

УДК 621.313.323

**Г.Г. Пивняк, В.И. Кириченко, В.В. Кириченко,
Р.А. Боровик, В.В. Барабан, Л.П. Вареник**

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КРУПНЫМИ СИНХРОННЫМИ ПРИВОДАМИ В ГМК

Обоснована целесообразность снижения установленной мощности приводного синхронного двигателя барабанной мельницы с 2,5 до 2 МВт. для улучшения качества пусковых режимов предложены программное управление возбудителем и регулирование разрядного сопротивления.

Ключевые слова: электропривод, синхронный двигатель, пуск, система возбуждения, разрядное сопротивление.

Основным потребителем электрической энергии на крупных предприятиях горно-металлургического комплекса (ГМК) являются синхронные двигатели приводов барабанных мельниц. Из-за трудностей точного теоретического определения полезной мощности мельниц, неодинаковых условий их использования на конкретных предприятиях, сложностей обеспечения успешных запуска и синхронизации при слабых сетях, дискретности шкалы номинальных мощностей изготавливаемых двигателей они нередко работают в нерациональных режимах. В том числе из-за обычно выбираемого значительного запаса мощности привода, который может достигать 20–30 %, а иногда и больше. Например, для привода мельницы МШРГУ-4500 × × 6000 используют синхронный двигатель СДС 19-56-40 УХЛ4 с номинальной мощностью 2,5 МВт, хотя для установившегося режима этой мельницы достаточно мощности всего 2 МВт. То есть, запас установленной мощности привода составляет 20% с соответствующим увеличением

его цены, капитальных и эксплуатационных затрат.

Известны результаты предварительной оценки возможностей решения задачи снижения стоимости привода [1]. На этом этапе исследования был принят ряд общепринятых допущений, в том числе не учитывались насыщение магнитных цепей и изменение активных сопротивлений обмоток и разрядного сопротивления в цепи возбуждения вследствие их нагрева во время пуска. При расчетах за исходные брались заводские данные сопротивлений обмоток при температуре 15 °С. Учитывались возможности подачи возбуждения при скольжении 2 %, использования повышенных разрядного сопротивления и коэффициента форсирования напряжения возбудителя. Исследования проводились для двигателей, длительное время находившихся в эксплуатации. То есть, не учитывались последние изменения в расчетных данных двигателей, которые изготавливаются сейчас.

Целью работы является уточненное обоснование возможности приме-

нения для мельницы МШРГУ-4500 × × 6000 в качестве приводного синхронного двигателя СДС 19-46-40 УХЛ4 с номинальной мощностью 2 МВт вместо используемого для нее СДС 19-56-40 УХЛ4 мощностью 2,5 МВт. Как и ранее, принято, что номинальные скорости вращения этих синхронных двигателей одинаковы (150 об/мин) и, следовательно, передаточное число открытой зубчатой передачи сохранится, а капитальные и эксплуатационные затраты — снизятся. Очевидно, что такая замена приводного двигателя требует гарантированного обеспечения надежности работы предложенного привода в асинхронных режимах пуска, синхронизации и ресинхронизации. Привод должен быть надежным и при работе мельницы в установившемся режиме с паспортной нагрузкой и производительностью. Кроме того, электромеханические свойства нового привода должны обеспечивать успешный запуск мельницы при «слежавшейся» загрузке барабана (тяжелый пуск) после длительного простоя мельницы, в том числе в условиях слабых сетей, снижение динамических нагрузок привода в переходных режимах по сравнению с используемым приводом мощностью 2,5 МВт.

Для решения поставленных задач нами предлагаются усовершенствования системы управления синхронным двигателем, а для слабых сетей — и конструкции двигателя. При этом для повышения достоверности получаемых результатов при исследовании динамики пусковых режимов мельницы принят ряд уточнений параметров математической модели синхронного двигателя. В частности, в модели двигателя учтен нагрев его обмоток и насыщение магнитных цепей. В алго-

