

УДК 62.5

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-195

*Лю Цзини,*  
аспирант

## **ДВУХЗОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ**

Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
3572457768@qq.com

*Аннотация.* Для двигателей постоянного тока, вентильных двигателей и асинхронных двигателей рассматривается проблема минимизации энергопотребления при заданной скорости. Путем анализа математической модели двигателя с двухзонным регулированием скорости были найдены способы получения минимального энергопотребления для первой зоны и второй зоны. Проведен сравнительный анализ двухзонного регулирования скорости с обратной связью по скорости и по напряжению. Результаты моделирования работы регулятора при различных скоростях и нагрузках получены с использованием MATLAB/Simulink и проиллюстрированы графически.

*Ключевые слова:* двухзонное регулирование скорости, векторное управление двигателями, двигатель постоянного тока, вентильный двигатель, асинхронный двигатель, управление ослаблением поля, максимальное соотношение крутящего момента и тока.

*Liu JingYi,*  
Postgraduate (PhD) Student

## **DUAL ZONE SPEED CONTROL WITH VOLTAGE FEEDBACK**

St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia,  
3572457768@qq.com

*Abstract.* For DC motors, brushless motors and induction motors, the problem of minimizing energy consumption at a given speed is considered. By analyzing the mathematical model of an engine with two-zone speed control, methods were found to obtain minimum energy consumption for the first zone and the second zone. A comparative analysis of two-zone speed control with speed and voltage feedback was carried out.

Simulation results of the controller operation at various speeds and loads were obtained using MATLAB/Simulink and illustrated graphically.

**Keywords:** dual-zone speed control, vector motor control, DC motor, brushless motor, induction motor, field weakening control, maximum torque-current ratio.

## **Введение**

Для двухзонных регуляторов с обратной связью по скорости заданное значение потокосцепления обычно получают исходя из текущей скорости (в бесщеточных двигателях получают угол опережения тока). Преимуществами такого регулятора являются:

1: Увеличение верхнего предела скорости.

2: При регулировании скорости вверх можно быстро получить максимальный ток (и получить максимально возможный электромагнитный крутящий момент).

При этом регулятор не лишен следующих недостатков:

1: Не достигается минимальное энергопотребление.

2: Для бесщеточных и асинхронных двигателей необходимо составлять таблицы данных скорости и потокосцепления на основе большого количества экспериментов.

Двухзонный регулятор с обратной связью по напряжению может компенсировать недостатки обратной связи по скорости. Он определяет, достигает ли скорость текущего верхнего предела, посредством обратной связи по напряжению, и автоматически увеличивает верхний предел скорости. На этой основе можно разработать решение по минимальному потреблению энергии.

## **1. Двухзонное регулирование с обратной связью по скорости**

Для двигателя постоянного тока, уравнение электрического равновесия имеет вид:

$$U_a = (L_a p + R_a) I_a + \psi w, \quad (1)$$

где  $U_a$  — напряжение якоря,  $I_a$  — ток якоря,  $\psi$  — потокосцепление,  $L_a$  — индуктивность якоря,  $R_a$  — сопротивление якоря,  $w$  — скорость вращения.

Электромагнитный момент:

$$M_e = \psi I_a, \quad (2)$$

где  $M_e$  — электромагнитный момент.

Зона регулирования скорости является первой при выполнении условия:

$$R_a I_{a\max} + \psi_{\max} w \leq U_{a\max}, \quad (3)$$

где  $U_{a\max}$  — максимальное напряжение якоря,  $I_{a\max}$  — максимальное значение тока якоря,  $\psi_{\max}$  — максимальное потокосцепление.

Максимальный электромагнитный момент можно получить в первой зоне регулирования скорости.

В противном случае используется вторая зона регулирования скорости, для которой характерно достижение напряжения своего максимального значения, что приводит либо к уменьшению тока якоря, либо к уменьшению потокосцепления. Заметим, что небольшое падение потокосцепления может быть эквивалентно большему падению тока якоря. Чтобы получить наибольшую стартовую скорость, то есть максимизировать электромагнитный момент, мы уменьшаем потокосцепление, чтобы предотвратить уменьшение тока:

$$U_{amax} = R_a I_{amax} + \psi \downarrow w \uparrow, \quad (4)$$

то есть:

$$\psi = \frac{U_{amax} - R_a I_{amax}}{w}. \quad (5)$$

С помощью (5) возможно проектирование двухзонного регулирования с обратной связью по скорости.

