

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.313.323

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-3-9

Поползин Иван Юрьевич^{1*}, Живаго Роман Эдуардович¹,
Маршев Дмитрий Александрович²

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики СибГИУ

*E-mail: eidoline@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕДОВОЗБУЖДЕННОМ СИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ



Информация о статье

Поступила:

31 октября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 ноября 2023 г.

Принята к печати:

01 декабря 2023 г.

Опубликована:

21 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

синхронный двигатель, U-образная характеристика, ток возбуждения, возбуждение, переходные процессы

Аннотация.

Синхронные двигатели большой мощности находят широкое применение в различных областях промышленности, в том числе в горнодобывающей и металлургической – в электроприводах различных механизмов (подъемных установок, вентиляторов, насосов, компрессоров, оборудования прокатных станов и т.д.). Как известно, для минимизации потребляемой синхронным двигателем реактивной мощности ток возбуждения выбирается таким образом, чтобы рабочая точка машины находилась вблизи точки перегиба U-образной характеристики. При этом увеличивается энергоэффективность машины, однако при этом переходные процессы в двигателе (в частности, при асинхронном пуске и при приложении нагрузки) являются достаточно «жесткими», что обусловлено демпфирующим действием магнитного поля обмотки возбуждения и демпферной обмотки при указанном положении рабочей точки. Эта проблема особенно актуальна для двигателей, связанных с рабочим органом привода через упругие механические связи либо через связи, имеющие зазоры и люфты, поскольку при этом в механических передачах возникают знакопеременные усилия, рывки и удары. Кроме того, жесткость переходных процессов двигателя в указанном случае усложняет выравнивание нагрузок в динамических режимах в многодвигательном приводе. В статье проводится модельное исследование переходных процессов мощного синхронного явнополюсного двигателя при различных условиях его возбуждения и предлагается использовать особенности протекания переходных процессов в недовозбужденном синхронном двигателе при регулировании скорости и момента и построении систем выравнивания нагрузок.

Для цитирования: Поползин И.Ю., Живаго Р.Э., Маршев Д.А. Особенности переходных процессов в недовозбужденном синхронном двигателе большой мощности // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 6 (170). С. 3-9. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-3-9, EDN: DJMJLK

Синхронные двигатели (СД) достаточно широко распространены в электроприводе различных промышленных механизмов. Основной проблемой, препятствующей широкому применению мощных синхронных двигателей, до недавнего времени была сравнительная сложность регулирования скорости СД, однако в настоящее время в связи с широким применением мощных частотных преобразователей на основе IGBT и совершенствованием алго-

ритмов частотного управления СД область применения таких машин существенно расширяется.

Как известно, обмотка статора СД питается переменным напряжением, а обмотка возбуждения – постоянным. При этом единственным возможным способом регулирования скорости СД является частотное управление [1-3]. Возможны различные алгоритмы частотного управления СД и формирования частоты и амплитуды напряжения на статоре

[2]. При этом для приводов с переменной нагрузкой обычно требуется и автоматическое регулирование тока возбуждения двигателя, однако вопросу совместного регулирования скорости СД и его тока возбуждения уделяется недостаточно внимания.

Как правило, в существующих решениях при регулировании тока возбуждения СД стремятся к тому, чтобы рабочая точка машины находилась вблизи перегиба ее U-образной характеристики (зависимости тока статора машины от тока возбуждения, Рис. 1). При этом обеспечивается максимальный коэффициент мощности двигателя и наименьший ток статора СД, что повышает его энергоэффективность [4-6].

