

УДК621.313.323

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ГРУППОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. К. ТытюкГосударственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: dinalt2006@gmail.com**А. П. Черный, Е. В. Бурдильная, В. В. Кузьмин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: alekseii.chornyi@gmail.com**К. Н. Богатырев**Открытое акционерное общество «Полтавский горно-обогатительный комбинат»
ул. Строителей, 16, г. Горишние Плавни, 39802, Украина.

Современные горно-металлургические комплексы оборудуются группой одинаковых технологических агрегатов с мощным синхронным электроприводом. Запуск групповых синхронных электроприводов, объединенных питающей сетью соизмеримой мощности, обладает дополнительными особенностями. Для облегчения запуска мощных синхронных двигателей в групповом электроприводе применяют перевозбуждение ранее запущенных синхронных двигателей для повышения уровня напряжения в питающей сети. Целью работы является определение оптимального уровня перевозбуждения ранее запущенного синхронного двигателя. Для исследования группового синхронного электропривода использовано математическое моделирование группового синхронного электропривода на основе известных уравнений Парка–Горева. Для оценки процесса управляемого запуска синхронного двигателя предложено использовать показатель эффективности процесса запуска. Для определения полного фазного тока группового синхронного электропривода было выполнено преобразование токов синхронных двигателей в ортогональной системе координат $d, q, 0$ в фазные координаты. Модель группового синхронного электропривода дополнена подсистемой определения полного фазного тока и падения напряжения в питающей линии. Получены зависимости износа электромеханического оборудования, его энергопотребления и показателя эффективности процесса запуска от управляющего воздействия. На основе применения показателя эффективности процесса запуска решена задача определения оптимального уровня перевозбуждения работающего синхронного двигателя для управления запуском последующих двигателей в групповом электроприводе. Впервые установлено, что показатель эффективности процесса запуска синхронного двигателя в составе группового электропривода имеет экстремальный характер. Применение предложенного метода оптимизации процесса запуска синхронного двигателя в групповом электроприводе позволит повысить технико-экономические показатели работы горно-металлургических комплексов в промышленности Украины.

Ключевые слова: управляемый запуск, групповой синхронный электропривод, перевозбуждение, показатель эффективности управляемого запуска.

ОСОБЛИВОСТІ КЕРОВАНОГО ЗАПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА У СКЛАДІ ГРУПОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В. К. ТитюкДержавний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»
вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: dinalt2006@gmail.com**О. П. Чорний, Є. В. Бурдільна, В. В. Кузьмін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: alekseii.chornyi@gmail.com**К. М. Богатирьов**Відкрите акціонерне товариство «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»
вул. Будівельників, 16, м. Горішні Плавні, 39802, Україна.

Сучасні гірничо-металургійні комплекси обладнуються групою однакових технологічних агрегатів із потужним синхронним електроприводом. Запуск групових синхронних електроприводів, що об'єднані мережею живлення сумірною потужності, має додаткові особливості. Для полегшення запуску потужних синхронних двигунів у груповому електроприводі застосовують перезбудження раніше запущених синхронних двигунів для підвищення рівня напруги в мережі живлення. Метою роботи є визначення оптимального рівня перезбудження раніше запущеного синхронного двигуна. Для дослідження групового синхронного електроприводу використано математичне моделювання групового синхронного електроприводу на основі відомих рівнянь Парка–Горева. Для оцінки процесу керованого запуску синхронних двигунів запропоновано використовувати показник ефективності процесу запуску. Для визначення повного фазного струму групового синхронного електроприводу було виконано перетворення струмів синхронних двигунів в ортогональній системі координат $d, q, 0$ у фазні координати. Модель групового синхронного електроприводу доповнена підсистемою визначення повного фазного струму й падіння напруги в лінії живлення. Отримано залежності зносу електромеханічного обладнання, його енергоспоживання та показника ефективності процесу запуску від керуючого впливу. На основі застосу-

вання показника ефективності процесу запуску вирішена задача визначення оптимального рівня перезбудження працюючого синхронного двигуна для управління запуском наступних двигунів у груповому електроприводі. Уперше встановлено, що показник ефективності процесу запуску синхронного двигуна у складі групового електроприводу має екстремальний характер. Застосування запропонованого методу оптимізації процесу запуску синхронних двигунів у груповому електроприводі дозволить підвищити техніко-економічні показники роботи гірничо-металургійних комплексів у промисловості України.

