

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОБЪЕКТОВ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ю.С. Усынин<sup>1</sup>, А.М. Журавлев<sup>1</sup>, И.А. Белых<sup>1</sup>, Е.С. Чупин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

<sup>2</sup>ООО НТЦ «Приводная техника», г. Челябинск

Рассмотрены пути повышения надежности полупроводниковых преобразователей и электроприводов объектов кислородно-конверторного производства. Получены зависимости надежных показателей комплекса «Полупроводниковый преобразователь – двигатель» от запаса мощности. Показано, что в синхронном реактивном электроприводе с импульсно-векторным управлением при резервировании полупроводникового преобразователя удастся значительно повысить надежные показатели системы. Предложена математическая модель комплекса «Импульсно-векторная система управления синхронной реактивной машины независимого возбуждения». Рассмотрены результаты математического моделирования синхронного реактивного электропривода с импульсно-векторным управлением: установлена зависимость удельных показателей электропривода от количества фаз.

*Ключевые слова:* надежность, синхронная реактивная машина независимого возбуждения, эксгаустер, конверторное производство.

В современной металлургии существенно возросла за последние десятилетия значимость кислородно-конверторного производства. Так, по данным [1], количество выплавляемой стали в кислородных конверторах возросло с 431 до 811 млн т в год с 1996 по 2006 г., что составило 65,5 % от суммарного мирового объема металла [2]. В частности, на Южном Урале конверторное производство широко представлено на крупных промышленных предприятиях: Челябинском металлургическом комбинате, Магнитогорском металлургическом комбинате.

При конверторном способе производства стали происходит сильное пылеобразование, обусловленное обильным окислением и испарением железа. Это требует обязательного сооружения при конвертерах сложных и дорогих пылеочистительных установок [3]. Таким образом, роль эксгаустеров и дымососов в конвертерном производстве крайне высока.

Основным требованием, предъявляемым к механизму промышленного дымососа, является надежность. Повышение надежности работы газоочистительной системы способствует увеличению количества годного металла, уменьшению брака и улучшению качества получаемой стали. Существуют технологические механизмы (эксгаустеры кислородных конверторов, печей и т. д.), в которых остановка работы промышленного дымососа приводит к тяжелым последствиям, вплоть до остановки плавки и слива металла из котла конвертора.

По данным опроса специалистов ОАО «ЧМК», отказы эксгаустера на кислородном конверторе случаются с частотой 2 раза в месяц. Причинами остановок в настроенной системе электропривода служат отключение преобразователя частоты по максимальнотокковой защите, а также отказы в системе возбуждения синхронного двигателя.

Анализ режимов работы электропривода эксгаустера показал, что установленная мощность силового электрооборудования превышает расчетную по условиям обеспечения технологического процесса не более чем на 10 %. В этом случае, как показано в [4], вероятность безотказной работы ( $W$ ) составляет не более 90 %. Для сравнения: тот же показатель для объектов атомных станций составляет 99,9 %. В [4] авторы обращают внимание, что для снижения отказов в 3 раза вероятность  $W$  необходимо увечить до 98 %.

С учетом сказанного, повышение надежных показателей системы электропривода эксгаустера является актуальной задачей.

Существует два основных способа повышения надежности любой системы: введение избыточности системы [4]; переход к принципиально новым техническим решениям, отличающимся повышенными надежными показателями. Для системы электропривода в первом случае необходимо выбирать его элементы с наперед заданным запасом по мощности. Во втором случае можно, например, отказаться от традиционной конфигурации схем силовых цепей, использовать  $m$ -фазные независимые источники питания на каждую

фазу, не увеличивать установленную мощность полупроводникового преобразователя выше номинальной, а надежность системы обеспечить за счет использования резервного преобразователя мощностью, равной  $P/m$ , где  $P$  – суммарная установленная мощность электропривода,  $m$  – количество фаз преобразователя.

