

БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД РОТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА**В. П. Стяжкин, О. А. Зайченко, С. И. Гаврилюк***Институт электродинамики НАН Украины*

Аннотация. Предложено применение безредукторного электропривода для ротора электромагнитного сепаратора вместо электропривода с общепромышленным высокоскоростным асинхронным двигателем и редуктором. Показан принцип действия дугостаторной машины и электромагнитного роторного сепаратора. Проведен предварительный расчет габаритных размеров дугостаторной машины для ротора электромагнитного сепаратора. Приведены типовые механические характеристики безредукторных асинхронных электродвигателей и механические характеристики дугостаторной машины. А также, показаны преимущества безредукторного электропривода и пути повышения эффективности работы в системе с ротором электромагнитного сепаратора.

Ключевые слова: электромагнитный роторный сепаратор, безредукторный электропривод, дугостаторный асинхронный электродвигатель.

Введение

В настоящее время, в связи с интеграцией Украины в международный рынок, к промышленному электрооборудованию предъявляются жесткие требования. Необходимо обеспечивать высокую эффективность работы, то есть высокие производительность и качество выходной продукции при минимальных затратах электрической энергии и минимальном негативном влиянием на питающую сеть. Кроме того, оборудование, поставляемое на горно-обогатительные комбинаты и фабрики должно быть надежным и долговечным.

За последние годы коллективом научно-технического центра магнитной сепарации «МАГНИС» под руководством Улубабова Р.С. разработан, сконструирован и серийно выпускается ряд новых высокопроизводительных роторных электромагнитных сепараторов [1], предназначенных для магнитного обогащения слабомагнитных руд и россыпей. В то же время, для обеспечения вышеупомянутых требований к электрооборудованию, Институтом электродинамики НАН Украины при участии НТФ «ТЕМС» были также разработаны: полупроводниковые регуляторы постоянного тока для питания электромагнитной системы сепаратора [2]; система оптимального управления параметрами магнитной сепарации на базе нечеткой логики [3, 4]; серия универсальных фильтров высших гармоник для электромагнитных сепараторов, обмотки намагничивания которых питаются от тиристорных управляемых регуляторов [5].

© Стяжкин В. П., Зайченко О. А.,
Гаврилюк С. И., 2019

Но остается актуальной задача повышения надежности и эффективности электропривода ротора. Вращение ротора сепаратора осуществляется от электропривода, состоящего из асинхронного электродвигателя с редуктором, который необходим для обеспечения малой скорости вращения, порядка 10 об/мин. Эксплуатация механического редуктора требует в течение срока службы электромагнитного роторного сепаратора проведения постоянных регламентных работ по смазке высокооборотных подшипников электродвигателя и редуктора зубчатых колес, которые являются самыми не надёжными элементами электропривода. Каждая ступень редуктора имеет десять главных поверхностей износа: четыре подшипника, четыре цапфы двух валов, две поверхности зацепления зубьев шестерен. Электродвигатель имеет также два подшипника и вал с двумя цапфами вращающихся с высокой скоростью. Износ этих элементов определяет долговечность и надежность электропривода ротора сепаратора, и как следствие, всей установки в целом.

Учитывая то, что установки электромагнитной сепарации используются в тяжелых промышленных условиях на горно-обогатительных комбинатах и фабриках, которые обычно расположены вдалеке от сервисных центров, проблема повышения надежности и долговечности является одной из главных задач.

Сегодня в различных технологиях, где главным фактором являются надёжность и долговечность успешно используется безредукторный электропривод, одними из которых, например, являются антенны навигационных радиолокационных станций, как наземного, так и судового размещения [6, 7]. Новые компьютерные техно-

логии позволяют проводить исследования процессов и разрабатывать новые методы расчета безредукторных электроприводов [8, 9].

Целью работы является повышение надежности и долговечности электромагнитного сепаратора роторного типа путем применения безредукторного электропривода ротора.

1. Принцип действия дугостаторной машины и электромагнитного роторного сепаратора

Получение малых скоростей ротора сепаратора возможно несколькими способами. Один из них - применение общепромышленного асинхронного электродвигателя с частотным преобразователем. Но использование высокоскоростных электродвигателей на малых скоростях, как известно, неэффективно и нецелесообразно. Второй способ - применение тихоходных, так называемых неявно многополюсных электродвигателей. И третий способ – применение безредукторного дугостаторного электропривода. В [10] было проведено сравнение тихоходного и дугостаторного электроприводов, в результате которого последний оказался более эффективным. Это связано с тем, что тихоходные машины имеют малые значения КПД, коэффициента мощности и удельной мощности на единицу активной поверхности, более сложны в изготовлении, и как результат, имеют меньшую надежность.