Ключові слова: керований запуск, груповий синхронний електропривод, перезбудження, показник ефективності керованого запуску

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные энергоёмкие производства горно-металлургического комплекса достаточно часто оборудуются группой одинаковых технологических агрегатов с мощным синхронным электроприводом. На обогатительной фабрике Полтавского горно-обогатительного комбината (ГОК) каждая секция мельниц содержит четыре агрегата с приводными синхронными двигателями (СД) мощностью 2500 кВт, аналогичная секция Ингулецкого ГОКа содержит восемь шаровых мельниц. Крупные компрессорные станции также, как правило, оборудованы несколькими, параллельно работающими компрессорами с приводными СД до 3500 кВт. Прямой асинхронный пуск СД является одним из тяжелейших эксплуатационных режимов, а запуск группы СД, объединённых общей питающей сетью соизмеримой мощности, обладает дополнительными особенностями. Широкая распространённость групп мощных синхронных электроприводов на предприятиях горно-металлургического комплекса, их значительной энергоёмкости, широкого спектра влияния таких электроприводов на работу всего узла системы электроснабжения, к которому подключена группа СД, обуславливает важность и актуальность проблемы оптимизации процесса запуска СД в таких условиях.

Известные исследования и публикации

Процесс запуска СД в условиях реальных сетей сопровождается кратковременным локальным снижением качества питающего напряжения в узле электроснабжения. Числовые значения параметров напряжения зависят как от параметров сети электроснабжения, так и от величины технологической нагрузки рабочей машины [1]. Пусковые провалы напряжения, вызванные процессами запуска мощных СД, обуславливает возникновение дополнительных экономических рисков, обусловленных недоставкой продукции при нарушениях работы, вызванных пусковыми провалами напряжения.

Для повышения надёжности процесса запуска мощных групповых СД в [2] предложено использовать регулировочные возможности ранее запущенных СД для повышения уровня напряжения в питающей сети путем увеличения напряжения возбуждения ранее запущенных СД. Однако в [2] не рассмотрен вопрос о выборе оптимального значения управляющего воздействия – уровня перевозбуждения СД. Решение этой проблемы связано, в первую очередь, с формированием показателя качества процесса запуска.

Известно, что пусковые режимы приводят к ускоренному выходу СД из строя по таким причинам, как динамические нагрузки на подшипниковые узлы, высокие пусковые токи, перегрев обмоток статора и ротора, уменьшение срока службы изоляции и т.д. [3].

На протяжении многих лет проблема пуска мощных электрических машин является предметом многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых. Разработаны алгоритмы, подходы к решению проблемы запуска, схемные решения [1, 4–7], которые применяются в промышленности. Однако единого решения проблемы пуска и управления процессом запуска не существует.

В [8] для управления процессом запуска электромеханических систем предложен критерий эффективности процесса запуска, однако здесь критерий рассмотрен на примере электропривода постоянного тока, применимость его к мощным электроприводам переменного тока не изучена.

Таким образом, управление процессом запуска групповых мощных СД требует дальнейшего развития теории электромеханических систем управляемого пуска.

