Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

ВК «Кузбасская ярмарка»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 9 - 2023

УДК 622.2 ISSN 2311-8342

ББК 33.1
Н 340

Главный редактор
д.т.н., проф. Фрянов В.Н.

Редакционная коллегия:
чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишин В.И., д.т.н., проф. Никитенко С.М.,
д.т.н. Павлова Л.Д. (технический редактор), д.т.н., проф. Домрачев А.Н.,
д.э.н., проф. Петрова Т.В.

Н 340 Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2023. - № 9. – 390 с.

Рассмотрены аспекты развития инновационных наукоёмких технологий диверсификации угольного производства и обобщены результаты научных исследований, в том числе создание роботизированных и автоматизированных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, базирующиеся на использовании прорывных технологий добычи угля и метана, комплексной переработке этих продуктов в угледобывающих регионах и реализации энергетической продукции потребителям в виде тепловой и электрической энергии.

Журнал предназначен для научных и научно-технических работников, специалистов угольной промышленности, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Номер подготовлен на основе материалов Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 6-9 июня 2023 г.).

Основан в 2015 г.
Выходит 1 раз в год

Учредитель - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 622.2
ББК 33.1

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2023

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМЫ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ЗАЯВОК NAUMEN SERVICE DESK 253
Матюшкин Г.В., д.т.н. Кулаков С.М. 253
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 253
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА T-ENERGY 258
к.т.н. Сеченов П.А., д.т.н. Рыбенко И.А. 258
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 258
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СКИПОВОГО ПОДЪЕМА ЦР6х3,2/0,75 АБАКАНСКОГО РУДНИКА 261
д.т.н. Островлянчик В.Ю., к.т.н. Кубарев В.А., Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю. 261
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 261
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ И ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ 267
д.т.н. Островлянчик В.Ю., к.т.н Кубарев В.А, Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю 267
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 267
ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖУЩЕГО МОМЕНТА И МАССЫ ГРУЗА В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВУХСКИПОВОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ 272
к.т.н. Поползин И.Ю. 272
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 272
О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЁМНЫХ УСТАНОВОК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ ПРИВОДА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАНАТАХ 276
к.т.н. Кипервассер М.В., к. ф-м.н., Хаимзон Б.Б., к.т.н. Симаков В.П. 276
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 276
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATHLAB/SIMULINK ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ 280
Стишенко К.П., к.т.н. Кипервассер М.В. 280
Сибирский государственный индустриальный университет. г. Новокузнецк, Россия 280
ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ МОЩНОЙ РЕГУЛИРУЕМОЙ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ 286
Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., к.т.н. Кипервассер М.В. 286
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия 286
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УГОЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СТРАНАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ 291
[1,2]д.т.н. Зеньков И. В., [3]Мулюшкина А.А. 291
1 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия 291
2 – Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия 291
3 – Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия 291
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА 294
к.т.н. Кузнецова Е.С., Усова Э.А., Комарова О.В., Качурин А.С. 294
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк 294
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРЯТИЯХ 298
[1]к.т.н. Кузнецова Е.С., [2]Кузьмина С.Ю., [3]Кузьмин С.А. 298

УДК 621.313.333.1: 622.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ И ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

д.т.н. Островлянчик В.Ю., к.т.н Кубарев В.А, Маршев Д.А., к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье приведена методика определения параметров системы преобразователя частоты асинхронного двигателя с фазным ротором (ПЧ-АДФР) на примере подъемного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника, по результатам которой получена математическая модель, которая позволяет исследовать статические характеристики и получать данные для синтеза системы автоматического регулирования скорости (САРС). Определены параметры двухзонного регулирования, с описанием двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ) с условиями переключения зон управления.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, шахтная подъемная установка, двухзонное регулирование, блок разделения зон управления, частотный преобразователь.

Высоковольтные асинхронные двигатели с фазным ротором отличаются высокой жесткостью механических характеристик и применяются на шахтных подъёмных установках в качестве главного привода клетевых и скиповых подъёмов. При модернизации систем управления с внедрением частотно – регулируемого электропривода с цифровой САРС основной проблемой является, реализация движения на малых скоростях, режимы растормаживания, движение в разгрузочных кривых, где $\omega \leq 2$ рад/с, и скорости «ревизия», где $\omega \leq 5$ рад/с. Причина заключается в конструктивной особенности АДФР. Токи возбуждения и нагрузки находятся в одной и той же обмотке статора. В связи с этим частота вращения поля статора ω_s не может быть ниже $\omega_{0}s_{кр}$, т.е. $\omega_s \geq \omega_{0}s_{кр}$.