Для вентильных двигателей, уравнение электрического равновесия имеет вид [1]:

$$\begin{cases} u_{1d} = (L_{1d} p + R_1) i_{1d} - w_{el} L_{1q} i_{1q}, \\ u_{1q} = (L_{1q} p + R_1) i_{1q} + w_{el} L_{1d} i_{1d} + w_{el} \psi_m, \end{cases} \quad (6)$$

где координаты  $dq$  — ортогональные координаты в ориентации ротора,  $u_{1d}$  — напряжение статора по оси  $d$ ,  $i_{1d}$  — ток статора по оси  $d$ ,  $\psi_m$  — потокосцепление ротора в статоре,  $L_{1d}$  — индуктивность статора по оси  $d$ ,  $R_1$  — сопротивление статора,  $w_{el}$  — электрическая скорость ротора,  $w_{el} = p_n^* w$ ,  $p_n$  — количество пар полюсов,  $w$  — скорость вращения.

Электромагнитный момент:

$$M_e = \psi_m i_{1q} + (L_{1d} - L_{1q}) i_{1d} i_{1q}, \quad (7)$$

Кривую максимального отношения крутящего момента к току (МТРА) (рис. 1) можно получить с помощью метода множителей Лагранжа.

Если  $w_{el} \psi_m$  всегда занимает большую часть напряжения, то двухзонное регулирование скорости не будет иметь никакого эффекта. Поэтому принимается следующее неравенство:

$$w_{el} L_{1d} > 0.1 \psi_m, \quad w_{el} L_{1d} \gg R_1. \quad (8)$$

Тогда, значение напряжения составляет приблизительно

$$u_{1d}^2 + u_{1q}^2 \approx w_{el}^2 \left[ (L_{1q} i_{1q})^2 + (L_{1d} i_{1d} + \psi_m)^2 \right]. \quad (9)$$

Это первая зона регулирования скорости, если:

$$u_{1d}^2 + u_{1q}^2 \leq U_{1\max}^2, \quad (10)$$

где  $U_{1\max}$  — максимальное напряжение статора.

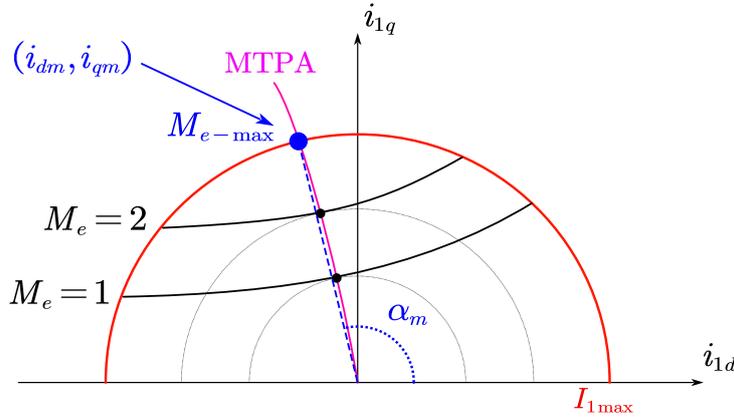


Рис. 1. Кривая МТРА

В противном случае используется вторая зона регулирования скорости, в которой  $i_q \gg i_d$ , поэтому уменьшаю ток  $i_d$  для компенсации некоторой части первичного  $i_q$ .

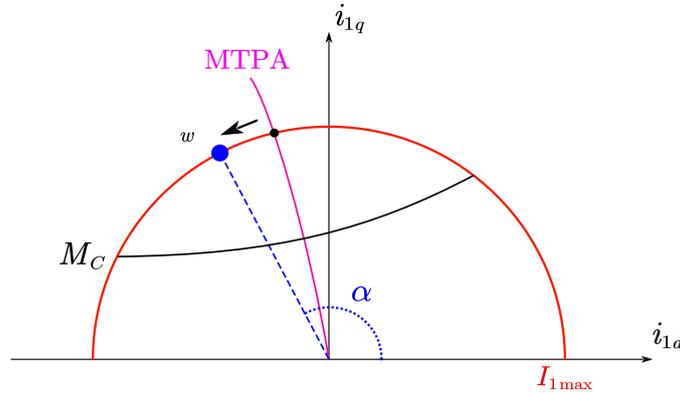


Рис. 2. Текущий максимальный электромагнитный крутящий момент

Для вентильных двигателей, статическое уравнение электрического равновесия имеет вид [1]:

$$\begin{cases} u_{1x} = [R_{1e}(T_{1e}p + 1)]i_{1x} - (w_{0el}\sigma L_1 i_{1y} + T_2^{-1}K_2\psi_{2x}), \\ u_{1y} = [R_{1e}(T_{1e}p + 1)]i_{1y} + (w_{0el}\sigma L_1 i_{1x} + w_{el}K_2\psi_{2x}), \\ L_m i_{1x} = (T_2 p + 1)\psi_{2x}, \\ -T_2^{-1}L_m i_{1y} + (w_{0el} - w_{el})\psi_{2x} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где координаты  $xu$  — ортогональные координаты в ориентации потокоцепления ротора.  $u_{1x}$  — напряжение статора по оси  $x$ ,  $i_{1x}$  — ток статора по