Целью работы является разработка критерия качества процесса запуска мощного СД, обоснование рационального (оптимального) уровня перевозбуждения СД при запуске последующих СД.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для математического моделирования процессов запуска СД используем известные уравнения Парка–Горева в ортогональной системе координат d, q, θ . Записанные относительно переменных состояния потокосцеплений, скорости вращения и угла поворота ротора, уравнения будут иметь вид [9]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= u_d - R_s i_d + \omega \Psi_q; & \frac{d\Psi_q}{dt} &= u_q - R_s i_q + \omega \Psi_d; \\ \frac{d\Psi_{ed}}{dt} &= -R_{ed} i_{ed}; & \frac{d\Psi_{eq}}{dt} &= -R_{eq} i_{eq}; \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= u_f - R_f i_f; & \frac{d\omega}{dt} &= p \frac{T_e - T_l}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega; & T_e &= \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d); \\ u_d &= U_{max} \cos(\omega_c t - \gamma); & u_q &= U_{max} \sin(\omega_c t - \gamma), \end{aligned} \quad (1)$$

где Ψ_d, Ψ_q – потокосцепления статора СД по осям d и q соответственно; Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения СД; Ψ_{ed}, Ψ_{eq} – потокосцепления демпферных контуров СД по осям d и q соответственно; u_d, u_q, u_f – составляющие питающего напряжения

статора по осям d и q соответственно и напряжение возбуждения СД; ω , ω_c – угловая частота вращения ротора и синхронная частота соответственно.

Определенной сложностью при моделировании работы групповых электроприводов с СД является определение суммарного тока статора от нескольких двигателей, т.к. статорные токи отдельных двигателей представлены в собственных системах координат, вращающихся с различными угловыми скоростями, и не могут быть сложены алгебраически. Также необходимо раздельно для каждого моделируемого двигателя формировать питающее напряжение статорных обмоток по осям d и q . Указанные проблемы могут быть преодолены путем преобразования токов отдельных двигателей в трехфазную систему координат, их сложения, вычисления падения напряжения в питающей линии от полного тока всех работающих двигателей и последующим вычислением преобразованного напряжения питания для каждого СД отдельно с учетом угла поворота его ротора.

В ходе процесса запуска СД используются различные виды входных продуктов. Перечислим основные из них: для реализации запуска используется электроэнергия, а сам процесс запуска сопровождается повышенным энергопотреблением; процесс запуска сопровождается ускоренным износом как самого СД, так и технологического оборудования.

Так как для регулирования напряжения используется управление возбуждением ранее запущенных двигателей, то при вычислении затрат электроэнергии необходимо учесть изменение статорных токов СД при регулировании их возбуждения. Также, как указывалось выше, процесс запуска вызывает дополнительные экономические риски, вызванные влиянием пусковых процессов на качество питающего напряжения.

Поскольку рассматриваемые входные продукты процесса запуска электромеханической системы (ЭМС) рассматриваются в их количественном выражении, то их значения нельзя объединять между собой в рамках общих математических выражений из-за проблемы размерности.

Для преодоления проблемы размерности используем агрегирование входных и выходных продуктов с применением сопоставимых единиц измерения. Для технических систем в качестве таких единиц измерения целесообразно использовать стоимостные оценки как экономически обоснованную разновидность метода экспертных оценок. При использовании этого подхода векторы продуктов ЭМС преобразуются в сигналы стоимостных оценок и суммируются в одномерные сигналы суммарной стоимостной оценки продуктов.

Для оценки качества процесса запуска СД используем обоснованный в [8] показатель эффективности процесса запуска:

$$kE = \text{sign}(pe - re - fe) \frac{(pe - re - fe)^2}{(pe)(re)(te^2)}, \quad (2)$$

где re – стоимостная оценка входных продуктов операции; pe – стоимостная оценка выходных продуктов операции; te – длительность запуска; fe – штрафная функция экономических рисков, вызванных запуском СД.

Поскольку в теоретической электротехнике однозначно определены только понятия полной и активной мощности электрической цепи, то энергопотребление в ходе запуска СД предлагается оценивать по величине полной мощности, т.к. неактивные составляющие полной мощности, такие как мощность искажения, обусловленная действием высших гармоник, также оказывают негативное воздействие на ЭМС.

