

УДК 681.51:004.94

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КРАНА ПЛАТФОРМЕННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

**ЧЕРНЫШЕВ Денис Валентинович**, канд. техн. наук; e-mail: fersy@mail.ru

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», Хабаровск

Моделируется система управления на основе нечеткой логики электроприводом главного движения крана, расположенного на платформе. В качестве основы для регуляторов используются теория нечеткой логики и стандартные настройки. Модель силовой части системы регулирования построена согласно способу векторного управления, электроприводом с опорным вектором потокосцепления ротора. Система управления выполнена по подчиненному способу регулирования с классическим регулятором тока и нечетким регулятором скорости, при этом внутренний контур тока настроен на модульный оптимум. Целью разработки модели системы управления является улучшение энергетических характеристик при питании от источников с ограниченной мощностью, при соблюдении требований к качеству регулирования. В сравнении с системой управления с нечетким регулятором скорости используется система подчиненного регулирования с внутренним контуром тока настроенного на модульный оптимум и внешним контуром скорости настроенным на симметричный оптимум. Полученные параметры и логику настройки нечеткого регулятора математической модели возможно использовать как основу для программирования в системах управления. В изменяемых внешних условиях работы корректировка параметров такого регулятора выполняется персоналом на основе понятных логических правил и функций принадлежности.

**Ключевые слова:** система управления; нечеткая логика; электродвигатель; математическое моделирование; регулятор.

**DOI:** 10.20295/2412-9186-2022-8-04-389-398

## ▼ Введение

Техническое устройство, такое как железнодорожный кран, расположенный на платформе, определяется как механизм, который обеспечивает движение по железнодорожному полотну, при этом выполняющий погрузочно-разгрузочные работы. Краны такого типа являются полноповоротными и оборудованы стрелой. Краны платформенного типа применяются при проведении монтажных и строительных работ на железной дороге.

Как правило, такие устройства работают удаленно от внешних источников энергии, и это определяет дополнительные требования к энергоэффективности работы всей системы. Источники энергии для работы являются локальными и, соответственно, ограниченными по мощности. Это ограничение учитывается в требованиях к системе управления электроприводом крана. Применение теории нечеткой логики для реализации регуляторов

в системе автоматического управления позволяет обеспечить энергоэффективное управление, а также компенсировать упругие связи и случайные нагрузки, присущие крановым механизмам [1–5].

Требования, применяемые к силовой части и системе управления электроприводом подъема крана, с учетом специфики работы и расположения, определяются как:

- защита системы управления и силовой части от коротких замыканий и длительных перегрузок;
- реверсивный привод;
- ограничение управления по параметрам механической части;
- экономное потребление энергии.

В качестве электропривода главного движения возможно использовать асинхронный электропривод с частотным управлением.

Цель настоящей статьи состоит в построении модели и математическом моделировании

системы управления двигателем нечетким регулятором, который определяет нелинейную зависимость в управлении скоростью электродвигателя и выполняет ограничение тока, а также в определении основных параметров нечеткого регулятора и его настроек как базиса для практического программирования параметров контроллера в системе управления скоростью, определении математическим моделированием основных параметров переходного процесса на соответствие требуемому качеству.

### 1. Особенности применения частотного управления в электроприводе

В настоящее время для управления асинхронными двигателями широко применяется частотное регулирование. Это определяется тем, что такой электропривод обеспечивает высокий уровень стабильности работы, энергоэффективности и требований к точности управления.

С развитием силовой преобразовательной техники стали широко применяться различные виды полупроводниковых преобразователей частоты.

Внедрение преобразователя частоты в систему позволяет продлить ресурс ее использования и повысить среднюю наработку на отказ. Уменьшаются перегрузки механической и электрической части, а также пусковые токи. Встроенные регуляторы преобразователя позволяют выполнить стандартные настройки управляемых переменных [1, 6–9].

Особенности работы асинхронного двигателя с системой частотного регулирования:

- уменьшение потерь энергии в режиме торможения, что позволяет выполнить систему электропривода на электродвигателях с более высоким значением номинальной скорости вращения;
- широкий диапазон регулирования скорости электродвигателя;
- экономия электрической энергии;
- уменьшение критических нагрузок, вызванных пусковым моментом.

Специализированные преобразователи частоты оснащаются дополнительными функциями, например, для грузоподъемных кранов создаются алгоритмы, которые предотвращают

раскачивание груза и контролируют натяжение троса, регулируют параметры привода в зависимости от нагрузки.

В современных преобразователях широко применяется система векторного управления. В такой системе управления электроприводом содержится математическая модель двигателя, позволяющая рассчитать скорость вращения, поток и ток.

При повышенных требованиях к точности управления устанавливаются датчики тока фаз статора двигателя и датчик скорости [1, 6].

Преимущества векторного метода управления асинхронным двигателем в электроприводе крана:

- вращения двигателя на малых частотах происходит плавно и без рывков;
- высокий уровень точности при регулировании скорости вращения;
- быстрое реагирование на возможное изменение нагрузки.

### 2. Математическое описание системы управления со стандартными настройками регуляторов электропривода

Метод векторного управления имеет в качестве недостатков большую сложность вычислений, и необходимо точное знание параметров электродвигателя.

