

Корнилов Г.П., Кожевников И.О., Косматов В.И., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РЕЗЕРВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Развитие силовой электроники и микропроцессорной техники способствовало тому, что регулируемый электропривод на основе синхронных и асинхронных двигателей стал преобладающим в металлургической отрасли. Но сохраняется большое количество мощных синхронных двигателей (СД) в составе нерегулируемых электроприводов. При существующей технологии металлургического производства большинство сетевых синхронных двигателей сохранится в обозримом будущем и вопросы их эффективного использования как энергоемких потребителей остаются актуальными и практически значимыми. В статье рассмотрены нереализованные резервы экономии электроэнергии мощных синхронных двигателей прокатного производства. Сформулированы требования, предъявляемые к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) СД прокатных станов, это обеспечение устойчивого, быстро затухающего характера переходного процесса при ударном приложении нагрузки, а также минимизация суммарных электрических потерь в статоре и обмотке возбуждения двигателя. Рассмотрены варианты построения систем возбуждения синхронных двигателей с силоизмерительным датчиком, а также косвенным методом по сигналам напряжения и тока преобразовательного агрегата. Выполнена оценка экономии электрической энергии (мощности) для режимов работы под нагрузкой и на холостом ходу. Обосновано, что у агрегатов с немотивированной работой двигателя на холостом ходу во время длительных технологических простоев основного оборудования для снижения потерь электроэнергии рекомендуется внедрение устройства плавного пуска синхронных двигателей.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автоматическое регулирование возбуждения, прокатное производство.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря мощному развитию силовой электроники и микропроцессорной техники регулируемый электропривод на основе синхронных и асинхронных двигателей стал преобладающим во всех отраслях промышленности, в том числе и металлургической. Вместе с тем сохраняется большое количество мощных нерегулируемых электроприводов, выполненных на базе сетевых синхронных двигателей мощностью 1-20 МВт и напряжением 6-10 кВ. Такие машины используют в качестве приводных двигателей черновых клетей прокатных станов, турбокомпрессоров кислородных станций, а также в составе преобразовательных агрегатов. Можно предположить, что при существующей технологии металлургического и, в частности, прокатного производства значительная часть мощных сетевых синхронных двигателей сохранит свой статус и в обозримом будущем, а вопросы их эффективного использования, как наиболее энергоемких потребителей, будут решаться с учетом режимов работы по мере совершенствования элементной базы и принципов управления такими объектами.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В зависимости от характера нагрузки выделяют синхронные двигатели с резкопеременной и с практически постоянной нагрузкой. Основные требования, предъявляемые к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) были сформулированы ранее в [1] следующим образом:

- АРВ должно обеспечивать устойчивую работу СД при заданных режимах нагрузки;
- АРВ СД должно способствовать поддержанию нормального (оптимального) напряжения в узле

нагрузки, к которому он присоединен, при допустимом тепловом режиме;

- АРВ должно обеспечивать минимум потерь электрической энергии в двигателе и в элементах системы электроснабжения, если это не противоречит первым двум пунктам.

Нетрудно заметить, что эти положения не могут быть реализованы одновременно, так как исключают друг друга. Например, обеспечение устойчивой работы СД предполагает регулирование активной составляющей тока статора за счет усиления демпфирования качания ротора, а поддержание напряжения в точке подключения СД может быть реализовано за счет регулирования реактивного тока статора. Поэтому на практике обычно выбирают один обобщенный критерий качества с учетом характера нагрузки и выбора приоритетов. Для СД прокатных станов большое значение имеет устойчивый, быстро затухающий характер переходного процесса при ударном приложении нагрузки, а также суммарные электрические потери в статоре и обмотке возбуждения двигателя.

Успешное практическое внедрение различных типов АРВ для СД прокатных станов было подготовлено глубокими теоретическими исследованиями, проведенными ранее учеными Уральского политехнического института [2-3], ВНИИ электропривода [4] и другими [5-6].

Для улучшения демпфирования СД с резкопеременной нагрузкой в системах АРВ часто используют основные входные величины самого СД – статорный ток и напряжение. По этим величинам выделяют контролируемые параметры – внутренний угол нагрузки θ , активную и реактивную мощности, угол φ и т.п. Возможен также и другой путь – это установка дополнительных датчиков в двигателе [7], на рабочем валу или в исполнительном механизме для измерения угла θ или прикладываемого статического момента.

