

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ВИРТУАЛЬНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

Вейнгер А. М., Ильин Е. П.  
(Rockwell Automation, Москва),

Шатохин А. А.  
(Энергоресурс, Екатеринбург)

Аннотация. Исследован электропривод с векторным управлением, ориентированным по полю. Для синхронного электропривода введены дополнительные элементы алгоритма управления. Теоретические результаты подтверждены испытаниями на стенде, в состав которого входят шкаф управления серийного высоковольтного регулируемого электропривода PowerFlex 7000 и компьютерная модель силовой части электропривода, работающая в реальном времени.

Abstract. A drive is investigated with field oriented vector control. Additional elements are included in control algorithm for operation of synchronous drive. Theoretical results are confirmed by tests at test bench. The bench includes control cabinet of serial MV controlled drive PowerFlex 7000 and computer model of a drive power part, operating in real time.

## 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом является мощный электропривод, содержащий синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением и преобразовательно-регулирующее устройство (ПРУ). Используется ПРУ на основе инвертора тока с ШИМ. Схема главных цепей представлена на рис. 1.

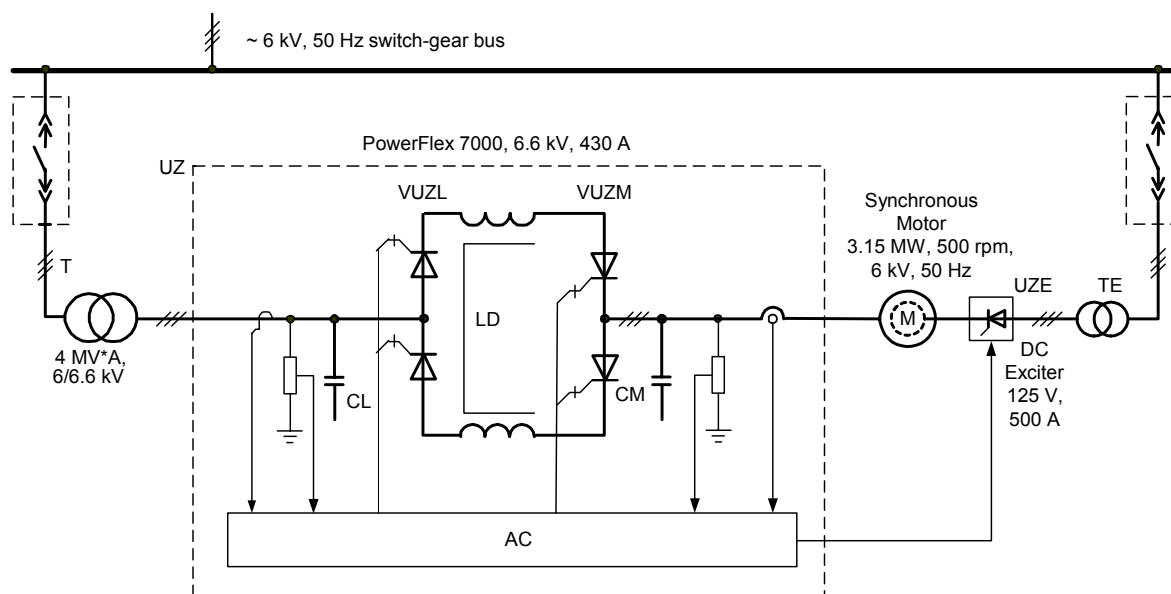


Рис. 1. Главные цепи синхронного электропривода

В ПРУ реализуется векторное управление, ориентированное по полю, [1]. Такое управление, с точки зрения авторов, не является предпочтительным для синхронного электропривода. Ещё в [2] для синхронного электропривода было предложено векторное управление, ориентированное по ротору. Этот метод был развит и далее, например, в [3], [4]. Однако, управление, ориентированное по полю, целесообразно в ряде применений с точки зрения унификации с асинхронными электроприводами. В [5] были рассмотрены недостатки метода и возможные дополнения, позволяющие использовать этот метод для массовых электроприводов: насосов, вентиляторов и т. п. Функциональная схема алгоритма управления с указанными дополнениями приведена на рис. 2.