Примем допущение, что износ запускаемого СД определяется значением тока статора и угловой скорости СД. Тогда для определения стоимостной оценки эксплуатационного износа запускаемого СД за период времени $t_1 \leq t \leq t_2$ используем обоснованное в [8] выражение

$$C = \alpha \int_{t_1}^{t_2} [\gamma f_i(i_{*a}) + (1-\gamma) f_\omega(\omega_*)] dt, \quad (3)$$

где α – стоимостная оценка единицы износа оборудования, которую несложно вычислить как отношение общей стоимости электромеханического оборудования к его номинальному ресурсу; γ_i – весовой коэффициент влияния i -й переменной состояния на общий износ СД; $f_i(i_{*a})$, $f_\omega(\omega_*)$ – функциональные зависимости ускорения износа оборудования по каналам тока и скорости в зависимости от относительного значения соответствующих переменных состояния. Необходимо отметить трудности реализации этой модели: отсутствуют сведения о характере функциональных зависимостей $f_i(i_{*a})$ и $f_\omega(\omega_*)$, определяющие зависимость износа оборудования при отклонении тока якоря и угловой скорости от их номинальных значений.

В качестве среды разработки математической модели по представленным выше уравнениям (1)–(3) был применен MATLAB/Simulink. Разработанная математическая модель исследования запуска СД представлена на рис. 1.

В данной модели использовался синхронный двигатель типа СТМ–3500–2, номинальная мощность 3500 кВт, номинальное напряжение 6000 В, номинальная частота вращения 3000 об/мин.

Начальная скорость СД SM0 устанавливалась равной 300 с^{-1} ; в момент времени $t = 2 \text{ с}$ на обмотку возбуждения подается напряжение возбуждения. После завершения синхронизации СД SM0 с сетью в момент времени $t = 6 \text{ с}$ подается команда на включение двигателя SM1. В зависимости от величины напряжения возбуждения двигателя SM0 уровень питающего напряжения будет изменяться, что приводит к изменению длительности, пусковых токов и других параметров в процессе запуска двигателя SM1.