На U-образной характеристике можно условно выделить области слева и справа от точки экстремума [7,8]. Область слева назовем областью недовозбуждения – в ней ток статора машины имеет индуктивный характер, и, следовательно, двигатель потребляет реактивную мощность из сети. Область справа – область перевозбуждения, ток статора в этой области имеет емкостной характер, а машина отдает реактивную мощность в сеть (то есть в определенном смысле работает в качестве компенсатора реактивной мощности). В точке экстремума двигатель не потребляет и не отдает реактивную мощность, то есть ток статора является чисто активным, а коэффициент мощности равен 1. Практика показывает, что чаще всего мощные СД в промышленности работают в недовозбужденном режиме, что влияет на их динамические свойства [9,10]. Исследование такого влияния особенно актуально для СД, работающих в составе электроприводов с переменной нагрузкой (например, приводов клеток прокатных станов) [11-13] или большими приведенными моментами инерции (к примеру, приводов длинных конвейеров), а также для многодвигательного синхронного привода [12,14,15].

Для установления особенностей переходных процессов в недовозбужденных мощных СД прибегнем к математическому моделированию двигателя. Математическое описание синхронных двигателей осуществляется в ортогональной системе координат d - q , вращающейся со скоростью ротора, при этом продольная ось d направлена по электрической оси ротора машины, а квадратурная ось q перпендикулярна ей. Выбор такой системы координат обусловлен тем, что в ней наиболее просты преобразования координат машины [2]. Электромагнитное преобразование энергии в машине и формирование крутящего момента на валу обусловлено взаимодействием магнитных потоков обмоток статора по осям d и q , обмотки возбуждения по оси d и демпферной обмотки. Поскольку мощные СД являются явнополусными, то индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям отличаются. Входными координатами такой модели являются проекции напряжения на статоре на оси d и q , напряжение на обмотке возбуждения и частота напряжения на статоре.

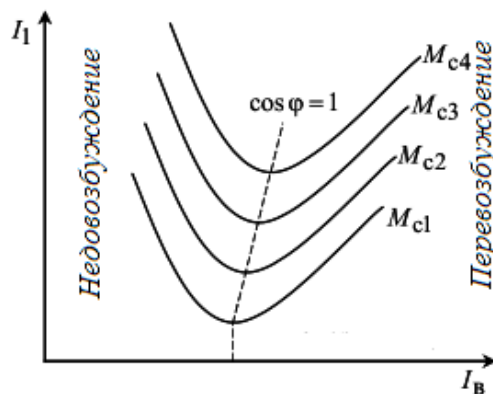


Рис. 1. U-образные характеристики синхронного двигателя
Fig. 1. U-shaped characteristics of a synchronous motor

Электромагнитное преобразование энергии в явнополусном синхронном двигателе описывается следующей системой уравнений (1), где индексами d и q обозначены проекции соответствующих координат соответственно на оси d и q выбранной системы координат; Ψ_l – потокосцепление обмотки статора, u_l – напряжение на статоре, i_l – ток статора, Ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения, u_f – напряжение возбуждения машины, i_f – ток возбуждения, L_{ld} – индуктивность статора по оси d , L_{lq} – индуктивность статора по оси q , L_μ – взаимная индуктивность обмоток, L_f – индуктивность обмотки возбуждения, M – электромагнитный момент машины, z_p – число пар полюсов, M_c – момент нагрузки на валу машины, J – суммарный приведенный к валу машины момент инерции электропривода, ω – угловая скорость вращения якоря машины.

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{ld}}{dt} = u_{ld} - i_{ld}R_l + z_f \omega \Psi_{lq}, \\ \frac{d\Psi_{lq}}{dt} = u_{lq} - i_{lq}R_l - z_f \omega \Psi_{ld}, \\ \frac{d\Psi_f}{dt} = u_f - i_f R_f, \\ i_{ld} = \frac{\Psi_{ld} - L_\mu i_f}{L_{ld}}, \\ i_{lq} = \frac{\Psi_{lq}}{L_{lq}}, \\ i_f = \frac{\Psi_f - L_\mu i_{ld}}{L_f}, \\ M = z_f (i_{lq} \Psi_{ld} - i_{ld} \Psi_{lq}), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M - |M_N| \text{sign}(\omega)}{J} \end{cases} \quad (1)$$

Неудобство использования (1) для практического использования обусловлено тем, что данная система предполагает идентификацию потокосцеплений обмоток двухфазной модели СД, что в общем случае сопряжено с определенными трудностями.

