

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
дисциплины

**«ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА»**

для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»

Гомель 2021

## Введение

По дисциплине “Векторное управление электродвигателями переменного тока”, согласно учебного плана, проводятся практические занятия.

Цель занятий – закрепить полученные теоретические знания и научиться применять их для практических расчетов электроприводов.

### 1. Практическая работа №1

#### 1.1. Выбор электродвигателя и расчет его параметров

Выбор электродвигателя осуществляется по заданным преподавателем требуемым мощности и частоте вращения. При существенном отличии номинальной частоты вращения необходимо завышать мощность, пересчитав ее через требуемый момент и номинальную частоту.

Если в справочнике параметры схемы замещения приведены в относительных единицах, то необходимо их привести к абсолютным

$$x = x^o \cdot \frac{U_H}{I_H}, R = R^o \cdot \frac{U_H}{I_H} \quad (2.1)$$

где:  $I_H$  – номинальный ток (А)

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}, \quad (2.2)$$

$U_H$  – номинальное фазное напряжение (В),

$\eta_H$  – номинальный КПД – КПД при нагрузке 100 % (о.е.),

$\cos \varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности – при нагрузке 100 % (о.е.).

Активные сопротивления схемы замещения соответствуют активным сопротивлениям обмотки фазы, а индуктивности статора и ротора следует рассчитывать по соотношениям

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{12}, L_2 = L_{\sigma 2} + L_{12} \quad (2.3)$$

где:  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$  – индуктивности рассеяния статора и ротора, соответственно

$$L_{\sigma 1} = \frac{x_1}{\omega_C}, L_{\sigma 2} = \frac{x_2}{\omega_C}, \quad (2.4)$$

$L_{12}$  – взаимоиנדуктивность между обмотками статора и ротора

$$L_{12} = \frac{x_{\mu}}{\omega_C}. \quad (2.5)$$

Индуктивность рассеяния двигателя

$$L_{\sigma}'' = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}{L_2} \quad (2.6)$$

( $L_{\sigma}'' \approx L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$ ).

Коэффициенты электромагнитной связи ротора

$$K_2 = \frac{L_{12}}{L_2}. \quad (2.7)$$

Номинальные параметры двигателя определяются следующим образом:

- номинальная угловая скорость вращения ( $\text{рад/с}$ )

$$\omega_H = \omega_{0H} \cdot (1 - s_H) \quad (2.8)$$

где:  $s_H$  – номинальное скольжение (о.е.),

$\omega_{0H}$  – синхронная скорость при номинальной частоте напряжения ( $\text{рад/с}$ )

$$\omega_{0H} = \frac{\omega_{0ЭЛН}}{p_d}, \quad (2.9)$$

$\omega_{0ЭЛН}$  – номинальная синхронная скорость поля статора ( $\omega_{0ЭЛН} = \omega_c$ );

- номинальный момент (Н·м)

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (2.10)$$

- номинальное потокосцепление статора (Вб)

$$\Psi_{1H} = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_H}\right)^2 + \left[\frac{R_1}{x_\mu} \cdot \frac{R_2}{s_H} - (x_1 + x_2)\right]^2}} \cdot \frac{U_H}{\omega_{0ЭЛ}}; \quad (2.11)$$

- номинальное потокосцепление ротора (Вб)

$$\Psi_{2H} = \frac{\frac{R_2}{s_H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \cdot \Psi_{1H}. \quad (2.12)$$

Следует также помнить, что номинальные параметры: напряжение, ток, потокосцепление, следует привести от трехфазной к двухфазной модели, используя коэффициент согласования

$$k_c = \sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (2.13)$$

## 1.2. Расчет параметров модели системы векторного управления

Структурная схема упрощенной модели системы векторного управления асинхронным двигателем представлена на рис. 1.1.