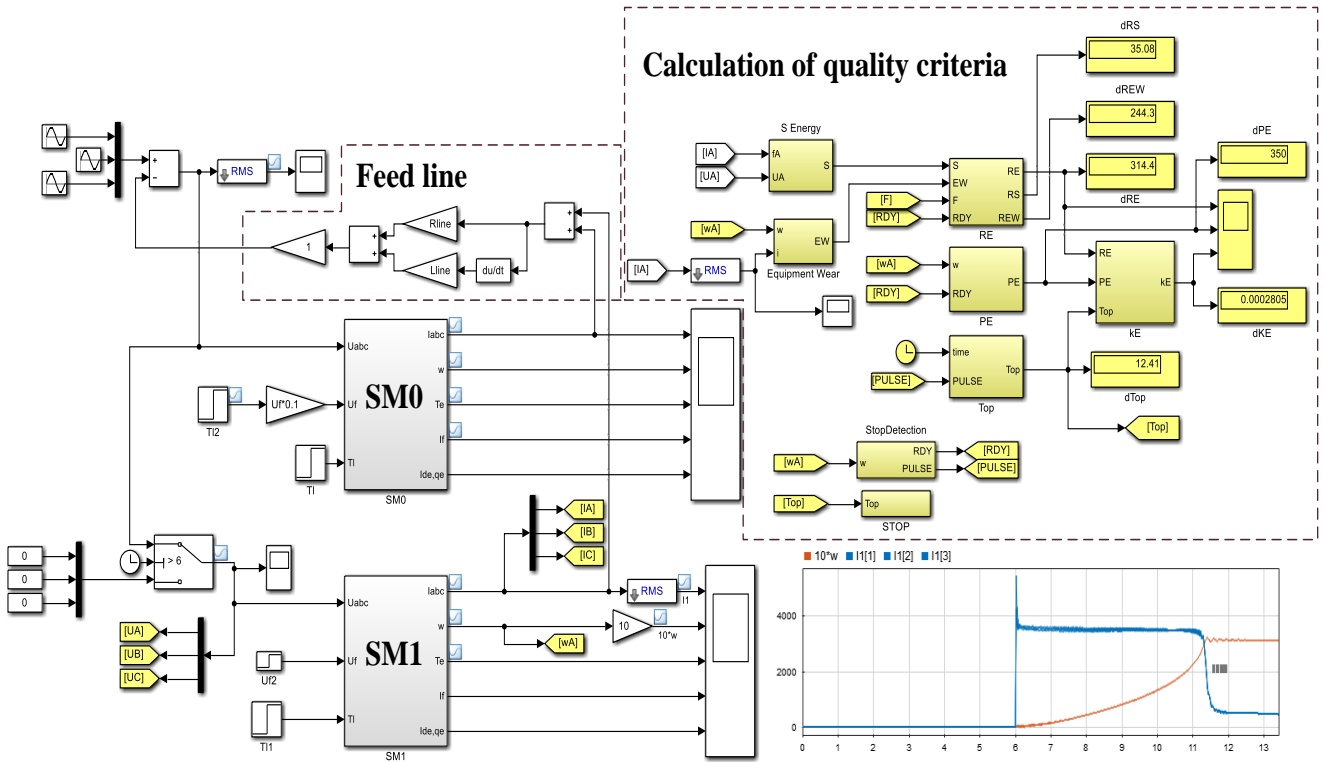


Рисунок 1 – Реализация математической модели группового синхронного электропривода в Matlab/Simulink

На рис. 2 приведены временные диаграммы напряжения питания, угловой скорости и действующего значения тока статора для двух граничных значений напряжения возбуждения двигателя SM0.

Приведенные на рис. 2 графики процессов запуска СД SM1 по своему характеру совпадают с общетеоретическими представлениями о работе синхронного двигателя и подтверждают адекватность разработанной математической модели.

Увеличение напряжения возбуждения двигателя SM0 приводит к росту напряжения на общей шине питания двигателей, что, в свою очередь, обуславливает увеличение пускового тока и сокращение времени запуска двигателя SM1, а также сопровождается изменением тока статора двигателя SM0 в соответствии с его U-образной характеристикой.

При определении показателя эффективности процесса запуска по выражению (2) наиболее малоисследованным вопросом является определение структуры и параметров функции дополнительных экономических рисков fe . Штрафная функция экономических рисков предприятия fe определяется структурой и параметрами производственного окружения изучаемой системы запуска.

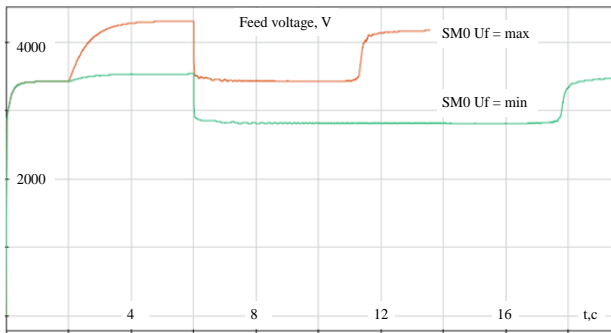
А priori можно утверждать, что для случая запуска СД значение fe должно изменяться в направлении, противоположном изменению остаточного напряжения на общих шинах питания: при увеличении напряжения питания функция fe уменьшается, и наоборот.

Функция экономических рисков fe в общем случае имеет выраженный вероятностный характер, ее значение обусловлено, в основном, технологическим окружением и мало зависит от показателей процесса запуска. Поэтому показатель эффективности процесса запуска также необходимо рассматривать как случайную величину. Для анализа показателя эффективности процесса запуска необходимо решить частные задачи определения фактического закона распределения для переменной fe и числовых характеристик этого распределения, а также более общую задачу определения вида и числовых характеристик статистического распределения показателя эффективности процесса запуска. Данная задача может быть решена с привлечением методов математической статистики для определения числовых характеристик функций случайных величин. Общий метод решения поставленной задачи состоит в отыскании закона распределения функции случайного аргумента по известному закону распределения аргумента.