Здесь уместны следующие замечания:

– синхронный двигатель как объект регулирования представляет собой колебательное звено с малым коэффициентом затухания и поэтому эффективность обратных связей в улучшении динамики по выходным координатам двигателя весьма ограничена;

– установка дополнительных датчиков в двигателе и на валу не практикуется из-за усложнения конструкции и снижения надежности.

Исследования режимов работы СД, проведенные ранее на одном из крупнейших металлургических предприятий, показали, что большая часть приводов оборудованы аналоговыми системами АРВ и работают в разомкнутой системе, то есть с постоянным током возбуждения, близким к номинальному. Исключение составили приводные двигатели черновых клетей широкополосного стана горячей прокатки, где задействован корректирующий сигнал, пропорциональный внешнему возмущающему воздействию – прикладываемому статическому моменту. На этом примере стоит остановиться подробнее.

В качестве датчика момента первоначально был использован силоизмерительный элемент – мессдоза [8]. Она крепилась на станине под подушкой опорного валка и формировала сигнал, пропорциональный давлению на валки (**рис. 1**), а момент прокатки, как известно, линейно зависит от этого усилия.

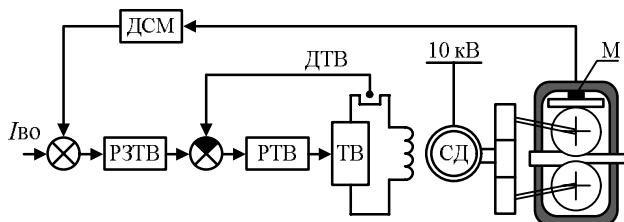


Рис. 1. Принципиальная схема системы возбуждения СД с силовым датчиком – мсдозой:
РЗТВ – регулятор задания тока возбуждения;
ДСМ – датчик статического момента с мсдозой (М);
ТВ - тиристорный возбудитель; ДТВ, РТВ – датчик и регулятор тока возбуждения

В современных автоматизированных системах управления механизмами прокатного стана величину статического момента рассчитывают программно по карте прокатки и в зависимости от нагрузки формируют задание на приращение тока возбуждения.

На осциллограмме (рис. 2) показано изменение токов статора и возбуждения СД черновой клети того же стана горячей прокатки, где ранее стояли месдозы. Отметим, что для повышения устойчивости работы двигателя при набросе нагрузки ток возбуждения во время прокатки на 20-30% выше номинального значения, но с учётом того, что это время не превышает 10-15% времени цикла, среднеквадратичное значение тока возбуждения за цикл прокатки находится на уровне 60-65% номинального значения. Суммарные электрические потери в статоре и обмотке возбуждения при таком регулировании также существенно ниже номинальных. Работавшую на стане горячей прокатки систему АРВ синхронных двигателей, безусловно, следует признать энергоэффективной. Рассмотрим другой пример, где мощные двигатели преобразовательных агрегатов работают с постоянным током возбуждения.

Для СД преобразовательных агрегатов измерение момента (мощности) на валу двигателя не вызывает затруднений и может быть легко реализовано по току и напряжению приводного двигателя постоянного тока [9], как показано на **рис. 3**. Здесь сигналы с датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН) формируют на выходе блока перемножения сигнал, пропорциональный мощности (моменту) на валу СД. Но на практике предлагаемая система не реализована по причине морального и физического износа тиристорных возбудителей.

Для металлургических агрегатов и машин, у которых коэффициент включения заметно ниже единицы, такой простой параметрический способ регулирования возбуждения в зависимости от статической нагрузки на валу мог бы обеспечить значительную экономию электроэнергии за счет снижения потерь активной мощности при работе на холостом ходу ΔP_{xx} и под нагрузкой ΔP_n .