Информация о переменных состоянии электропривода получается от прямого измерения величин регулирования или от их моделирования на основе математического описания и построения математической модели. Математические модели менее точные по сравнению с прямыми измерениями, но позволяют на практике реализовывать требуемые алгоритмы управления.

В математической модели используется переход от трехфазных переменных к двухфазным переменным. Это является основой использования методов подчиненного регулирования координатами электропривода.

Применяем систему управления с опорным вектором потокосцепления ротора  $\psi_2$ . При этом в системе два канала управления. Один — это управление потокосцеплением  $\psi_2$ ,

другой — управление скоростью двигателя  $\omega$ . Определение вектора  $\psi_2$  происходит математическим моделированием на основе уравнений электродвигателя. В этом неточность модели, так как параметры системы уравнений задаются с определенной точностью и являются постоянными, в отличие от реальных параметров электродвигателя, которые изменяются в процессе работы [1, 6–10].

Система уравнений, на основе которых строится модель электродвигателя, определяется в системе координат  $x, y$ , вращающихся с синхронной скоростью магнитного поля двигателя, при ориентации вектора потокосцепления ротора  $\psi_2$  по оси  $x$ , для статора и ротора [1, 6, 8, 9]:

$$\begin{cases} U_{1x} = \frac{d\psi_{1x}}{dt} + I_{1x}R_1 + \omega_{0эл}\psi_{1y} \\ U_{1y} = \frac{d\psi_{1y}}{dt} + I_{1y}R_1 + \omega_{0эл}\psi_{1x} \\ 0 = \frac{d\psi_{2x}}{dt} + I'_{2x}R'_2 \\ 0 = I'_{2y}R'_2 + (\omega_{0эл} - p_n\omega)\psi_{2x} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $U_{1x}$  и  $U_{1y}$  — проекции напряжения питания статора на оси  $x$  и  $y$ ;

$I_{1x}$  и  $I_{1y}$  — проекции тока статора на оси  $x$  и  $y$ ;

$I'_{2x}$  и  $I'_{2y}$  — проекции тока ротора на оси  $x$  и  $y$ ;

$R_1$  — сопротивление статора;

$R'_2$  — сопротивление ротора;

$\psi_{1x}$  и  $\psi_{1y}$  — проекции потокосцепления статора на оси  $x$  и  $y$ ;

$\psi_{2x}$  — проекция потокосцепления ротора на ось  $x$ ;

$\omega_{0эл}$  — угловая скорость электромагнитного поля;

$\omega$  — угловая скорость электродвигателя;

$p_n$  — число пар полюсов.

Момент определяется по формуле:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_{12}}{L'_2} [\bar{\psi}_2 \cdot \bar{I}_1], \quad (2)$$

где  $L_{12}$  — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

$L'_2$  — приведенная индуктивность обмоток ротора.

Зависимость между векторами  $\psi_2$  и  $I_1$ , при ориентации вектора потокосцепления по оси  $x$ , определяет систему уравнений напряжений для статора и ротора.

При построении системы управления в передаточных функциях уравнения записываются в операторной форме.

Тогда система уравнений модели электродвигателя определяется как:

$$\begin{cases} U_{1x}(p) + E_{1x}(p) = R_{1э}(1 + T_{1э}p)I_{1x}(p) \\ U_{1y}(p) - E_{1y}(p) = R_{1э}(1 + T_{1э}p)I_{1y}(p) \\ d\psi_{2x} = L_{12} \frac{1}{(1 + T_2p)} I_{1x}(p) \\ (\omega_{0эл}(p) - p_n\omega(p))\psi_{2x}(p) = \frac{L_{12}}{T_2} I_{1y}(p) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $E_{1x}$  и  $E_{1y}$  — составляющие ЭДС, наводимые в статоре по осям  $x$  и  $y$ ;

$R_{1э}$  — эквивалентное активное сопротивление цепи статора:

$$R_{1э} = R_1 + k_2^2 R'_2; \quad (4)$$

$T_{1э}$  — электромагнитная постоянная цепи статора:

$$T_{1э} = \frac{\sigma L_1}{R_{1э}}; \quad (5)$$

$T_2$  — электромагнитная постоянная цепи ротора:

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2}; \quad (6)$$

$k_2$  — коэффициент электромагнитной связи:

$$k_2 = \frac{L_{12}}{L'_2}; \quad (7)$$

$\sigma$  — коэффициент рассеяния магнитного поля:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L'_2}; \quad (8)$$

$L_1$  — индуктивность обмоток статора.

