

# ПЕРСПЕКТИВЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Вейнгер А. М.

(Rockwell Automation, Москва)

**Аннотация.** Рассматриваются ближайшие и долгосрочные перспективы регулируемых электроприводов переменного тока мощностью от 0.5 МВт: насосов, вентиляторов, мельниц, крупных конвейеров, прокатных станков, шахтных подъёмных машин, мощных буровых лебёдок, систем электродвижения судов. Представлены перспективные направления в электроприводе как системе и его компонентах: двигателе, преобразователе частоты, системе автоматического управления.

**Abstract.** The nearest and long-term perspectives are considered for controlled AC drives from 0.5 MW: drives for pumps, fans, grinding mills, large conveyers, rolling mills, mine hoists, powerful drill hoists, ship propulsion. Perspectives are represented for drive as a complex and for its components: motor, frequency converter, control system.

## 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Массовый электропривод большой мощности: привод насосов, компрессоров, вентиляторов, мельниц, конвейеров, – становится регулируемым. Здесь регулируемый электропривод является, прежде всего, важным средством энергосбережения.

В электродвижении судов, шахтном подъёме, мощных буровых лебёдках, главных приводах прокатных станков электроприводы переменного тока приходят на смену электроприводам постоянного тока. Во многих применениях электропривод переменного тока даёт конструктивные и технологические преимущества.

Сверхбыстроходные безредукторные турбокомпрессоры относятся к третьей группе. Здесь сами рабочие машины невозможны без современных регулируемых электроприводов.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

В массовых электроприводах большой мощности сохраняется тенденция использования существующих серийных асинхронных и синхронных двигателей, например, [1].

В динамичных электроприводах используются специальные асинхронные и синхронные двигатели. Для регулируемого электропривода перспективны СД со щёточным возбуждением и СД с постоянными магнитами (СДПМ). Уже в настоящее время созданы СДПМ с номинальным моментом примерно 400 кН\*м. Синхронные реактивные двигатели (switched reluctance motors) также перспективны в приводах большой мощности.

Линейные электродвигатели находят новые применения и в мощных электроприводах. Примером является разрабатываемая система электромагнитного запуска самолётов с кораблей, [2]. Линейный двигатель должен обеспечить разгон самолёта (на тележке) на отрезке 100 м до скорости 100 м/с.

Специальные электрические машины свыше 5-10 МВт целесообразно использовать с многофазной (2\*3-фазной, 3\*3-фазной и т. д.) обмоткой статора. В новейших электроприводах более полно реализуются известные преимущества многофазных систем в отношении момента двигателя, гармоник его магнитного поля, гармоник токов, потребляемых от сети, аварийных токов.

### 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Новейшие преобразователи частоты. В новейших электроприводах используются два вида ПЧ – на основе симметричного инвертора напряжения (ИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и симметричного инвертора тока (ИТ) с ШИМ, [3]. Схемы главных цепей показаны на рис. 1.

