

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАРОВЫХ РУДОРАЗМОЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ

*Черный А.П., д.т.н., проф., Калинов А.П., к.т.н., доц., Мамчур Д.Г., ассист.,
Лаико Ю.В., к.т.н., доц., Воробейчик О.С., инж.*

Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг Полтавской обл., Украина

E-mail: apch@kdu.edu.ua

Богатырев К.Н., замест. главного энергетика

ОАО «Полтавский горно-обогатительный комбинат»

ул. Строителей, 16, 39802, г. Комсомольск Полтавской обл., Украина

Рассмотрены режимы прямого асинхронного пуска синхронного двигателя. Предложен метод расчета зависимостей момента и частоты вращения ротора при пуске. Исследованы показатели качества электрической энергии. Определены значения снижения срока службы двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель, пусковые режимы, показатели качества электрической энергии.

Введение. Вопросы пуска и режимов работы синхронных двигателей (СД) исследованы достаточно полно. Известно, что пусковые режимы приводят к ускоренному выходу СД из строя по причине динамических нагрузок на механические соединения и подшипниковые узлы, большие пусковые токи, перегрев обмоток статора и ротора и пр. Подробно исследованы режимы работы СД при несимметрии, несинусоидальности питающего напряжения, колебаниях напряжения и частоты сети. Однако в каждом конкретном случае необходимо найти те причины, действие которых на СД наибольшие. Экспериментальные исследования являются теми мероприятиями, которые позволяют проанализировать работу СД в данном технологическом процессе и предложить наиболее эффективные меры повышения надежности эксплуатации и создания энергосберегающих режимов.

Цель работы. Анализ экспериментальных исследований режимов работы синхронных двигателей электроприводов шаровых рудоразмольных мельниц.

Материал и результаты исследований. Измельчение руды на обогатительной фабрике Полтавского горно-обогатительного комбината осуществляется при помощи шаровых рудоразмольных мельниц МШЦ 4500 × 6000 приводными явнополюсными низкоскоростными СД (табл. 1).

Таблица 1 – Паспортные данные СДС 19-56-40 УХЛ4

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВА/кВт	2930/2500
Номинальное напряжение, В	6000
Номинальный ток, А	281
Частота вращения, об / мин	150
Номинальный коэффициент мощности	0,9
Номинальный КПД	0,951

Номинальное напряжение возбуждения, В	162
Номинальный ток возбуждения, А	225

По различным причинам в течение года выходит из строя 2-3 двигателя. Капитальный ремонт такого СД может составлять 50-250 тыс. грн. В отдельных случаях ремонт проводят таким образом, что вышедшие из строя секции обмотки просто вырезаются, а СД остается в эксплуатации. Поэтому для оценки ресурса работы двигателей, а также установления их надежности совместно с ОГЭ ОАО «Полтавский ГОК» проведены экспериментальные исследования режимов прямого асинхронного пуска и работы СД в установившемся режиме с технологической нагрузкой [7].

Для проведения экспериментальных исследований на кафедре систем автоматического управления и электропривода Кременчугского государственного университета имени Михаила Остроградского разработана мобильная компьютеризированная измерительная система, позволяющая в реальном времени выполнить измерение до 32 электрических сигналов и произвести их запись [9]. Результатом измерений процесса прямого асинхронного пуска СД, втягивания его в синхронизм и работы под нагрузкой являются токи фаз статора и межфазные напряжения, огибающие которых показаны на рис. 1. Ток статора, отражающий процессы преобразования энергии в СД, является лишь частью информации, которая необходима для анализа. Как правило, режимы работы анализируют на основе зависимостей момента и угловой частоты вращения, однако соответствующие регистрирующие датчики в электроприводе мельницы отсутствуют. Поэтому расчет момента и частоты вращения необходимо произвести дополнительно.

Расчет электромагнитного момента и угловой

частоты произведен согласно алгоритму расчета электромагнитных, электромеханических и энергетических характеристик двигателей переменного тока на основании экспериментальных токов и напряжений [10]. Трехфазную мгновенную мощность можно выразить через межфазные напряжения и фазные токи статора:

$$p(t) = \frac{1}{3} \left(\begin{aligned} &(i_A(t) - i_B(t))u_{AB}(t) + \\ &+ (i_B(t) - i_C(t))u_{BC}(t) + \\ &+ (i_C(t) - i_A(t))u_{CA}(t) \end{aligned} \right)$$

Без учета потерь в стали СД его электромагнитный момент можно представить как:

$$m(t) = \frac{p(t) - \Delta p_{i_1}(t)}{w_0},$$

где w_0 - угловая частота вращения идеального холостого хода;

$\Delta p_{i_1}(t) = i_A^2(t)R_A + i_B^2(t)R_B + i_C^2(t)R_C$ - потери в меди статора.