Дадим анализ возможностей первого способа. С увеличением запаса мощности элементов электропривода (электрической машины и полупроводникового преобразователя) увеличивается и вероятность безотказной работы электропривода  $W$  [4]. На рис. 1 даны расчетные зависимости относительного значения затрат на электрическую машину от величины вероятности безотказной работы электродвигателя  $W$ . За базовое значение цены принималась стоимость электродвигателя номинальной мощности, рассчитанной по условию допустимого нагрева, при этом вероятность безотказной работы электрической машины по условиям проектирования равна 0,9 [5]. В электроприводах металлургических объектов необходимая надежность должна быть не ниже  $W = 0,98$  [4], что требует завышения мощности электропривода на 80 % [4]. При этом в соответствии с кривой 2 (см. рис. 1) цена электродвигателя увеличивается примерно в 1,4 раза.

Кривая 1 проходит ниже зависимости 2 (см. рис. 1), и обусловлено это тем, что в крупных

электрических машинах закладывается больше активных материалов. Рассмотренные кривые (1, 2) построены для случая  $m = 3$ . При числе фаз  $m > 3$  новые зависимости будут совпадать с соответствующими кривыми 1 и 2 (см. рис. 1).

Аналогичным образом были построены зависимости относительных затрат на полупроводниковый преобразователь от вероятности безотказной работы  $W$  (рис. 2), которые качественно совпадают с кривыми рис. 1, но при этом для обеспечения той же  $W = 0,98$  требуется увеличить относительные затраты  $C$ . Наиболее выразительно это проявляется для электроприводов больших мощностей (см. рис. 2, кривая 2). Объясняется это тем, что в суммарной стоимости установленного электрооборудования доля затрат на полупроводниковый преобразователь является существенной [6].

Так как для обеспечения повышенной надежности работы электропривода, например, с  $W = 0,98$ , требуется неоправданное завышение затрат на полупроводниковую часть, то на этапе синтеза целесообразно рассмотреть специальные схемотехнические решения силовых цепей полупроводникового преобразователя [6] и электрической машины [7], при этом электромеханический преобразователь необходимо выбрать с заданным запасом по мощности (см. рис. 1,  $W = 0,98$ ).

В наибольшей степени требованиям надежности отвечают электроприводы с новыми типами

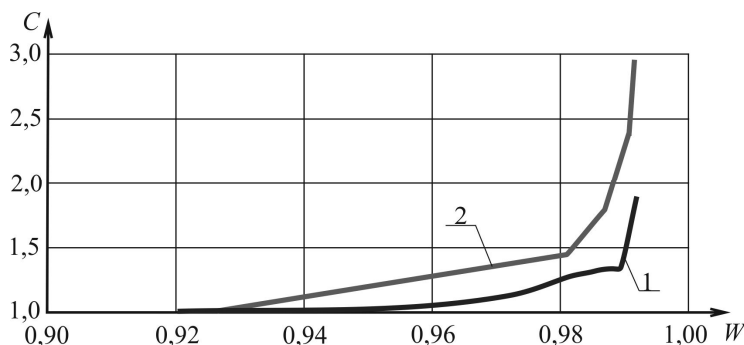


Рис. 1. Зависимость относительных затрат  $C$  на электромеханический преобразователь от вероятности его безотказной работы  $W$  для диапазона мощностей: 1 – 0,18–1,1 кВт; 2 – 1000–2000 кВт

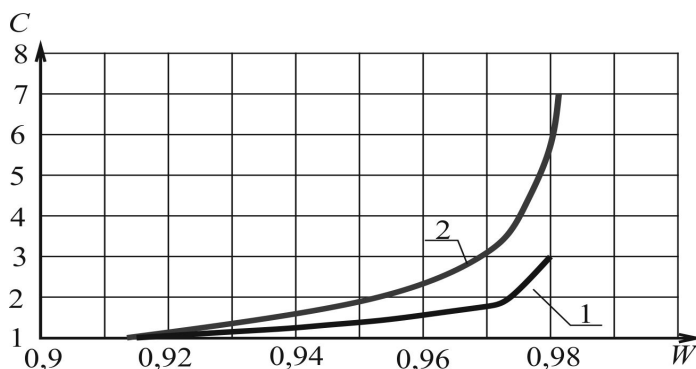


Рис. 2. Зависимость относительных затрат  $C$  на полупроводниковый преобразователь от вероятности его безотказной работы  $W$  для диапазона мощностей: 1 – 0,18–1,1 кВт; 2 – 1000–2000 кВт