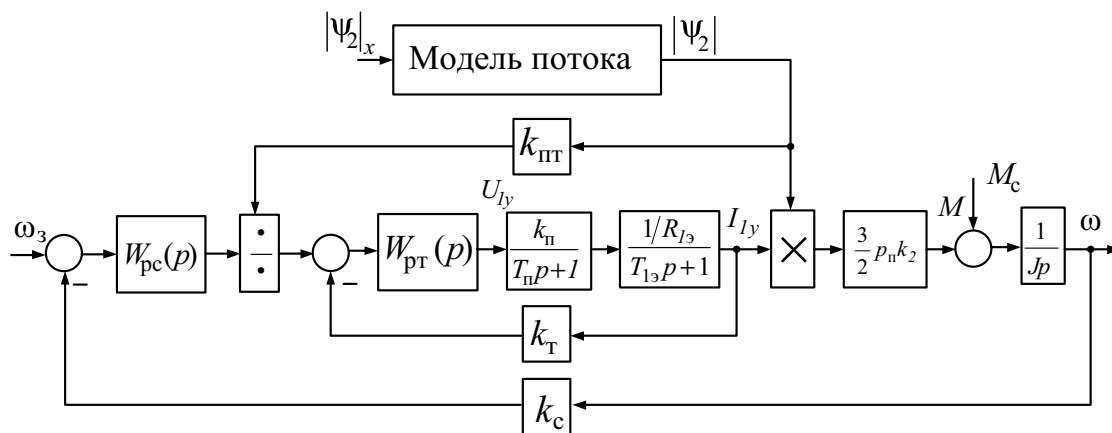


Рис. 1. Структурная схема управления скоростью с классическими регуляторами

На основании этих уравнений составляется структурная схема системы регулирования в передаточных функциях [1, 6–12].

Передаточная функция силового преобразователя представлена как апериодическое звено первого порядка, с постоянной времени  $T_{\text{п}}$  и коэффициентом усиления  $k_{\text{п}}$  силового преобразователя:

$$W_{\text{п}}(p) = \frac{k_{\text{п}}}{T_{\text{п}} p + 1}. \quad (9)$$

При математическом моделировании системы с классическим управлением выполняется расчет регулятора тока и регулятора скорости. Передаточная функция регулятора тока определяется из настройки контура тока на модульный оптимум с постоянной времени  $T_{\mu} = T_{\text{п}}$

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{R_{\text{л}y} T_{\text{л}y}}{2 T_{\mu} k_{\text{п}} k_{\text{т}}} \frac{(T_{\text{л}y} p + 1)}{T_{\text{л}y} p}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{т}}$  — коэффициент обратной связи по току.

Передаточная функция регулятора скорости определяется из настройки контура скорости на симметричный оптимум с постоянной малой времени контура скорости  $T_{\mu\text{с}} = 2T_{\mu}$ :

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{2 J k_{\text{т}}}{6 T_{\mu\text{с}} k_{\text{с}} p_{\text{н}} k_2} \frac{(4 T_{\mu\text{с}} p + 1)}{4 T_{\mu\text{с}} p}, \quad (11)$$

где  $k_{\text{с}}$  — коэффициент обратной связи по скорости;

$J$  — момент инерции.

Структурная схема системы управления, полученная для моделирования, представлена на рис. 1.

Модель потока строится на основании уравнений электродвигателя. Сигналом задания для контура потока является  $|d\psi_2|_x$ , а выходной координатой — значение потокосцепления  $|d\psi_2|$ .

При моделировании системы управления в программном продукте Matlab применялись параметры асинхронного двигателя мощностью 37 кВт, номинальный ток 912 А, номинальная скорость 740 об/мин.

### 3. Система управления с нечетким регулятором скорости электропривода

В целях улучшения энергетических показателей электропривода используем в качестве регулятора скорости нечеткий метод управления. В качестве обратных связей для такого регулятора используется обратная связь по ошибке скорости, по первой производной скорости и интегральная составляющая скорости [6–15]. Структурная схема такой системы с нечетким регулятором скорости представлена на рис. 2.

Нечеткий регулятор выполнен по структуре, изображенной на рис. 3. В основе работы используется метод Мамдани.