Недостающие параметры модели двигателя:

- эквивалентное сопротивление (Ом)

$$R_\sigma = R_1 + R_2 \cdot K_2^2; \quad (2.14)$$

- эквивалентная постоянная времени (с)

$$T_\sigma = \frac{L_\sigma''}{R_\sigma}; \quad (2.15)$$

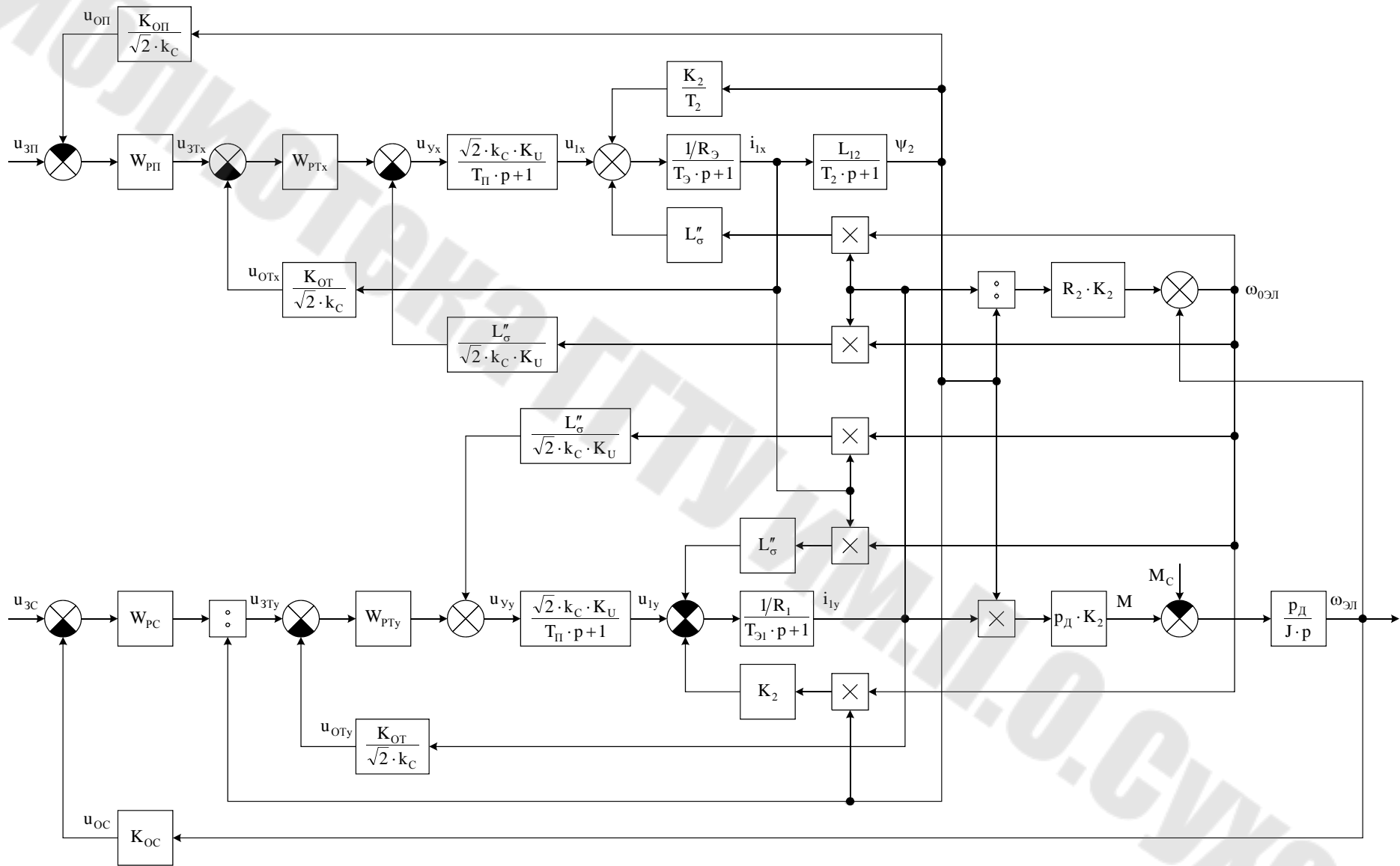


Рис. 2.1. Структурная схема модели системы векторного управления.

- электромагнитная постоянная времени статора (с)

$$T_{\text{Э1}} = \frac{L''_{\sigma}}{R_1}; \quad (2.16)$$

- постоянная времени ротора (с)

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad (2.17)$$

- электромеханическая постоянная времени, определяемая внутренней обратной связью двигателя по ЭДС в канале управления скоростью (с)

$$T_M = \frac{J \cdot R_1}{P_d \cdot K_2^2 \cdot \Psi_{2xH}^2} \quad (2.18)$$

где  $\Psi_{2xH}$  – номинальное потокосцепление ротора по оси х (Вб)

$$\Psi_{2xH} = \sqrt{2} \cdot k_C \cdot \Psi_{2H}. \quad (2.19)$$

Постоянная времени инвертора определяется частотой модуляции. Ее можно принять равной  $T_{\Pi} = 1 \dots 2$  мс.