В [1, 2] установлено, что возможно определить оптимальное управление АДФР при двухзонном регулировании скорости АДФР. Первая зона – регулирование скорости изменением частоты вращения поля статора при угловой скорости ротора выше (0,2÷0,4) ω_0, т.е. 0,2 $\omega_0 < \omega < \omega_0$. При этом поток статора поддерживается на заданном уровне и постоянен. Это обеспечивается адаптивным регулятором потока [3]. ЭДС статора поддерживается на заданном уровне в соответствии с выражением $E_s = C_e \Phi \omega = K_e E_{rн}$. Из этого выражения следует, что при изменении частоты в пределах $\omega_0^n = (0{,}1 \div 1)\omega_o$, где $n = 0 \div 1$; ЭДС также изменяется в этих же пределах. Например: $n = 0{,}1$; = 0,1; $\omega_0^{0,1} = 0{,}1\omega_{\text{o}}$ и $\text{E}_{r\text{н}}^{0,1} = 0{,}1\text{E}_{r\text{н}}$.

Таким образом, можно сформулировать цель и задачи исследований.

Цель работы: на основании исследований статических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором определить основные параметры, условия переключения и математическое описание процесса переключения зон управления.

Для обеспечения выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Получить систему уравнений и структуру АДФР для исследования электромеханических характеристик и свойств объекта управления.

2. На основе анализа структуры и системы уравнений определить расчётные параметры и методику их вычисления по каталожным данным на примере подъёмного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника.

3. Построить вычислительную модель в системе Mathcad.

4. Получить семейства механических характеристик для первой зоны, и на основании совместного анализа получить условия переключения и математическое описание блока разделения зон управления.

Составим систему уравнений для анализа электромеханической и механической характеристик.

Учитывая вышеизложенное на основании [4], можно записать:

$$E_s = (w_s k_{\text{об}s}/w_r k_{\text{об}r})E_{r\text{н}} = k_{\text{е}}E_{r\text{н}}, \quad (1)$$

где $E_{rн}$ – ЭДС неподвижного ротора.

ЭДС вращающегося ротора:

$$E_r = E_{r\text{н}}s = E_{r\text{н}} - k_E\omega. \quad (2)$$

Ток в фазе ротора можно определить из выражения:

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_r^2 + {L_r}^2(\omega_0 - \omega)^2}}, \quad (3)$$

где E_r – ЭДС вращающегося ротора.

Электромагнитный момент можно определить, через мощности потерь:

$$\Delta P_{\text{эл}} = \text{M}\omega_0 s. \quad (4)$$

Учитывая, что $I_r r_r = E_a = E_{r\text{н}}\cos\varphi_r$ и $\cos\varphi_{\text{к}} = \frac{r_{\text{г}}}{\sqrt{r_r^2 + (x_{r\text{к}}s)^2}} = \frac{r_r}{\sqrt{r_r^2 + L_r^2(\omega_0 - \omega)^2}}$, получим:

$$M_{\text{д}} = \triangle \text{P}_{\text{э}r} m_2 \frac{r_2}{\omega_0\sqrt{r_2^2 + L_r^2(\omega_0 - \omega)^2}}, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{э}} = E_{2\text{н}}I_2$ – полная электрическая мощность, подводимая к ротору.