В [16] для анализа процессов в мощных СД предлагается следующая модификация (1), предполагающая идентификацию токов обмоток машины с учетом тока нулевой последовательности:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = i_{1d} R_1 + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} - z_{\Pi} \omega \Psi_{1q}, \\ u_{1q} = i_{1q} R_1 + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + z_{\Pi} \omega \Psi_{1d}, \\ u_0 = i_0 R_0 + \frac{d\Psi_0}{dt}, \\ \Psi_{1d} = i_{1d} L_{1d} + i_0 L_{\mu}, \\ \Psi_{1q} = i_{1q} L_{1q}, \\ \Psi_f = \frac{3}{2} i_{1d} L_{\mu} + i_f L_f, \\ \Psi_0 = i_0 L_0, \\ u_f = i_f R_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \\ M = \frac{3}{2} z_{\Pi} (\Psi_{1d} i_{1q} - \Psi_{1q} i_{1d}), \\ M - M_C = \frac{J}{z_{\Pi}} \frac{d\omega}{dt}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где индексом 0 обозначены параметры и координаты нулевой последовательности.

Недостатком (2) является необходимость определения параметров нулевой последовательности СД, что в свою очередь затрудняет анализ влияния изменения тока возбуждения на процессы в машине. Кроме того, в (2) внутренний угол нагрузки СД, идентификация которого необходима для управления СД, не входит в уравнения и не учитывается в явном виде. Кроме того, в уравнениях системы (2), как и в уравнениях системы (1), не учитывается влияние на процессы в СД демпферной обмотки, которая присутствует практически во всех мощных СД [17,18] и требует учета при исследовании режимов работы СД с уменьшенным током возбуждения [19].

Для решения указанных выше проблем модифицируем систему (1) и приведем ее к следующему виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} + \Psi_{1d} p - \omega_{0эл} \Psi_{1q}; \\ u_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + \Psi_{1q} p + \omega_{0эл} \Psi_{1d}; \\ u_f = R_f \cdot i_f + \Psi_f p; \\ 0 = R_{kd} \cdot i_{kd} + \Psi_{kd} p; \\ 0 = R_{kq} \cdot i_{kq} + \Psi_{kq} p; \\ \Psi_{1d} = L_{1d} \cdot i_{1d} + L_{md} \cdot i_f + L_{md} \cdot i_{kd}; \\ \Psi_{1q} = L_{1q} \cdot i_{1q} + L_{mq} \cdot i_{kq}; \\ \Psi_f = L_f \cdot i_f + L_{md} \cdot i_{1d} + L_{md} \cdot i_{kd}; \\ \Psi_{kd} = L_{kd} \cdot i_{kd} + L_{md} \cdot i_{1d} + L_{md} \cdot i_f; \\ \Psi_{kq} = L_{kq} \cdot i_{kq} + L_{mq} \cdot i_{1q}; \\ u_{1d} = U_{1ампл} \cdot \sin \theta; \\ u_{1q} = -U_{1ампл} \cdot \cos \theta, \\ \theta = \frac{\omega_{0эл} - z_{\Pi} \cdot \omega}{p}, \\ M_{\partial\theta} = \frac{3}{2} \cdot z_{\Pi} \cdot (i_{1q} \Psi_{1d} - i_{1d} \Psi_{1q}), \\ M_{\partial\theta} - M_c = \frac{J}{z_{\Pi}} \cdot \omega p. \end{array} \right.$$

где дополнительно введены следующие обозначения: Ψ_{kd} , Ψ_{kq} – потокосцепление демпферной обмотки по осям d и q ; R_{kd} , R_{kq} – сопротивление демпферной обмотки по осям d и q ; L_{md} , L_{mq} – взаимные индуктивности обмоток по осям d и q ; $\omega_{0эл}$ – скорость вращения поля статора, $U_{1ампл}$ –