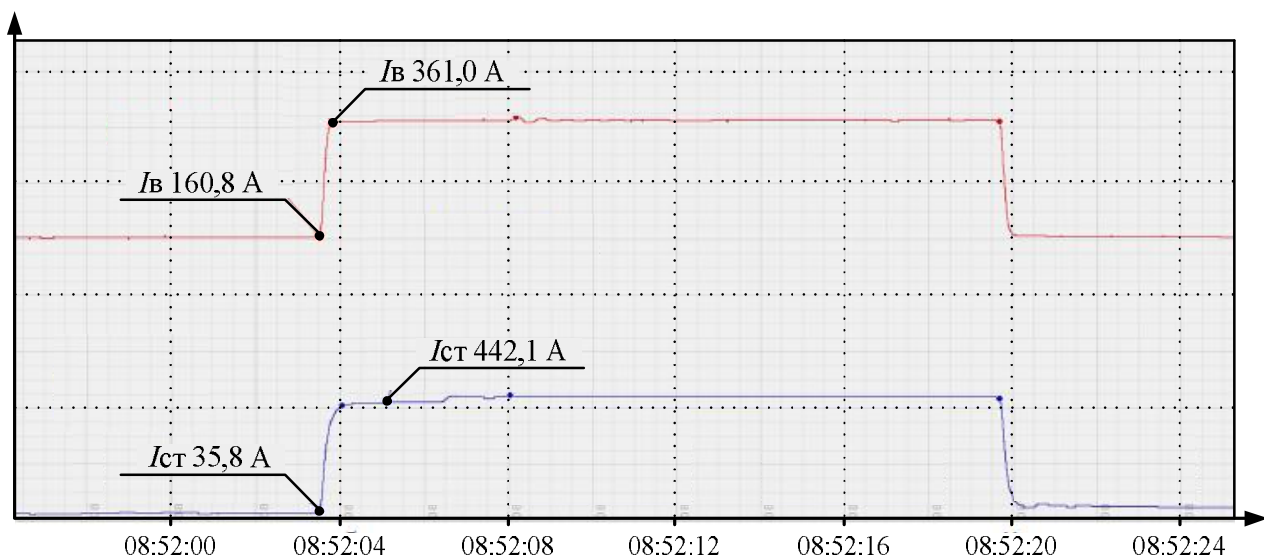


Рис. 2. Изменение тока статора и тока возбуждения синхронного двигателя черновой клетки прокатного стана

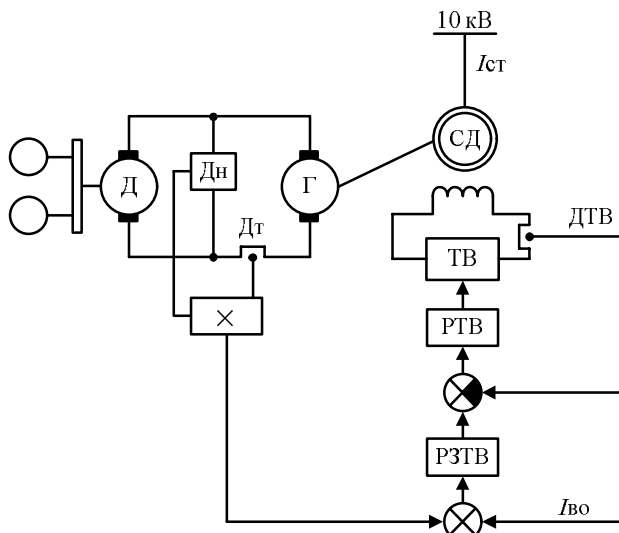


Рис. 3. Схема АРВ-СД преобразовательного агрегата

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Используя U -образные характеристики синхронного двигателя, нетрудно рассчитать искомые величины.

Так, например, для действующего четырехклетьевого прокатного стана, где в составе преобразовательного агрегата работает двигатель типа СДСЗ 19-125-16 (его технические данные приведены в **таблице**), а U -образные характеристики на **рис. 4**, рассчитаем снижение потерь в двигателе на холостом ходу и под нагрузкой при переходе от ручного регулирования с постоянным током возбуждения $I_{вр} = 400$ А на автоматическое.

$$\Delta P_{xx} = 3R_{ст} (I_{ср}^2 - I_{соа}^2) + R_{в} (I_{вр}^2 - I_{ва}^2), \quad (1)$$

где $R_{ст}$, $R_{в}$ – сопротивления обмоток статора и возбуждения; $I_{ср}$, $I_{соа}$ – токи статора при ручном и автоматическом регулировании на холостом ходу (коэффициент загрузки $\beta = 0$).

$$\Delta P_{н} = 3R_{ст} (I_{ср}^2 - I_{са}^2) + R_{в} (I_{вр}^2 - I_{ва}^2), \quad (2)$$

где $I_{ср}$, $I_{са}$ – токи статора при ручном и автоматическом регулировании при работе с коэффициентом загрузки $\beta = 0,5$.