Выражения (1) – (5) можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{r\text{н}} = \frac{E_s}{k_T}, \\ E_r = E_{r\text{н}} - k_E\omega, \\ I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_r^2 + L_r^2(\omega_{\text{ном}} - \omega)^2}}, \\ \Delta P_{\text{э}} = I_r \times E_{r\text{н}}, \\ M_{\text{д}} = \Delta P_{\text{э}} \frac{m_r r_r}{\omega_{\text{ном}}\sqrt{r_r^2 + L_r^2(\omega_{\text{ном}} - \omega)^2}}. \end{cases} \quad (6)$$

Систему уравнений можно представить в виде вычислительной модели:

$$f(E_r, Z_r, \varphi_r, I_r, \omega, M_{\text{д}}) = \begin{cases} E_r = E_{r\text{н}} - k_E\omega, \\ Z_r = \sqrt{r_r^2 + L_r^2(\omega_{\text{ном}} - \omega)^2}, \\ I_r = \frac{E_r}{Z}, \\ \cos\varphi_r = \frac{r_r}{Z_r}, \\ M_{\text{д}} = \frac{I_r E_{r\text{н}}\cos\varphi_r m_r}{\omega_{\text{ном}}}. \end{cases} \quad (7)$$

В системах уравнений (6) – (7) $\sqrt{r_r^2 + L_r^2(\omega_{\text{ном}} - \omega)^2} = Z_r$ – полное сопротивление цепи ротора.

Использовав полученную систему уравнений (7), можно построить статические механические и электромеханические характеристики для асинхронного двигателя. Приведенные система уравнений позволяет исследовать не только электромеханическое преобразование энергии, но и получить данные для разработки САРС.

Ниже приведена методика расчёта электромеханической $I=f(\omega)$ и механической $M=f(\omega)$ характеристик. Построение механических и электромеханических характеристик приведем для высоковольтного асинхронного двигателя типа АКН2-19-33-20УХЛ4.

Из приведённых систем уравнений и структур следует определить следующие параметры: r_r – активное сопротивление фазы ротора; L_r – индуктивность фазы ротора; Z_r – полное сопротивление фазы ротора; $\cos\varphi = r_r/Z_r$; I_r – ток ротора; M_∂ – момент двигателя.

Приведем каталожные параметры АДФР типа АКН2-19-33-20УХЛ4. Номинальная мощность, $P_н$=1000 кВт; синхронная скорость вращения поля статора, n_0=300 об/мин;

синхронная скорость вращения поля, ω_0=31,4 рад/с; номинальная скорость вращения двигателя, $n_н$=300 об/мин; номинальная скорость вращения, $\omega_н$=31,4 рад/с; номинальное линейное напряжение статора, U_s=6000 В; коэффициент полезного действия, η=93,4%; косинус φ, $cos\,\varphi=0,73$; номинальный ток фазы ротора, $I_{rн}$=550 А; номинальное линейное напряжение ротора, $Urн$=1130 В; перегрузочная способность, $\lambda=M_{max}/M_н$=2,5; номинальное скольжение, $s_н$%=1,6; критическое скольжение, s_k%=1,6; номинальный ток фазы статора, I_s=141 А.

Активное сопротивление обмотки ротора:

$$r_r = R_{\Sigma R\text{н}} \cdot s_\text{н} = 0{,}019, \tag{8}$$

где суммарное активное сопротивление обмотки ротора при номинальном токе ротора определяется на основании учета линейности механической характеристики в рабочей зоне при s=1 и номинальном токе двигателя: $R_{\Sigma R\text{н}} = r_r + r_d = \frac{U_{r\text{н}}}{\sqrt{3}\cdot I_{r\text{н}}} = 1.18$Ом.

Номинальный момент двигателя:

$$\text{М}_\text{н} = \frac{U_{r\text{н}}\cdot I_{r\text{н}}\cdot m_r}{\sqrt{3}\cdot\omega_\text{н}} = 34890\text{Нм}, \tag{9}$$

где m_r – количество фаз обмотки ротора, m_r=3.

Определим индуктивное сопротивление короткого замыкания обмотки ротора (при $s=1$). Представим выражение (9) к удобному для анализа, учитывая, что ω_0-$\omega=\omega_0 s$, $\text{Р}_э = E_{r\text{н}} I_{r\text{н}}$ и $I_r = \frac{E_{r\text{н}} s}{\sqrt{r_r^2 + x_{rk}{}^2 s^2}}$, получим:

$$M = \frac{E_{2\text{н}}^2 m_r s}{\omega_0\left(1+\frac{x_{r\text{к}}^2}{r_r{}^2}s^2\right)}. \tag{10}$$

Из выражения (10) следует, что при $s=s_k$, $\frac{x_{r\text{к}}^2}{r_r{}^2}s^2 = 1$, отсюда следует:

$$s_k = \frac{r_r}{x_{rk}}. \tag{11}$$

Из выражения (11) определим индуктивное сопротивление короткого замыкания фазы ротора:$x_{rk} = 0{,}247$ом.