ритмах программного управления возбудителем учтены активное сопротивление обмотки статора, динамика его нагрева и изменения в процессе пуска. Как и динамика нагрева и изменения активных сопротивлений обмотки возбуждения и пусковой. Из-за малого времени пуска процессы нагрева обмоток рассмотрены как адиабатические, то есть не учитывалось охлаждение вследствие вентиляции двигателя [2]. Кроме того, коэффициент форсирования напряжения возбудителя принят 1,75 вместо завышенного 2,5 предложенного в работе [1]. Также учтены паспортные данные последних моделей двигателей и допускаемый по ТУ уровень перенапряжений на зажимах обмотки возбуждения. Последнее учтено при обосновании допустимой величины разрядного сопротивления при его регулировании в процессе пуска привода. Для доказательства эффективности предлагаемых усовершенствований при исследованиях выбран режим с наиболее тяжелыми условиями, когда пуск происходит при «слежавшейся» загрузке барабана после длительного простоя мельницы без ее «выхаживания». Учтено, что неподвижный сегмент загрузки при пуске мельницы поднимается до угла поворота $\pi/2$ с сохранением неизменной формы сечения, после чего начинается его обрушение и угол подъема загрузки становится таким, как и в установившемся режиме работы мельницы ($\theta_p \approx 0,69$ рад). Во время подъема слежавшейся загрузки статический момент привода изменяется синусоидально в функции угла поворота, причем максимальный момент внутримельничной загрузки при этом составляет $M_{c\max} = 1,47 M_H$ [3].

Для получения сравнительных оценок авторами работы сначала

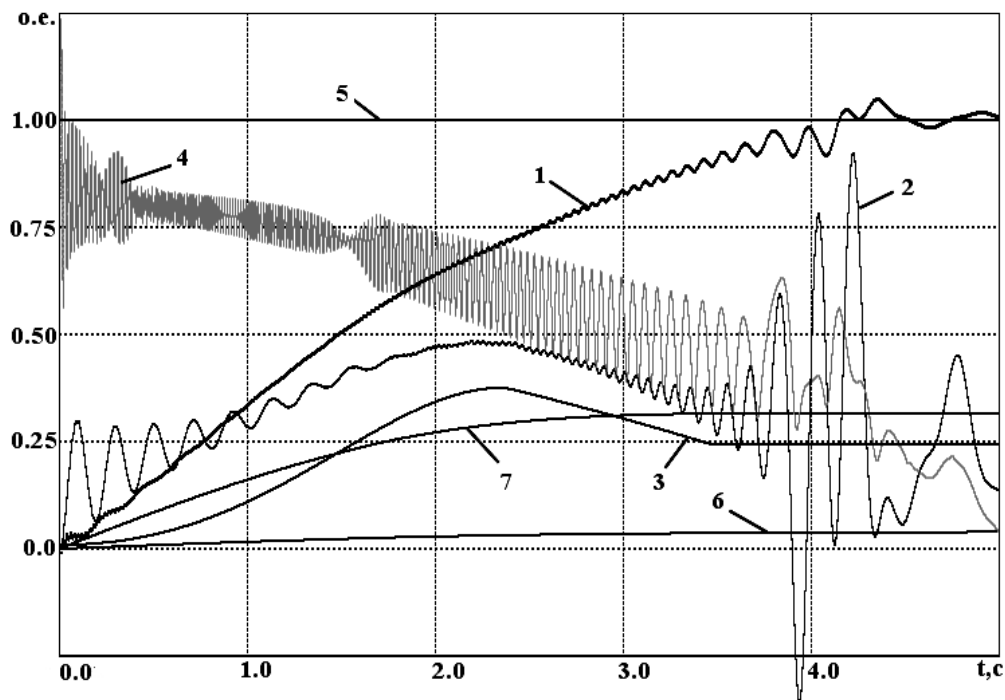


Рис. 1. Пуск мельницы МШРГУ-4500×6000 с двигателем СДС-19-56-40УХЛ4 мощностью 2,5 МВт

исследован прямой пуск привода мельницы МШРГУ-4500 × 6000 с двигателем мощностью 2,5 МВт, то есть при номинальном напряжении статора (рис. 1).

На этом рисунке (и всех последующих) приняты одинаковые цифровые обозначения зависимостей, а именно: 1 — скорость двигателя в долях от синхронной; 2 — 0,002 упругого момента в кН·м; 3 — 0,002 статического момента в кН·м; 4 — 0,0005 тока статора в А; 5 — напряжение статора в долях номинального; 6 — 0,005 перегрева обмотки статора в °С; 7 — 0,005 перегрева пусковой обмотки в °С.