После выбора номинальных значений сигналов задания потокосцепления  $U_{3ПН}$ , скорости  $U_{3СН}$ , токов  $U_{3ТН}$  и сигнала управления напряжением  $U_{УН}$  определим коэффициенты передачи:

- коэффициент передачи обратной связи по потокосцеплению ( $B/Bб$ )

$$K_{\text{ОП}} = \frac{U_{3ПН}}{\Psi_{2H}}; \quad (2.20)$$

- коэффициент передачи обратной связи по скорости ( $B \cdot c / \text{рад}$ )

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{3СН}}{\omega_{\text{ЭЛН}}}; \quad (2.21)$$

- коэффициент передачи обратной связи по току ( $B/A$ )

$$K_{\text{ОТ}} = \frac{U_{3ТН}}{I_H}; \quad (2.22)$$

- коэффициент передачи инвертора по напряжению (о.е.)

$$K_U = \frac{U_H}{U_{УН}}. \quad (2.23)$$

### 1.3. Синтез системы векторного управления

При рассмотрении контура тока  $i_{1x}$  пренебрегаем положительной обратной связью по потокосцеплению. Также в контур вводится отрицательная обратная связь для компенсации  $L''_{\sigma} \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_{1y}$ . Тогда структурная схема контура тока  $i_{1x}$  будет иметь вид, представленный на рис. 1.2.

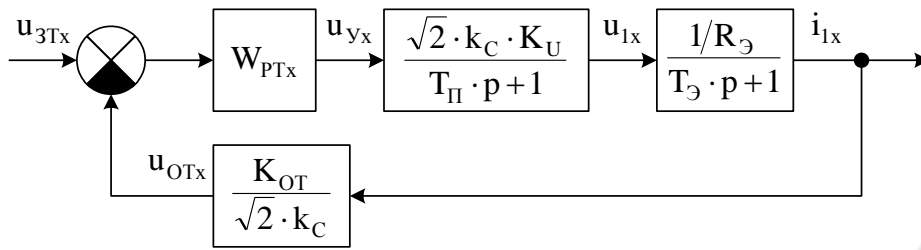


Рис. 2.2. Структурная схема контура регулирования тока  $i_{1x}$ .

Объектом регулирования контура тока  $i_{1x}$  является апериодическое звено

$$W_{оix}(p) = \frac{1/R_{\mathcal{E}}}{T_{\mathcal{E}} \cdot p + 1}. \quad (2.24)$$

И для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{РТх}(p) = K_{РТх} \cdot \frac{T_{РТх} \cdot p + 1}{T_{РТх} \cdot p}. \quad (2.25)$$

Выбрав в качестве малой постоянной времени контура постоянную времени инвертора  $T_{\mu x} = T_{\Pi}$  определим параметры регулятора

$$T_{РТх} = T_{\mathcal{E}}, \quad K_{РТх} = \frac{R_{\mathcal{E}} \cdot T_{РТх}}{K_U \cdot K_{от} \cdot 2 \cdot T_{\mu x}}. \quad (2.26)$$

Для синтеза внешнего контура регулирования потокосцепления представим передаточную функцию замкнутого контура регулирования тока  $i_{1x}$  в виде

$$\Phi_{ix}(p) \approx \frac{\sqrt{2} \cdot k_C / K_{от}}{2 \cdot T_{\mu x} \cdot p + 1}. \quad (2.27)$$

Тогда структурная схема контура потокосцепления ротора примет вид, представленный на рис. 1.3.