Индуктивность обмотки ротора:

$$L_r = \frac{x_{rk}}{\omega_0} = 7{,}876\cdot 10^{-3}\text{Гн}. \tag{12}$$

Добавочное сопротивление ротора определяется из выражения $r_d = R_{\Sigma R\text{н}} - r_r$, где ΣR_{rd} - суммарное сопротивление ротора при $s_k=1$ $R_{\Sigma R\text{н}} = \frac{E_{r\text{н}}}{I_r}$.

Для определения добавочного сопротивления воспользуемся системой уравнения (7), из которой момент равен: $M_\text{д} = \frac{I_r E_{r\text{н}} cos\varphi_r m_r}{\omega_0}$, где, ток ротора $I_r = \frac{E_{r\text{н}} - k_E\omega}{Z}$, при скорости ω=0, $I_{r\text{н}} = \frac{E_{r\text{н}}}{Z}$, $cos\varphi_r = \frac{R_{\Sigma R\text{н}}}{Z_r}$ и выражение для момента примет вид:

$$M_\text{д} = \frac{E_{r\text{н}}{}^2\cdot R_{\Sigma R\text{н}}\cdot m_r}{\omega_0\left(\sqrt{R_{\Sigma R\text{н}}{}^2 + L_r^2(\omega_0-\omega)^2}\right)^2} = \frac{E_{r\text{н}}{}^2\cdot r_\Sigma\cdot m_r}{\omega_0\left(R_{\Sigma R\text{н}}{}^2 + L_r^2(\omega_0-\omega)^2\right)}. \tag{13}$$

Из выражения (13) можно получить квадратное уравнение:

$$R_{\Sigma R\text{н}}{}^2 - \frac{E_{r\text{н}}{}^2\cdot m_r}{M_\text{д}\cdot\omega_0} R_{\Sigma R\text{н}} - L_r^2\omega_0{}^2 = 0. \tag{14}$$

Подставляя известные значение для характеристики 0,1·ω$_0$ и 0,1·Е$_{rн}$, а именно: $\omega_{00,1} = 3{,}14\text{рад/с}, E_{r\text{н}0,1} = 65{,}3\text{В}, m_r = 3, M_\text{д} = 2M_\text{н} = 65760, L_r = 0{,}007876\text{Гн}$, получим:

$$R_{\Sigma R\text{н}}{}^2 - \frac{65,3^2\cdot 3}{65760\cdot 3{,}14} R_{\Sigma R\text{н}} - 0{,}007876^2\cdot 3{,}14^2 = 0.$$

Суммарное сопротивление равному$R_{\Sigma R\text{н}} = 0{,}051$ Ом, тогда необходимое определить добавочное сопротивление, для характеристики $0,1\ \omega_0$ и $0,1E_{rн}$, вычисляем по выражению (8):

$$r_{d0.1} = R_{\Sigma R\text{н}} - r_r$$
$$r_{d0,1} = 0{,}051 - 0{,}019 = 0{,}032\text{Ом}$$

Аналогичный расчет добавочных сопротивлений произведем для *0,2ω₀* и *0,2Eгн*, *0,3ω₀* и *0,3Eгн*, *0,4ω₀*, и *0,4Eгн*, *0,5 ω₀* и *0,5Eгн* соответственно получим:

$r_{d0,2}$=0,083 Ом; $r_{d0,3}$=0,135 Ом; $r_{d0,4}$=0,185 Ом; $r_{d0,5}$=0,235 Ом.