Индуктор дугостаторной машины представляет собой статор кругового асинхронного двигателя, разрезанного по полюсному делению [11]. На рис. 1 стрелками показано направление движения магнитного поля и радиусы кругового статора r_0 , дугостаторного r_1 , r_2 и линейного ($r_3=\infty$), причем длина статора постоянна $l_0=l_1=l_2=l_3$.

При дуговом статоре магнитное поле характеризуется относительным центральным углом:

$$\frac{M_{\kappa}}{M_{\delta}} = \frac{n_{\delta}}{n_{\kappa}} = \frac{\alpha}{2\pi} = \alpha_{\delta}, \quad (1)$$

где M_{κ} , M_{δ} – момент кругового и дугового статора, n_{κ} , n_{δ} – синхронная частота вращения поля.

Синхронная частота вращения поля круговой машины определяется выражением:

$$n_{\kappa} = \frac{f}{p_{\kappa}}, \quad (2)$$

где f – частота сети, p_{κ} – количество пар полюсов обмотки статора.

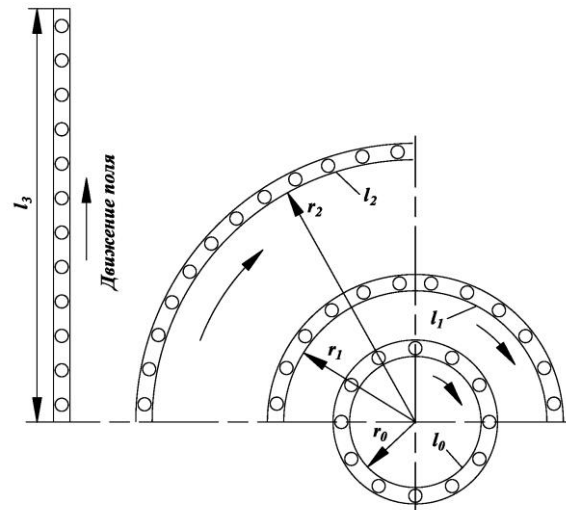


Рис. 1. Движение поля в круговом, дугостаторном и линейном асинхронном двигателе

С учетом выражений (1) и (2) для дуговой асинхронной машины получим:

$$n_{\delta} = \frac{f \cdot \alpha_{\delta}}{p_{\delta}}. \quad (3)$$

При одной и той же синхронной частоте вращения круговой и дуговой машины ($n_{\kappa}=n_{\delta}$) соотношение количества пар полюсов, исходя из формул (2) и (3) можно записать:

$$p_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot p_{\kappa}. \quad (4)$$

Значения α_{δ} могут принимать значения от 0 до 1, причем $\alpha_{\delta}=0$ – для линейного статора, $\alpha_{\delta}=1$ – для кругового статора.

Тогда, при синхронной частоте вращения ротора сепаратора 0.2 об/с и частоте сети 50 Гц количество пар полюсов круговой машины, согласно (2), будет составлять $p_{\kappa}=50/0.2=250$, а для дуговой машины с центральным углом $\alpha_{\delta}=0.1$, $p_{\delta}=250*0.1=25$.

Таким образом, в дугостаторной машине формируется низкая частота вращения при малом количестве полюсов. Такой подход позволяет получить ряд синхронных частот вращения ротора, при этом происходит “электромагнитная редукция” скорости вращения.

Ротор дугостаторной машины можно выполнить в любом удобном для встраивания в конструкцию сепаратора виде, причем его можно выполнять из любого токопроводящего материала (медь, сталь, алюминий и др.). Дуговые индукторы могут располагаться как с двух сторон сплошного ротора в виде обода, либо диска, так и с одной стороны, в зависимости от конструктивных особенностей сепаратора.

На рис.2 приведена конструктивная схема электромагнитного роторного сепаратора 6ЭРМ с безредукторным приводом. Основными элементами предлагаемого безредукторного электропривода являются диск ротора и индукторы, из которых состоит дуговой статор. Вспомогательные элементы, которые являются общими для всей сепараторной установки, это опорные подшипники и сам вал сепаратора.