Из рис. 1 видно что продолжительность пуска двигателя мощностью 2,5 МВт при пусковом токе

$I_n = 1640$ А и разрядном сопротивлении 3,2 Ом (заводские данные) составила $t_n = 4,15$ с при коэффициенте динамичности (отношение максимального упругого момента к установившемуся значению статического момента) $k_d = 3,8$. Таким образом, прямой пуск двигателя мощностью 2,5 МВт сопровождается достаточно высокими динамическими нагрузками зубчатых элементов привода. Особенность привода и в том, что в нем происходит размыкание зазоров зубчатого зацепления, что увеличивает его износ и снижает надежность. Что касается перегрева пусковой обмотки и статора, то для них он составил около 66 и 9 °С соответственно.

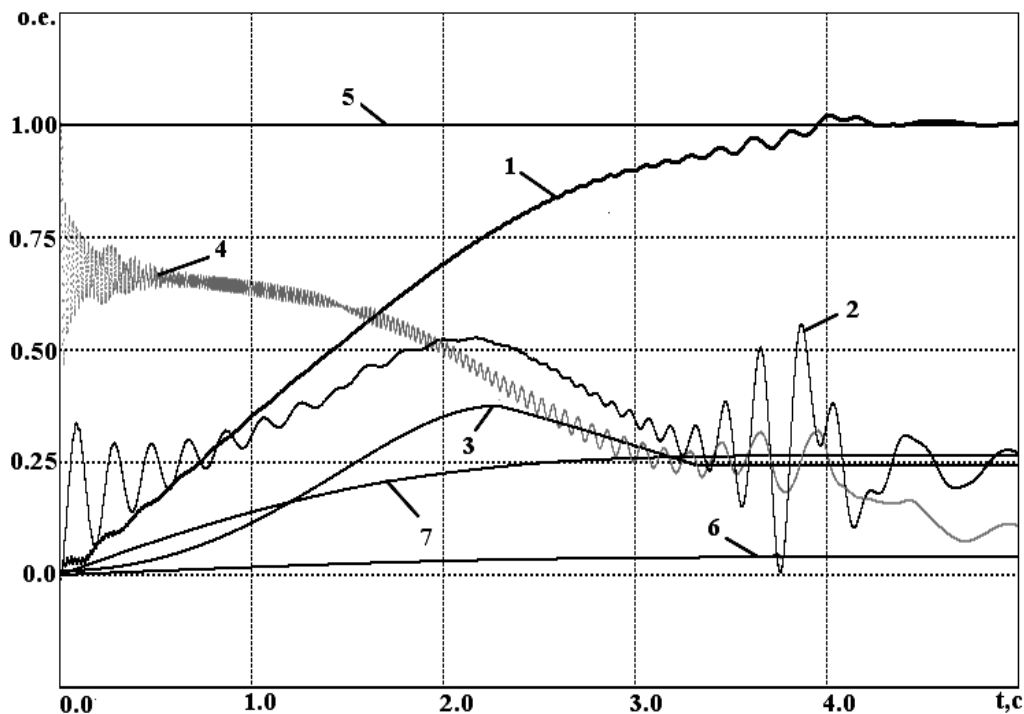


Рис. 2. Пуск мельницы МШРГУ-4500×6000 с двигателем СДС-19-46-40УХЛ4 с использованием программного управления возбудителем и регулированием разрядного сопротивления

Отчетливо видно вредное для надежности размыкание зазоров в зацеплении.

Что касается применения прямого пуска предлагаемого двигателя мощностью 2 МВт с традиционной системой управления, то взятый для исследования тяжелый режим пуска мельницы без «выхаживания» привода приводит к «застреванию» такого привода на подсинхронной скорости. Однако в асинхронном режиме прямого пуска использование программного управления возбудителем по методу, разработанному в Государственном высшем учебном заведении «Национальный горный университет, позволяет увеличить средний асинхронный момент двигателя в зоне малых скольжений и тем самым увеличить надежность син-

хронизации [4]. Позже нами установлено, что дополнительного увеличения электромагнитного момента в асинхронном режиме можно достичь путем регулирования разрядного сопротивления в цепи обмотки возбуждения [5]. Однако при этом разрядное сопротивление не должно достигать уровня, при котором мгновенное напряжение на зажимах обмотки возбуждения превышает допустимое по ТУ значение. Исходя из этого ограничения и принимая во внимание выше сказанное, нами исследован режим прямого тяжелого пуска двигателя СДС 19-46-40 УХЛ4 с номинальной мощностью 2 МВт, предлагаемого для модернизации и удешевления привода рассматриваемой мельницы (рис. 2).

