



рицательной обратной связи по основному магнитному потоку и регулятор потока (*РП*) для поддержания его номинального значения.

Канал управления в цепи статора содержит три контура регулирования: тока (*КТ*), момента (*КМ*) и скорости (*КС*). *КТ* включает в себя *ПЧ*, цепь отрицательной обратной связи по току и регулятор тока (*РТ*). *КМ* включает в себя замкнутый *КТ*, цепь отрицательной обратной связи по моменту и регулятор момента (*РМ*). *КС* включает в себя замкнутый *КМ*, цепь отрицательной обратной связи по скорости двигателя и регулятор скорости (*РС*).

Структурные схемы ротора, статора, электромагнитного момента и скорости представлены на рис.2 и рис.3 соответственно [3].

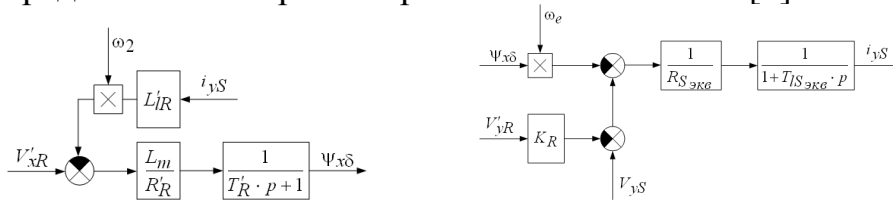


Рис 2. Структурные схемы ротора и статора

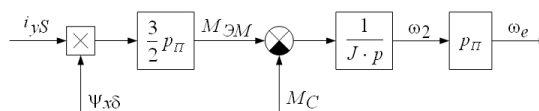


Рис.3. Структурная схема электромагнитного момента и скорости

Учитывая следующие допущения – напряжение возбуждения (ротора) синусоидально; ток статорной цепи двигателя непрерывный; регулировочная характеристика *ПЧ* линейна; момент инерции, приведенный к валу двигателя, постоянный; инерционность цепей обратной связи по потоку, току, моменту и скорости не учитывается ввиду ее малости, - можно предложить следующую структурную схему регулирования *ЭП* с *АВД* (рис.4):

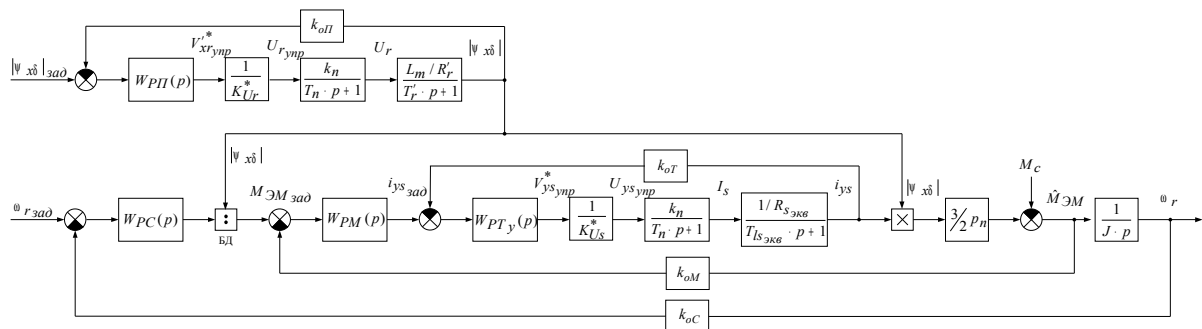


Рис.4. Структурная схема с подчиненным регулированием

Оптимизацию контуров системы подчиненного регулирования выполним по условию технического (*ТО*) и симметричного (*СО*) оптимумов [4, 5].

В одноконтурной цепи возбуждения необходимо компенсировать большую постоянную времени ротора  $T_r'$ , при этом некомпенсируемая постоянная времени будет определяться инерционностью вентильного преобразователя  $T_{\mu\Pi} = T_n = T_{\mu}$ . Задачу синтеза решает использование *ПИИ*-регулятора, который позволяет выполнить настройку замкнутого контура на *ТО* с желаемой передаточной функцией:

$$W_{TO}(p) = \frac{1/k_o}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}. \quad (1)$$

Разомкнутый контур системы имеет передаточную функцию:

$$W_{P\Pi}(p) \cdot W_{K\Pi}(p) = \frac{k_{P\Pi}(T_{P\Pi} \cdot p + 1)}{T_{P\Pi} \cdot p} \cdot \frac{k_n}{(T_n \cdot p + 1)} \cdot \frac{L_m / (R_r' \cdot K_{ur}^*)}{(T_r' \cdot p + 1)}. \quad (2)$$

Воспользовавшись условиями настройки контура на *ТО*, получим:

$$k_{P\Pi} = \frac{T_r' \cdot R_r' \cdot K_{ur}^*}{2 \cdot T_{\mu\Pi} \cdot k_n \cdot k_{o\Pi} \cdot L_m}, \quad T_{P\Pi} = \frac{T_r'}{k_{P\Pi}}. \quad (3)$$

Полученная система не имеет статической ошибки по управлению независимо от ее параметров, что определено типом регулятора.