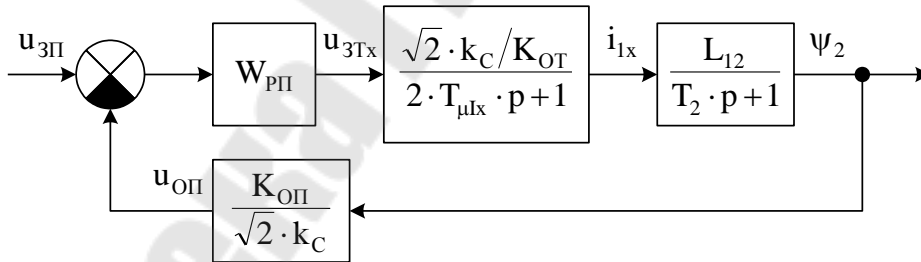


Рис. 2.3. Структурная схема контура регулирования потокосцепления.

Объектом регулирования контура потокосцепления является апериодическое звено

$$W_{оп}(p) = \frac{L_{12}}{T_2 \cdot p + 1}. \quad (2.28)$$

При таком объекте регулирования для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{РП}(p) = K_{РП} \cdot \frac{T_{РП} \cdot p + 1}{T_{РП} \cdot p}. \quad (2.29)$$

При выборе малой постоянной времени контура  $T_{\mu\Pi} = 2 \cdot T_{\mu x}$  параметры регулятора

$$T_{\text{РП}} = T_2, K_{\text{РП}} = \frac{K_{\text{ОТ}} \cdot T_{\text{РП}}}{L_{12} \cdot K_{\text{ОП}} \cdot 2 \cdot T_{\text{МП}}} \quad (2.30)$$

В контуре регулирования тока  $i_{1y}$  вводится компенсирующая положительная обратная связь по  $L''_{\sigma} \cdot \omega_{0\text{ЭЛ}} \cdot i_{1x}$ . С учетом этого структурная схема контура имеет вид, показанный на рис. 1.4. После преобразования получим передаточную функцию объекта регулирования

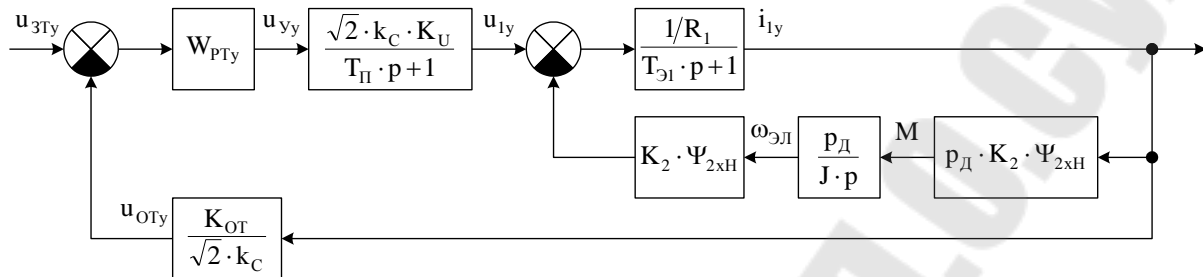


Рис. 2.4. Структурная схема контура регулирования тока  $i_{1y}$ .

$$W_{\text{Оy}}(p) = \frac{1/R_1 \cdot T_M \cdot p}{T_M \cdot p \cdot (T_{\text{Э1}} \cdot p + 1) + 1} \quad (2.31)$$

При  $T_M < 4 \cdot T_{\text{Э1}}$  знаменатель представляет собой апериодическое звено 2-го порядка с постоянной времени

$$T_D = \sqrt{T_M \cdot T_{\text{Э1}}} \quad (2.32)$$

и коэффициентом затухания

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_M}{T_{\text{Э1}}}} \quad (2.33)$$

Для упрощения наладки системы апериодическое звено второго порядка заменяют на два апериодических звена первого порядка

$$W_{\text{Оy}}(p) = \frac{1/R_1 \cdot T_M \cdot p}{(T_D \cdot p + 1)^2} \quad (2.34)$$

При  $T_M \geq 4 \cdot T_{\text{Э1}}$  знаменатель раскладывается на два апериодических звена с постоянными времени

$$T_{\text{Д1}} = T_D \cdot (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}), T_{\text{Д2}} = T_D \cdot (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}), \quad (2.35)$$

$$W_{\text{Оy}}(p) = \frac{1/R_1 \cdot T_M \cdot p}{(T_{\text{Д1}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{Д2}} \cdot p + 1)} \quad (2.36)$$