оси  $x$ ,  $\psi_{2x}$  — потокосцепление ротора по оси  $x$ ,  $L_1$  — индуктивность статора,  $L_2$  — индуктивность ротора,  $L_m$  — взаимная индуктивность между статором и ротором,  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$ ,  $K_1 = \frac{L_m}{L_1}$ ,  $K_2 = \frac{L_m}{L_2}$ ,  $R_1$  — сопротивление статора,  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ ,  $R_{1e} = R_1 + K_2^2 R_2$ ;  $T_{1e} = \frac{\sigma L_1}{R_{1e}}$ ,  $w_{el}$  — электрическая скорость ротора,  $p_n$  — количество пар полюсов,  $w_{el} = p_n * w$ ,  $w$  — скорость вращения.

Электромагнитный момент:

$$M_e = p_n K_2 \psi_{2x} i_{1y}. \quad (12)$$

Установившийся электромагнитный момент равен:

$$M_e = p_n K_2 L_m i_{1x} i_{1y}. \quad (13)$$

Положение максимального электромагнитного момента можно получить графически, как показано на рисунке 3.

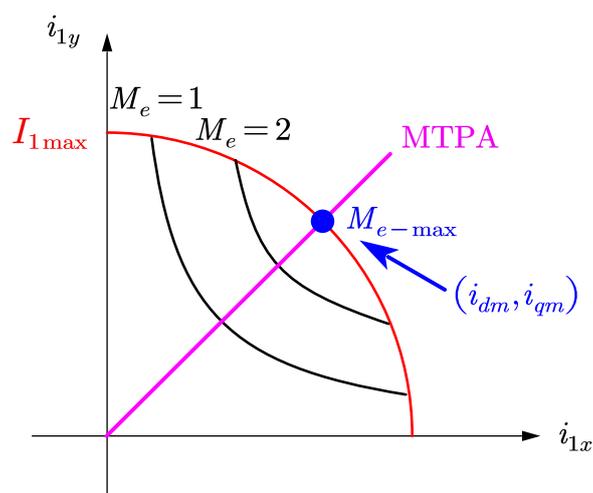


Рис. 3. Кривая МТРА

Последующий анализ регулирования скорости аналогичен предыдущему, но представлен в более сжатом виде.

## 2. Двухзонное регулирование с обратной связью по напряжению

### 2.1. Для двигателя постоянного тока

Согласно (1) и (2), имеет место соотношение

$$w_{\max} = \left( U_{a\max} - R_a M_C \frac{1}{\psi} \right) \frac{1}{\psi}, \quad (14)$$

где  $M_C$  — момент нагрузки.

Из (14) видно, что чем ниже потокосцепление, тем выше верхний предел скорости (см. рис. 4).

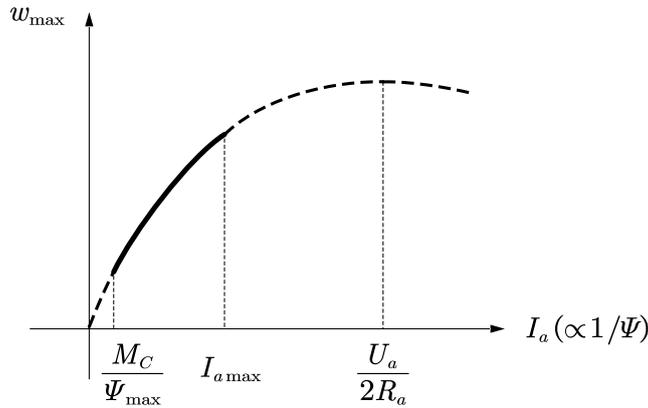


Рис. 4. Характеристика верхнего предела скорости

Для двигателей постоянного тока, чем меньше ток якоря, тем меньше потребление энергии. Как показано в (15) и на рисунке 5, когда ток якоря минимален, напряжение должно быть максимальным.