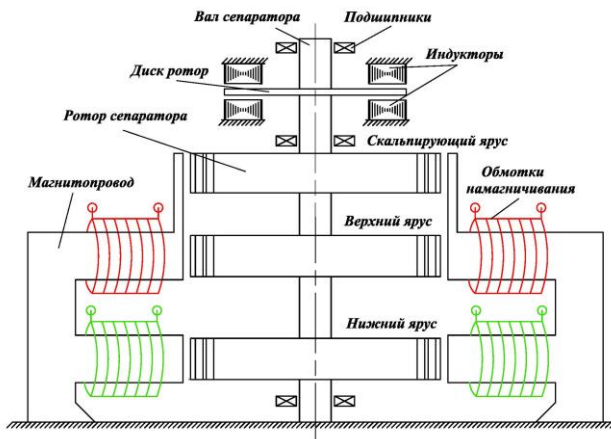


Рис. 2. Конструктивная схема электромагнитного роторного сепаратора с безредукторным приводом

Электромагнитный роторный сепаратор 6ЭРМ представляет собою установку с шестью рабочими зонами мокрого высокоградиентного обогащения, основными конструктивными элементами которого являются: магнитопровод, предназначенный для проведения магнитного потока; обмотки намагничивания для создания магнитного поля; трёхъярусный ротор с рабочими зонами.

Принцип действия сепаратора заключается в том, что при постоянном непрерывном вращении ротора, в зоне действия магнитного поля происходит загрузка слабомагнитного материала в рабочую зону, в это время немагнитные частицы просыпаются, а слабомагнитные залипают. При дальнейшем вращении ротора, когда рабочая зона выходит из зоны действия магнитного поля, залипшие слабомагнитные частицы смываются водой в отдельную фракцию. Причем количество стадий сепарации может изменяться в зависимости от технологии. Для получения концентрата с необходимым содержанием полезной составляющей, слабомагнитная руда проходит три основные стадии сепарации. На скальпирующем ярусе происходит предварительная сепарация слабым магнитным полем, таким образом происходит выделение сильномагнитных частиц. А на верхнем и нижнем ярусах сепаратора происходит непосредственно сепарация сильным магнитным

полем, таким образом отделяются слабомагнитные частицы.

В процессе высокоградиентной магнитной сепарации, привод должен обеспечить стабильное вращение массивного ротора на малых оборотах, плавные переходные процессы всей электромеханической системы в процессе пуска, остановки и изменения скорости вращения ротора. А также, необходимо обеспечить быструю реакцию электромеханической системы в аварийных ситуациях, например, резкой остановки ротора сепаратора, при попадании в воздушный зазор внешних предметов и др.

Характерной особенностью безредукторного электропривода является то, что его отдельные элементы, такие как вал, подшипники, ротор, встраиваются непосредственно в конструкцию сепаратора, отдельного электродвигателя не существует. Поэтому необходимо, исходя из заданных конструктивных размеров сепаратора и его параметров вращения, а также характеристик питающей сети, произвести предварительный расчет габаритных размеров безредукторного привода.

2. Предварительный расчет габаритных размеров безредукторного привода для ротора электромагнитного сепаратора

Линейную скорость перемещения бегущего поля вдоль индуктора можно определить из выражения [11]:

$$V_c = 2 \cdot \tau \cdot f_c, \quad (5)$$

где f_c – частота питающей сети, τ – полюсный шаг индуктора, который равен:

$$\tau = m \cdot q \cdot t_n, \quad (6)$$

где m – число фаз; q – число пазов на полюс и фазу; t_n – пазовый шаг.

С другой стороны, линейная скорость ротора сепаратора:

$$V_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot r, \quad (7)$$

где f_p – частота вращения ротора сепаратора; r – радиус установки индукторов, относительно оси вращения.

Приравнивая выражения (5) и (7) и учитывая то, что скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля на величину скольжения, получим:

$$r = \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{f_c \cdot (1-s)}{f_p}, \quad (8)$$

где s – скольжение.

Выражение (8) позволяет произвести предварительный расчет минимально габаритного размера безредукторного электропривода.