За малую постоянную времени контура берется постоянная времени инвертора  $T_{\text{Иy}} = T_{\text{П}}$ . При  $T_M > 20 \cdot T_{\text{Иy}}$  (обычно данное условие выполняется) обратной связью по ЭДС можно пренебречь. Тогда объектом регулирования контура будет апериодическое звено

$$W_{\text{Оy}}(p) = \frac{1/R_1}{T_{\text{Э1}} \cdot p + 1} \quad (2.37)$$

Для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{pTy}(p) = K_{pTy} \cdot \frac{T_{pTy} \cdot p + 1}{T_{pTy} \cdot p} \quad (2.38)$$

с параметрами

$$T_{pTy} = T_{Э1}, \quad K_{pTy} = \frac{R_1 \cdot T_{pTy}}{K_U \cdot K_{OT} \cdot 2 \cdot T_{\mu y}} \quad (2.39)$$

Если обратной связью по ЭДС пренебречь нельзя, то необходим ПИД-И-регулятор, с передаточной функцией и параметрами.

$$W_{pTy}(p) = K_{pTy} \cdot \frac{(T_{pTy1} \cdot p + 1) \cdot (T_{pTy2} \cdot p + 1)}{T_{pTy1} \cdot p^2}, \quad (2.40)$$

$$K_{pTy} = \frac{R_1 \cdot T_{pTy1}}{K_U \cdot K_{OT} \cdot T_M \cdot 2 \cdot T_{\mu y}}, \quad (2.41)$$

$$T_{pTy1} = T_{Д1}, \quad T_{pTy2} = T_{Д2} \quad (\text{при } T_M \geq 4 \cdot T_{Э1}), \quad \text{или} \\ T_{pTy1} = T_{pTy2} = T_{Д} \quad (\text{при } T_M < 4 \cdot T_{Э1}). \quad (2.42)$$

Заменяв контур регулирования тока  $i_{1y}$  эквивалентным апериодическим звеном

$$\Phi_{iy}(p) \approx \frac{\sqrt{2} \cdot k_C / K_{OT}}{2 \cdot T_{\mu y} \cdot p + 1} \quad (2.43)$$

получим структурную схему контура регулирования скорости, показанную на рис. 1.5. На ней учтено, что для компенсации изменения потока на выходе регулятора скорости стоит делитель. Объект регулирования контура – интегрирующий

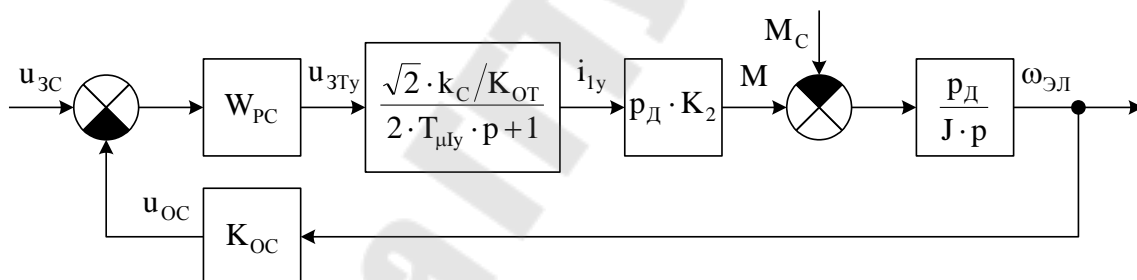


Рис. 2.5. Структурная схема контура регулирования скорости.

$$W_{\omega\omega}(p) = \frac{p_D^2 \cdot K_2}{J \cdot p}. \quad (2.44)$$

И для настройки на технический оптимум необходим П-регулятор

$$W_{PC}(p) = K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot J}{\sqrt{2} \cdot k_C \cdot p_D^2 \cdot K_2 \cdot K_{OC} \cdot 2 \cdot T_{\mu\omega}} \quad (2.45)$$

где малая постоянная времени контура скорости определяется эквивалентной постоянной времени контура тока  $T_{\mu\omega} = 2 \cdot T_{\mu y}$ .