$$U_a = R_a I_a + \frac{M_C}{I_a} w \quad (15)$$

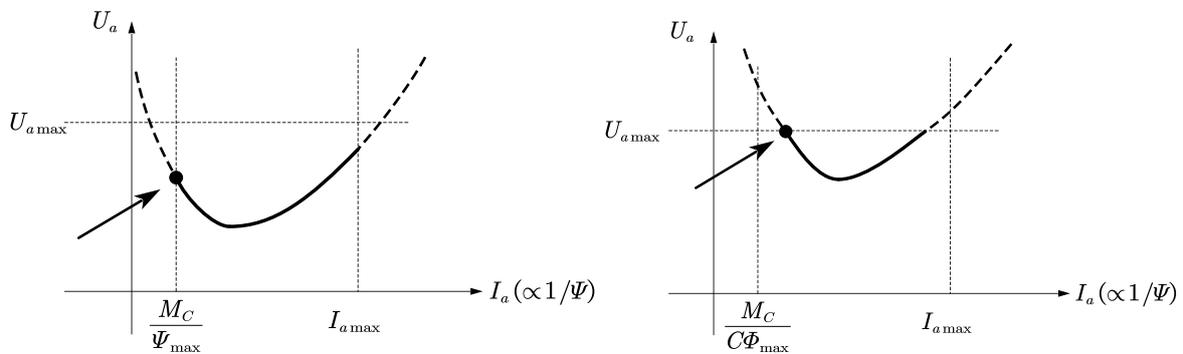


Рис. 5. Первая зона и вторая зона

Двухзонный регулятор для настройки тока возбуждения описывается с помощью следующих правил:

1. Когда  $U_a < U_{a\max}$ , ток возбуждения увеличивают. Это приводит к максимизации напряжения и минимизации потребления энергии.

2. Когда  $U_a = U_{a\max}$ , ток возбуждения уменьшается. Это может увеличить верхний предел регулирования скорости.

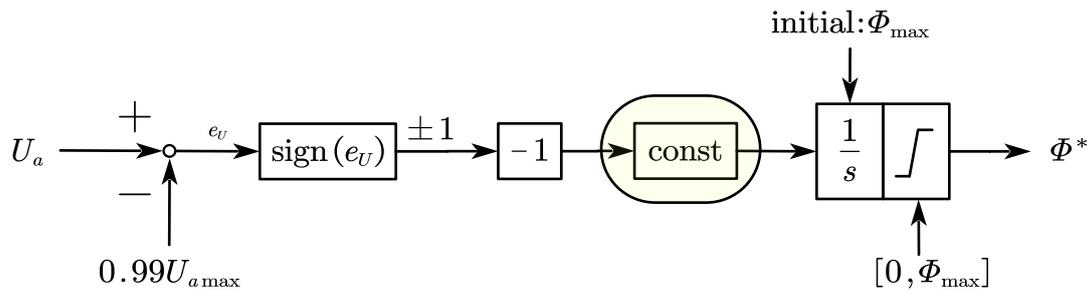


Рис. 6. Двухзонный регулятор постоянного тока

Как показано на рисунке 6, необходимо учитывать настройку интегрального коэффициента “const”.

Чем выше “const”, тем быстрее снижается ток возбуждения при  $U_a = U_{a\max}$ , то есть тем быстрее реакция при увеличении скорости. Однако слишком высокий “const” приведет к перерегулированию и колебанию системы.

Кроме того, разность напряжений  $e_U$  часто пересекает ноль, что приводит к слишком частому изменению параметров и делает систему более ненадежной.

Принимая во внимание все эти факторы, система может быть улучшена, как показано на рисунке 7.