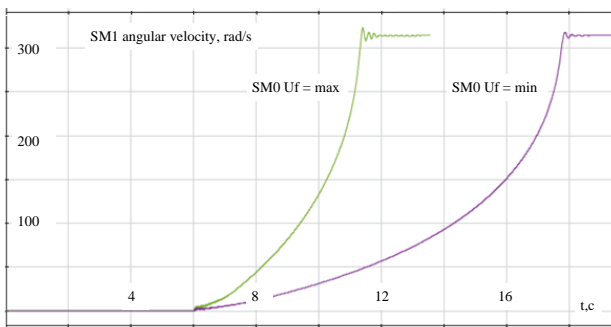
Ввиду отсутствия экспериментальных данных о величине и характере распределения функции экономических рисков fe , в настоящем исследовании была принята экспоненциальная аппроксимация этой функции от напряжения возбуждения двигателя SM0 в соответствии с выражением

$$fe(u_f) = F_0 e^{-\frac{u_f}{\tau}}, \quad (4)$$

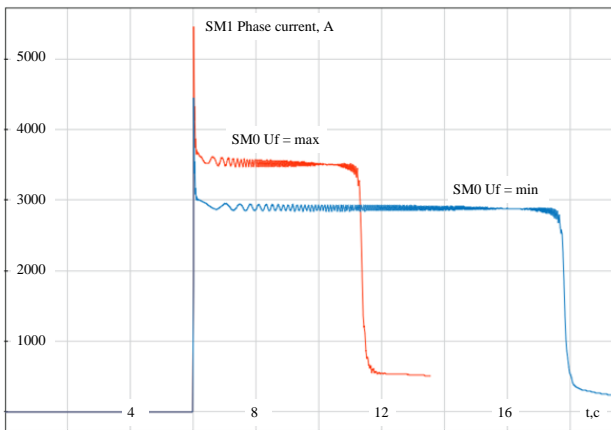
т.к. с ростом напряжения возбуждения двигателя SM0 остаточное напряжение на общих шинах питания растёт (рис. 2), а вероятность нарушений в узле электроснабжения снижается.



а)



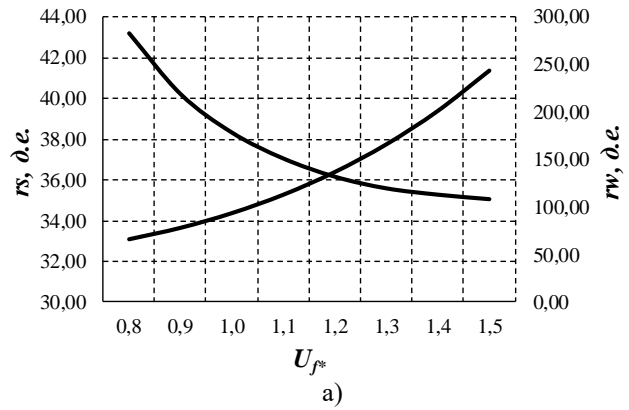
б)



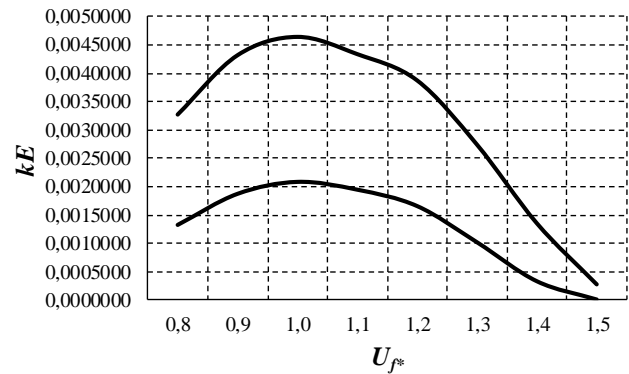
в)

Рисунок 2 – Временные диаграммы запуска синхронного двигателя SM1 при различных уровнях перевозбуждения двигателя SM0: а) напряжение питающей сети; б) угловая скорость двигателя SM1; в) пусковой ток статора двигателя SM1

С помощью математической модели (рис. 1) были выполнены расчеты зависимостей стоимостных оценок потребленной электроэнергии, износа электромеханического оборудования и показателя эффективности процесса запуска двигателя SM1 при управлении напряжением возбуждения двигателя SM0. Полученные результаты приведены на рис. 3.