Канал управления в статорной цепи состоит из трех контуров регулирования. В соответствии с принципами подчиненного регулирования синтез начинается с внутреннего *КТ*. Для него, так же как и для *КП* выполняется настройка на *ТО*, при условии  $T_{\mu T} = T_n = T_{\mu}$ . В результате получаем *ПИИ*-регулятор, со следующими коэффициентами:

$$k_{PTy} = \frac{T_{ls_{эке}} \cdot R_{s_{эке}} \cdot K_{us}^*}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot k_n \cdot k_{oT}}, \quad T_{PTy} = \frac{T_{ls_{эке}}}{k_{PTy}}. \quad (4)$$

Контур регулирования тока является внутренним по отношению к контуру регулирования момента. При дальнейшем синтезе передаточная функция замкнутого контура тока с достаточной степенью точности (ввиду малости некомпенсируемой постоянной времени  $T_{\mu T}$ ) аппроксимируется выражением:

$$W_{PT}(p) = \frac{1/k_{oT}}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{oT}}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}. \quad (5)$$

Разомкнутый контур системы имеет передаточную функцию:

$$W_{PM}(p) \cdot W_{KM}(p) = W_{PM}(p) \cdot \frac{1/k_{oT}}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1} \cdot \frac{3}{2} \cdot p_n. \quad (6)$$

В результате объект регулирования представляется инерционным звеном с малой постоянной времени и задача синтеза решается применением *И*-регулятора. Некомпенсируемая постоянная времени *КМ* будет определяться как  $T_{\mu M} = 2 \cdot T_{\mu T}$ :

$$W_{PM}(p) = \frac{1}{T_{PM} \cdot p} = \frac{k_{oT}}{6 \cdot k_{oM} \cdot p_n \cdot T_{\mu T} \cdot p}, \quad T_{PM} = \frac{6 \cdot k_{oM} \cdot p_n \cdot T_{\mu T}}{k_{oT}}. \quad (7)$$

Наличие интегральной составляющей в *КМ* позволит компенсировать статическую ошибку, возникающую при изменении момента сопротивления на валу двигателя.

В свою очередь контур регулирования момента является внутренним по отношению к контуру регулирования скорости. Здесь также, ввиду малости некомпенсируемой постоянной времени  $T_{\mu M}$ , передаточная функция с достаточной степенью точности аппроксимируется выражением (5), а некомпенсируемая постоянная времени равна  $T_{\mu C} = 2 \cdot T_{\mu M} = 4 \cdot T_{\mu T}$ .

Разомкнутый контур системы имеет передаточную функцию:

$$W_{PC}(p) \cdot W_{KC}(p) = W_{PC}(p) \cdot \frac{1/k_{oM}}{4 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{J \cdot p}. \quad (8)$$

В результате объект регулирования представляется в виде последовательно соединенных звеньев – инерционного, с малой постоянной времени и звена интегрирования. Для  $KC$  настройка выполняется на  $CO$  путем применения  $ПИ$ -регулятора.

Коэффициенты регулятора скорости получаются равными:

$$k_{PC} = \frac{k_{oM} \cdot J}{8 \cdot k_{oC} \cdot T_{\mu T}}, \quad T_{PC} = 16 \cdot T_{\mu T}; \quad (9)$$

Расчет регуляторов произведем для двигателя с фазным ротором  $4AK200L4U3$ , мощностью  $55 \text{ кВт}$  [6]. Расчет коэффициентов силовых преобразователей, которые являются апериодическими звеньями, и датчиков обратной связи по потоку, току, моменту и скорости представлен в [7].

По синтезированной структурной схеме электропривода (рис. 4) и рассчитанным значениям регуляторов была построена математическая модель в среде программирования *Matlab* [8] (*Toolbox-Simulink*), которая приведена на рис.5.