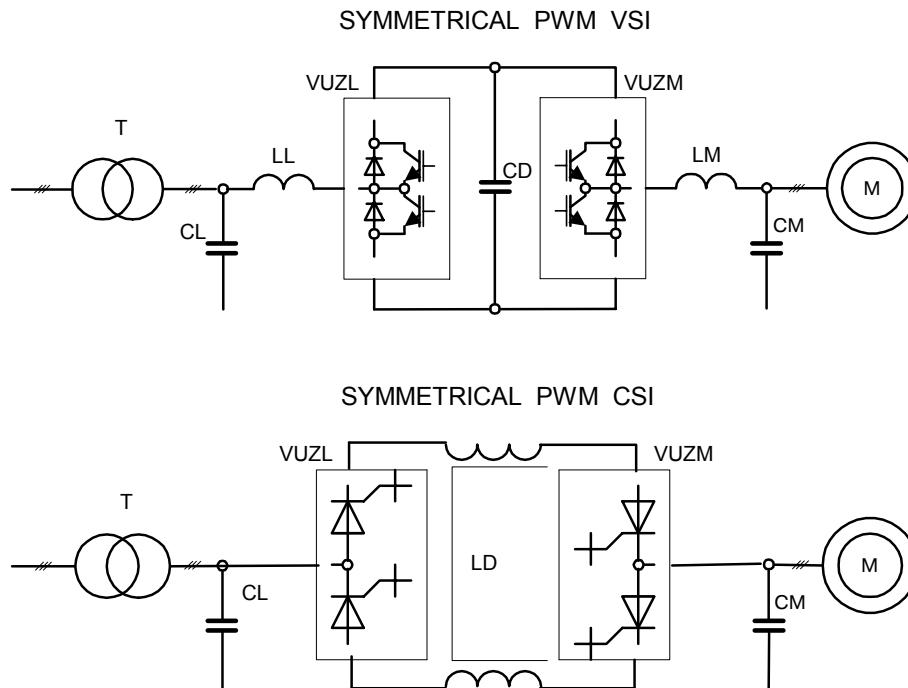


Рис. 1. Симметричные ИН с ШИМ и ИТ с ШИМ

В ИН преобразователь со стороны сети  $VUZL$  преобразует напряжение питания в регулируемое выпрямленное напряжение конденсатора  $CD$ . Преобразователь со стороны двигателя  $VUZM$  преобразует выпрямленное напряжение в двуполярные импульсы напряжения на зажимах переменного напряжения. Напряжения на зажимах переменного напряжения преобразователя  $VUZL$  представляют собой также двуполярные импульсы.

Фильтрация высокочастотных составляющих импульсных напряжений обеспечивается фильтрами. Управление преобразователями  $VUZL$ ,  $VUZM$  в каждый момент времени обеспечивает необходимые изображающие векторы полезных составляющих напряжений. Это позволяет управлять токами со стороны сети и токами статора.

В ИТ преобразователь со стороны сети  $VUZL$  преобразует напряжение питания в регулируемый выпрямленный ток реактора  $LD$ . Преобразователь со стороны двигателя  $VUZM$  преобразует выпрямленный ток в двуполярные импульсы тока в проводах переменного тока. Токи в проводах переменного тока преобразователя  $VUZL$  – также двуполярные импульсы. Высокочастотные составляющие импульсных токов фильтруются конденсаторными батареями  $CL$ ,  $CM$ . Управление преобразователями в каждый момент времени обеспечивает необходимый изображающий вектор полезных составляющих токов. Это позволяет управлять токами статора и со стороны сети, [4]. Принцип действия ИТ с ШИМ поясняется рис. 2.

По основным показателям ПЧ двух рассмотренных видов вполне сопоставимы.



Рис. 2:  $u_{sAB}$  – одно из линейных напряжений статора,  $i_{MA}$  – один из выходных токов ПЧ,  $i_{sA}$  – один из линейных токов статора

Элементная база. В ИН используются полностью управляемые полупроводниковые приборы: на основе транзистора – IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) и на основе тиристора – IGCT (Integrated Gate Controlled Thyristor).

В ИТ используются полностью управляемые тиристоры SGCT (Symmetrical Gate Controlled Thyristor).

Максимальные напряжения и токи современных приборов (примеры) – IGCT 4.5 кВ, 4 кА (ABB), SGCT 6.2 кВ, 3 кА (Mitsubishi). Современные полупроводниковые приборы обеспечивают работу ПЧ с частотой модуляции примерно до 0.5 кГц, на основе тиристора, и до 1 кГц, на основе транзистора.

## 5. УПРАВЛЕНИЕ

Элементная база. В новейших электроприводах используются сигнальные процессоры (DSP) большой вычислительной мощности – от  $60 \cdot 10^6$  операций с плавающей точкой в секунду (60 Mflops), включая операцию умножения. В аппаратной части используется программируемая логика, например, элементы FPGA (Field Programmed Gate Array). Такая элементная база обеспечивает выполнение даже сложных алгоритмов управления с высоким темпом.