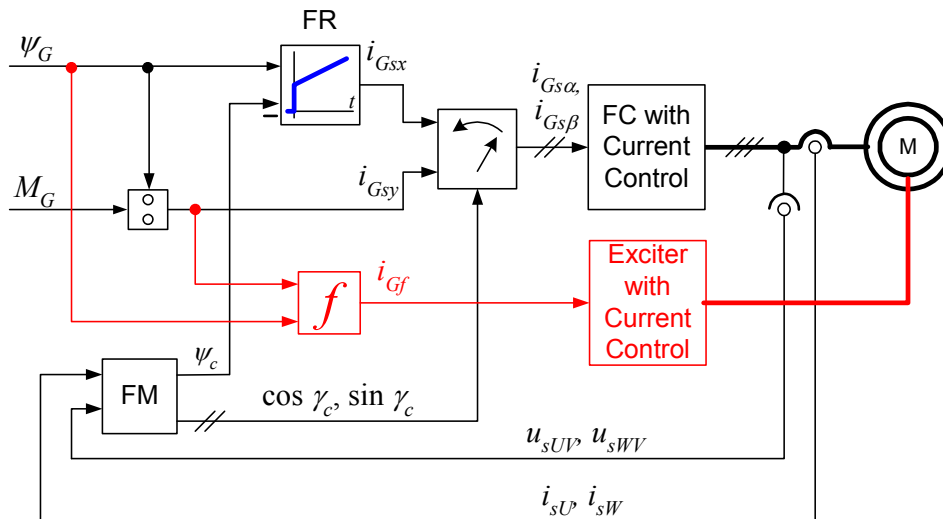


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема алгоритма управления с дополнениями для синхронного электропривода

Все переменные и параметры, кроме времени и постоянных времени, рассматриваются здесь как относительные величины при общепринятом выборе базовых значений электрической машины.

Входами данной части алгоритма являются задание момента  $M_G$  и задание магнитного потока  $\psi_G$ . Выходами являются задания токов статора  $i_{Gs\alpha}$ ,  $i_{Gs\beta}$  в координатах статора  $\alpha$ ,  $\beta$ , а также задание тока возбуждения  $i_{Gf}$ . Управление ориентировано по вектору основного магнитного потока  $\psi_\delta$  (магнитного потока в зазоре). Элемент  $FM$  формирует сигнал обратной связи  $\psi_\delta$  – модуль указанного вектора и единичный направляющий вектор  $\mathbf{d}_c = (\cos \gamma_c, \sin \gamma_c)$  для вектора потока в координатах статора. Управляемый поток определяется через вектор потокосцеплений статора и вектор тока статора:

$$\psi_\delta = \psi_s - L_{s\sigma} \mathbf{i}_s.$$

Здесь  $L_{s\sigma}$  - индуктивность рассеяния статора.

## 2. ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Задачей данной работы является экспериментальная проверка предложенного метода. Кроме того, исследованы специальные вопросы:

- Свойства внутреннего контура регулирования тока возбуждения.
- Влияние пульсаций тока статора на напряжение возбудителя и выбор параметров обратной связи по току возбуждения.
- Методы расчёта параметров управления.
- Свойства пуско-тормозных и установившихся режимов.

Исследование выполняется на примере конкретного применения – электропривода шахтного вентилятора, 3.15 МВт, 500 об/мин, 6 кВ. Специфические свойства этого электропривода, в определённой степени, общие для массовых мощных электроприводов: управление без датчика положения, сравнительно высокий уровень искажений токов статора, сравнительно низкий уровень максимального напряжения возбудителя.

## 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованы простые теоретические методы. Экспериментальное исследование выполняется на виртуальном испытательном стенде высоковольтных электроприводов. В состав стенда входят шкаф управления серийного электропривода PowerFlex 7000 и компьютерная модель силовой части электропривода, работающая в

реальном времени. Из шкафа управления в компьютерную модель поступают логические команды проводящего состояния для каждого плеча преобразователя частоты. Из модели в шкаф управления поступают аналоговые сигналы обратной связи по напряжениям и токам. В состав компьютерной модели входят модели механизма, двигателя, силовой части преобразовательно-регулирующего устройства, питающей сети.

Соответствие процессов стенда и реальных электроприводов было подтверждено многократно.

#### 4. ВНУТРЕННИЙ КОНТУР РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Упрощенная структурная схема контура представлена на рис. 3.