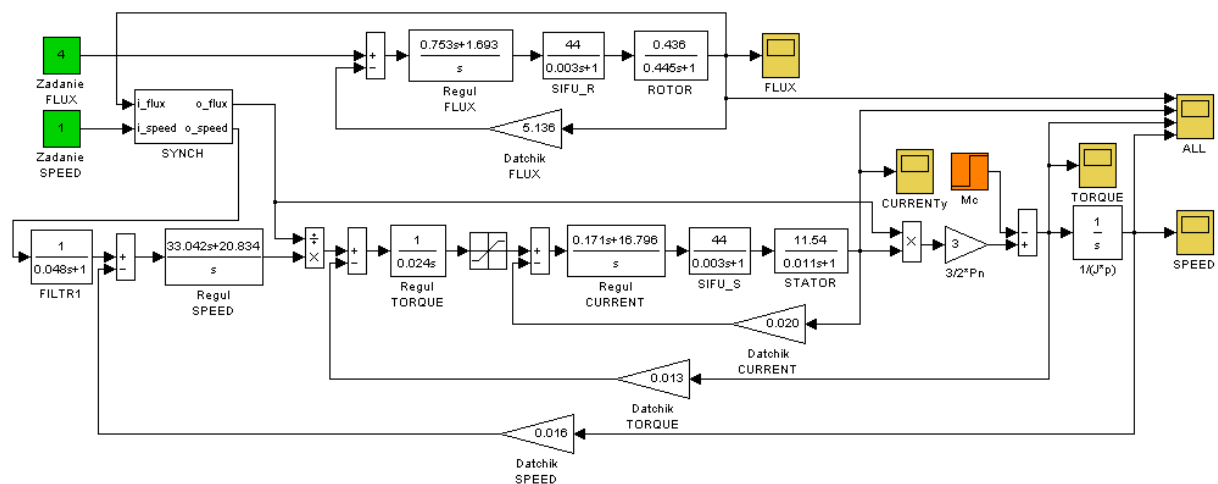


Рис. 5. Синтезированная схема с подчиненным регулированием в Matlab

Первоначально происходит процесс насыщения цепи ротора ( $KII$ ) до достижения номинального значения основного магнитного потока  $\Psi_{\delta}$ . Затем происходит пуск цепи статора при условии  $\Psi_{\delta} = Const$ , что позволит использовать  $\mathcal{ЭП}$  при тяжелых условиях пуска. Последовательное включение цепей  $\mathcal{ЭП}$  в модели обеспечивает функциональный блок *SYNC*, который только по истечении заданного времени передает текущее значение основного магнитного потока в статор, в противном случае оно равно единице. Таким образом, исключается возможное деление на ноль в цепи статора

(блок деления) при пуске цепи возбуждения. Результаты моделирования переходных процессов потока, тока, момента и скорости представлены на рис.6. Модель для первой группы осциллограмм (рис.6, а) не учитывает ограничений заданий входных сигналов, на второй группе осциллограмм (рис. 6, б) присутствует ограничение задания в  $KT$ , и на третьей группе осциллограмм установлен входной фильтр в  $KС$ .