конструкций электрических машин, например, с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [8], отличающейся простой конструкции статора и высокой технологичностью изготовления ротора [9]. В исходном случае схема силовых цепей выполняется многофазной с индивидуальными источниками питания [10]. Отказ от индивидуальных источников в пользу более простой схемы приводит к структуре с импульсно-векторным управлением [11]. В этом случае фазные обмотки  $L_1, L_2, L_3$  двигателя  $M$  подключаются к питающей сети, а обмотки  $L_4, L_5, L_6$  – непосредственно на неуправляемый выпрямитель (рис. 3). На схеме рис. 3 количество фаз равно трем  $m = 3$ . В общем случае используется  $m$ -фазный выпрямитель. При отказе одного из плеч диодного моста в работу вводится резерв, установленная мощность которого равна  $P/m$ , где  $P$  – номинальная мощность электропривода.

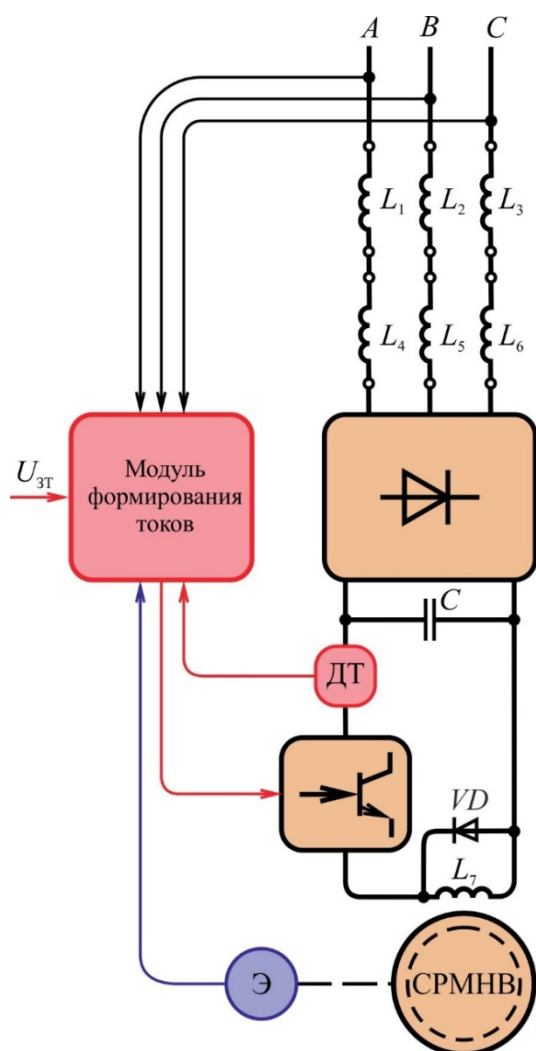


Рис. 3. Пример упрощенной схемы импульсно-векторного управления СРМНВ

Идея работы схемы с импульсно-векторным управлением заключается в формировании управ-

ляющих импульсов на транзисторный блок в функции положения ротора СРМНВ и обобщающего вектора напряжения  $\alpha_C$  так, чтобы он открывался и пропускал ток по обмоткам статора лишь в те отрезки времени, когда взаимное положение полюсов явнополюсного ротора и магнитного поля, создаваемого токами статора, соответствовало двигательному электромагнитному моменту электрической машины.

Математическая модель электропривода состояла из двух блоков. Первый блок, который был реализован в модуле *Ansys Simplorer* [9], представлен в форме дифференциальных уравнений в полных производных и учитывал уравнения баланса напряжений в статорных обмотках с активным сопротивлением  $r$ , а также уравнения Лагранжа для тел, совершающих вращательное движение вокруг оси с угловой скоростью  $\omega$ . Передаточная функция полупроводникового преобразователя каждой из фаз аппроксимировалась аperiodическим звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания [10], учитывающим инерционные свойства микропроцессорного блока. Каждая из фаз статорных обмоток подключалась к питающей сети при условиях, что подан управляющий сигнал на транзистор и выпрямитель допускает протекание тока конкретных фаз электрической машины [11].

Второй блок «Модель магнитной системы» [9] включал в себя уравнения в частных производных, учитывающих распределение магнитных полей в электрической машине и для решения которых использовался метод конечных элементов в вариационной постановке. Расчет дифференциальных уравнений этого блока выполнялся в модуле *Ansys Maxwell*. Результирующий электромагнитный момент, создаваемый двигателем, использовался при расчетах в модуле *Ansys Simplorer* [9].