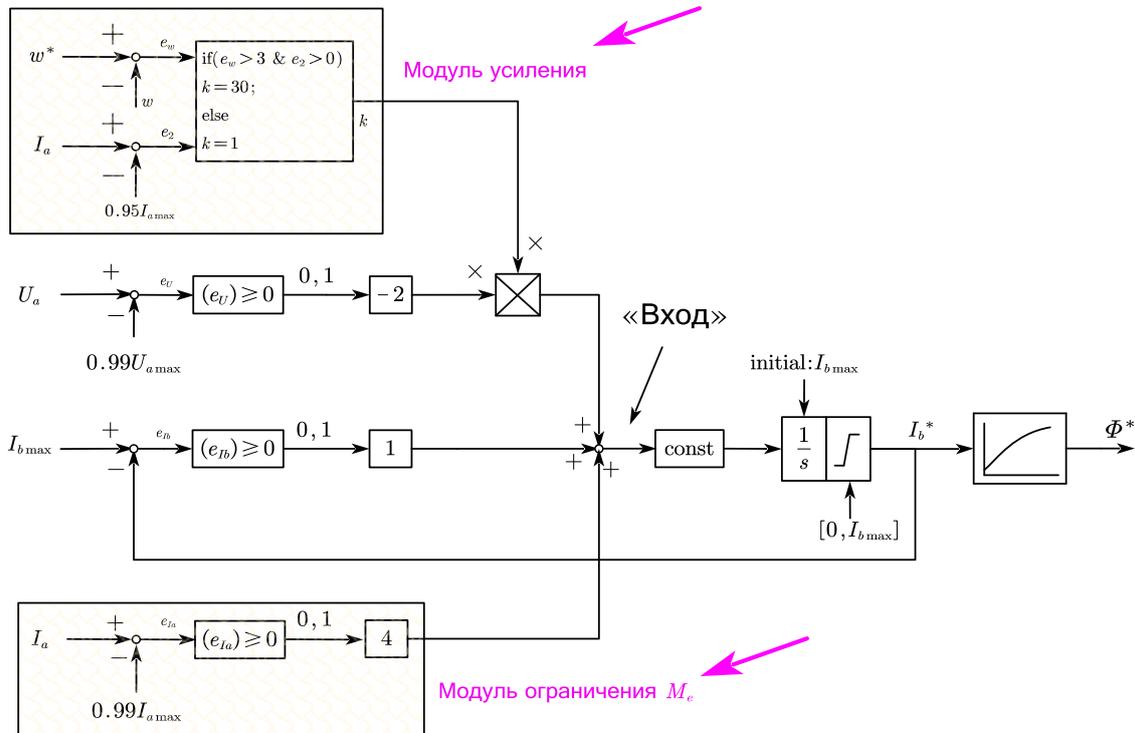


Рис. 7. Улучшенный двухзонный регулятор

Для улучшенного регулятора «Вход» больше не зависит исключительно от измерения напряжения. Конкретные правила алгоритма таковы:

1. Когда  $U_a < U_{amax}$ , «Вход» равен «1»;
2. Когда  $U_a = U_{amax}$ , «Вход» равен «1 – 2 = -1».

Добавлен Блок «модуль усиления». Когда скорость намного ниже заданного значения, ток возбуждения быстро уменьшается. В этом случае мы можем уменьшить интегральный коэффициент “const” (чтобы уменьшить колебания системы), обеспечив при этом быстрый отклик системы. Чтобы предотвратить превышение значения скорости за достижимый предел, в «модуль усиления» также добавляется проверка (то есть наблюдение за тем, достигает ли текущий ток пикового значения).

Добавлен Блок «Модуль ограничения  $M_e$ », это необходимо для предотвращения слишком низкого тока возбуждения, в результате чего электромагнитный крутящий момент будет меньше, чем нагрузка, что, в свою очередь, вызывает большие колебания скорости.

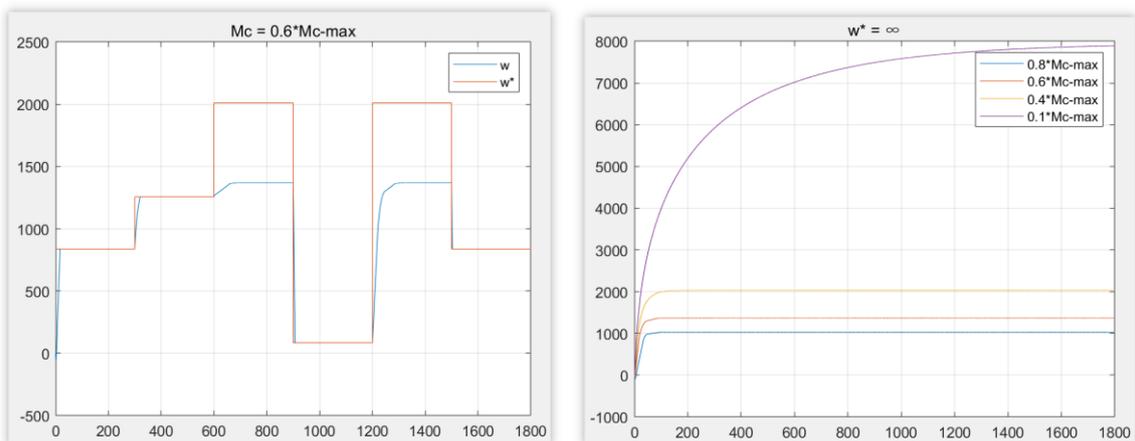


Рис. 8. Результаты моделирования при различных скорости и нагрузках

На рисунке 8 показан верхний предел регулирования максимальной скорости при различных нагрузках, из чего видно, что этот метод регулирования скорости не подходит для небольших нагрузок.