Учитывая, что для питания сепараторов на горно-обогатительных комбинатах используется общепромышленная трехфазная сеть, где количество фаз $m=3$, частота $f=50$ Гц, а также минимальное число пазов на полюс и фазу $q=1$, а технологически выполняемый пазовый шаг для силовых электрических машин [11] составляет 4 мм, полюсный шаг индуктора согласно (6) будет равен:

$$\tau = 3 \cdot 1 \cdot 4 = 12 \text{ мм}.$$

Выбрав величину скольжения равной $s=0.5$, проведем расчет минимального радиуса индуктора приняв, что частота вращения ротора сепаратора $f_p=12$ об/мин или $f_p=0.2$ с⁻¹:

$$r_{\min} = \frac{12}{\pi} \cdot \frac{50 \cdot (1-0.5)}{0.2} = 477.5 \text{ мм}.$$

Следовательно, минимальный габаритный размер безредукторного привода для электромагнитного роторного сепаратора составит $2 \cdot r_{\min} \approx 960$ мм.

3. Основные характеристики безредукторных электродвигателей

Коэффициент полезного действия безредукторного электропривода определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\Sigma}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность привода; P_{Σ} – суммарная мощность привода, которая определяется:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{мех}} + P_u \cdot n, \quad (10)$$

где P_u – мощность индуктора привода; n – количество индукторов привода.

Механические характеристики асинхронных электродвигателей с дуговым и линейным статором представляют собой зависимость между силой тяги F и скоростью V . Сила тяги линейного асинхронного двигателя определяется выражением [11]:

$$F = c \cdot p \cdot I_2 \cdot \Phi_1 \cdot \cos \psi_2, \quad (11)$$

где c – конструктивная постоянная; I_2 – ток во вторичной части; Φ_1 – магнитный поток пары полюсов индуктора, сцепляющийся со вторичной частью; ψ_2 – угол сдвига между э.д.с. и током I_2 во вторичной части.

При питании двигателя от источника неизменной частоты и напряжения магнитный поток постоянен, тогда выражение (11) принимает вид:

$$F = c_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2, \quad (12)$$

где $c_1 = c p \Phi_1$.

Таким образом, сила тяги двигателя пропорциональна току вторичной части, а ток прямо пропорционален скольжению и зависит от соотношения между активной и реактивной составляющими сопротивления вторичной части. Типовые характеристики дугостаторных асинхронных электродвигателей приведены на рис. 3. Кривая 2 соответствует двигателю, у которого активное сопротивление вторичной части достаточно велико. При изменении скорости от синхронной до нуля реактивное сопротивление остается все время меньше активного сопротивления, а при скорости, равной нулю, эти сопротивления становятся равными. Для такой машины сила тяги с уменьшением скорости будет возрастать, достигая своего максимального значения при нулевой скорости, т.е. при неподвижном роторе. Для машины, у которой реактивное сопротивление ротора преобладает над активным, нагрузочная характеристика имеет вид кривой 1, а для машины, у которой активное сопротивление ротора настолько велико, что реактивная составляющая во всех режимах работы остаётся намного меньше активной составляющей, нагрузочная характеристика имеет вид кривой 3. Такой вид имеют характеристики машин, у которых в качестве диска ротора используется ферромагнитный материал.

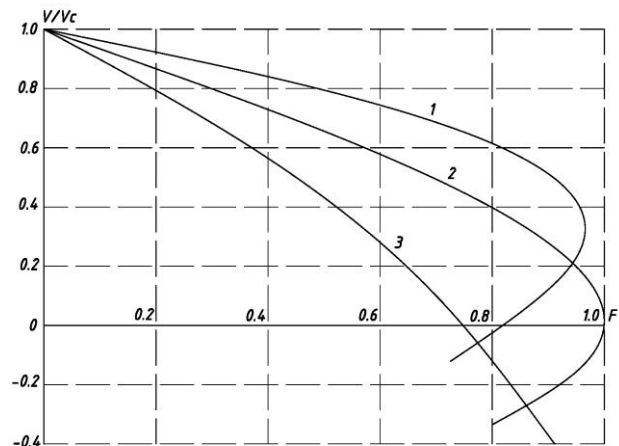


Рис.3. Типовые механические характеристики безредукторных электродвигателей

Нагрузочная характеристика безредукторного электродвигателя может быть построена с использованием схемы замещения в соответствии с выражением [10]:

$$F_k = \frac{2 \cdot F_k}{2 \cdot p} \left[\frac{2 \cdot p + 1}{s/s_k + s_k/s} - \frac{1}{(2-s)/s_k + s_k/(2-s)} \right], \quad (13)$$

где F_k , S_k – критическое значение силы и скольжения на идеальной характеристике. Учитывая то, что магнитопровод машины разомкнут и величина воздушного зазора намного больше обычного кругового асинхронного двигателя, нагрузочные характеристики дугостаторной машины имеют меньшую жесткость.