Для получения значения статической ошибки контура по моменту сопротивления запишем передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущению



$$\Phi_B(p) = -\frac{\frac{p_d}{J \cdot p}}{1 + W_\omega(p)} = -\frac{\frac{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot p_d}{J} \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot p \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1) + 1}$$

Тогда величина ошибки составит

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\omega_{\text{эЛ}}}{p_d} = \frac{\Phi_B(p)|_{p=0} \cdot \Delta M_C}{p_d} = -\frac{2 \cdot T_{\mu\omega}}{J} \cdot \Delta M_C. \quad (2.46)$$

Если полученное значение  $\Delta\omega$  превышает допустимое, то следует перейти к настройке на симметричный оптимум.

#### 1.4. Расчет переходных процессов в “малом” и “большом” в системе векторного управления

Для данной системы управления, как показывают расчеты, переходные процессы в упрощенной и точной моделях различаются только в начальный момент времени в переходном процессе подачи сигнала задания потокосцепления. Поэтому допустимо рассчитывать переходные процессы по упрощенной модели, представленной на рис. 1.1. При расчетах в Matlab Simulink делители для исключения деления на ноль следует реализовывать в виде подсистемы, как показано на рис. 1.6. Также следует учесть ограничение регуляторов.

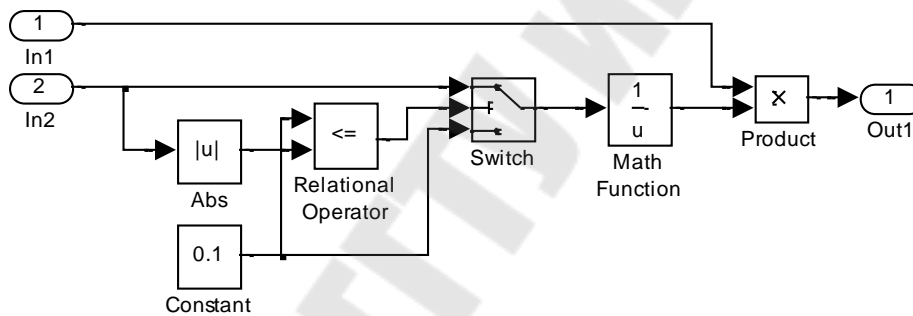


Рис. 2.6. Реализация делителя в Matlab Simulink.

Рассчитываемые переходные процессы приведены в табл. 1.1. Для процесса пуска сигнал задания скорости необходимо формировать с учетом задатчика интенсивности.

Таблица 2.1.

Переходные процессы для системы частотного управления.

№	Процесс, величина изменяемого сигнала	Начальные условия
1	Подача сигнала задания потокосцепления, $u_{3П} = U_{3Пн}$ .	Нулевые
2	Пуск, $u_{3С} = f(t)$ , $M_C = 0,1 \cdot M_H$	п. 1
3	По заданию, $u_{3С} = 1,01 \cdot U_{3Сн}$	п. 2
4	По моменту сопротивления, $M_C = M_H$	п. 3

## **2. Практическая работа №2. Изучение структуры системы векторного управления асинхронным электродвигателем и расчет параметров двигателя и системы**

Цель работы:

- ознакомиться с принципами построения систем векторного управления асинхронным электродвигателем;
- ознакомиться со структурой систем векторного управления асинхронным электродвигателем;
- получить практические навыки расчета параметров электропривода с векторным управлением.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с разделами 7.1 и 7.2 конспекта лекций. Изучить функциональную схему системы с непосредственным измерением потока, назначение всех ее узлов.
2. По исходным данным, заданным преподавателем выбрать асинхронный электродвигатель по справочнику [3] и выписать его параметры.
3. По паспортным данным рассчитать параметры модели двигателя и системы управления по (1.1) – (1.23).

Контрольные вопросы:

1. Чему равна скорость вращения координатной системы модели двигателя при векторном управлении?
2. Какому функциональному узлу системы соответствуют блоки структурной схемы с параметрами  $K_U$  и  $T_{II}$  ?
3. Зачем в канале управления скоростью присутствует блок деления?
4. Почему датчики тока устанавливаются только в двух, а не в трех фазах двигателя и почему так можно делать?

## **3. Практическая работа №3. Синтез регуляторов системы векторного управления асинхронным электродвигателем**

Цель работы:

- получить практические навыки синтеза регуляторов систем векторного управления асинхронного электродвигателя.