При моделировании электропривода варьировалось количество фаз  $m$ , на которое выполнялись двигатель и полупроводниковый преобразователь. При расчете момент сопротивления на валу двигателя принимался номинальным. Установлено, что действующее значение тока снижается с увеличением  $m$ , и обусловлено это уменьшением пульсаций электромагнитного момента, а также более полным использованием статорных обмоток по току [11]. Однако увеличение количества фаз  $m$  ведет к увеличению количества вентиля и стоимости полупроводникового преобразователя.

Выбор рациональной системы электропривода состоит в сопоставлении двух схем по критерию минимума стоимости силового электрооборудования [11]. В первом случае по кривым 1 и 2 (см. рис. 1) выполняется расчет стоимости электропривода (электродвигателя и преобразователя частоты) из условия обеспечения заданной вероятности безотказной работы.

Во втором случае для сопоставления может быть выбрана схема с импульсно-векторным уп-



Рис. 4. Зависимость полезной мощности  $P$  многофазных машин в относительных единицах от количества работающих фаз  $m$ ; 1 –  $m$  работающих фаз; 2 –  $m-1$  работающих фаз; 3 –  $m-2$  работающих фаз; 4 –  $m-3$  работающих фаз; 5 –  $m-4$  работающих фаз

равлением. При расчете определяется не только стоимость оборудования, но и находится оптимальное количество фаз  $m$  электрического преобразователя и двигателя. Стоимость электрического преобразователя включает в себя затраты на основной преобразователь, который выбирается номинальной мощности, и резервный модуль мощности  $P/m$ , где  $P$  – номинальная мощность электропривода. При расчете стоимости электрической машины необходимо учитывать не только заданную вероятность безотказной работы  $W$ , но и учесть снижение полезной мощности двигателя в зависимости от выбранного количества фаз  $m$  (рис. 4).

Для электроприводов крупных мощностей (1000 кВт и выше) с непрерывным графиком нагрузки и повышенными требованиями по надежности при выборе рациональной системы ряд традиционных структур электроприводов должен быть дополнен новыми техническими решениями на базе многофазных схем силовых цепей.

Благодаря применению ИВСУ СРМНВ значительно с ( $W = 0,9$  до  $W = 0,98$ ) возрастает надежность электрического преобразователя. Происходит это по нескольким причинам. При применении СРМНВ нет необходимости в возбуждении обмоток ротора машины, и, следовательно, можно отказаться от возбудителя как элемента системы управления, от контактных колец и щеточно-коллекторного контакта. Повышенная механическая прочность ротора снижает вибрации, что положительно сказывается на работе подшипников двигателя. Наконец, наличие лишь одного IGBT-транзистора в схеме силовых цепей преобразователя повышает надежность электропривода.

#### Литература

1. Носов, А.Д. Производство анизотропной трансформаторной стали в кислородно-конвер-

терном цехе ММК / А.Д. Носов // Вестник МГТУ. – 2005. – № 1 (5). – С. 9–12.

2. Лукьянов, С.И. Многодвигательный электропривод тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянов, Н.В. Фомин, А.И. Хлыстов // Труды XV международной научно-технической конференции: Электроприводы переменного тока. – Екатеринбург, 2012. – С. 305–308.

3. Головин, В.В. Опыт внедрения современных электроприводов в ОАО «ММК» / В.В. Головин, А.В. Косенков, В.П. Разворотнев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 149–156.

4. Рипс, Я.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами / Я.А. Рипс, Б.А. Савельев. – М.: Энергия, 1974. – 248 с.

5. ГОСТ 19523–81 Машины электрические вращающиеся от 50 до 355 габарита. Двигатели асинхронные серии 4А трехфазные с короткозамкнутым ротором. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 10 с.

6. Grigoryev, M.A. Specifics of power circuit arrangements of semiconductor converters for power supply to synchronous reluctance machines / M.A. Grigoryev // Russian Electrical Engineering. – 2014. – no. 85(10). – pp. 601–603. DOI: 10.3103/S1068371214100071

7. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // ETZ Archiv. – 1984. – Bd. 6. – P. 135–144.