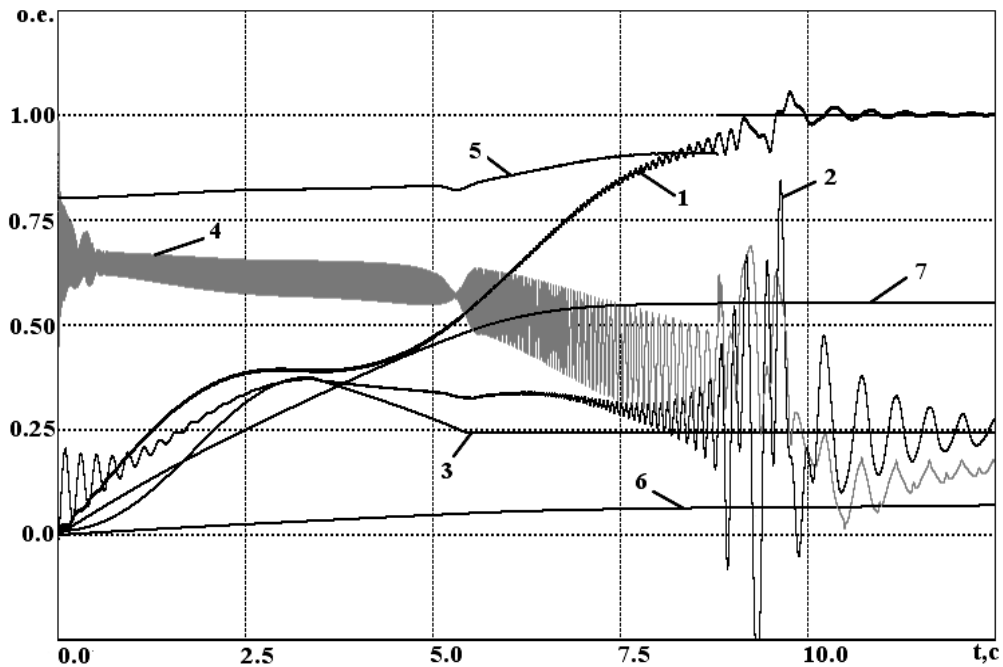


Рис. 3. Тяжелый реакторный пуск мельницы МШРГУ-4500Ч6000 с двигателем СДС-19-56-40УХЛ4 мощностью 2,5 МВт

Сравнивая полученные результаты пуска мельницы с новым приводом и ее пуска с приводным двигателем 2,5 МВт (см. зависимости рис. 1) можно увидеть, что замена используемого двигателя на менее дорогостоящий с применением более совершенной системы управления возбудителем и регулируемого разрядного сопротивления позволила снизить коэффициент динамичности упругого момента до уровня $k_n = 2,3$ (то есть на 39 %). Причем, время такого, практически плавного, пуска двигателя 2 МВт снизилось до 3,96 с. За счет усовершенствования привода снизился на 18 % и пусковой ток сети (до $I_n = 1340$ А). Перегрев пусковой обмотки снизился до 54 °С, а обмотки статора практически не изменился.

Одной из проблем использования крупных синхронных двигателей на малых и средних предприятиях являются слабые питающие сети, что приводит при прямом (или реакторном) пуске к существенному снижению напряжения на статоре (до 20 %). Принимая это во внимание на рис. 3 исследована динамика переходных процессов реакторного пуска мельницы МШРГУ-4500×6000 с используемым на сегодня двигателем СДС-19-56-40УХЛ4 мощностью 2,5 МВт при пониженном на 20 % напряжении сети (например, за счет реактора).

Видно, что такое снижение напряжения привело к затягиванию процесса пуска (время пуска стало $t_n = 9,58$ с) при одновременном снижении коэффициента динамичности упругого момента во время синхронизации.

зации до уровня $k_d = 3,48$. Пусковой ток двигателя снизился и составил $I_n = 1353 \text{ A}$, однако при этом из-за увеличения продолжительности пуска перегрев обмоток двигателя изменился. Для пусковой обмотки он возрос до $\tau_k = 113^\circ \text{C}$. До 19°C увеличился и перегрев обмотки статора. Сохранилось и размыкание зазоров зубчатого зацепления.