Алгоритм управления. В докладе рассматриваются только электроприводы с замкнутой системой автоматического регулирования. Используются системы подчинённого регулирования, [5]. Например, для синхронного электропривода на основе ИТ с ШИМ в [6] представлена система регулирования, в которой со стороны двигателя образованы три замкнутых контура: внутренний контур регулирования напряжений статора, контур регулирования электромагнитных переменных двигателя, внешний контур регулирования скорости. Сигналы напряжений, токов и потокосцеплений преобразованы к системе координат  $d, q$  – к осям ротора СД. Таким образом, рассматривается регулирование, ориентированное по ротору. Такое регулирование соответствует свойствам СД. В асинхронных электроприводах используется регулирование, ориентированное по полю, т. е. по некоторому вектору потокосцеплений. Некоторые современные методы регулирования, использующие этот же принцип, неправомерно ему противопоставлены.

Специфика электроприводов большой мощности – низкая частота модуляции – проявляется в повышенных пульсациях сигналов обратной связи по токам,

напряжениям, потокосцеплениям. Чтобы обеспечить в этих условиях высокое быстродействие, автором предложен метод полужамкнутого управления, [6].

Формирование сигналов обратной связи. Если нет необходимости продолжительно обеспечивать значительный момент при нулевой скорости, используется косвенное измерение скорости, в синхронных электроприводах – также угловое положение ротора. Измеряются только напряжения и токи. Для остальных измерений используется локальная следящая система. Принципиальная идея – сравнение вектора потокосцепления статора, сформированного из измеренных напряжений, с вектором, сформированным из токов с помощью модели магнитной цепи двигателя. Предложены разнообразные варианты такой системы. Вариант формирователя [7] обеспечивает устойчивую работу синхронного электропривода 20 МВт, начиная от 2 % номинальной скорости. Предложены и исследованы косвенные формирователи сигналов обратной связи, использующие магнитную неоднородность ротора, например [8]. Такие формирователи обеспечивают для многих видов двигателя измерение скорости и углового положения ротора, включая режим нулевой скорости.

Всё же, в электроприводах с высокой кратностью момента в настоящее время используется датчик скорости/ положения.

## 6. ВОЗМОЖНОСТИ НОВЕЙШИХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Регулировочные и электромеханические характеристики. Обеспечивается плавное регулирование скорости электропривода от максимальной скорости в обратном направлении до максимальной скорости в прямом направлении. Обеспечивается рекуперативное торможение электропривода. Приводы обеспечивают двухзонное регулирование скорости. В верхней зоне скоростей осуществляется ослабление поля; обеспечивается специальное регулирование магнитного потока, позволяющее снизить необходимые максимальные значения напряжений статора (для СД – также напряжения возбуждения). Диапазон регулирования при ослаблении поля – до 2.5:1-3:1. Обеспечивается плавный переход от любой фактической скорости к заданной скорости. В процессах изменения скорости обеспечиваются ограничения ускорения и рывка.

Обеспечиваются типовые динамические свойства электропривода с системой подчинённого регулирования. Возможно регулирование как с восстановлением скорости при набросах нагрузки (ПИ-регулятор скорости), так и без восстановления (П регулятор).

Пример процессов показан на рис. 3 для варианта без восстановления скорости. Обозначения переменных на рис. 3:  $v_G$  – задание скорости,  $M_l$  – момент нагрузки,  $\psi_\delta$  – магнитный поток в зазоре двигателя,  $\psi_s$  – потокосцепление статора,  $M$  – электромагнитный момент двигателя,  $\Delta v = v - v_G$  – отклонение скорости от задания скорость (относительные значения переменных). Достаточно заметные пульсации момента в процессах на рис. 3 уменьшаются при переходе к 3\*3-фазной системе примерно в 5 раз, [9].

Полоса пропускания контура регулирования скорости – до 50-100 рад/с. Однако, высокое быстродействие электропривода обеспечивается не только свойствами системы регулирования, но и выбором преобразовательного оборудования. Требуется повышенная кратность выходного напряжения ПЧ и возбудителя, особенно в тихоходных электроприводах.