Данные синхронного двигателя СДСЗ 19-125-16

Наименование	Величина
Номинальная мощность	18500 кВт
Номинальная скорость	375 об/мин
Номинальный ток статора	1100 А
Номинальное напряжение статора	10500 В
Номинальный коэффициент мощности	0,95
Номинальное напряжение возбуждения	220 В
Сопротивление фаз обмоток статора	0,019 Ом
Сопротивление обмотки возбуждения	0,3265 Ом
Ток возбуждения холостого хода	315 А
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,905
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,6

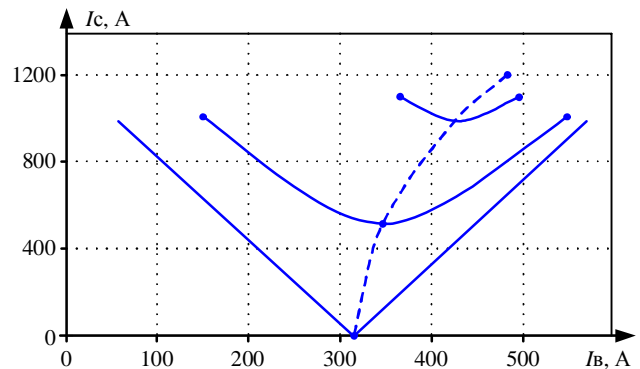


Рис. 4. U -образная характеристика двигателя СДСЗ

Примем $I_{ва} = 350$ А, $I_{са} = 500$ А – это значит, что система АРВ настроена таким образом, чтобы сетевой ток двигателя во время прокатки был чисто активным, то есть $\cos \phi = 1$ (см. **рис. 4**), поскольку выработка реактивной мощности СД прокатных стансов с низкой частотой вращения не всегда является экономически целесообразной. В результате вычислений получены искомые величины $\Delta P_{xx} = 25,5$ кВт, $\Delta P_{н} = 18,5$ кВт.

Построение U -образных характеристик – зависимости тока статора от тока возбуждения при различных значениях нагрузки (момента на валу двигателя) – заслуживает отдельного рассмотрения. Их получают либо в результате эксперимента на действующем оборудовании, либо аналитически с помощью векторных диаграмм [10]. Приведенные на **рис. 4** характеристики получены по оригинальной методике, предложенной в [11].

Значительная экономия электроэнергии при эксплуатации мощных синхронных двигателей может быть достигнута за счет применения устройств плавного пуска. Эта экономия определяется не условиями и способом пуска, поскольку затраченная энергия в этом случае зависит исключительно от момента инерции и конечной скорости. Существенные потери мощности ΔP_0 и, соответственно, энергии обусловлены в основном немотивированной работой двигателя на холостом ходу во время длительных технологических простоев основного оборудования.

$$\Delta P_0 = 3R_{ст} I_{со}^2 + R_{в} I_{вр}^2. \quad (3)$$

На практике мощные сетевые синхронные двигатели отключают достаточно редко, чтобы избежать нежелательных последствий прямого пуска от сети в асинхронном режиме – увеличения тока в 5-6 раз по отношению к номинальному и, как следствие, значительных просадок питающего напряжения в точке подключения СД. Для двигателя, технические данные которого определены в **таблице**, мощность, потребляемая на холостом ходу, во время останова стана составит 58 кВт.

Из теоретически возможных и практически реализованных способов мягкого пуска мощных синхронных двигателей заслуживают внимания следующие варианты:

- пуск с пониженным напряжением, формируемым тиристорным регулятором напряжения (ТРН) [12];
- пуск по схеме вентильного двигателя с зависимым инвертором тока [13];
- пуск с преобразователем частоты [14, 15].

Вопросы, касающиеся обоснованного выбора пускового устройства и его адаптации к конкретным условиям работы синхронных двигателей, заслуживают отдельного рассмотрения в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены примеры эффективного использования систем автоматического регулирования возбуждения мощных синхронных двигателей прокатного стана, которые одновременно обеспечивают устойчивую работу при набросе нагрузки и снижение электрических потерь в обмотках статора и возбуждения.