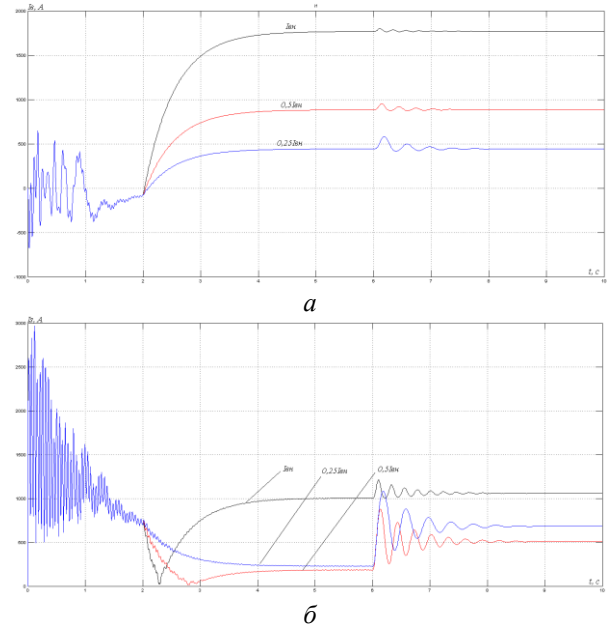


Рис. 3. Переходные процессы токов обмоток двигателя AMZ 0900LT08LSB: а – тока возбуждения; б – тока статора

Fig. 3. Transient processes of winding currents of AMZ 0900LT08LSB motor: a – excitation current; b – stator current

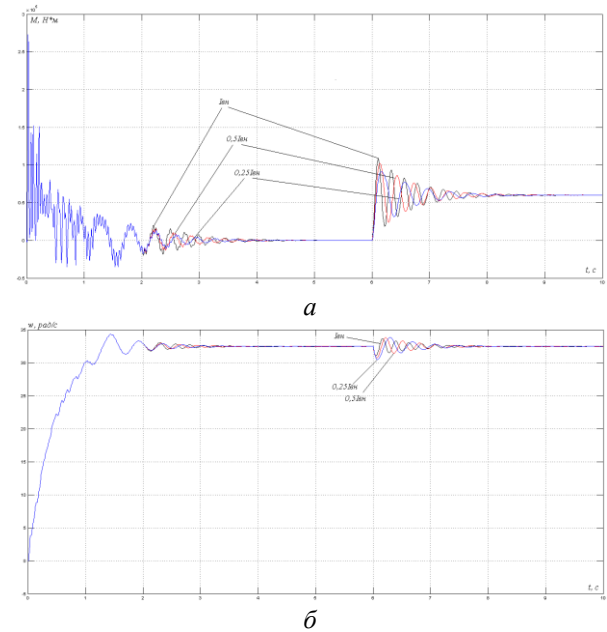


Рис. 4. Переходные процессы механических координат двигателя AMZ 0900LT08LSB: а – вращающего момента; б – угловой скорости вращения ротора

Fig. 4. Transient processes of mechanical coordinates of the AMZ 0900LT08LSB motor: a – torque; b – rotor angular velocity

амплитудное значение напряжения статора, θ – угол нагрузки, p – символ дифференцирования.

Системе уравнений (3) соответствует структурная схема двигателя, приведенная на Рис. 2.

Структура, приведенная на Рис. 2, удобна для исследования влияния на двигатель параметров напряжения на статоре, а также тока возбуждения. Кроме того, приведенная структура позволяет явно идентифицировать все потокоцепления и токи машины, а также внутренний угол нагрузки.