Механические характеристики дугостаторной машины, у которой диск ротора спроектирован из металла с малым сопротивлением (медь, алюминий), приведены на рис.4, жесткость характеристик составляет 10-30. Безредукторный электродвигатель состоит из четырех индукторов, которые могут подключаться по мере роста нагрузки. Кривая 1 соответствует включению всех индукторов, кривая 2 – включению двух индукторов и кривая 3 – включению одного индуктора.

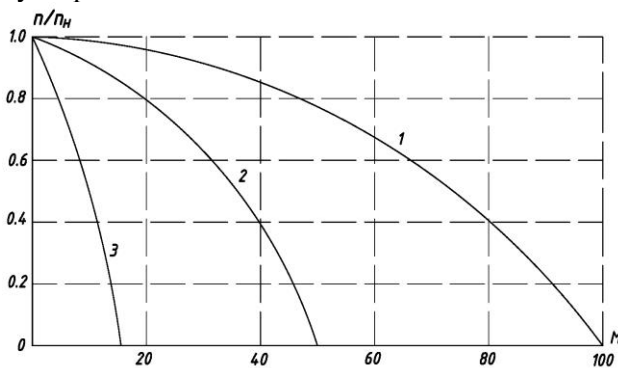


Рис.4. Механические характеристики дугостаторной машины

Недостатки дугостаторной машины (мягкость механических характеристик, низкий КПД), а также непосредственное воздействие ротора сепаратора на режимы работы безредукторного электропривода, можно компенсировать в той или иной степени, разработкой системы автоматизированного управления, например, как было предложено авторами для безредукторного электропривода навигационной судовой радиолокационной станции [12].

Выводы

Благодаря применению безредукторного электропривода для ротора электромагнитного сепаратора исключается вся кинематическая цепь зубчатых передач и высокооборотный электродвигатель, а остаются только два тихоходных подшипника, в которых вращается ротор. Так как скорость вращения ротора невысокая, порядка 10 об/мин, то срок службы таких подшипников бу-

дет достаточно велик. Показатели надежности дугостаторных машин аналогичны обычным трансформаторам. Из конструкции привода исключаются все трущиеся и, следовательно, изнашивающиеся узлы и в ней не остается элементов и устройств, требующих регламентного обслуживания в процессе эксплуатации.

Таким образом, разработка дугостаторного электропривода для ротора электромагнитного сепаратора дает возможность получить качественно новые показатели надежности и долговечности. Для удаленно расположенных горно-обогатительных комбинатов, где происходит добыча ценных и дорогостоящих концентратов, вопросы повышения надежности и срока безотказной работы являются самыми важными.

Список использованной литературы

1. Улубабов, Р. С., В.И. Кармазин и развитие в Украине современного сепараторостроения для магнитного обогащения слабомангнитных руд [Текст] / Р. С. Улубабов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 48(89). – С. 13–23.
2. Волков, И. В., Стяжкин, В. П., Зайченко, О. А., Электромагнитные процессы в сепараторах роторного типа при питании обмоток намагничивания от регулируемого источника постоянного тока [Текст] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, О. А. Зайченко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч.1. – С. 71–76.
3. Волков, И. В., Стяжкин, В. П., Зайченко, О. А., Нечеткий логический контроллер качества концентрата сепаратора БЭРМ при питании от регуляторов постоянного тока [Текст] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, О. А. Зайченко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Спец. вып. – 2014. – Т.1. – №9. – С.84–91.
4. Стяжкин, В. П., Зайченко, О. А., Пропорционально-интегральный нечеткий логический контроллер тока обмоток намагничивания сепаратора БЭРМ [Электронный ресурс] / В. П. Стяжкин, О. А. Зайченко // Технічна електродинаміка. – 2015. – №2. – С.38–44. Режим доступа: http://techned.org.ua/2015_2/st5.pdf
5. Волков, И. В., Стяжкин, В. П., Зайченко, О. А., Расчет параметров универсального фильтра гармоник системы тиристорный регулятор тока – электромагнитный сепаратор роторного типа [Электронный ресурс] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, О. А. Зайченко // *Техническая електродинаміка*, 3, 2017. – С. 29–34. Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.029>