Использование системы APB для СД, входящих в состав преобразовательных агрегатов, с помощью рассмотренного в статье параметрического метода регулирования возбуждения в зависимости от статической нагрузки на валу создаёт условия значительного снижения потерь активной мощности. Это снижение потерь нетрудно рассчитать с помощью U-образных характеристик действующего синхронного двигателя прокатного стана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов С.И., Михайлов В.В. Всесоюзное совещание по автоматическому регулированию и систем возбуждения синхронных двигателей // *Электричество*. 1964. №7.
2. Вейнгер А.М., Янко-Триницкий А.А. Критерий качества автоматического регулирования возбуждения крупных синхронных двигателей // *Инструктивные указания Тяжпромэлектропроект*. 1967. №7.
3. Вейнгер А.М., Янко-Триницкий А.А. Приближенный закон оптимального регулирования возбуждения крупных синхронных двигателей // *Инструктивные указания Тяжпромэлектропроект*. 1968. № 12.
4. Вайнтриб О.Ш., Вейнгер А.М., Гендельман Б.Р. Система управления синхронным двигателем с подчиненной структурой регулирования // *Электричество*. 1975. №4.
5. Корнилов Г.П., Шурыгина Г.В., Самохин Ю.А. Управление возбуждением синхронного двигателя преобразовательного агрегата с резкопеременной нагрузкой // *Промышленная энергетика*. 1990. №3. С. 24-26.
6. Корнилов Г.П., Карандаев А.С., Шурыгина Г.В. Оптимальное регулирование возбуждения синхронного двигателя // *Промышленная энергетика*. 1990. №8. С. 24-25.
7. Фомин Д.В., Косматов В.И. Исследование режимов синхронного двигателя с автоматическим регулированием возбуждения в функции внутреннего угла методами промышленного испытания // *Сборник трудов IV международной конференции по автоматизированному электроприводу*. Ч.1. Магнитогорск. 2004. С. 287-291.
8. Анализ систем возбуждения мощных синхронных двигателей металлургических приводов / Семёнов Е.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Чигвинцев Е.Н. // *Электроприводы переменного тока: труды Международной тринадцатой научно-технической конференции*. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. С. 286-287.
9. А.с. 1339862. Устройство для автоматического регулирования возбуждением синхронного двигателя преобразовательного агрегата / Корнилов Г.П., Шурыгина Г.В., Карандаев А.С. Оpubл. в Б.И. 1987, №35.
10. Иванов-Смоленский А.В. *Электрические машины: учебник для вузов*. Т.2. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
11. Першин Ю.С., Першина Л.М. Расчет оптимального режима работы синхронного двигателя // *Электричество*. 1981. №9.
12. Басков С.Н., Давыдкин М.Н., Коньков А.С. Устройство плавного пуска высоковольтного синхронного двигателя с векторно-импульсным управлением // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Ч.3. 2010. №3.
13. Кабанов П.С., Каспаров Э.А. Пути создания мощных синхронных компенсаторов продольно-поперечного возбуждения // *Электричество*. 1984. №9.
14. Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han, Q. Gao, Gang Li and D. Xu, "Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 1858-1862.
15. Castagnini A., Kansakangas T., Kolehmainen J. and Termini P.S., "Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications," 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, 2015, pp. 121-126.

Поступила в редакцию 15 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESERVES FOR POWER SAVING OF SYNCHRONOUS MOTORS AS A PART OF METALLURGICAL DRIVES

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Igor O. Kozhevnikov

Foreman of vocational training, Department no. 1 "Information Technology", Polytechnical College, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Timur R. Khramshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: timur.hramshin@mail.ru.

Rifhat R. Khramshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hramshinrr@mail.ru.