На основе модели, приведенной на Рис. 2, были проведены исследования двигателя типа AMZ 0900LT08LSB, используемого в двухдвигательном приводе чистовой клети прокатного стана. Моделировались следующие процессы: запуск двигателя в асинхронном режиме и его вход в синхронизм с подачей напряжения возбуждения в момент времени 2 с; ударное приложение нагрузки, соответствующее входу в клеть сляба в момент времени 6 с. Результаты исследований приведены на Рис. 3 и 4.

Хорошо видно, что при недовозбуждении машины переходные процессы момента и скорости сглаживаются, уменьшается их колебательность и перерегулирование (в среднем на 7,3%), однако несколько затягивается переходный процесс (на 6,7%). Таким образом, изменяя ток возбуждения, можно регулировать момент, развиваемый машиной, и, кроме того, можно добиться выравнивания нагрузок между двумя приводными двигателями стана (что должно быть предметом отдельного исследования). При этом также было установлено, что при кратности тока возбуждения около 0,15 машина выходит из синхронизма.

Экспериментально полученная зависимость перерегулирования переходного процесса момента при ступенчатом приложении номинальной нагрузки при номинальной скорости машины приведена на Рис. 5.

Из приведенного графика видно, что уменьшение тока возбуждения машины позволяет снизить перерегулирование момента машины, а, следовательно, и удары в механической части привода. Также при снижении частоты напряжения на статоре

ре машины, а, следовательно, синхронной скорости машины перерегулирование момента уменьшается

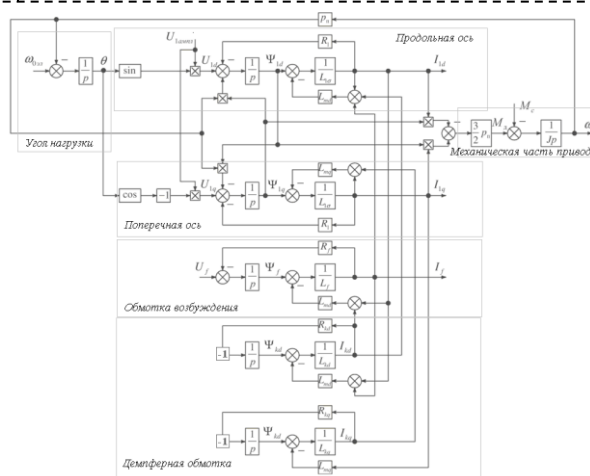


Рис. 2. Структурная схема мощного явнополюсного синхронного двигателя

Fig. 2. Structural scheme of a powerful salient-pole synchronous motor

приблизительно пропорционально снижению частоты, поэтому графики для пониженной скорости вращения не приводятся.

Предлагаемая модель также позволяет анализировать зависимость параметров машины от внутреннего угла нагрузки и получать U-образную характеристику машины, что является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, на основании исследования математической модели электромеханического преобразования энергии в мощном явнополюсном синхронном двигателе установлено, что использование режима недовозбуждения позволяет получать более «мягкие» переходные процессы как для токов машины, так и для ее механических координат. Это позволяет в известной мере управлять моментом машины, что может быть использовано, например, при выравнивании нагрузок в многодвигательном синхронном электроприводе. При этом, разумеется, следует учитывать, что данный режим сопряжен с повышенным потреблением двигателем реактивной энергии из сети, что требует дополнительной ее компенсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск : Техноперспектива, 2006. 363 с.
2. Krause P. C., Wasynczyk O., Sudhoff S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. USA : IEEE, Wiley Interscience, 2002. 631 p.
3. Жужгов Н. В., Буторин Г. В., Ключников А. Т. Исследование режимов работы синхронного двигателя // Автоматизированные системы управления и информационные технологии. 2018. Т. 2. С. 20–27.
4. Баширов М. Г., Юсупова И. Г., Файзуллина Г. Р. Анализ систем возбуждения синхронных двигателей // StudNet. 2021. №6.