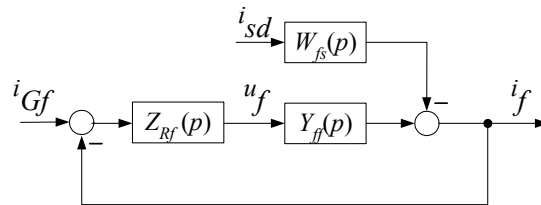


Рис. 3. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения

Обозначения:  $i_f$  – ток возбуждения,  $u_f$  – напряжение возбуждения,  $i_{Gf}$  – задание тока возбуждения,  $i_{sd}$  – продольная компонента тока статора,  $p$  – оператор дифференцирования по времени. Передаточные операторы:  $Z_{Rf}(p)$ ,  $Y_{ff}(p)$ ,  $W_{fs}(p)$ , – выводятся из общепринятых уравнений синхронной машины.

На основе метода подчинённого регулирования может быть получен передаточный оператор регулятора, в состав которого входит фильтр и ПИ регулятор (для крупных машин интегральная часть почти не влияет на свойства контура и может быть исключена):

$$Z_{Rf1}(p) = \frac{1}{2} R_{cd} \frac{L_f}{L_{cfd}} \frac{1}{1 + T_{cd} p}; L_f = L_{md} + L_{f\sigma}; L_{cfd} = L_{cd\sigma} + \frac{L_{md} L_{f\sigma}}{L_f}; T_{cd} = \frac{L_{cd}}{\Omega_b R_{cd}}.$$

Кроме того, предложен простейший П регулятор с оператором:

$$Z_{Rf2}(p) = \frac{1}{2} R_{cd} \frac{L_f}{L_{cd}}.$$

Реакция замкнутого контура регулирования на задание  $\Delta i_{Gf}$  выражается оператором  $W_{cl}(p)$ :

$$\Delta i_f = W_{fcl}(p) \Delta i_{Gf}.$$

На рис. 4 представлены ЛАЧХ для оператора объекта регулирования  $Y_{ff}$  и для оператора замкнутого контура регулирования с двумя вариантами регулятора:  $W_{fcl1}$ ,  $W_{fcl2}$ . В обоих вариантах имеет место вполне достаточный запас устойчивости.

Регулятор с фильтром обеспечивает характеристику, близкую к таковой для оптимального фильтра. Контур с примитивным регулятором имеет более низкое быстродействие, однако оно достаточно для рассматриваемых применений.

Очень важной проблемой является влияние искажений токов статора на напряжение возбуждения. Относительное максимальное напряжение возбудителя очень мало; значительная амплитуда искажений в этом напряжении, вызванная искажениями токов статора, сужает рабочий диапазон возбудителя. Влияние тока статора на напряжение возбуждения характеризуется оператором  $Z_{ufs}(p)$ :