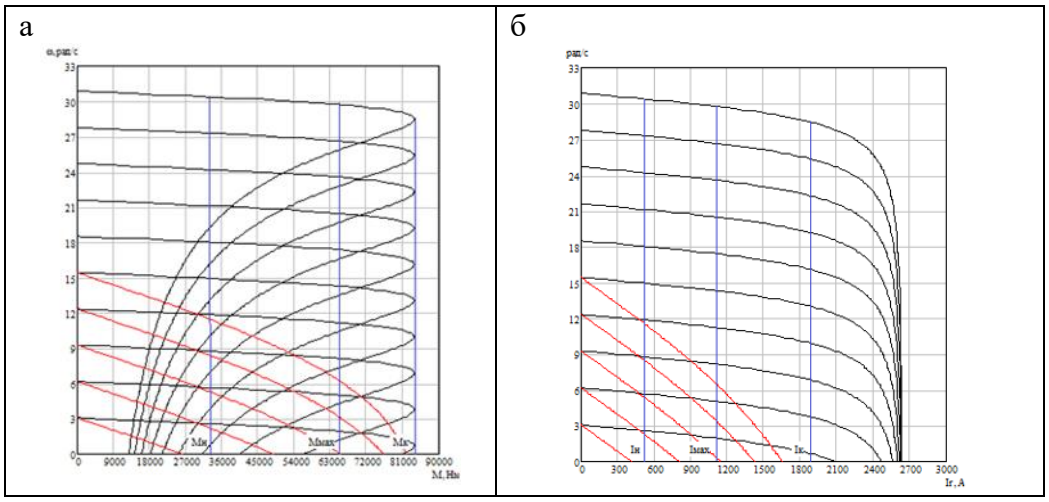
Для этих значений добавочных сопротивлений построим семейства механических *M=f(ω)* и электромеханических *I=f(ω)* характеристик для первой и второй зон при изменении частоты вращающегося поля.

При этом семейство характеристик при изменении частоты вращения поля статора $\omega_0^n = (0{,}1 \div 1) \cdot \omega_0$ при ЭДС неподвижного $E_{r\text{н}}^n = (0{,}1 \div 1)E_{r\text{н}}$, частота принимает ряд значений ω_0^n, где $n = 0{,}1 \ldots 1\omega_0$, т.е. изменяется от 0,1 до 1 с интервалом 0,1. ЭДС ротора *Eгн* принимает такой же ряд значений в соответствии с выражением $E_{r\text{н}} = E_s/K_e = Ce\Phi_m\omega/K_e$ и условием, что магнитный поток Φ_m поддерживается постоянным.

Получим следующее семейство характеристик:

$$
\begin{array}{l}
n = 1, \omega_0^1 = \omega_0, E_{r\text{н}}^1 = E_{r\text{н}}, r_d = 0; n = 0{,}9, \omega_0^{0,9} = 0{,}9\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,9} = 0{,}9E_{r\text{н}}, r_{d0,9} = 0; \\
n = 0{,}8; \omega_0^{0,8} = 0{,}8\omega_0; E_{r\text{н}}^{0,8} = 0{,}8E_{r\text{н}}; r_{d0,8} = 0; n = 0{,}7, \omega_0^{0,7} = 0{,}7\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,7} = 0{,}7E_{r\text{н}}, r_{d0,7} = 0; \\
n = 0{,}6, \omega_0^{0,6} = 0{,}6\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,6} = 0{,}6E_{r\text{н}}, r_{d0,6} = 0;\ n = 0{,}5, \omega_0^{0,5} = 0{,}5\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,5} = 0{,}5E_{r\text{н}}, r_{d0,5} = 0; \\
n = 0{,}4, \omega_0^{0,4} = 0{,}4\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,4} = 0{,}4E_{r\text{н}}, r_{d0,4} = 0; n = 0{,}3, \omega_0^{0,3} = 0{,}3\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,3} = 0{,}3E_{r\text{н}}, r_{d0,3} = 0; \\
n = 0{,}2, \omega_0^{0,2} = 0{,}2\omega_0, E_{r\text{н}}^{0,2} = 0{,}2E_{r\text{н}}, r_{d0,2} = 0; n = 0{,}1\omega_0^{0,1} = 0{,}1\omega_0 E_{r\text{н}}^{0,1} = 0{,}1E_{r\text{н}} r_{d0,1} = 0.
\end{array}
\quad (15)
$$

На рис. 1 представлены семейства выбранных по результатам анализа характеристик при $r_{d0,3}$=0,135 Ом. При таком значении обеспечиваются линейные характеристики на всём диапазоне управления, как в первой, так и во второй зонах. Для этого же значения сопротивления на рис. 2, приведены характеристики при управлении во второй зоне при изменении напряжения статора.