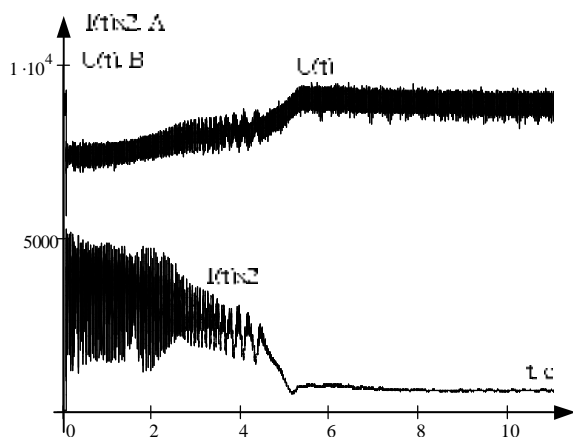


Рисунок 1 – Огибающие межфазных напряжений и токов фаз статора СД при его асинхронном пуске и втягивании в синхронизм

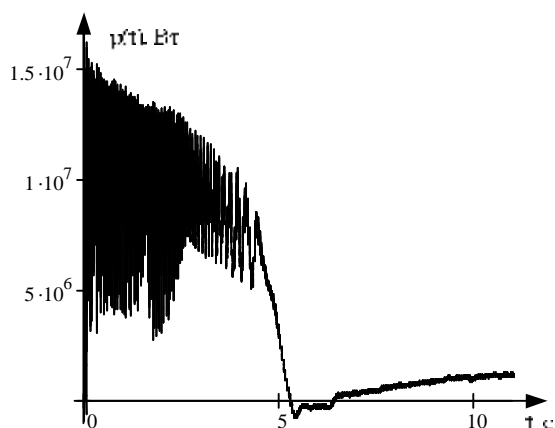


Рисунок 2 – Трехфазная мгновенная мощность СД при его асинхронном пуске и втягивании в синхронизм

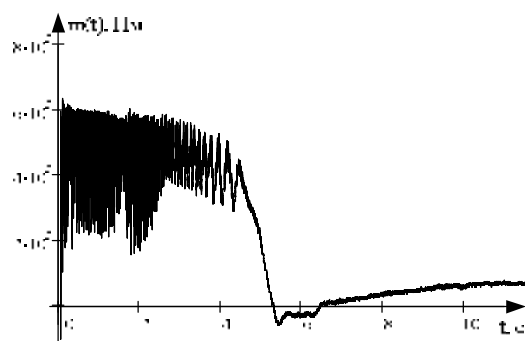


Рисунок 3 – Расчетная временная зависимость электромагнитного момента $m(t)$ СД при его асинхронном пуске и втягивании в синхронизм

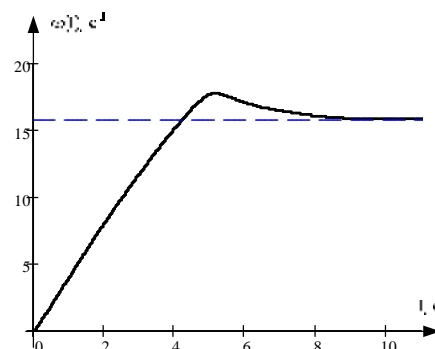


Рисунок 4 – Расчетная временная зависимость угловой частоты вращения ротора $\omega(t)$ СД при его асинхронном пуске и втягивании в синхронизм

Характер временных характеристик момента $m(t)$ и угловой частоты вращения ротора $\omega(t)$ СД, на первый взгляд, отличается от приводимых в технической литературе [2-3]. Однако следует учесть, что зависимости получены с учетом реальной формы и характера изменения питающего напряжения, ограниченной мощности системы энергоснабжения, когда пуск сопровождается понижением напряжения. Например, согласно полученным экспериментальным данным, снижение напряжения при пуске составляет 14%.

Следует отметить пульсирующий характер момента в установившемся режиме (рис 5).

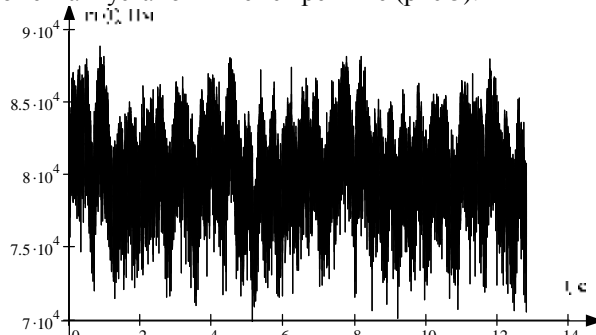


Рисунок 5 – Мгновенные значения электромагнитного момента СД $m(t)$ в установившемся режиме