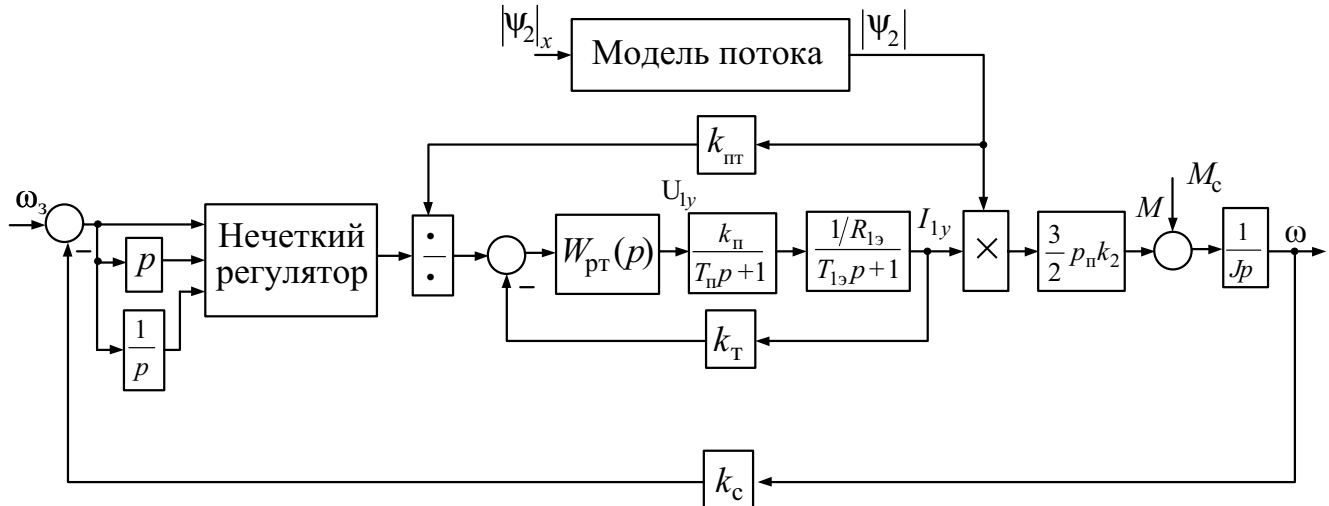


Рис. 2. Структурная схема управления с нечетким регулятором скорости

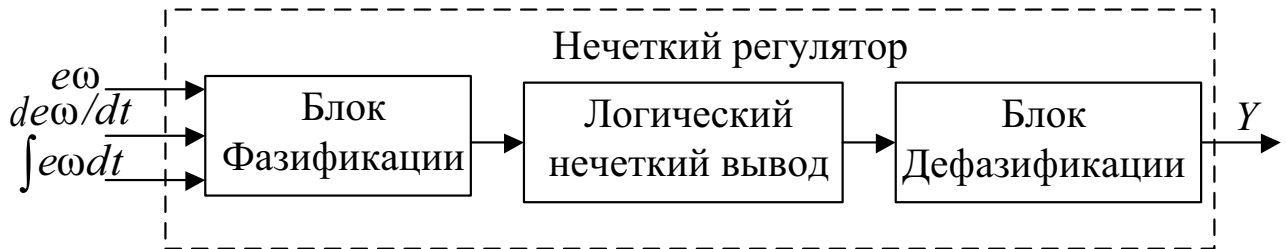


Рис. 3. Структурная схема нечеткого регулятора

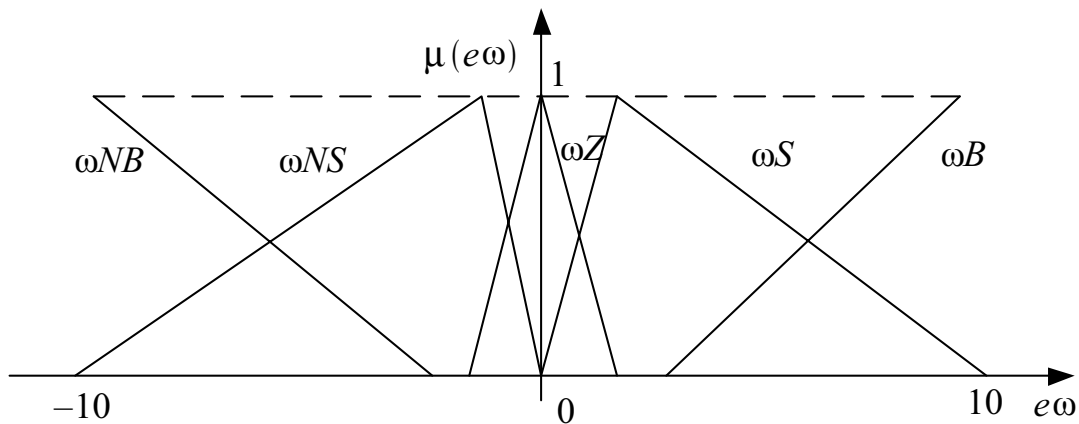


Рис. 4. График функций принадлежности ошибки по скорости

В основе нечеткого регулятора лежит база знаний эксперта, которая выполнена как набор функций принадлежности и правил вывода [15–19]. В процессе работы эти правила могут меняться персоналом в зависимости от требуемого качества управления и энергоэффективности. Структура функций принадлежности по входным параметрам нечеткого регулятора показана на рис. 4–6. Каждой функции присвоено

свое обозначение, которое используется при работе в базе правил нечеткого регулятора.

Набор правил нечеткого регулятора составлен из множества в виде:

Если  $e\omega$  есть  $\mu(\omega NB)$  и  $\frac{de\omega}{dt}$  есть  $\mu(p\omega NB)$ , и  $\int e\omega dt$  есть  $\mu(NBI)$ , тогда  $u$  есть  $\mu(YLN)$ .

Если  $e\omega$  есть  $\mu(\omega B)$  и  $\frac{de\omega}{dt}$  есть  $\mu(p\omega B)$ , и  $\int e\omega dt$  есть  $\mu(BI)$ , тогда  $u$  есть  $\mu(YLB)$ ,