Mн, Iн – номинальный момент и ток; *Mmax, Imax* – максимальный момент и ток;
Mk, Ik – критический момент и ток

Рис. 1. Механические (а) и электромеханические (б) характеристики для $\omega_0^{0,1\ldots0,9}, E_{r\text{н}}^{0,1\ldots0,9}$ (красные); $\omega_0^{0,1\ldots0,5}, E_{r\text{н}}^{0,1\ldots0,5}$ при добавочном сопротивлении *rd0.3* =0,135 Ом (черные)

По полученным данным при анализе характеристик можно составить систему нелинейных уравнений для двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ). Система уравнений БРЗУ, описывающая управления задающим сигналом для формирования амплитуды и частоты частотного преобразователя:

$$
u_s = \begin{cases} K_s|u_y|, 0 < |u_y| \le (0{,}2 \div 0{,}3)u_{y\text{н}}; \\ u_{ys\text{н}}, |u_y| > (0{,}2 \div 0{,}3)u_{y\text{н}}; \end{cases}
$$

$$u_\omega = \begin{cases} K_\omega u_y, (0{,}2 \div 0{,}3)u_{\omega\text{ном}} < u_y \le u_{\omega\text{ном}}, \\ K_{0\omega} u_y, 0 < u_y \le (0{,}2 \div 0{,}3)u_{\omega\text{ном}}, \\ u_{\omega\text{ном}}, u_y > u_{\omega\text{ном}}, \end{cases} \quad (16)$$

где u_y – сигнал управления; $|u_y|$ – модуль сигнала управления; u_s – сигнал управления напряжением статора; u_ω – сигнал управления скоростью вращения магнитного потока статора; $K_{\omega 1}$ – коэффициенты усиления блока нелинейного задания скорости при скорости более $(0,2 \div 0,3)u_{\omega ном}$; $K_{\omega 0}$ – задания скорости при задании скорости от 0 до $\pm\ (0,2 \div 0,3)u_{\omega ном}$.

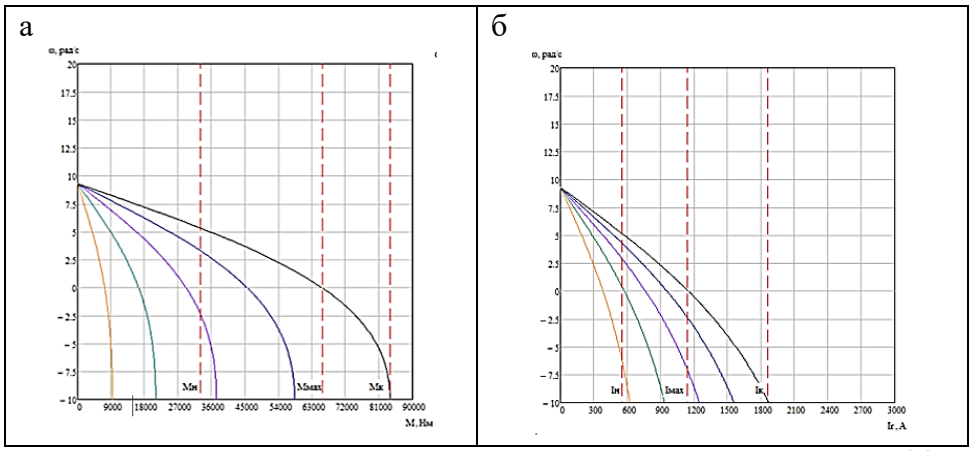


Рис. 2. Механическая (а) и электромеханическая (б) характеристики для $\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,1\ldots0,3}$ при добавочном сопротивлении $r_{d0.3}$ =0,135 Ом ($\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,3}$ – черная, $\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,25}$ – синяя, $\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,2}$ – фиолетовая, $\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,15}$ – зеленая, $\omega_0^{0,3}, E_{r\text{н}}^{0,1}$ – желтая)

Структура БРЗУ в соответствии с системой уравнений (16) представлена на рис. 3.