Из рис. 5 и спектра электромагнитного момента (рис. 6) видно, что временная зависимость момента содержит ряд основных гармоник с частотами 50, 100, 300 и 600 Гц. Наличие составляющей электромагнитного момента с частотой 100 Гц обусловлено пофазной несимметрией питающего напряжения или параметрической несимметрией обмоток двигателя [4-5], а составляющие 300 Гц и 600 Гц – несинусоидальностью питающего напряжения. Низкочастотные составляющие спектра вызваны либо технологическими особенностями измельчения руды, либо некачественностями механических креплений к рабочему механизму или (и) основанию. Среднеквадратичное значение высших гармоник электромагнитного момента по отношению к номинальному моменту СД составляет 2,5%, что говорит об общем удовлетворительном состоянии электромеханической системы с исследуемым СД.

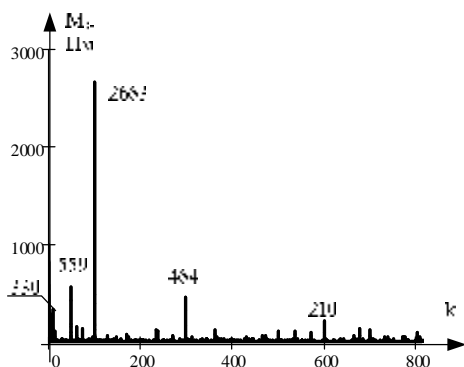


Рисунок 6 – Спектр электромагнитного момента СД

Ранее [7] было установлено, что с 95%-ой вероятностью параметры обмоток СД симметричны, но существует несимметрия и несинусоидальность питающего двигателя напряжения (рис. 7).

Параметры питающего напряжения рассчитаем согласно [8] (табл. 1) с использованием методов спектрального анализа (рис. 8):

$$U_1 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB} + \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2 \right]};$$

– напряжение обратной последовательности:

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2 \right]}.$$

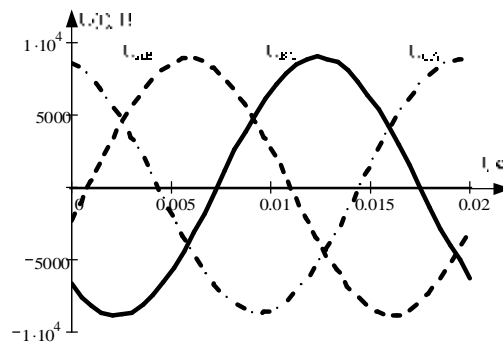


Рисунок 7 – Временные зависимости межфазных напряжений на зажимах статора СД

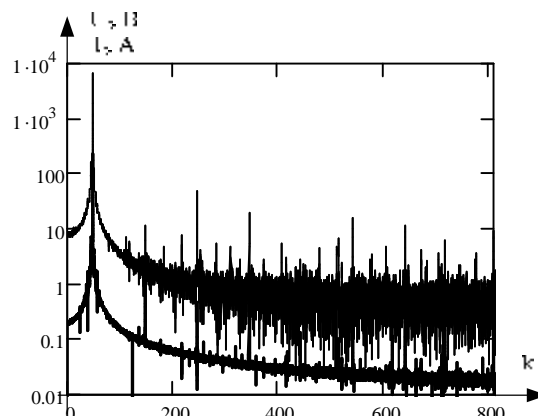


Рисунок 8 – Спектральный состав межфазных напряжений и фазных токов СД

– коэффициент несимметрии $k_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100$;

– коэффициент несинусоидальности

$$k_{nc} = 100 \sqrt{\sum_{v=2}^{40} \frac{U_v^2}{U_n^2}};$$

– напряжение прямой последовательности:

Таблица 1 – Параметры питающего напряжения

$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	k_{2U}	$k_{нс}$
6325	6185	6325	6231	93,7	1,503	2,41

В соответствии с [8] значение коэффициента несинусоидальности k_v определяется в зависимости от уровня напряжения электрической сети. Для напряжений 6-20 кВ значения k_v составляют: 4% - номинальное, 8% - максимальное. Согласно [8], допустимо нормальное - 2 % и максимальное - 4 % значение коэффициента несимметрии k_{2U} . Полученное значение $k_{2U} = 1,503 < 2$ является нормальным. Однако авторы [4] указывают, что наличие на зажимах СД даже небольшой несимметрии напряжений, вследствие низкого сопротивления обратной последовательности, приводит к значительному увеличению потерь активной мощности, что, в свою очередь, вызывает дополнительный нагрев обмоток. Превышение температуры приводит к снижению срока службы изоляции обмоток и, собственно, двигателя в целом.