6. Стяжкін, В. П., Теряєв, В. І., Гаврилюк, С. І., Застосування методів частотного керування для дугостаторних електроприводів антен суднової РЛС [Электронный ресурс] / В. П. Стяжкін, В. І. Теряєв, С. І. Гаврилюк // *Вісник НТУ «ХПИ»*, 27, 2017. – С. 411–414. Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34122>

7. Стяжкін, В. П., Теряєв, В. І., Гаврилюк, С. І., Співвідношення швидкостей та моментів у дводвигунному електроприводі з безредукторним електромеханічним диференціалом [Электронный ресурс] / В. П. Стяжкін, В. І. Теряєв, С. І. Гаврилюк // *Технічна електродинаміка*, 5, 2018. – С. 80–83. Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.080>

8. Карлов О. М., Кондратенко І. П., Кришук Р. С., Ращепкін А. П., Метод розрахунку усередненого магнітного поля по висоті повітряного проміжку торцевого дугостаторного асинхронного двигуна [Текст] / О. М. Карлов, І. П. Кондратенко, Р. С. Кришук, А. П. Ращепкін // *Електромеханічні і енергосберігаючі системи*. – 2014. – №3. – С. 68–76.

9. Кондратенко І. П., Кришук Р. С., Ращепкін А. П., Електромагнітні процеси в торцевій дугостаторній асинхронній машині з двошаровою обмоткою [Электронный ресурс] / І. П. Кондратенко, Р. С. Кришук, А. П. Ращепкін // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №6. – С. 34–40. Режим доступа: http://techned.org.ua/2015_6/st7.pdf

10. Стеклов, В. К., Милько, Р. Э., Системы управления с безредукторным приводом / В. К. Стеклов, Р. Э. Милько [Текст]. – К.: Техника, 1983. – 120 с.

11. Фридкин, П. А., Безредукторный дугостаторный электропривод / П. А. Фридкин [Текст]. – Л.: Энергия, 1970. – 138 с.

12. Стяжкін, В. П., Гаврилюк, С. І., Автоматизована система керування безредукторними електроприводами навігаційної суднової РЛС [Электронный ресурс] / В. П. Стяжкін, С. І. Гаврилюк // *Електроніка та зв'язок*, 4, 2016. – С. 20–23. Режим доступа: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.4.81914>

References

1. Ulubabov, R. S., (2012). “V.I. Karmazin and the development in Ukraine of modern separator construction for magnetic enrichment of low-magnetic ores” [“V.I. Karmazin i razvitie v Ukraine sovremennogo separatorostroenia dlia magnitnogo obogaschenia slabomagnitnyh rud”], *Zbagachennia korysnyh kopalyn*, No 48(89), P. 13–23.

2. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A., (2010). Electromagnet processes in rotor type separators with magnetization windings supplied by regulated dc current source [Elektromagnitnye procesy v separatorah rotornogo tipa pri pitanii obmotok namagnichivania ot reguliruemogo istochnika postoiannogo toka] *Tekhnichna elektrodynamika. Temat. vyp. “Sylova elektronika ta energoefektyvnist”*, No 1, P. 71–76.

3. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A., (2014). Fuzzy logic controller of the concentrates quality for the 6ERM separator, the magnetization windings of which supplied by dc regulators [Nechetkij logicheskij kontroller kachestva koncentrata separatora 6ERM pri pitanii ot regulatorov postoiannogo toka] *Energoberezhenie, Energetika, Energoaudit*, Vol.1, No 9. - P. 84–91.

4. Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A., (2015). Proportional-integral fuzzy logic controller of the magnetization windings current of the 6ERM separator [Proporcionalno-integralnij nechetkij logicheskij kontroller toka obmotok namagnichivania separatora 6ERM] *Tekhnichna elektrodynamika*, No 2., P. 38–44. Available at: http://techned.org.ua/2015_2/st5.pdf

5. Volkov, I. V., Stiazhkin, V. P., Zaichenko, O. A., (2017). Calculation of parameters of a universal harmonic filter of system: thyristor current regulator - rotar type electromagnetic separator [Raschet parametrov universalnogo filtra garmonik toka sistemy tiristornyj regulator toka – elektromagnitnyj separator rotornogo tipa]. *Tekhnichna elektrodynamika*, No 3., P. 29–35. Available at: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.029>

6. Stiazhkin, V. P., Teriaev, V. I., Gavryluk, S. I., (2017). Application of frequency control methods for arc-stator electric drives of ship radar antennas [Zastosuvannia metodiv chastotnogo keruvannia dlia dugostatornyh elektopryvodiv anten sudnovoi RLS], *Visnyk NTU “HPI”*, No 27, P. 411–414. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34122>

7. Stiazhkin, V. P., Teriaev, V. I., Gavryluk, S. I., (2018). The ratio of velocities and moments in a two-engined electric motor with a gearless electromechanical differential [Spivvidnoshenia shvydkostej ta momentiv u dvodvygunnomu elektopryvodi z bezreduktornym elektromehanichnym dyferencialom], *Tekhnichna elektrodynamika*, No 5, P. 80–83. Available at: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.080>

8. Karlov O. M., Kondratenko I. P., Krischuk R. S., Raschepkin A. P., (2014). Method of calculating the averaged magnetic field over the height of the air gap of the end arc-stator asynchronous motor [Metod rozrahunku userednenogo magnitnogo polia

po vysoti povitriannogo promizhku torcevoغو dugostatornogo asynhronnogo dvyguna] *Elektromehanichni ta energosberigajuchi systemy*, No 3, P. 68–76.

9. Kondratenko I. P., Krishchuk R. S., Raschepkin A. P., (2015). Electromagnetic processes in the arc-stator asynchronous motor with double winding [Elektromagnitni procesy v torcevij dugostatornij asynhronij mashuni z dvosharovoju obmotkoju] *Tekhnichna elektrodynamika*, No 6, P. 34–40. Available at: http://techmed.org.ua/2015_6/st7.pdf

10. Steklov, V. K., Milko, R. E., (1983). Gearless electro drives control systems [Sistemy uprav-

lenia s bezreduktornym elektroprivodom], *Tehnika*, 120 p.

11. Fridkin, P. A., (1970). Gearless arc-core drive [Bezreduktornyj dugostatornyj elektroprivod], *Energia*, 138 p.

12. Stiazhkin, V. P., Gavryluk, S. I., (2016). Automated control system of the gearless electro drives for navigational marine radar [Avtomatyzovana sistema keruvania bezreduktornymy elektroprivodamy navigacijnoj sudnovoj RLS], *Elektronika ta zviazok*, No 4, P. 20–23. Available at: <https://doi.org/10.20535/2312-1807.2016.21.4.81914>

GEARLESS ELECTRIC DRIVE OF ROTOR OF ELECTROMAGNETIC SEPARATOR

V. P. Stiazhkin, O. A. Zaichenko, S. I. Gavryluk

Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine

Abstract. *The aim of the work is to increase the reliability and durability of the electromagnetic rotor type separator due to application of a gearless electric drive for rotor. In the process of high-gradient magnetic separation, the drive must ensure stable rotation of the massive rotor at low speeds, smooth transients of the entire electromechanical system during the starting, stopping and changing of the rotor speed. And also, it is necessary to provide a quick response of the electromechanical system in emergency situations. A characteristic feature of a gearless electric drive is that its individual elements, such as the shaft, bearings, rotor, are built directly into the construction of the separator, the motor itself does not exist separately. The article presents the basic expressions for arc-mounted electric motor and its mechanical characteristics. The advantages of a gearless electric drive and ways of increasing the efficiency of work in a system with a rotor of an electromagnetic separator are illustrated. Thanks to the use of a gearless electric drive for the rotor of an electromagnetic separator, the entire kinematic chain of gears and a high-speed electric motor are eliminated, and only two low-speed bearings remain in which the rotor rotates. Since the rotation speed of the rotor is low, about 10 rpm, the service life of such bearings will be quite large. Reliability indicators of arc-forming machines are similar to conventional transformers. From the design of the drive, all rubbing and, consequently, wearing parts are eliminated and there are no elements and devices in it that require routine maintenance during operation. Thus, the development of an arc-core electric drive for the rotor of an electromagnetic separator makes it possible to obtain qualitatively new indicators of reliability and durability. For remote mining and processing plants, where valuable and expensive concentrates are mined, the issues of improving reliability and uptime are the most important.*