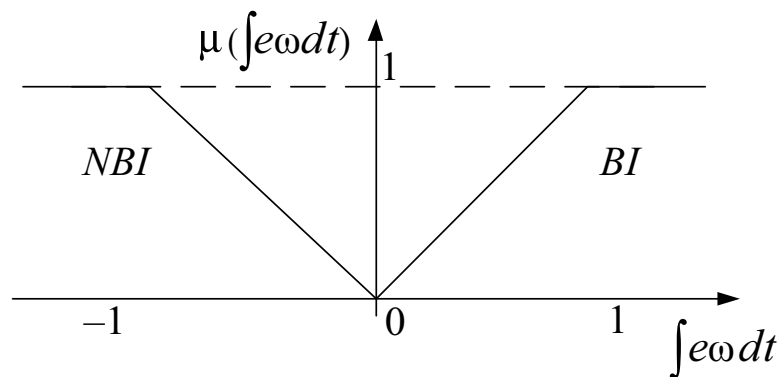


Рис. 5. График функций принадлежности интеграла ошибки по скорости

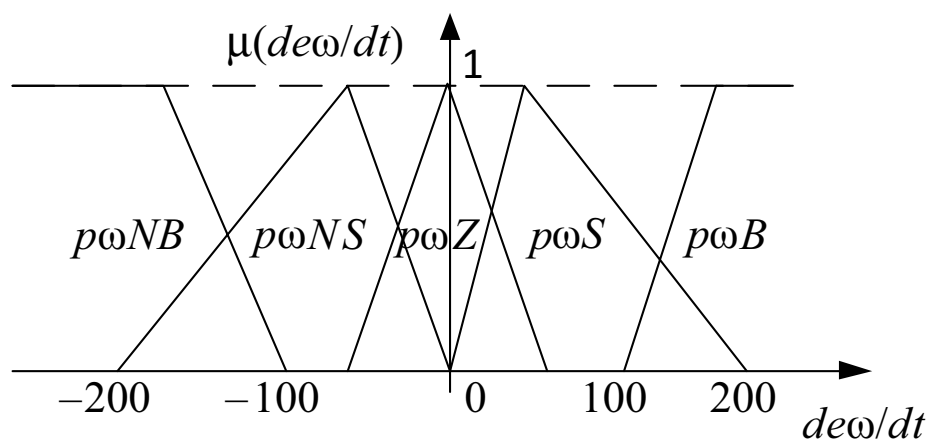


Рис. 6. График функций принадлежности интеграла ошибки по скорости

где  $e\omega$ ,  $\frac{ed\omega}{dt}$ ,  $\int e\omega dt$  — переменные ошибки по

скорости, производной ошибки по скорости и интеграла ошибки по скорости;

$y$  — переменная управления выхода нечеткого регулятора;

$\mu(e\omega)$ ,  $\mu\left(\frac{ed\omega}{dt}\right)$ ,  $\mu(\int e\omega dt)$ ,  $\mu(Y)$  — заданные

функции принадлежности ошибки по скорости, производной ошибки по скорости, интегральной составляющей ошибки по скорости и выходного сигнала управления нечеткого регулятора.

Математические действия регулятора определяются как [16–19]:

1) определение принадлежности для правил каждой переменной;

2) нечеткий вывод по каждому правилу посредством логического минимума;

3) композиция посредством логического максимума и получения итогового нечеткого подмножества для переменной выхода;

4) определение значения выходного сигнала управления  $Y$  проводится центроидным методом.

Нечеткий регулятор является нелинейным и при работе позволяет реализовывать управление с ограничением координат управляемой системы. Это используется при ограничении тока двигателя. На рис. 7, 8 показаны графики тока и скорости в относительных единицах при ступенчатом входном воздействии. На рис. 7, 8 цифрой 1 отмечены ток и скорость при классическом управлении, цифрой 2 отмечены ток и скорость при применении нечеткого регулятора скорости.

