КПД ниже, так как падение напряжения на параллельном диоде выше, чем падение на диоде выпрямительного моста.

Миф 6. Емкость звена постоянного тока в двухзвенном ПЧ служит для обмена реактивной энергией между фазами двигателя

В том, что данный миф до сих пор существует, автор убедился совсем недавно, когда на семинаре, проводимом в МЭИ Центром силовой электроники при участии профессора Ральфа Кеннела, вопрос расчета емкости звена постоянного тока вызвал оживленную дискуссию. Какой же должна быть емкость конденсатора звена постоянного тока?

В первую очередь необходимо уточнить, что емкость не служит для обмена реактивной энергией. Если приводить осциллограмму тока и напряжения одной фазы асинхронного двигателя при питании от ПЧ, то на периоде основной частоты за счет сдвига между напряжением и током фаза будет находиться как в двигательном режиме, так и в генераторном. Генераторный режим и является возвратом той самой реактивной энергии, для которой нужен конденсатор звена постоянного тока. Однако в тот момент, когда происходит этот возврат, другие фазы энергию потребляют. Если двигатель не работает в генераторном режиме, то энергия из двигателя никогда не возвращается на конденсатор, ее потребляют соседние фазы. Зачем в этом случае необходим конденсатор звена постоянного тока?

В первую очередь он необходим, как снаббер, но С-снаббер имеет емкость на порядок ниже, чем та, что устанавливается на общепромышленных преобразователях частоты. Дальнейшее увеличение емкости необходимо для некоторого увеличения среднего выпрямленного напряжения на звене постоянного тока. Если емкость мала, то напряжение на звене опускается до 465 В, а с большой емкостью его можно удерживать в пределах 500 В. Кроме того, на холостом ходу и малой нагрузке при скалярном управлении асинхронный двигатель может кратковременно попадать в генераторный режим. Если такой режим исключить за счет применения векторного управления или специальных подходов для скалярного управления, то емкость может быть существенно уменьшена и преобразователь может работать, имея только снабберную емкость в звене постоянного тока [7]. При этом существенно улучшается коэффициент гармонических искажений потребляемого ПЧ тока.

Минимальное же значение емкости звена постоянного тока в этом случае определяется режимом аварийного отключения инвертора. В случае срабатывания максимально-

токовой защиты при отключении инвертора возникает кратковременный генераторный режим, когда энергия, запасенная в индуктивности рассеяния, возвращается через обратные диоды отключенного инвертора на звено, заряжая его емкость. Заряд не должен вызвать рост напряжения, который может привести к выходу из строя элементов преобразователей частоты. Например, конденсатора емкостью 20 мкФ хватает для стандартного асинхронного двигателя 4 кВт, чтобы напряжение звена в случае аварийного отключения не превышало 800 В при напряжении отключения 540 В.

Выводы

Современный электропривод, как динамично развивающаяся область техники, требует постоянной систематизации и обобщения знаний. Необходима разработка новых учебных пособий, в которых современные вопросы электропривода должны быть выверены и исключены какие-либо серые зоны в очевидных вопросах, подобных рассмотренным в докладе.

Библиографический список

1. Анучин А.С. Методики расчета параметров цифрового ПИ-регулятора в электроприводе, Электротехника, Знак, Москва, 2014, №5, С. 32-39
2. F. Becker, H. Ennadifi, and M. Braun, Straightforward current control-one step controller based on current slope detection, EPE ECCE-EUROPE 2011 Birmingham, 2011
3. http://www.sovel.org/files/Seminars_2014/AC_Motors_24-25.03.2014/Present/Day%201%201-2_vector%20control.pdf
4. Peter Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford university press, 1998, pp.729
5. http://www.isep.pw.edu.pl/ies-pels/pdf/Seminarium_prezentacja_profKennel.pdf
6. Частотное управление асинхронного электропривода, Энциклопедия «Машиностроение», том IV-2 «Электропривод. Гидро- и виброприводы», книга 1 «Электропривод», Москва, Машиностроение, 2012, с.256-279
7. Остриров В.Н., Трофимов С.А., Дмитриев В.Ю., Ионов А.А., Пути усовершенствования преобразователей частоты, Промышленная энергетика, Энергоэкспресс, Москва, 2012, №3, с.5-8

Сведения об авторах

Анучин Алексей Сергеевич, к.т.н., зав. каф. АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», +74953627021, anuchinas@mpei.ru