Таким образом, использование реакторного пуска привода мельницы с запасом установленной мощности 20 % обеспечило его работоспособность в условиях тяжелого пуска при одновременном снижении коэффициента динамичности на 8 % (с 3,8 до 3,48). И хотя продолжительность пуска существенно возросла (с 4,15 до 9,58 с) с соответствующим ростом перегрева пусковой обмотки и статора, однако в целом это не повлияло на работоспособность привода и декларируемое заводом изготовителем количество пусков подряд. В тоже время очевидно, что это объясняется завышенной на 20% установленной мощностью приводного двигателя.

В соответствие поставленной цели исключить необходимость в использовании завышенного запаса установленной мощности привода, а в более общем случае — и большего, нами проведены исследования динамики реакторного пуска мельницы с двигателем мощностью 2 МВт. То есть, без запаса установленной мощности вообще. При этом учтена возможность усиления пусковой обмотки двигателя путем увеличения ее активного сопротивления в сочетании с одновременным регулированием во время пуска и синхронизации разрядного сопротивления в цепи возбуждения и напряжения возбудителя по специальному алгоритму [6].

Для подтверждения эффективности использования такой модернизации системы управления синхронным двигателем нами исследован режим тяжелого пуска привода мощностью 2 МВт с использованием усиленной на 10 % пусковой обмоткой, а также с применением программного управления возбудителем и регулировкой разрядного сопротивления при снижении напряжения статора на 20% из-за использования пускового реактора (рис. 4).

Видно, что по сравнению с реакторным пуском синхронного двигателя мощностью 2,5 МВт (см. рис. 3) продолжительность пуска двигателя мощностью 2 МВт снизилась на 28 % и составила $t_n = 6,9 \text{ с}$. По сравнению с существующим приводом снизился на 19 % и коэффициент динамичности упругого момента, который стал равным 2,83. Пусковой ток стал ниже на 20 % и составил всего $I_n = 1080 \text{ A}$. Перегрев пусковой обмотки 70°C , а обмотки статора — 10°C .

Таким образом, можно заключить, что снижение установленной мощности привода мельницы МШРГУ-4500 × × 6000 с 2,5 до 2 МВт с одновременным использованием предлагаемых усовершенствований системы управления синхронным двигателем обеспечили высокую надежность реакторного пуска привода в сочетании с существенным (на 34 %) снижением нагрузки сети в пусковых режимах двигателя. При этом одновременно уменьшились динамические нагрузки зубчатого зацепления и электродинамические усилия обмоток двигателя. Благодаря достигнутому существенному снижению перегрева обмоток двигателя созданы условия для увеличения количества пусков двигателя подряд до 4–5.