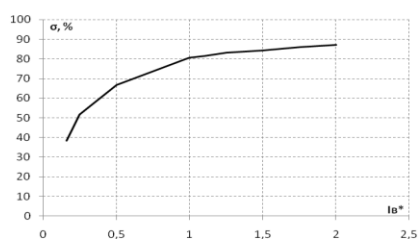


Рис. 5. Зависимость перерегулирования переходного процесса момента при ступенчатом приложении номинальной нагрузки от кратности тока возбуждения машины

Fig. 5. Dependence of overshooting of the torque during stepwise application of the rated load on the multiplicity of the excitation current

5. Mustafakulova G., Toirov O., Mirkhonov U. Principles for Controlling the Excitation of Synchronous Motors of the Compressor Installation // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET). 2020. Vol. 7. Iss. 5. P. 13876–13881. DOI: 10.3103/S1068371214120116.

6. Shewit Tsegaye, Kinde A. Fante. Analysis of Synchronous Machine Excitation Systems // Comparative Study, Energy and Power Engineering. 2018. Vol. 10(12). P. 1492–1496. DOI: 10.5281/zenodo.1130957

7. Волинцев Д. Г. Выбор закона автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019): сборник трудов. 2019. С. 156–159.

8. Жеребцов А. Л., Чуйков В. Ю., Шульпин А. А. Способ управления током возбуждения как средство обеспечения устойчивости работы синхронного двигателя // Вестник ИГЭУ. 2018. №2.

9. Ostroverkhov N., Buryk N. Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). 2020. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.

10. Bianchi N., Carlet P. G., Cinti L., Ortombina L. A. Review about Flux-Weakening Operating Limits and Control Techniques for Synchronous Motor Drives // Energies. 2022. 15(5):1930. DOI: 10.3390/en15051930

11. Корнилов Г. П., Кожевников И. О., Косматов В. И., Храмшин Т. Р., Храмшин Р. Р. Резервы энергосбережения мощных синхронных двигателей металлургических приводов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. №1 (46). С. 41–45.

12. Кузнецов В. А., Кузнецова Е. С., Лузин Д. А., Зайцев Н. С. Основные проблемы двухдвигательного электропривода прокатных станов // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 81–86.

13. Кузнецов В. А., Чураков А. С., Маршев Д. А. Увеличение производительности прокатного стана путем оптимизации синхронного привода ACS 6000 // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 93–99.

14. Seggewiss G., Dai J., Fanslow M. Synchronous Motors on Grinding Mills: The Different Excitation Types and Resulting Performance Characteristics with VFD Control for New or Retrofit Installations // IEEE Industry Applications Magazine. 2015. Vol. 21. No. 6. Pp. 60–67. DOI: 10.1109/MIAS.2014.2345821

15. Lukić M., Ninković P., Stojić D., Milinković M., Veinović S. Static Excitation of the 7.5 MW Synchronous Motor for Compressor Drive // 2019 18th International Symposium INFOTEN-IAHORINA (INFOTEN). 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/INFOTEN.2019.8717764.

16. Гасияров В.Р., Маклакова Е.А. Математическое описание главного электропривода толстолистового стана 5000 горячей прокатки // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2. №3. С. 62–66.

17. Абдулвелеев И. Р., Храмшин Т. Р., Корнилов Г. П., Николаев А. А. Синтез наблюдателя состояния потокосцепления синхронного электропривода прокатного стана // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. Серия «Энергетика». 2016. Том 16. №3. С. 84–92. DOI: 0.14529/power160310

18. Jeong I., Gu B.-G., Kim J., Nam K., Kim Y. Inductance Estimation of Electrically Excited Synchronous Motor via Polynomial Approximations by Least Square Method // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. No. 2. Pp. 1526–1537. DOI: 10.1109/TIA.2014.2339634.