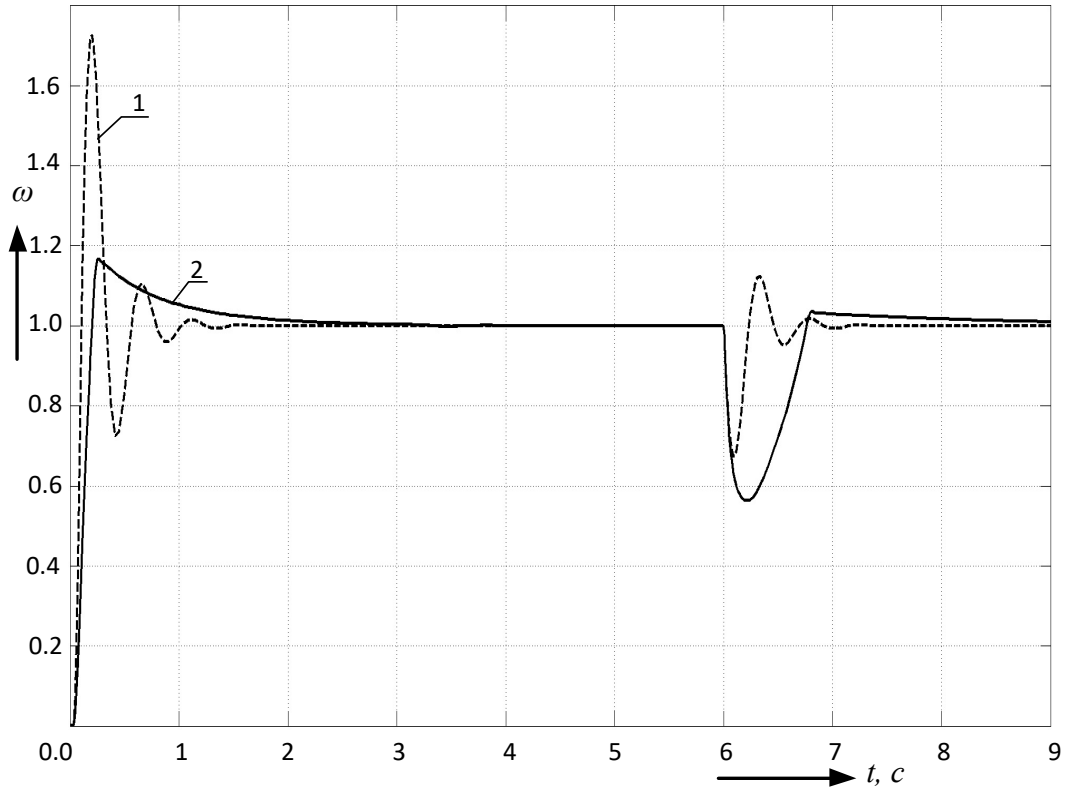


Рис. 7. Графики скорости

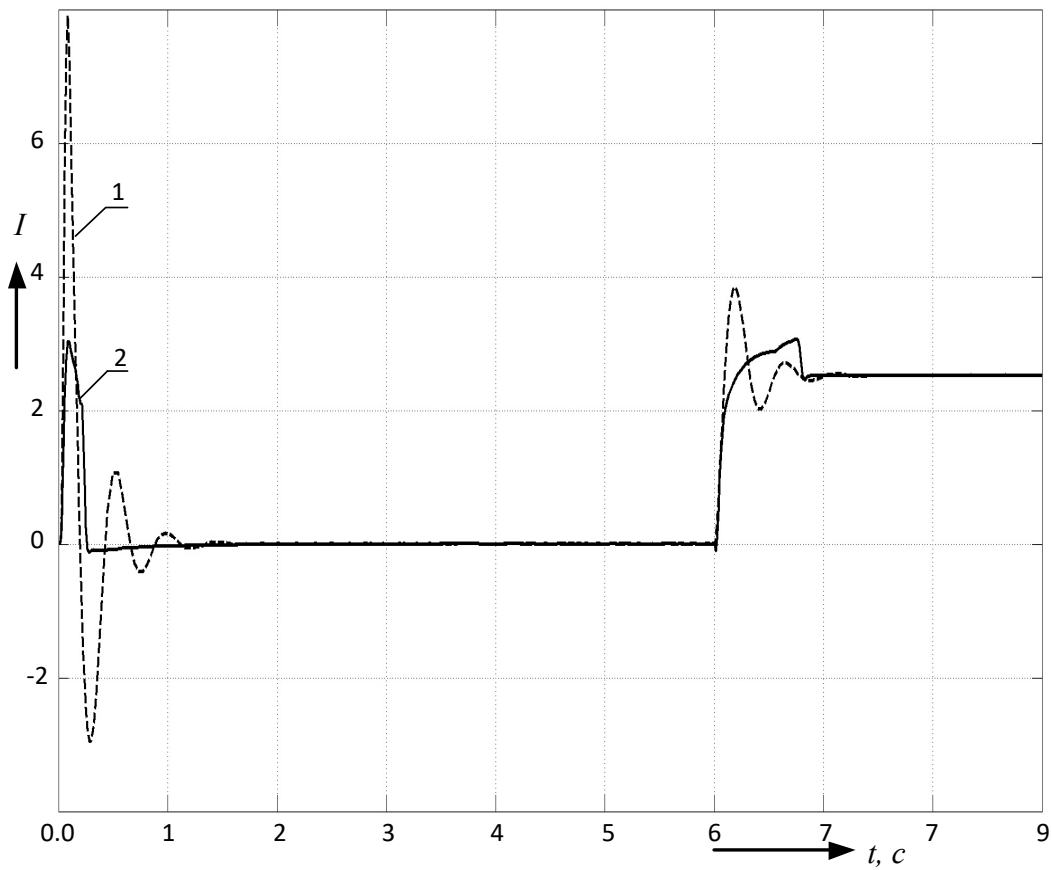


Рис. 8. Графики тока

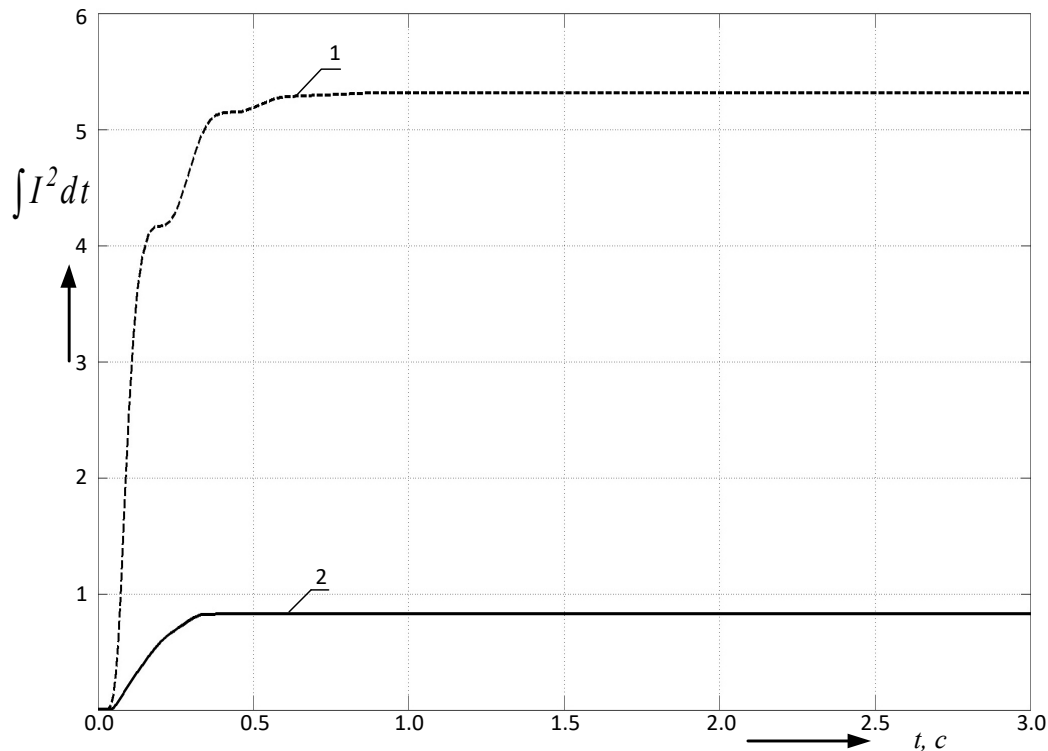


Рис. 9. Графики изменения  $\int I^2 dt$  при пуске

Согласно моделированию, нечеткий регулятор управляет как координатой скорости, так и выполняет токоограничение. Поэтому в системе с нечетким регулятором ток не превышает допустимых значений в переходном процессе. После пуска с течением времени к системе приложено внешнее воздействие. В результате этого ток увеличивается и принимает новое установившееся значение в обеих системах управления. Контур скорости обрабатывает внешнее воздействие, и скорость стремится к величине задания, так как контур настроен на симметричный оптимум. При этом в системе управления с нечетким регулятором скорость двигателя также принимает величину задания скорости.

На основании [1, 6, 8, 9] термин «энергоэффективность потребления энергии из сети или автономного источника электроприводом» определяется как потери в сопротивлениях источника, линии и приемника энергии. Так как приемник энергии электродвигатель, то суммарная мощность потерь в электродвигателе определяется как:

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v, \quad (12)$$

где  $\Delta P_c$  — постоянные потери;  
 $\Delta P_v$  — переменные потери.

Переменные потери определяются протеканием тока по сопротивлениям силовой части. Потери в двигателе и электрических элементах питания определяются как:

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (13)$$

где  $I_i$  — ток  $i$ -го элемента;  
 $R_i$  — сопротивление  $i$ -го элемента;  
 $\Delta P_{\text{ст}}$  — потери в стали.

Переменные потери асинхронного двигателя, в роторной и статорной цепях, определяются как:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (14)$$

Принимается  $I_1 \approx I_2'$  с учетом того, что потери от тока холостого хода условно учтены в постоянных потерях.



$$\Delta P_v \approx 3I_2'^2 (R_1 + R_2'). \quad (15)$$

При этом потери в силовой части в переходном процессе определяются как:

$$\Delta A_{\Sigma \text{п.п.}} = \int_0^T \Delta P_{\text{дв}\Sigma}(t) dt \sim \int_0^T I^2(t) dt. \quad (16)$$

На рис. 9 показано математическим моделированием изменение  $\int I^2 dt$  при стандартном  $I$  и нечетком  $2$  управлении в относительных единицах.

Ограничение тока, при нечетком управлении, в переходном процессе пуска, снижает  $\int I^2 dt$ , в результате уменьшаются  $\Delta A_{\Sigma \text{п.п.}}$  по сравнению с управлением со стандартными настройками регуляторов.

### Заключение

Применение нечеткого регулятора в контуре скорости позволяет реализовывать управление главным движением с выполнением требований к электромеханической системе крана. В крановом механизме это дает возможность ограничивать ток в процессе работы и потери энергии при переходных процессах в системах с ограниченной мощностью источника электропитания. Определенные математическим моделированием основные параметры переходного процесса соответствуют требуемому качеству. Перерегулирование не превышает допустимого уровня при ступенчатом управляющем воздействии. Ошибка по скорости стремится к нулю, как при настройке классического регулятора на симметричный оптимум, при внешнем воздействии.