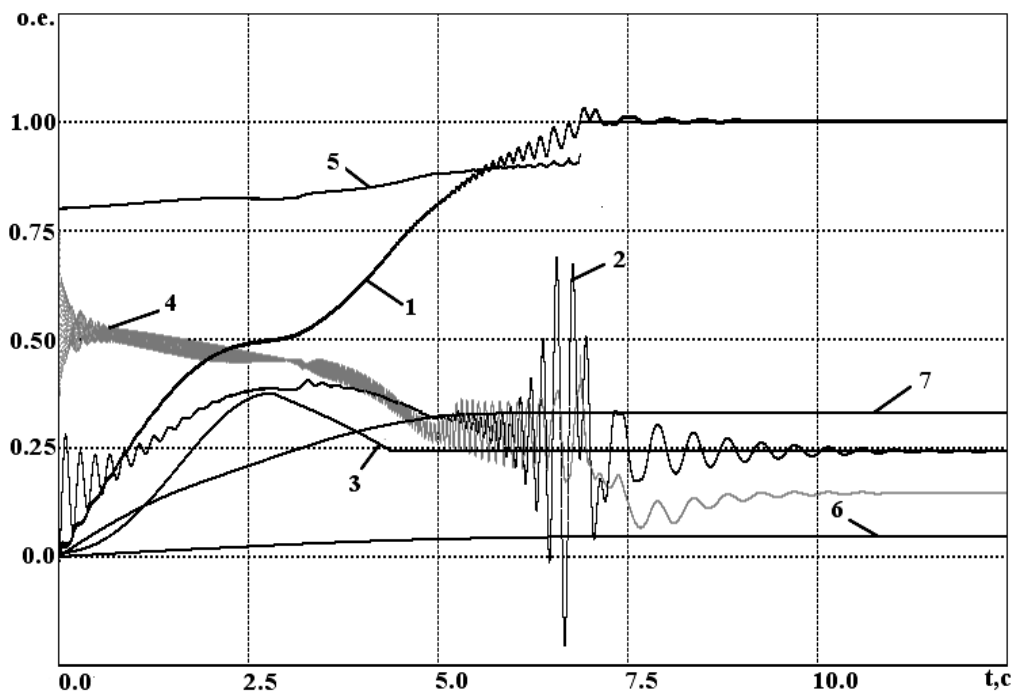


Рис. 4. Реакторный пуск мельницы с двигателем мощностью 2 МВт с использованием программного управления возбудителем, регулировкой разрядного сопротивления и усиленной пусковой обмоткой

Выводы

В условиях непрерывного удорожания энергетических и материальных ресурсов промышленные предприятия должны переходить на использование энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования. При этом для горно-металлургического комплекса характерно использование значительных запасов установленной мощности крупных приводов для обеспечения их надежности в пусковых режимах. Однако при этом дополнительно возрастают нагрузки питающих сетей, что вынуждает использовать реакторный пуск двигателей и удорожает стоимость приводов в целом. Особенно это характерно для меха-

низмов с тяжелым пуском. Проблемы увеличиваются при слабых сетях питания двигателей.

Предложенные в работе пути усовершенствования системы управления и конструкции синхронных двигателей позволяют исключить необходимость в использовании запаса установленной мощности привода и тем самым существенно снизить капитальные и эксплуатационные расходы предприятия. При этом надежность привода выше, а динамические нагрузки его элементов ниже, создаются условия для увеличения количества пусков подряд без снижения срока службы двигателя. Улучшаются и условия работы открытых зубчатых зацеплений. Привод эффективен и в

условиях слабых сетей, сохраняя свою работоспособность при снижении напряжения сети на 20 % и более. Предложенные усовершенствования

синхронного привода перспективны и для других механизмов с повышенными моментами трогания и инерции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Модернизация синхронного электропривода шаровой мельницы* / Г.Г. Пивняк, В.И. Кириченко, В.В. Кириченко и др. // Известия вузов. Горный журнал». — 2009. — № 4. — С. 101—106.

2. *Постников И.М. Метод теплового расчета крупных синхронных машин* / Труды Ленинградского политехнического института. — 1946, № 1. — С. 83—120.

3. *Виноградов Б.В. Динамика барабанных млинів* / Б.В. Виноградов — Днепропетровськ: УДТХТУ, 2004. — 314 с.

4. *Пивняк Г.Г., Школа Н.И., Кириченко В.В. Роль программного управления в обеспечении надежности многомассовых систем с синхронными электроприводами* //

Металлургич. и горно-обогатит. пром-сть. — 2002. — № 3. — С. 81—87.

5. *Кириченко В.В., Боровик Р.О., Барабан В.В. Дослідження впливу розрядного опору на ефективність програмного керування синхронним приводом* // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» — Львів: ЕКОінформ, 2009. — С. 384—385.

6. *Пивняк Г.Г., Кириченко В.І., Кириченко В.В. Перспективи удосконалення потужних синхронних приводів* / Доповіді національної академії наук України. Математика, природознавство, технічні науки. — 2009, — № 9. — С. 97—102. **ПІАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пивняк Геннадий Григорьевич – академик Национальной академии наук Украины, ректор, доктор технических наук, профессор, rector@nmu.org.ua, <http://www.nmu.org.ua>

Кириченко Виталий Иванович – профессор кафедры электропривода, доктор технических наук, профессор, ViKirichenko@nmu.org.ua

Кириченко Владислав Витальевич – доцент кафедры систем электроснабжения, кандидат технических наук, kirichenko_vv@mail.ru

Боровик Роман Алексеевич – ассистент кафедры электропривода, borovikra@bigmir.net

Барабан Виктор Викторович – аспирант кафедры электропривода, barabanv@ukr.net

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет».

Вареник Людмила Петровна – ведущий инженер ООО «Инженерный центр» концерна РОС-ЭНЕРГОМАШ, ic@nk.rosenergomash.com



ФРАЗЫ

Даже самые знаменитые ученые будут забыты, если не оставят после себя изданных сочинений.