19. Bobtsov A., Bazylev D., Pyrkina A., Aranovskiy S., Ortega R. A Robust Nonlinear Position Observer for Synchronous Motors With Relaxed Excitation Conditions // International Journal of Control. 2017. Vol. 90:4. Pp. 813–824. DOI: 10.1080/00207179.2016.1230229

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Поползин Иван Юрьевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», (654007, Российская Федерация, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), e-mail: eidoline@yandex.ru

Живаго Роман Эдуардович, старший преподаватель кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», (654007, Российская Федерация, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Маршев Дмитрий Александрович, ведущий инженер, ООО «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики СибГИУ», (654041, Российская Федерация, г. Новокузнецк, пр. Бардина, 25)

Заявленный вклад авторов:

Поползин И. Ю. – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Живаго Р. Э. – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-3-9

Ivan Yu. Popolzin^{1,*}, Roman E. Zhivago¹, Dmitri A. Marshev²

¹ Siberian State Industrial University

² Research Institute of Automation and Electromechanics SibSIU

*E-mail: eidoline@yandex.ru

FEATURES OF TRANSIENT PROCESSES IN AN UNDEREXCITED HIGH POWER SYNCHRONOUS MOTOR



Article info

Received:

31 October 2023

Accepted for publication:

30 November 2023

Accepted:

01 December 2023

Published:

21 December 2023

Keywords: synchronous motor, U-shaped characteristic, excitation current, excitation, transients.

Abstract.

High-power synchronous motors are widely used in various fields of industry, including mining and metallurgy - in electric drives of various mechanisms (lifting units, fans, pumps, compressors, rolling mill equipment, etc.). As is known, to minimize the reactive power consumed by a synchronous motor, the excitation current is selected in such a way that the operating point of the machine is located near the inflection point of the U-shaped characteristic. At the same time, the energy efficiency of the machine increases, however, transient processes in the engine (in particular, during asynchronous starting and when a load is applied) are quite "hard", which is due to the damping effect of the magnetic field of the excitation winding and the damper winding at the specified operating position points. This problem is especially relevant for engines connected to the working body of the drive through elastic mechanical connections or through connections with gaps and backlashes, since in this case alternating forces, jerks and impacts occur in mechanical transmissions. In addition, the rigidity of the transient processes of the engine in this case complicates the balancing of loads in dynamic modes in a multi-motor drive. The article conducts a model study of transient processes in a powerful synchronous salient-pole motor under various conditions of its excitation and proposes to use the features of transient processes in an underexcited synchronous motor when regulating speed and torque and constructing load equalization systems.

For citation: Popolzin I.Yu., Zhivago R.E., Marshev D.A. Features of transient processes in an underexcited high power synchronous motor. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 6(170):3-9 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-3-9, EDN: DJMJLK

REFERENCES

1. Firago B.I., Pavlyachik L.B. Reguliruemye elektrivody peremennogo toka [Adjustable AC electric drives]. Minsk: CJSC Tehnoperspektiva; 2006. 363 p.
2. Krause P.C. Analysis of electric machinery and drive systems. IEEE, Wiley Interscience, 2002. 631 p.
3. Zhuzhgov N.V., Butorin G.V., Klyuchnikov A.T. Issledovanie rezhimov raboty sinhronnogo dvigatelya [Study of operating modes of a synchronous motor] Automated control systems and information technologies. 2018; 2.
4. Bashirov M.G., Yusupova I.G., Faizullina G.R. Analiz system vzbuzhdeniya sinhronnykh dvigatelei [Analysis of excitation systems for synchronous motors]. StudNet. 2021; 6.

5. Mustafakulova G., Toirov O., Mirkhonov U. Principles for Controlling the Excitation of Synchronous Motors of the Compressor Installation. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET)*. 2020; 7(5). DOI: 10.3103/S1068371214120116.
6. Shewit Tsegaye, Kinde A. Fante. Analysis of Synchronous Machine Excitation Systems. *Comparative Study, Energy and Power Engineering*. 2018; 10(12). DOI: 10.5281/zenodo.1130957.
7. Volyntsev D.G. Vybora zakona avtomaticheskogo regulirovaniya vzbuzhdeniya sinhronnogo dvigatelya [Selection of the law for automatic control of excitation of a synchronous motor]. *Energy efficiency and energy safety of production processes 2019*. 2019.