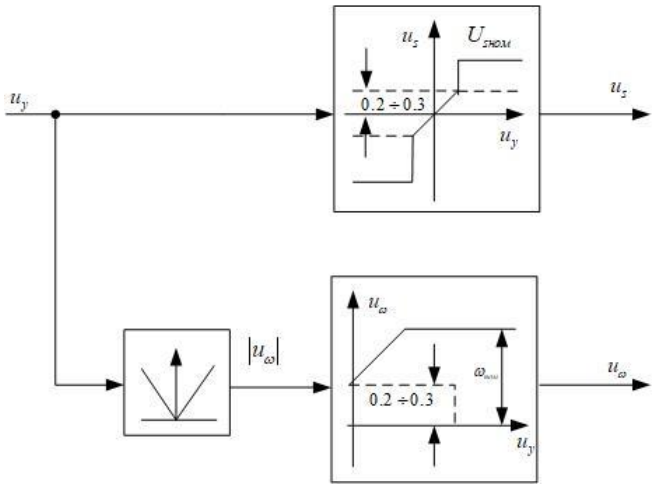


Рис. 3. Блок разделения зон управления

Выводы. Полученная модель для исследования статических характеристик АДФР позволяет исследовать не только электромеханические свойства, но и получить данные для синтеза САРС. Получена и реализована методика определения параметров системы ПЧ-АДФР на примере подъёмного двигателя ствола «Клетевой» Абаканского рудника.

На основе анализа электромеханических характеристик определены параметры двухзонного регулирования скорости АДФР.

Получено математическое описание и структура двухканального блока разделения зон управления (БРЗУ). Анализ механических характеристик позволяет определить не только условия для переключения зон управления, но и параметры регуляторов в двух контурной системе подчинённого регулирования с переменной структурой.

Список литературы

1. Исследования асинхронного электропривода с фазным ротором подъемных установок / Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А., Поползин И.Ю. Маршев Д.А // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 255-261.

2. Оптимизация характеристик электропривода переменного тока подъемных установок / Островлянчик В.Ю., Кубарев В.А., Поползин И.Ю. Маршев Д.А. // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 248-255.

3. Синтез адаптивного управления магнитным потоком возбуждения статора асинхронного двигателя с фазным ротором / Островлянчик В.Ю., Маршев Д.А., Кубарев В.А., Поползин И.Ю // Системы автоматизации AS'2022: труды всерос. науч.–практ. конф. 15-16 декабря 2022 г. – Новокузнецк, 2022. – С. 592-599

4. Электрические машины / Брускин Д.Э. [и др.]. – М. : Высшая школа, 1979. – Ч1. – 288 с.

УДК 681.518.22+681.518.5: 621.313.333

ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖУЩЕГО МОМЕНТА И МАССЫ ГРУЗА В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВУХСКИПОВОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

к.т.н. Поползин И.Ю.
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье проведен краткий обзор способов измерения момента асинхронных двигателей, предложен способ измерения момента для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, а также получены расчетные выражения, позволяющие определить массу поднимаемого груза для двускиповых подъемных установок с асинхронным электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, двухскиповая подъемная установка, шахтный подъем, масса груза, электромагнитный момент.

Для шахтных подъемных установок (ШПУ) важной задачей является определение массы поднимаемого груза. Это связано с задачами повышения энергоэффективности и рентабельности ШПУ, а также с задачами учета и контроля добычи полезного ископаемого.

Простейшим способом определения массы груза является взвешивание скипов. Однако этот способ обладает следующими существенными недостатками:

– необходимость организации весового поста с оборудованием для взвешивания;

– техническая сложность процесса взвешивания;

– высокая погрешность, обусловленная трудностью фиксации скипа в устойчивом положении для взвешивания;

– существенное замедление технологического процесса, и, как следствие, падение производительности ШПУ.

Вследствие приведенных причин в технологическом процессе шахтного подъема следует применять косвенные методы измерения массы груза, основанные на ее вычислении на основании какого-либо измеряемого параметра системы. При этом желательно, чтобы определение массы груза не было связано с дополнительными измерениями и установкой дополнительного оборудования. В свете вышеизложенного оптимальным видится вычисление массы поднимаемого груза на основе параметров электропривода ШПУ. При этом существует прямая связь массы поднимаемого груза и электромагнитного момента, развиваемого приводным двигателем, что обуславливает необходимость в идентификации момента приводного двигателя.