Обеспечиваются ограничения момента и мощности электропривода. Кратность максимальных значений момента и мощности – до 2.5-3.5.

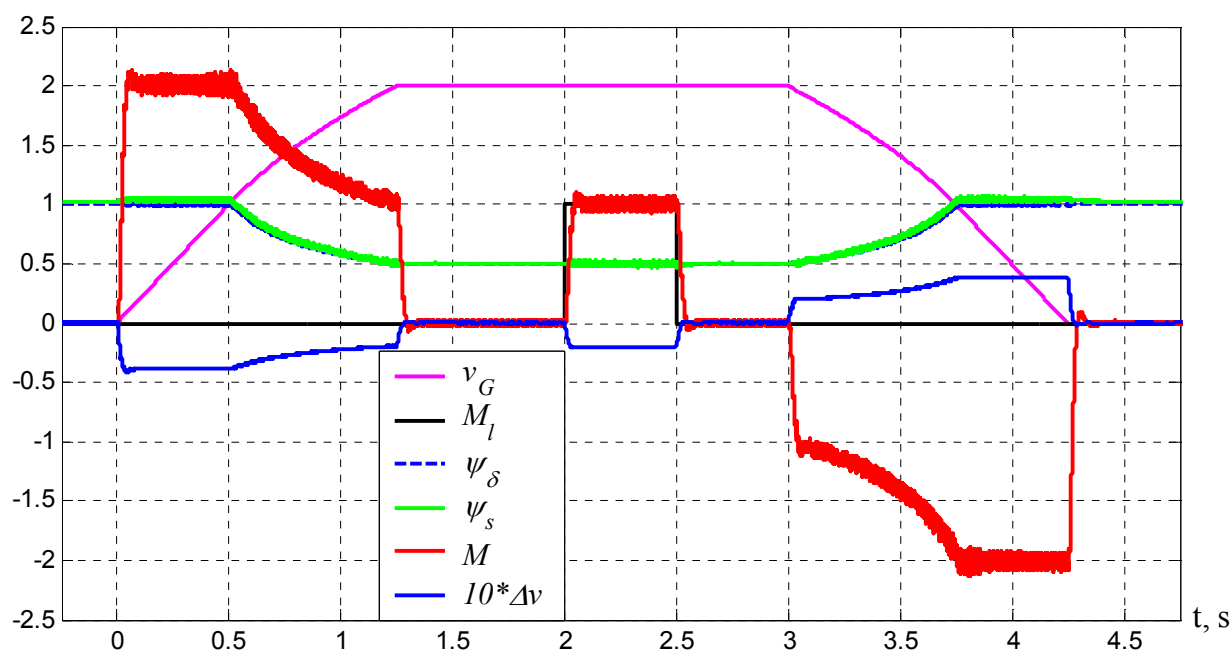


Рис. 3

Режимы двигателя. Система регулирования поддерживает режимы с пониженными потерями энергии за счёт оптимизации магнитного потока двигателя, а в синхронном электроприводе – также за счёт подмагничивающей составляющей тока статора. Это снижает суммарные потери энергии в СД и, особенно, потери энергии в обмотке возбуждения - наиболее напряжённой в тепловом отношении части двигателя.

При наличии фильтра на выходе ПЧ, напряжения на обмотках статора – сглаженные, без крутых перепадов, опасных с точки зрения старения изоляции обмоток. Форма одного из линейных напряжений и одного из фазных токов статора была показана на рис. 2. Ток весьма близок к синусоидальному. Действующее значение всех высших гармоник тока статора не превышает 5 % номинального тока.

Воздействие на питающую сеть. Ток, потребляемый от сети главными цепями, имеет форму, близкую к показанной на рис. 2 для статора, с малым содержанием высших гармоник. Действующее значение всех высших гармоник тока, потребляемого от сети, не превышает 5 % номинального тока.

Реактивная мощность по основной гармонике тока, потребляемого от сети, автоматически поддерживается на нулевом уровне. **Фильтро-компенсирующее устройство не требуется.**

Надёжность. Среднее время безаварийной работы новейших электроприводов достигает 120 000 ч.