Evolution of power electronics and microprocessor technology has contributed to the situation when an adjustable electric drive based on synchronous and asynchronous motors has become predominant in metallurgical industry. However, a large number of nonadjustable powerful synchronous motors (SM) are still in operation. With the existing technology of metallurgical industry, most powerful synchronous motors will remain in the near future and the issues of their effective use as energy-intensive consumers as remain relevant and practically significant. The article discusses the unrealized reserves for power saving of powerful SM for rolling production. The paper states the requirements to the automatic excitation control system of synchronous motors of rolling mills; these requirements include provision of stable, rapidly damping character of the transient process during impulse loads and minimization of total electric losses in the stator and in the motor field. The paper considers different options for design of the excitation systems of synchronous motors with a force-measuring transducer as well as excitation by the indirect method, by the signals of the voltage and the current of the converting unit. Assessment of electric energy saving was carried out for operating modes, for on-load operation and for idle running. The practice was justified when the unit with the unmotivated idle operation of the motor during long operational delays of the capital equipment was equipped with soft starters to reduce power losses.

Keywords: synchronous motor, automatic excitation control, rolling production.

REFERENCES

1. Loginov S.I., Mikhailov V.V. All-Union conference on automatic control and excitation systems synchronous motors. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 7, 1964. (In Russian)
2. Veinger A.M., Yanko-Trinitskii A.A. Quality factor of automatic excitation control of large synchronous motors. *Instrukivnye ukazaniya Tyazhpromelektroproekt* [Implementing guidance of Tyazhpromelektroproekt], no. 7, 1967. (In Russian)
3. Veinger A.M., Yanko-Trinitskii A.A. Approximate law of optimizing excitation control of large synchronous motors. *Instrukivnye ukazaniya Tyazhpromelektroproekt* [Implementing guidance of Tyazhpromelektroproekt], no. 12, 1968. (In Russian)
4. Vaintrub O.Sh., Veinger A.M., Gendelman B.P. Control system of a synchronous motor with subordinate control system. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 4, 1975. (In Russian)
5. Kornilov G.P., Shurygina G.V., Samokhin Yu.A. Excitation control of a synchronous motor of a converting unit with abruptly variable load. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], no. 3, 1990, pp. 24-26. (In Russian)
6. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Shurygina G.V. Optimizing excitation control of a synchronous motor. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], no. 8, 1990, pp. 24-25. (In Russian)
7. Fomin D.V., Kosmatov V.I. Operating modes of a synchronous motor with automatic excitation control as a function of a torque angle using commercial test methods. *Sbornik trudov IV mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Collection of scientific paper of IV international conference on automatic electric drive]. Part 1. Magnitogorsk, 2004, pp. 287-291. (In Russian)
8. Semenov E.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Chigvintsev E.N. Analysis of excitation systems of power synchronous motors of metallurgical drives. *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoy trinatstsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [AC electric drives: Papers of the international thirteenth scientific and technical conference]. Yekaterinburg: UGTU – UPI, 2005, pp. 286-287.
9. Kornilov G.P., Shurygina G.V., Karandaev A.S. A.S. 1339862 *Ustroystvo dlya avtomaticheskogo regulirovaniya vzbuzhdeniem synkhronnogo dvigatelya preobrazovatel'nogo agregata* [A.S. 1339862 Device for automatic excitation control of a synchronous motor of a converting unit]. Published in B.I., no. 35, 1987. (In Russian)
10. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]: Textbook for Universities. Vol. 2. M.: Publishing house of MEI, 2004. (In Russian)
11. Pershin Yu.S., Pershina L.M. Calculation of the optimum operation of a synchronous motor. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 9, 1981. (In Russian)
12. Baskov S.N., Davydkin M.N., Konkov A.S. Soft start device for a high voltage synchronous motor with a vector-pulse control. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulGU. Technical sciences]. Part 3, no. 3, 2010. (In Russian)
13. Kabanov P.S., Kasparov E.A. Development of power synchronous compensators of direct-and-quadrature axes excitation. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 9, 1984. (In Russian)
14. Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han, Q. Gao, Gang Li and D. Xu, "Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEM-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 1858-1862.
15. Castagnini A., Kansakangas T., Kolehmainen J. and Termini P.S., "Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications," 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, 2015, pp. 121-126.

Резервы энергосбережения мощных синхронных двигателей металлургических приводов / Г.П. Корнилов, И.О. Кожевников, В.И. Косматов, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 41-45. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-41-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-41-45)

Kornilov G.P., Kozhevnikov I.O., Kosmatov V.I., Khramshin T.R., Khramshin R.R. Reserves for Power Saving of Synchronous Motors as a Part of Metallurgical Drives. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 41-45. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-41-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-41-45)