## 2.2. Для вентильных двигателей

Из формулы (9) видно, что увеличение угла опережения тока позволяет увеличить верхний предел регулирования скорости. Рисунок 2 демонстрирует, что чем больше угол опережения тока, тем выше энергопотребление. Это означает, что когда она находится на кривой МТРА или верхнем пределе текущего регулирования скорости, можно получить минимальное потребление энергии.

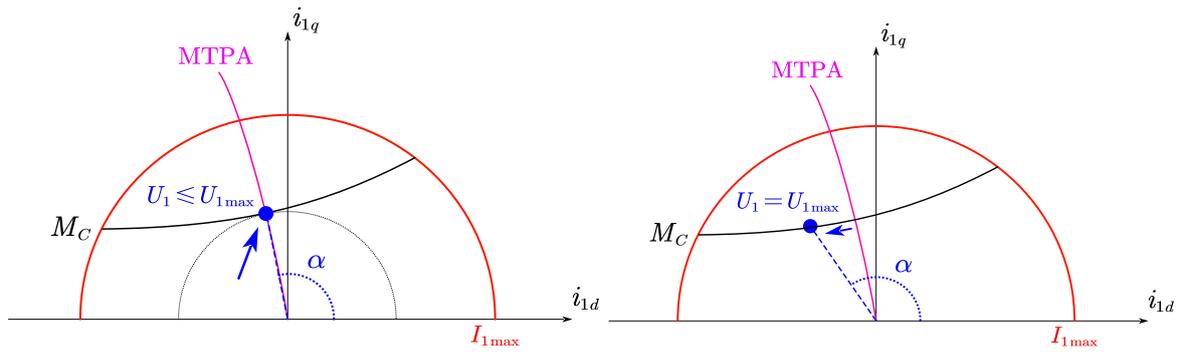


Рис. 9. Первая зона и вторая зона

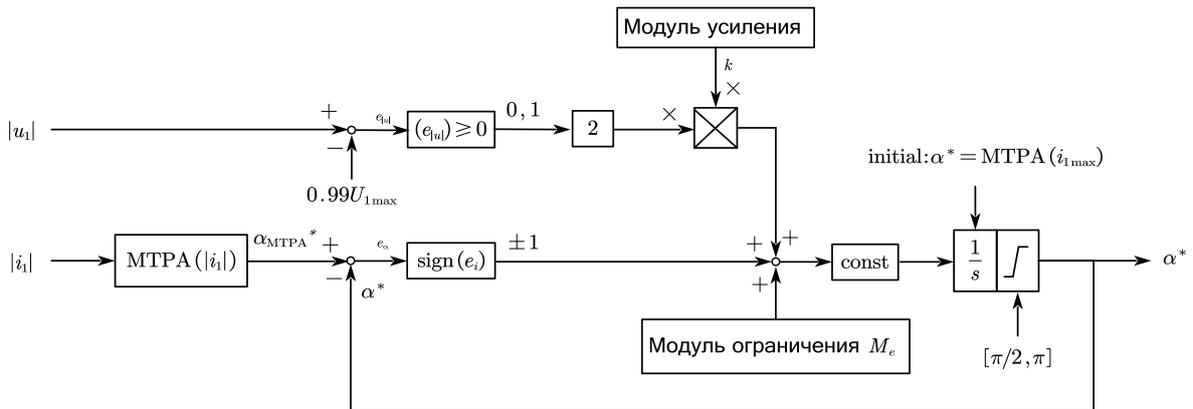


Рис. 10. Двухзонный регулятор вентильного двигателя

Как показано на рисунке 10, блок «модуль усиления» и «Модуль ограничения  $M_e$ » точно такой же, как в двигателе постоянного тока.