Параметры и логику работы нечеткого регулятора, полученные в результате математического моделирования, возможно применять при программировании системы управления скоростью электродвигателя главного движения. ▲

### Библиографический список

1. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / Под ред. В. М. Терехова. — 3-е изд. — М.: Академия, 2008. — 304 с.
2. Сапожников В. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников; под ред. В. В. Сапожникова. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 394 с.
3. Певзнер Е. М. Электрооборудование грузоподъемных кранов / Е. М. Певзнер, Е. В. Попов и др. — Москва, 2009. — 359 с.
4. Мужичков В. И. Грузоподъемные краны на железнодорожном ходу / В. И. Мужичков, В. А. Редников. — М.: Транспорт, 1978. — 429 с.
5. Лифанов В. А. Грузоподъемные и транспортные механизмы: учебник / В. А. Лифанов, Б. П. Дофанов. — М.: Машиностроение, 1990. — 671 с.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник / Г. Г. Соколовский. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 272 с.
7. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. — М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. — 364 с.
8. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 690 с.
9. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. — 6-е изд., перераб. и доп. / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.
10. Шрейнер Р. Т. Токоограничение в двухзонных системах частотного управления асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, В. К. Кривовяз, С. И. Шилин // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь, 3–7 октября 2016. — С. 243–247.
11. Виноградов А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов, В. Л. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Электротехника. — 2003. — № 7. — С. 7–17.
12. Ещин Е. К. Энергосберегающее управление состоянием асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. — 2018. — Т. 61. — № 3. — С. 31–36.
13. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 1994. — 318 с.
14. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Наука, 1986. — 312 с.
15. Чернышев Д. В. Система двухуровневого управления на основе нечеткой логики. Патент на полезную модель № 117652, зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 июня 2012 г. / Д. В. Чернышев.
16. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. — М.: Энергоиздат, 1981. — 232 с.
17. Герман-Галкин С. Г. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
18. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. / Л. Заде. — М.: Мир, 1976. 166 с.
19. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 288 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 389–398  
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-389-398