Keywords: *electromagnetic rotor type separator, gearless electric drive, arc-induction asynchronous electric motor.*

БЕЗРЕДУКТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД РОТОРА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

В. П. Стяжкін, О. А. Зайченко, С. І. Гаврилюк

Інститут електродинаміки НАН України

Анотація. *Запропоновано застосування безредукторного електроприводу для ротора електромагнітного сепаратора замість електроприводу з загальнопромисловим високошвидкісним асинхронним двигуном і редуктором з метою підвищення його надійності та довговічності. Показано принцип дії та основні співвідношення дугостаторної машини. Приведена конструктивна схема електромагнітного роторного сепаратора вал якого безпосередньо з'єднаний з диском ротором дугостаторного двигуна. Таким чином, ротор сепаратора та дугостаторної машини являється єдиним цілим механізмом без передаточних ланок. Отримано вираз для попереднього розрахунку мінімальних габаритних розмірів безредукторного електропривода. За отриманим виразом, розраховано мініма-*

льний розмір дугостаторного двигуна, який буде обертати ротор сепаратора з номінальною частотою. Показані основні енергетичні характеристики та побудовані типові механічні характеристики безредукторних електродвигунів, а також приведений вираз для побудови навантажувальних характеристик. Для дугостаторної машини з чотирма індукторами побудовані механічні характеристики для випадків роботи з різною ввімкненою кількістю індукторів. Таким чином, завдяки застосуванню безредукторного електропривода для ротора електромагнітного сепаратора виключається весь кінематичний ланцюг зубчатих передач та високошвидкісний двигун, а залишаються тільки два тихоходні підшипники в яких обертається ротор. Так як швидкість обертання ротора невисока, то термін служби таких підшипників буде досить великий. Показники надійності дугостаторних машин аналогічні звичайним трансформаторів. З конструкції приводу виключаються деталі що труться і, отже, зношуються, в ній майже не залишається елементів і пристроїв, що вимагають регламентного обслуговування в процесі експлуатації. Таким чином, розробка дугостаторного електропривода для ротора електромагнітного сепаратора дає можливість отримати якісно нові показники надійності і довговічності. Для віддалено розташованих гірничо-збагачувальних комбінатів, де відбувається видобуток цінних і дорогих концентратів, питання підвищення надійності та терміну безвідмовної роботи є найважливішими.

Ключові слова: електромагнітний роторний сепаратор, безредукторний електропривод, дугостаторний асинхронний електродвигун.

Получено 03.09.2019



Стяжкін Віталій Павлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела преобразования и стабилизации электромагнитных процессов института электродинамики НАН Украины. Просп. Победы, 56, Киев, Украина, E-mail: tems@ukr.net, тел. +38-066-733-37-01

Vitalii Stiazhkin, Ph.D, senior researcher of the department of conversion and stabilization of electromagnetic processes, institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. Peremogy ave., 56, Kyiv, Ukraine, E-mail: tems@ukr.net, tel. +38-066-733-37-01

ORCID ID: 0000-0003-0602-1112



Зайченко Олег Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела преобразования и стабилизации электромагнитных процессов института электродинамики НАН Украины. Просп. Победы, 56, Киев, Украина, E-mail: oleg_tems@ukr.net, тел. +38-050-131-97-52

Oleg Zaichenko, Ph.D, researcher of the department of conversion and stabilization of electromagnetic processes, institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. Peremogy ave., 56, Kyiv, Ukraine, E-mail: tems@ukr.net, tel. +38-050-131-97-52

ORCID ID: 0000-0001-9311-3378



Гаврилюк Сергей Иванович, младший научный сотрудник отдела преобразования и стабилизации электромагнитных процессов института электродинамики НАН Украины. Просп. Победы, 56, Киев, Украина, E-mail: serggtm@gmail.com, тел. +38-068-355-70-42

Sergii Gavryluk, junior researcher of the department of conversion and stabilization of electromagnetic processes, institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. Peremogy ave., 56, Kyiv, Ukraine, E-mail: tems@ukr.net, tel. +38-068-355-70-42

ORCID ID: 0000-0002-7345-8405