$$\Delta u_f = Z_{ufs}(p) \Delta i_{sd}.$$

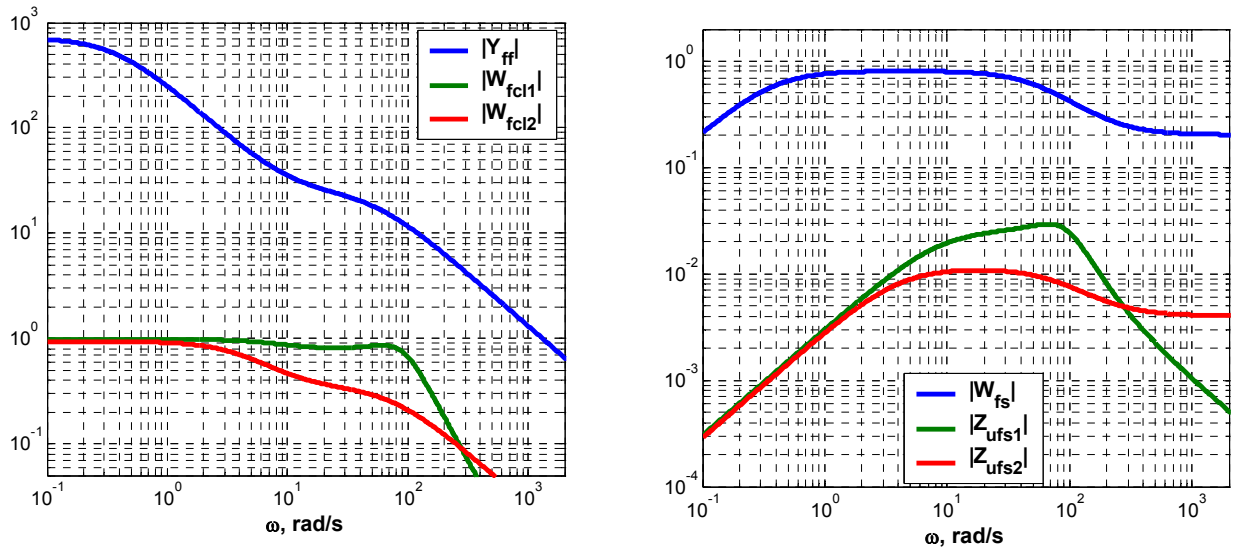


Рис. 4. ЛАЧХ для объекта регулирования в контуре тока возбуждения, для замкнутого контура и для зависимости тока возбуждения от продольного тока статора

ЛАЧХ для оператора объекта  $W_{fs}(p)$  и для оператора в замкнутом контуре  $Z_{ufs}(p)$  также представлены на рис. 4. Регулятор с фильтром обеспечивает меньшую амплитуду пульсации напряжения возбудителя при частотах свыше 300 рад/с. Это как раз диапазон частоты пульсаций в напряжении возбудителя от искажений токов статора. В зависимости от параметров обмотки возбуждения и возбудителя, возможно выбрать либо примитивный П регулятор, либо регулятор с фильтром.

#### 5. ПРОЦЕССЫ ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА

Параметры исследуемого электропривода:

- Электромеханическая постоянная времени  $T_j = 30$  с.
- Характеристика момента нагрузки:  $M_c = M_{c0} + M_{c2}v^2$ ;  $M_{c0} = 0.1$ ,  $M_{c2} = 0.7$ .
- Параметры двигателя:  $R_s = 0.01$ ,  $R_f = 0.0014$ ,  $R_{cd} = R_{cq} = 0.035$ ,  $L_{md} = 0.96$ ,  $L_{mq} = 0.64$ ,  $L_{s\sigma} = 0.09$ ,  $L_{f\sigma} = 0.19$ ,  $L_{cd\sigma} = L_{cq\sigma} = 0.051$ .
- Максимальное напряжение возбудителя:  $U_{f,max} = 0.0046$ .

Исследованы процессы с простейшим П регулятором тока возбуждения; оператор регулятора  $Z_R(p) = 0.025$  принят в примерном соответствии с частью 4.

Зарегистрированы пуско-тормозные и установившиеся режимы, процессы от возмущений со стороны механизма и со стороны питающей сети.

Процессы пуска показаны на рис. 5

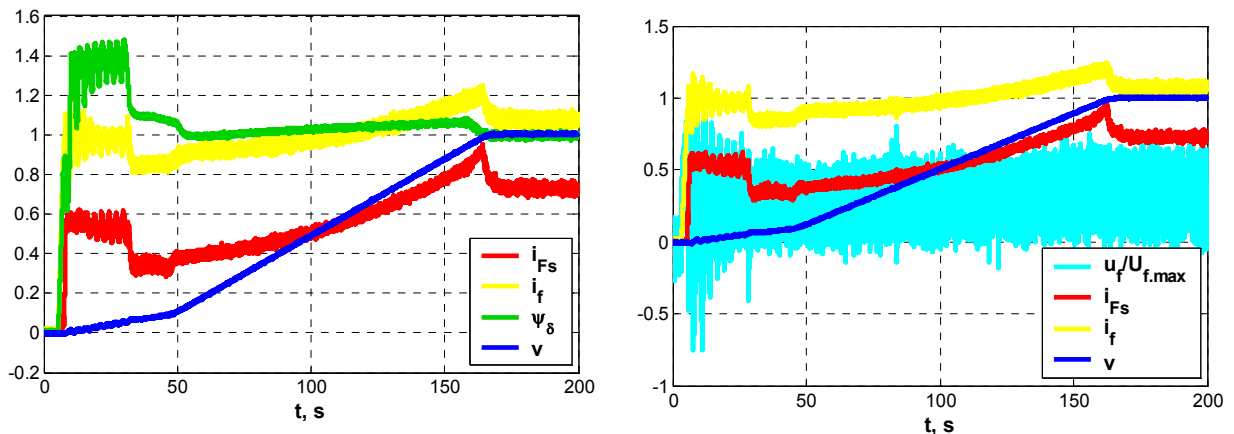


Рис. 5. Процессы пуска

Загегистрированы следующие переменные:  $i_{Fs}$  – ток статора (модуль вектора, фильтрованная переменная, постоянная времени фильтра 0.01 с),  $i_f$  – ток возбуждения,  $\psi_\delta$  – основной поток (модуль вектора),  $v$  – скорость,  $u_f$  – напряжение возбуждения.