а)



б)

Рисунок 3 – Расчетные зависимости, полученные при моделировании запуска двигателя SM1 при управлении напряжением возбуждения двигателя SM0: а) составляющих ресурсопотребления процесса запуска СД – износ оборудования r_w и энергопотребление r_s ; б) зависимость показателя эффективности процесса запуска с учетом и без учета функции экономических рисков fe

Увеличение уровня возбуждения СД SM0 сопровождается увеличением напряжения на общих шинах питания и возрастает в диапазоне от 3450 до 4150 В. При возрастании сетевого напряжения запуск СД SM1 происходит более интенсивно, с большими пусковыми токами, время запуска при этом снижается. Увеличение сетевого напряжения обеспечивает повышение интенсивности пусковых процессов и сопровождается снижением энергопотребления за период запуска, а также ростом износа электромеханического оборудования. Показатель эффективности процесса запуска, рассчитанный в соответствии с выражением (2), имеет явно выраженный экстремальный характер. При выбранной модели штрафной функции дополнительное экономическое распределение экстремума показателя эффективности на оси абсцисс практически не изменяется.

ВЫВОДЫ. Задача определения оптимального уровня перевозбуждения работающего синхронного двигателя для управления запуском последующих двигателей в групповом электроприводе может быть

успешно решена путем применения показателя эффективности процесса запуска. С помощью разработанной математической модели группового синхронного электропривода показано, что зависимости энергопотребления, износа электромеханического оборудования и показателя эффективности процесса запуска по характеру совпадают с выполненными ранее исследованиями для других типов электроприводов. В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть особенности процесса запуска СД при управлении возбуждением двух и более предварительно запущенных СД. Эта задача может быть особенно важна при несовпадающих мощностях предварительно запущенных СД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хребтова О.А., Сергієнко С.А. Электропривод механизма подъема затвора зливної греблі з керуванням процесом рушання // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Науковий журнал. – Вінниця, 2017. – Вип. 2 (131). – С. 56–62.
2. Черный А.П., Богатырев К.Н., Романов А.Ю., Бердаи А. Особенности математического моделирования процесса последовательного пуска синхронных двигателей электроприводов секции шаровых мельниц // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (3). – С. 50–52.
3. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
4. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
5. Zhang Q. et al. A simple asynchronous motor soft start method and its application // Automation (YAC), 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of IEEE, 2017. – PP. 1074–1078.
6. Ноженко В.Ю., Чорний О.П., Родькін Д.Й., Ченчевой В.В. Керування пуском зарезонансної вібраційної машини з дебалансними віброзбуджувачами // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – Вип. 7 (1249). – С. 384–387.
7. Bhavin Trivedi, Jaykishan Raval, Jay Desai, Kamlesh Sonwane. Soft Start of Induction Motor Using TRIAC Switching. – IJEDR, 2017. – Iss. 5 (2). – International Journal of Engineering Development and Research. – PP. 1635–1639.
8. Тытюк В.К. Влияние износа электромеханического оборудования на показатели процесса запуска // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Вып. 6/2 (78). – С. 23–29.
9. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование синхронной машины с многоконтурным ротором в фазных координатах // Технічна електродинаміка. – К., 2015. – Вип. 1. – С. 51–58.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

FEATURES OF CONTROLLED START OF SYNCHRONOUS MOTOR AS PART OF GROUP ELECTRIC DRIVE

V. Tytiuk

State Institution of Higher Education "Kryvyi Rih National University"
ul. Vitaliya Matusyevycha, 11, Kryvoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: dinalt2006@gmail.com

O. Chornyi, E. Burdilna, V. Kuzmin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: alekseii.chornyi@gmail.com

K. Bogatyrev

Open Joint Stock Company "Poltava Mining and Processing Plant"
ul. Stroiteley, 16, Gorishnie Plavni, 39802, Ukraine.