### Control System of Crane Electric Drive of Platform Type on the Basis of Controller with Fuzzy Logic

#### Information about author

Chernyshev D. V., PhD in Engineering. E-Mail: fersy@mail.ru

Far East State Transport University, Department of “Automation, Remote Control and Communication”, Khabarovsk

**Abstract:** Control system on fuzzy logic basis is modelled for the electric drive of main motion of crane, located on a platform. As a basis for controllers, fuzzy logic theory and standard settings are used. The model of control system powered part is built according to vectorial control approach, with electric drive with rotor flux reference vector. Control system is implemented by submittal regulation mode with classic controller of current and with speed fuzzy controller, together, current inner circuit is setup on modular optimum. The purpose of system model development is energetical characteristics improvement at power supply from the sources with limited capacity and at meeting the requirements on control quality. In comparison with control system with speed fuzzy controller, the system of secondary regulation with current inner circuit, adjusted to modular optimum, and with speed outer circuit, adjusted to symmetric optimum, is used. The obtained parameters and setup logic of fuzzy controller of mathematical model may be used as a basis for programming in control systems. In being changed work outdoor conditions, the correction of such controller parameters is embodied by personnel on the basis of understandable logic rules and functions of belonging.

**Keywords:** control system; fuzzy logic; electric drive; mathematical modelling; controller.

#### References

1. Sistemy upravlenija jelektrorivodov: uchebnik dlja vuzov [Electric drive control systems: a textbook for universities]. Moscow: Academy Publ., 2008. 304 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov V. I. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki: uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta [Theoretical basics of railway automation and remote control: textbook for railway transport universities]. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte” Publ., 2008. 394 p. (In Russian)
3. Pevzner E. M., Popov E. V. Jelektrooborudovanie gruzopod’emnyh kranov [Electrical equipment for cranes]. Moscow, 2009. 359 p. (In Russian)
4. Muzhichkov V. I., Rednikov V. A. Gruzopod’emnye krany na zheleznodorozhnom hodu [Railway cranes]. Moscow: Transport Publ., 1978. 429 p. (In Russian)
5. Lifanov V. A., B. P. Dofanov Gruzopod’emnye i transportnye mehanizmy: uchebnik [Lifting and transport mechanisms: textbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 671 p. (In Russian)
6. Sokolovsky G. G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovanijem: uchebnik [AC electric drives with frequency regulation: textbook]. Moscow: Akademija Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
7. Moskalenko V. V. Jelekticheskiy privod: uchebnik [Electric drive: textbook]. Moscow: INFRA-M Publ., 2015. 364 p. (In Russian)
8. Klyuchev V. I. Teorija jelektrorivoda [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2001. 690 p. (In Russian)
9. Chilikin M. G., Sandler A. S. Obshhij kurs jelektrorivoda: ucheb. dlja vuzov [General course of the electric drive: textbook for universities]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 576 p. (In Russian)
10. Shreiner R. T., Krivovjaz V. K., Shilin S. I. Tokoogranichenie v dvuhzonnnyh sistemah chastotnogo upravlenija asinhronnymi jelektrorivodami [Current limitation in two-zone frequency control systems for asynchronous electric drives]. *Trudy IX Mezhdunarodnoj (XX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektrorivodu AJeP-2016* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) conference on automated electric drive AEP-2016]. 2016, pp. 243–247. (In Russian)
11. Vinogradov A. B., Chistoserdov V. L., Sibircev A. N. Adaptivnaja sistema vektornogo upravlenija asinhronnym jelektrorivodom [Adaptive system of vector control of asynchronous electric drive]. *Jelektrotehnika* [Electrical engineering]. 2003, l. 7, pp. 7–17. (In Russian)
12. Eshchin E. K. Jenergosberegajushhee upravlenie sostojaniem asinhronnogo jelektrodvigatelja [Energy-saving control of the state of an asynchronous electric motor]. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika* [Izvestiya vuzov. Electromechanics]. 2018, vol. 61, l. 3, pp. 31–36. (In Russian)
13. Kopylov I. P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskih mashin: uchebnik dlja vuzov [Mathematical modeling of electrical machines: a textbook for universities]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 1994. 318 p. (In Russian)
14. Nechetkie mnozhestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy Sets in Control Models and Artificial Intelligence]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 312 p. (In Russian)
15. Chernyshev D. V. *Sistema dvuhurovnevo upravlenija na osnove nechetkoj logiki* [Two-level control system based on fuzzy logic]. Patent RF, no. 117652, 2012. (In Russian)
16. Pospelov D. A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemah upravlenija [Logical-linguistic models in control systems]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 232 p. (In Russian)
17. German-Galkin S. G. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK [Design of mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg: KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p. (In Russian)
18. Zadeh L. Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir Publ., 1976. 166 p. (In Russian)
19. Pospelov D. A. Situacionnoe upravlenie: teorija i praktika [Situational management: theory and practice]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 288 p. (In Russian)