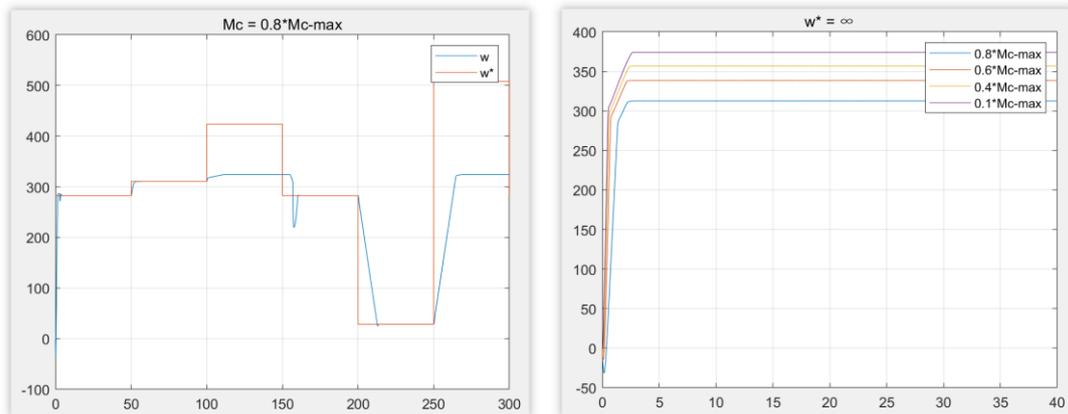


Рис. 11. Результаты моделирования при различных скорости и нагрузках

Как показано на рисунке 11, верхний предел скорости существенно не увеличился, но реакция при меньшей нагрузке очень плавная.

### 2.3. Для асинхронных двигателей

С помощью формулы (11) рассчитывается энергопотребление:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= [u_{1A} \quad u_{1B} \quad u_{1C}] \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} = [u_{1x} \quad u_{1y}] C_{2/3}^T C_{2/3} \begin{bmatrix} i_{1x} \\ i_{1y} \end{bmatrix} = \\
 &= \frac{3}{2} (u_{1x} i_{1x} + u_{1y} i_{1y}) = \frac{3}{2} \left( R_{1e} I_{1x}^2 - \frac{K_2}{T_2} L_m I_{1x}^2 \right) + \\
 &+ \frac{3}{2} R_{1e} I_{1y}^2 + \frac{3}{2} w_{el} K_2 \psi_{2x} I_{1y} = \frac{3}{2} R_1 I_{1x}^2 + \frac{3}{2} R_{1e} I_{1y}^2 + \frac{3}{2} w_{el} K_2 \psi_{2x} I_{1y},
 \end{aligned} \tag{16}$$

где координаты  $ABC$  — трехфазные координаты в ориентации статора,  $C_{2/3}$  — матрица преобразования координат

$$C_{2/3} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(120^\circ + \theta) & \sin(120^\circ + \theta) \\ \cos(-120^\circ + \theta) & \sin(-120^\circ + \theta) \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Подставив формулу (13) в  $P_R = P_1 - M_C w$ , получим

$$P_R = \frac{3}{2} R_1 \frac{2M_C}{3p_n K_2 L_m} \left( \frac{I_{1x}}{I_{1y}} + \frac{R_{1e}}{R_1} \frac{I_{1y}}{I_{1x}} \right). \tag{18}$$

Выражение  $K_2 w_{el} \psi_{2x}$  составляет основную часть напряжения, тогда уменьшение тока по оси  $x$  может увеличить верхний предел скорости, как показано на рисунке 12.

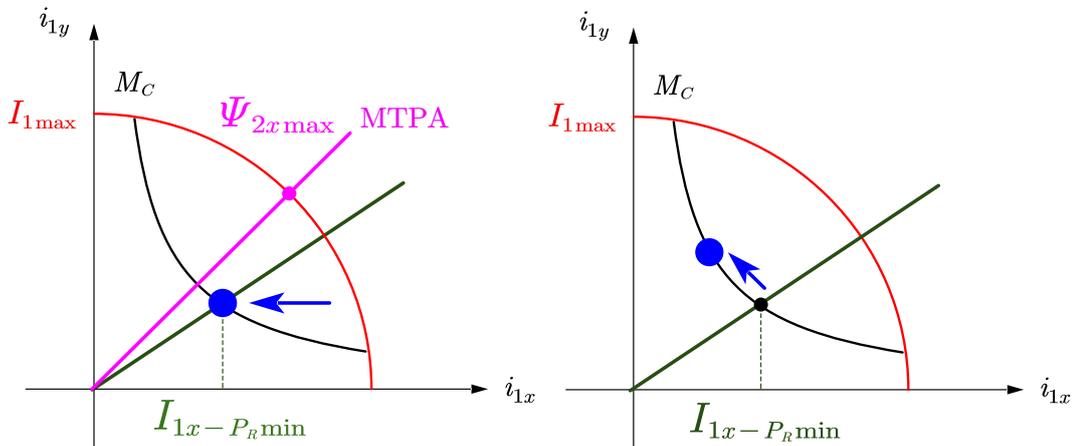


Рис. 12. Первая зона и вторая зона

Структурная схема двухзонного регулятора для асинхронных двигателей, как показано на рисунке 13, состоит из блока «модуль усиления» и «Модуль ограничения  $M_e$ » точно таких же, как для схемы с двигателем постоянного тока.