Имеет место предстартовый интервал с нарастанием потока при стоящем двигателе. Затем проходит начальная стадия пуска в разомкнутой системе, с определёнными колебаниями момента и потока. При скорости  $v \approx 0.06$  система замыкается. В целом процессы являются удовлетворительными.

На рис. 6 представлены осциллограммы процессов при скачкообразных изменениях момента нагрузки.

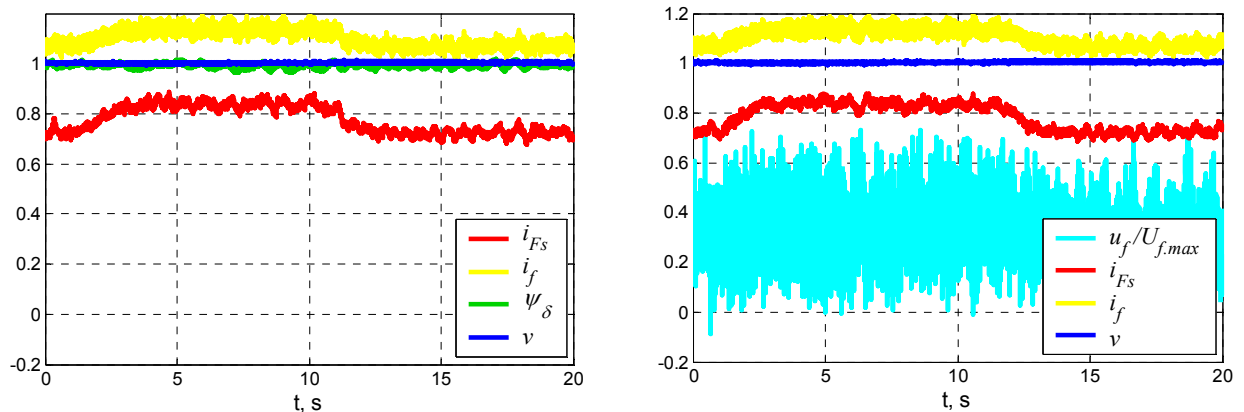


Рис. 6. Процессы при скачкообразных изменениях момента нагрузки

Процессы имеют ожидаемый характер. Изменения скорости практически незаметны из-за большой электромеханической постоянной времени привода.

Амплитуда пульсаций в напряжении возбуждения  $U_{fpm} \approx 0.0014$ , отношение амплитуды пульсаций к максимальному напряжению составляет  $U_{fpm}/U_{f,max} \approx 0.3$ . Это – существенное, но ещё допустимое сужение рабочего диапазона возбудителя.

## 6. ВЫВОДЫ

1. Испытания подтвердили приемлемость рассматриваемого алгоритма управления, по крайней мере, для массовых электроприводов.

2. Испытания подтвердили приемлемость предложенной методики выбора параметров внутреннего контура регулирования тока возбуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] F. Blaschke. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für den TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift, 1971, Bd. 45, № 10.- Ss. 757-760.

[2] Слежановский О. В., Дацковский Л. Х., Вейнгер А. М. и др. О возможностях регулируемого электропривода с синхронным двигателем // Электричество, 1971, № 9.- сс. 60-64.

[3] Вейнгер А. М. Регулируемый синхронный электропривод.- М., Энергоатомиздат, 1985.- 224 с.

[4] A. Weinger. 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.

[5] D. Beliaev, A. Weinger, R. Paes, S. Weigel. Field oriented control of a synchronous drive // Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference.- May 15-18, San Antonio, TX, USA.- pp. 957-961.



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.



Ильин Евгений Петрович,  
специалист по адаптации микропроцессорных систем  
управления, соавтор нескольких изобретений и  
публикаций по техническим средствам гибких  
производственных систем. В настоящее время – инженер  
по сервису и диагностике автоматизированного  
электропривода в Московском представительстве  
компания Rockwell Automation.

Шатохин Артур Анатольевич,  
Выпускник Уральского Политехнического института  
1991 г. В настоящее время – гл. инженер проектов  
предприятия «Энергоресурс-ЕК», г. Екатеринбург.