8. Zherebtsov A.L., Chuikov V.Yu., Shul'pin A.A. Sposob upravleniya tokom vozbuzhdeniya kak sredstvo obespecheniya ustoychivosti raboty sinhronnogo dvigatelya [A method for controlling the excitation current as a means of ensuring the stability of a synchronous motor]. *Vestnik IGEU*. 2018; 2.

9. Ostroverkhov N., Buryk N. Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.

10. Bianchi N., Carlet P.G., Cinti L., Ortombina L. A. Review about Flux-Weakening Operating Limits and Control Techniques for Synchronous Motor Drives. *Energies*. 2022; 15(5):1930. DOI:10.3390/en15051930

11. Kornilov G.P. [et al.] Rezervy energosberezheniya moshchnykh sinhronnykh dvigatelei metallurgicheskikh privodov [Energy saving reserves of powerful synchronous motors of metallurgical drives]. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020; 1(46).

12. Kuznetsov V.A. [et al.] Osnovnye problem dvuhdvigatel'nogo 'elektroprivoda prokatnykh stanov [The main problems of the twin-motor electric drive of rolling mills]. *High technologies, science and education-2020: current issues, achievements and innovations*. 2020.

13. Kuznetsov V.A., Churakov A.S., Marshev D.A. Uvelichenie proizvoditel'nosti prokatnogo stana putem optimizatsii sinhronnogo privoda ACS 6000 [Increasing the productivity of a rolling mill by optimizing the ACS 6000 synchronous drive]. *Automated electric drive and industrial electronics: proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2016.

14. Seggewiss G., Dai J., Fanslow M. Synchronous Motors on Grinding Mills: The Different Excitation Types and Resulting Performance Characteristics with VFD Control for New or Retrofit Installations. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2015. DOI: 10.1109/MIAS.2014.2345821

15. Lukić M. [et al.] Static Excitation of the 7.5 MW Synchronous Motor for Compressor Drive. *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. 2019. DOI: 10.1109/INFOTEH.2019.8717764.

16. Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Matematicheskoe opisanie glavnogo elektroprivoda tololistovogo stana 5000 goryachei prokatki [Mathematical Description of Main Electric Drive of Hot Plate Mill 5000]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2015; 2(3).

17. Abdulvelev T.R. [et al.] Sintez nablyudatelya sostoyaniya potokostsepleniya sinhronnogo elektroprivoda prokatnogo stana [Synthesis of an observer of the flux linkage state for a synchronous electric drive of a rolling mill]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2016; 16(3). DOI: 0.14529/power160310

18. I. Jeong [et al.] Inductance Estimation of Electrically Excited Synchronous Motor via Polynomial Approximations by Least Square Method. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015; 51(2). DOI: 10.1109/TIA.2014.2339634.

19. Bobtsov A. [et al.] Robust Nonlinear Position Observer for Synchronous Motors With Relaxed Excitation Conditions. *International Journal of Control*. 2017; 90:4. DOI: 10.1080/00207179.2016.1230229

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Ivan Yu. Popolzin^{1,*}, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Siberian State Industrial University, (654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirova 42), e-mail: eidoline@yandex.ru

Roman E. Zhivago¹, Senior Lecturer, Siberian State Industrial University, (654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirova 42),

Dmitri A. Marshev², Lead Engineer, Research Institute of Automation and Electromechanics SibSIU, (654041, Russia, Novokuznetsk, Str. Bardina 25)

Contribution of the authors:

Popolzin I. Y. – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, conclusions, writing a text.

Zhivago R. E. – review of relevant literature, data collection and analysis, writing a text.

Marshev D. A. – setting a research task, collecting and analyzing data, writing a text.

Author have read and approved the final manuscript.