## 7. ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Предсказывается смена элементной базы ПЧ [10], с заменой приборов на основе кремния приборами на основе карбида кремния. Рабочая температура структуры у таких приборов – до 500°C, частота переключений выше примерно на 3 порядка. Ожидаемое сокращение размеров ПЧ – в 50 раз по объёму, ожидаемый КПД – до 99.6 %. Но предполагаемый срок смены элементной базы – до 20 лет.

Улучшение параметров полупроводниковых приборов делает перспективными для приводов большой мощности ранее известные виды ПЧ: двухступенчатый непосредственный ПЧ и матричный ПЧ. В этих видах ПЧ, близких по свойствам, отсутствует накапливающий элемент цепи выпрямленного напряжения или

выпрямленного тока. ПЧ функционирует как ИН с ШИМ по отношению к двигателю и как ИТ с ШИМ по отношению к сети.

Усовершенствование регулируемых электроприводов большой мощности позволит перейти к решению более сложных задач. Автор считает насущной задачей перехода от регулирования скорости (положения) ротора двигателя к регулированию скорости (положения) рабочего органа в много-массовой упругой системе, например, в главных приводах прокатных станов или в системах электродвижения ледоколов с длинными валами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Akhmadeyev E., Beliaev D., Weigel S. and Weinger A. Industrial Implementation of a Controlled Sensorless Synchronous Drive with Hard Start Conditions // Proceedings of the 33rd Power Electronics Specialists Conference.- June 23-27, 2002.- Cairns, Queensland, Australia.- Paper 7-3-4.
2. Stumberger G., Zarko D., Aydemir M. T. and Lipo T. A. Design and Comparison of Linear Synchronous Motor and Linear Induction Motor for Electromagnetic Aircraft Launch System // Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference.- June 1-4, 2003.- Madison, Wisconsin, USA.- pp. 494-500.
3. Power Electronics Handbook. Edited by M. H. Rashid.- San Diego/London: Academic Press, 2001, 895 ps.
4. Xiao Y., Wu B., Rizzo S. C. and Sotudeh R. A Novel Power Factor Control Scheme for High-power GTO Current-source inverter // IEEE Transactions on Industrial Applications, 1998, Vol. 34, # 6.- pp. 1278-1283.
5. Вейнгер А. М. Перспективы систем подчинённого регулирования электроприводов переменного тока // Электротехника, 1996, № 4.- сс. 41-47.
6. Weinger A. Potential of AC Drives with Semi-closed Control // Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference.- June 1-4, 2003.- Madison, Wisconsin, USA.- pp. 1511-1517.
7. Novakovsky A, Shakaryan Yu., Vinitsky Yu., Tikotsky A. and Weinger A. Improvements in Automatic Control of Synchronous Machine with Machine Commutated Current Inverter // Proceedings of the International Conference on Electrical Machines.- September 2-4, 1998.- Istanbul, Turkey, V. 1/3.- pp. 78-82
8. Lorenz R. D. Observers and State Filters in Drives and Power Electronics // Journal of Electrical Engineering, 2000, Vol. 2, pp. 4-12.
9. Beliaev D., Ingram B., DeWinter F. and Weinger A.. Polyphase Systems for High-power Controlled AC Drives. Specifics of their Parameters and Control // Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications.- September 2-4, 2003.- Toulouse, France.- Paper 251.
10. Takahashi I. SiC Power Converter Technology in Future // Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference.- June 1-4, 2003.- Madison, Wisconsin, USA.- pp. 1903-1908.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Вейнгер Александр Меерович – доктор техн. наук, профессор, ведущий специалист Московского представительства компании Rockwell Automation, автор и соавтор 4 книг, более 190 опубликованных статей и докладов, более 60 изобретений в области электропривода и смежных областях: электрических машин, преобразовательной техники, автоматического управления.

Адрес: 115054, Москва, Б. Строченовский пер., 22/25, оф. 402, Rockwell Automation.

Тел.: +7 095 956 0464, факс: +7 095 956 0469, E-mail: weinger@rockwell.ru