Кратность снижения срока службы СД с параметрами питающего напряжения (табл. 1) и обусловленную несимметрией напряжений, на основании [4-5], можно определить по формуле:

$$\gamma = e^{k_{см} k_{иск}^2} = 0,887,$$

где $k_{см} = b\tau_{пов.н} P_n / \Delta P_{в.н} \approx 780$ при $\tau_{в.н} = 90^\circ C$, $\tau_{пов.н}$ - перегрев поверхности полюса ротора при номинальной и симметричной нагрузках; $\Delta P_{в.н}$ - номинальные потери обмотки возбуждения; P_n - номинальная мощность машины; b - постоянный коэффициент для данного вида изоляции. Коэффициент $k_{иск}$ определим из [4] как:

$$k_{иск} = \sqrt{k'_{см} k_{2U}^2},$$

где с учетом коэффициента $k'_{см} = \Delta P_{д.н.} / \Delta P_n z_{2см}^2 \approx 0,681$; $\Delta P_{д.н.}$ - дополнительные потери при токе обратной последовательности, равном номинальному; $z_{2см}$ - модуль сопротивления обратной последовательности, отн. ед.; ΔP_n - номинальные потери.

Выводы. Полученные результаты показывают, что имеется возможность расчета временных характеристик момента и угловой частоты вращения ротора СД на основе экспериментально измеренных напряжений и токов фаз двигателя без датчика скорости. Вычисленное значение частоты вращения, преобразованное в угол поворота, может использоваться в системах ПЧ-СД для контроля углового положения ротора. Рассчитанные

показатели качества питающего напряжения позволяют оценить срок службы СД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов Г. А. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): [учебное пособие для вузов]. / Г. А. Сипайлов., А. В. Лоос. – М.: Высш. школа, 1980. – 176 с.
2. Глебов И. А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин / И. А. Глебов, Н. В. Крутяков. – Л: Наука. Ленингр. отд-ние, 1988. – 197 с.
3. Павлюк К. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей / К. Павлюк, С. Беднарк. – М: Энергия, 271 с.
4. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
5. Черный А. П. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография / [Черный А. П., Родькин Д. И., Калинов А. П., Воробейчик О. С.]. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
6. Черный А. П. Модифицированный метод определения момента асинхронного двигателя по экспериментальным данным / А. П. Черный, А. Н. Волощенко, А. И. Гладырь // Вісник Національного технічного університету. “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – Вип. 11. – С. 127-132.
7. Чорний О. П. Статистична оцінка стану потужних синхронних двигунів у процесі їх роботи / [Чорний О. П., Сидоренко В. М., Воробейчик О. С., Богатирьов К. М.]. – Електромеханічні і енергозберігаючі системи // Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 2/2010 (10). – С. 50-52.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. Издательство стандартов. – 1998.
9. Калинов А. П. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий / А. П. Калинов, А. И. Гладырь // Щоквартальний науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». - Вип. 1. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 14-19.
10. Калинов А. П. Энергетические характеристики асинхронных двигателей в динамических режимах работы / Калинов А. П., Мамчур Д. Г., Чумачёва А. В. // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (техн. науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. - Вип. №1 (11). - С. 104-110.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ КУЛЬОВИХ РУДОРАЗМОЛЬНИХ МЛИНІВ

*Чорний О.П., д.т.н., проф., Калинов А.П., к.т.н., доц., Мамчур Д.Г., асист.,
Лашко Ю.В., к.т.н., доц., Воробейчик О.С., інж.*

*Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук Полтавської обл., Україна*

E-mail: apch@kdu.edu.ua

Богатирьов К.Н., зам. головного енергетика

ОАО «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

вул. Будівників, 16, 39802, м. Комсомольськ Полтавської обл., Україна

Розглянуті режими прямого асинхронного пуску синхронного двигуна. Запропонований метод розрахунку залежностей моменту і частоти обертання ротора при пуску. Досліджені показники якості електричної енергії. Визначені значення зниження терміну служби двигуна.

Ключові слова: синхронний двигун, пускові режими, показники якості електричної енергії.

EXPERIMENTAL RESEARCHES AND THE ANALYSIS STARTING REGIME OF THE SYNCHRONOUS ENGINES OF BALL MILLS

*Chorniy O., Doc. of Sc. (Tech.), Prof., Kalynov A., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Mamchur D., assist.,
Lashko Y., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Vorobejchuk O., eng.*

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskiy State University

Pershotravneva St., 20, 39600, Kremenchug, Ukraine

E-mail: apch@kdu.edu.ua

Bogatyrev K., the assistant to the main thing power

Open Society «Poltava mountain-concentrating industrial complex»

Stroiteley St., 16, 39802, Komsomolsk, Ukraine

The regimes of the direct asynchronous starting of synchronous machines engine are considered. A method of computation of dependences of moment and rotor rotation frequency at starting is offered. Indexes of quality of electric energy are explored. Values of decline of engine service date are definite.

Key words: synchronous machines, starting regime, indexes of quality of electric energy.