На рисунке 14, показаны результаты моделирования при различных величинах скоростей и нагрузок, из которых видно, что регулятор позволяет значительно увеличить верхний предел скорости.

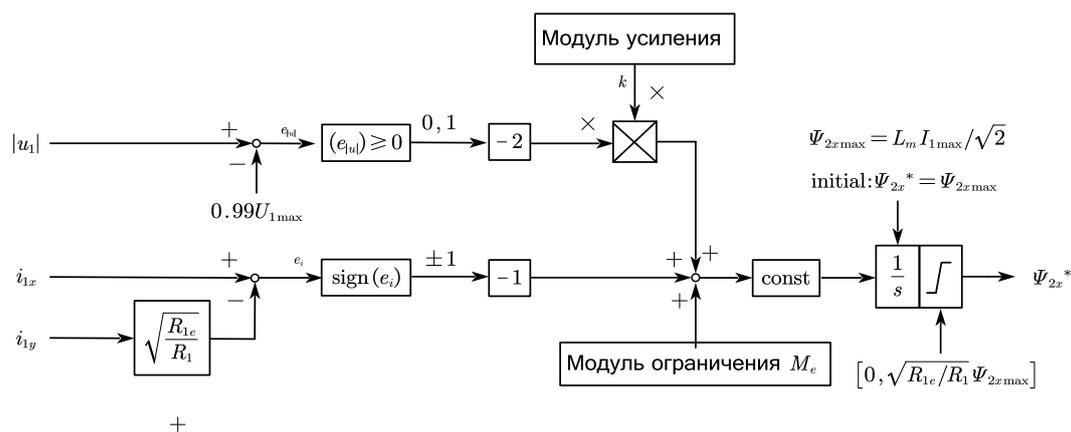


Рис. 13. Двухзонный регулятор вентильного двигателя

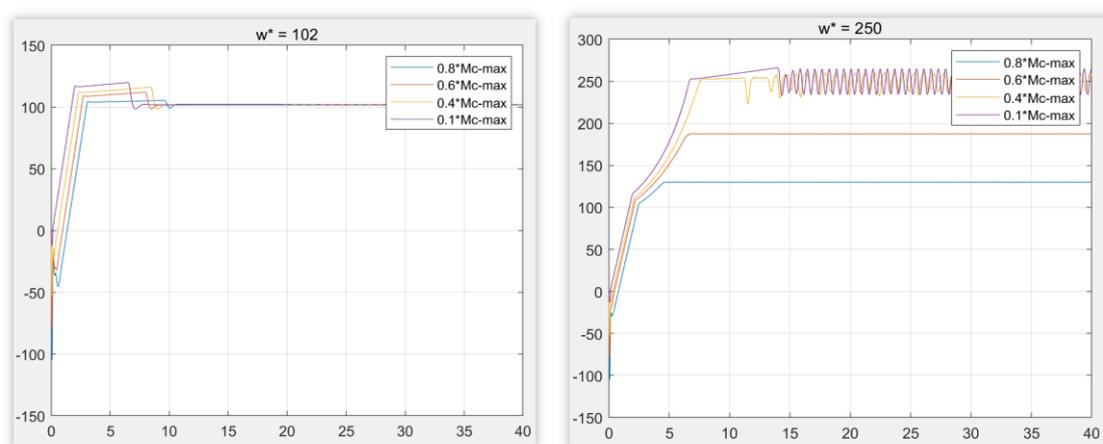


Рис. 14. Результаты моделирования при различных скоростях и нагрузках

## Заключение

В работе было изучено двухзонного регулирования скорости с обратной связью по скорости и обратной связью по напряжению. Представлены модели двигателей постоянного тока, вентильных двигателей и асинхронных двигателей с двухзонным регулированием скорости.

Основной вывод исследования: обратная связь по скорости позволяет получить самый высокий электромагнитный крутящий момент и получить самый быстрый отклик, а обратная связь по напряжению может обеспечить наименьшее потребление энергии.

## Список литературы

1. Терехов В.М., Осипов О.И Система управления электроприводов. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – С.168–214.
2. Ван Чэньюань. Современная технология управления двигателем. – Пекин: Машиностроительная промышленность Пресса, 2008. – С. 69–72.
3. Лю Цзини. Система управления электропривода с двухзонным регулированием скорости. Автореф. магистр. дис. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – С. 18–22.