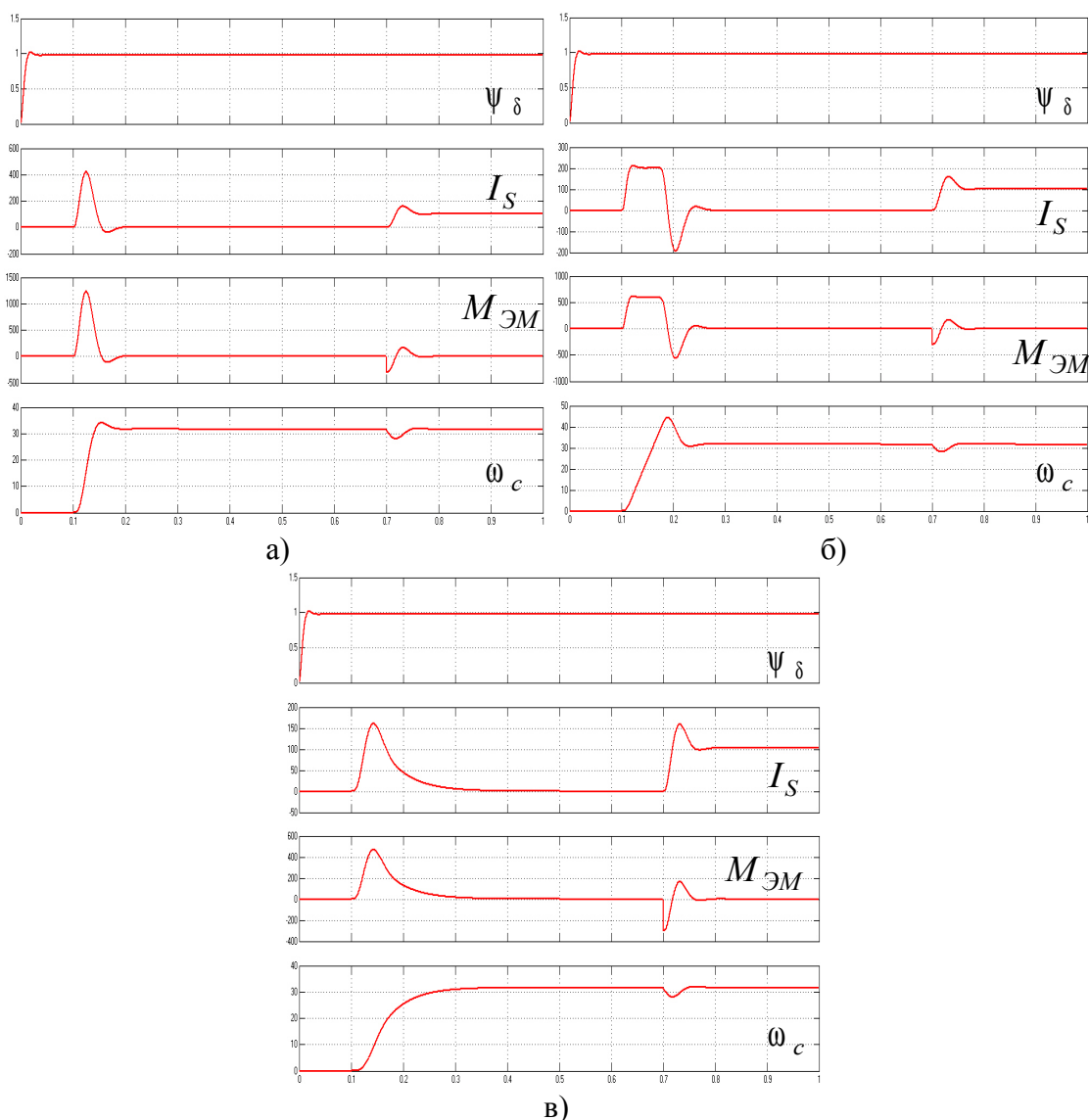


Рис. 6. Переходные характеристики потока, тока, момента и скорости (а), с ограничением тока (б), с входным фильтром скорости (в)

Для одноконтурной цепи возбуждения ( $KП$ ) был синтезирован  $ПИ$ -регулятор компенсирующий большую постоянную времени ротора  $T_r'$ , что отразилось в виде малого времени переходного процесса равного постоянной времени преобразователя  $T_{\mu П} = T_n = T_{\mu}$  (рис.6).

Внутренним в цепи статора является контур регулирования тока для которого аналогично  $KП$  был синтезирован  $ПИ$ -регулятор с малой постоянной времени равной  $T_{\mu T} = T_n = T_{\mu}$ . На рис.6 видно, что подаче момента сопротивления значение тока изменяется, т.е. возникает статическая ошибка,

что определяется условием настройки регулятора на  $TO$ . Из осциллограммы рис.6 (а) также видно, что вследствие отсутствия блоков, ограничивающих выходные сигналы, амплитудные значения во много раз превышают предельно допустимые (номинальные). Для ограничения максимальных значений используется блок *Saturation*, при этом процессы в модели приближаются к процессам в реальных системах (рис.6 (б)). Однако для большего соответствия следует учитывать ограничения не только в регуляторах, но и преобразователях.

В контуре регулирования момента был использован  $I$ -регулятор, который позволил принять малую постоянную времени равной  $T_{\mu M} = 2 \cdot T_{\mu T}$ .

Контур регулирования скорости настроен на  $CO$  ( $PII$ -регулятор) для устранения статической ошибки, возникающей при подаче момента сопротивления, и поддержания заданного значения. На рис.6. (а, б) видно значительное перерегулирование при первоначальном пуске, для сглаживания переходных характеристик на входе регулятора скорости ставится фильтр (FILTR, апериодическое звено) с постоянной времени  $4 \cdot T_{\mu C}$ . Из осциллограммы рис.6 (в) видно, что перерегулирование тока, момента и скорости значительно уменьшилось, а время переходного процесса увеличилось.

- 
1. Сонин, Ю.П. Асинхронизированный вентильный двигатель / Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 68 с.
  2. А.с. 1515323 СССР, МКИ5 Н 02 Р 7/42, А1. Способ управления двигателем двойного питания, выполненным на базе асинхронного двигателя с фазным ротором и устройство для его осуществления / Ю.П. Сонин, Ю.П. Шакарян, И.В. Гуляев, Ю.И. Прусаков (СССР).–№ 4192438/24-07; заявлено 11.02.87; опубл.15.10.89,Бюл. №38. – 6 с.
  3. Тутаев, Г.М. Векторное управление электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя / Г.М. Тутаев, А.Н. Ломакин // Материалы VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2006)». В 7 томах. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2006.– Т 6. С. 171-178.
  4. Ковчин, С.А. Теория электропривода: Учебник для вузов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин – СПб.:Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1994. – 496 с.
  5. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
  6. Кравчук, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчук, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
  7. Симаков, Г.М. Системы автоматического управления электроприводами: Учеб. пособие по курсовому проектированию – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 116 с.
  8. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.