Порядок выполнения:

1. Произвести синтез регуляторов системы векторного управления в соответствии с рекомендациями п. 1.3.
2. Рассчитать погрешность регулирования скорости (1.46) при изменении момента сопротивления от нуля до номинального. При необходимости, перейти к синтезу на СО для регулятора скорости.
3. Определить ожидаемые динамические показатели системы.

Контрольные вопросы:

1. Какая из двух составляющих тока статора  $x$  и  $y$  является активной, а какая – реактивной.
2. Как в структуре системы управления учтены перекрестные связи между каналами управления активной и реактивной составляющих тока статора?
3. Чем определяется структура регулятора тока  $i_{1y}$  ?

4. Есть ли в составе системы управления узлы, задающие частоту напряжения, подаваемого на двигатель?

#### **4. Практическая работа №4. Исследование динамических характеристик системы векторного управления асинхронным электродвигателем**

Цель работы:

- получить практические навыки анализа динамических процессов в системе векторного управления асинхронного электродвигателя;
- сравнить полученные динамические показатели системы с ожидаемыми.

Порядок выполнения:

1. В среде моделирования MATLAB Simulink или SCiLab XCOS набрать модель системы векторного управления асинхронным электродвигателем в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1.1.
2. Задать все рассчитанные в работе №1 параметры модели и определенные в работе №2 параметры регуляторов.
3. Произвести расчет переходных процессов в соответствии с табл. 1.1.
4. Сравнить полученные динамические показатели системы с ожидаемыми, определенными в работе №2. Сделать выводы. При наличии существенных отличий определить причины расхождения.

Контрольные вопросы:

1. По каким переходным процессам определяются длительность и перерегулирование?
2. Как определить перерегулирование в переходном процессе по управлению «в малом»?
3. Наблюдается ли падение скорости при переходном процессе по моменту сопротивления? Почему?
4. Объясните вид диаграммы тока  $i_{1y}$  в процессе пуска.

#### **5. Практическая работа №5. Изучение алгоритмов построения наблюдателей состояния в системе векторного управления асинхронным электродвигателем**

Цель работы:

- изучить алгоритмы построения наблюдателей состояния в системе векторного управления асинхронным электродвигателем;
- исследовать влияние точности определения параметров двигателя и наблюдателя на работу системы векторного управления.

Порядок работы:

1. В среде моделирования MATLAB Simulink или SCiLab XCOS, в созданной в ходе выполнения работы №3, модели системы убрать прямые обратные связи по потокосцеплению и скорости. Собрать модель наблюдателя состояния для определения потокосцепления и скорости в соответствии с рис. 8.6 конспекта лекций. Подать в качестве обратных связей в систему сигналы, рассчитанные наблюдателем.
2. Рассчитать переходные процессы в системе. Сравнить с полученными в работе №3. Сделать выводы.

3. Исследовать влияние точности определения параметров модели двигателя на работу системы. Для этого рассчитать переходные процессы в системе и получить диаграммы действительных и рассчитанных наблюдателем потокосцепления и скорости для следующих случаев: изменение в модели двигателя на  $\pm 5\%$  сопротивления ротора, статора, взаимоиндуктивности. Сделать выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как влияет изменение сопротивления ротора двигателя на работу системы векторного управления с наблюдателем состояния?
2. Как влияет точность определения взаимоиндуктивности на работу системы векторного управления с наблюдателем состояния?
3. Какова величина погрешности определенной наблюдателем скорости в рассчитанных переходных процессах.

## **Литература**

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
2. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

## Содержание

Введение	1
1. Теоретические сведения	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.1. Выбор электродвигателя и расчет его параметров	2
1.2. Расчет параметров модели системы векторного управления	3
1.3. Синтез системы векторного управления	5
1.4. Расчет переходных процессов в “малом” и “большом” в системе векторного управления	9
2. Лабораторная работа №1. Изучение структуры системы векторного управления асинхронным электродвигателем и расчет параметров двигателя и системы	10
3. Лабораторная работа №2. Синтез регуляторов системы векторного управления асинхронным электродвигателем	10
4. Лабораторная работа №3. Исследование динамических характеристик системы векторного управления асинхронным электродвигателем	11
5. Лабораторная работа №4. Изучение алгоритмов построения наблюдателей состояния в системе векторного управления асинхронным электродвигателем	11
Литература	13