Modern mining and metallurgical complexes are equipped with a group of identical technological units with a powerful synchronous electric drive. The starting of group synchronous electric drives, which are connected by an electric grid with commensurate power, has additional features. To facilitate the starting of powerful synchronous motors in a group electric drive, overexcitation of previously started synchronous motors is used to increase the voltage level in the electrical grid. **Purpose.** The determination of the optimum level of overexcitation of previously started synchronous motors. **Methodology.** To research the group synchronous electric drive, mathematical modeling of the group synchronous electric drive is used on the basis of the Park–Gorev equations. To assess the process of controlled starting of synchronous motors, it is suggested to use the efficiency indicator of the starting process. **Results.** To determine the total phase current of the group synchronous electric drive, the currents of synchronous motors in the orthogonal coordinate system $d, q, 0$ were converted to phase coordinates. The model of a group synchronous electric drive is supplemented with a subsystem for determining the total phase current and the voltage drop in the power line. Dependencies of wear of electromechanical equipment, its power consumption and the efficiency index of the start-up process on the control effect are obtained. **Originality.** On the basis of the application of the starting process efficiency index, the task of determining the optimum level of overexcitation of an operating synchronous motors for controlling the starting of subsequent motors in a group electric drive is solved. For the first time it was established that the efficiency index of the start-

ing process of the synchronous motor in the group electric drive is extreme. **Practical value.** The application of the proposed method for optimizing the start-up of synchronous motors in a group electric drive will improve the technical and economic indicators of mining and metallurgical complexes in the industry of Ukraine. References 10, figures 3.

Key words: controlled starting, group synchronous electric drive, overexcitation, the indicator of the efficiency of the controlled starting.

REFERENCES

1. Khrebtova, O.A. and Sergiienko, S.A. (2017), "Electric gate lifting mechanism to drain the dam with controlled process of starting", *Visnik Vinnitskogo Politekhnicznego Institutu. Naukovyi zhurnal*, Vol. 2, no. 131, pp. 56–62. (in Ukrainian)
2. Chornyi, O.P., Bogatyryov, K.N., Romanov, A.Yu. and Berdai, A. (2015), "Peculiarities of mathematical modeling of consecutive starts synchronous motors of electric drive of ball mill section", *Problemy energoresursozbezpechennya v elektrotekhnichnikh sistemakh. Nauka, osvita i praktika*, Vol. 1, no. 3, pp. 50–52. (in Russian)
3. Vazhnov, A.I. (1980), *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in alternating current machines], Energiya, Leningrad. (in Russian)
4. Chornyi, O.P., Gladyr, A.I., Osadchuk, Yu.G. et al. (2006), *Puskovye sistemy nereguliruemyykh elektroprivodov, monografiya* [Starting systems of unregulated electric drives, monograph], *ChP Shcherbatykh A.V.*, Kremenchug. (in Russian)
5. Zhang, Q. et al. (2017), "A simple asynchronous motor soft start method and its application", *Automation (YAC), 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of IEEE*, pp. 1074–1078.
6. Nozhenko, V.Yu., Chornyi, O.P., Rodkin, D.Y. and Chenchevoy, V.V. (2017), "Controlling the start of a resonant vibration machine with unbalanced exciters", *Visnik Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu "Kharkivskiy Politekhnicniy Institut"*, Kharkiv, Vol. 7, no. 1249, pp. 384–387. (in Ukrainian)
7. Bhavin, T., Jaykishan, R., Jay, D. and Kamlesh, S. (2017), "Soft Start of Induction Motor Using TRIAC Switching", *International Journal of Engineering Development and Research*, IJEDR, Vol. 5, no. 2, pp. 1635–1639.
8. Tytiuk, V.K. (2015), "Effect of electromechanical equipment wear on startup process indicators", *Eastern-European journal of enterprise technologies*, Vol. 6/2, no. 78, pp. 23–29. (in Russian)
9. Syvokobylenko, V.F. (2015), "Mathematical modeling of synchronous machin with multicontour rotor in phase coordinates", *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 1, pp. 51–58. (in Russian)
10. Venttsel, E.S. (1999), *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory], Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 03.09.2017.