8. Grigoryev, M.A. Dynamic parameters of active rectifiers / M.A. Grigoryev, A.N. Gorozhankin, S.I. Kinan, E.V. Belousov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – no. 85 (10). – P. 638–640. DOI: 10.3103/S1068371214100083

9. Grigoryev, M.A. A mathematical model of the synchronous reluctance machine with indepen-

dent control along the excitation line / M.A. Grigoryev, S.I. Kinas // *Russian Electrical Engineering*. – 2014. – no. 85 (10). – P. 645–648. DOI: 10.3103/S1068371214100095

10. Usynin, Yu.S. *Electric drive with a field-regulated reluctance machine* / Yu.S. Usynin, M.A. Grigor'ev, A.N. Shishkov // *Russian Electrical Engi-*

*neering*. – 2013. – 84 (3). – P. 149–154. DOI: 10.3103/S1068371213030127

11. Grigoryev, M.A. *A control system for an electric drive with a synchronous reluctance machine with separate excitation* / M.A. Grigoryev // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – no. 84 (10). – P. 560–565. DOI: 10.3103/S1068371213100052

**Усынин Юрий Семенович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

**Журавлев Артем Михайлович**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zhuravlevam@susu.ru.

**Белых Игорь Анатольевич**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

**Чупин Евгений Сергеевич**, инженер, отдел перспективного развития, ООО НТЦ «Приводная техника», г. Челябинск; chupin\_evgeny13@rambler.ru.

Поступила в редакцию 8 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/power160209

## IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS AND ELECTRIC DRIVES OF OXYGEN-STEELMAKING FACILITIES

Yu.S. Usynin<sup>1</sup>, 9191236713@mail.ru,

A.M. Zhuravlev<sup>1</sup>, zhuravlevam@susu.ru,

I.A. Belykh<sup>1</sup>, 9191236713@mail.ru,

E.S. Chupin<sup>2</sup>, chupin\_evgeny13@rambler.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> STC "Drive technology", Chelyabinsk, Russian Federation

The paper deals with ways to improve reliability of semiconductor converters and electric drives of the oxygen-steelmaking facilities. It provides the dependences of reliability of the semiconductor converter – electric motor system on the power margin. It is proved that redundancy of the semiconductor converter in the synchronous reactive drive with the pulse-vector control significantly improves reliability of the system. The authors propose a mathematical model of pulse-vector control of field-regulated reluctance machine. The results of mathematical modeling the synchronous reactive drive with pulse-vector control are represented. They confirm the dependence of specific indicators of the electric drive electric on the number of phases.

*Keywords: reliability; field regulated reluctance machine; gas exhauster; oxygen-steelmaking.*

### References

1. Nosov A.D. [Production of Anisotropic Transformer Steel in the Oxygen-Converter]. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University*. 2010, no. 1 (5), pp. 9–12. (in Russ).
2. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Hlistov A.I. [Multi-Motor Electric Drive Continuous Casting Machine Pinch Rolls]. *Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference: The AC drives*, 2012, pp. 305–308. (in Russ)
3. Golovin, V.V. [Experience of Introduction of Modern Electric Drives in OJSC "MMK"]. *News TSU. Technical Science*, 2010, iss. 3, no. 2, pp. 149–156. (in Russ)

4. Rips J.A., Savelev B.A. [Analysis and Calculation of the Reliability of Electrical Control Systems]. Moscow, Energy Publ., 1974, 248 p.
5. GOST 19523–81 [Rotating Electrical Machines from 50 to 355 Dimensions. Engines Three-Phase Asynchronous, Series 4A Squirrel Cage. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 10 p. (in Russ.)
6. Grigoryev M.A. [Specifics of Power Circuit Arrangements of Semiconductor Converters for Power Supply to Synchronous Reluctance Machines]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 85 (10), pp. 601–603. DOI: 10.3103/S1068371214100071
7. Weh, H. [On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output]. *ETZ Archiv*, 1984, pp. 135–144.
8. Grigoryev M.A., Gorozhankin A.N., Kinas S.I., Belousov E.V. [Dynamic Parameters of Active Rectifiers]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 85 (10), pp. 638–640. DOI: 10.3103/S1068371214100083
9. Grigoryev M.A., Kinas S.I. [A Mathematical Model of the Synchronous Reluctance Machine with Independent Control Along the Excitation Line]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 85 (10), pp. 645–648. DOI: 10.3103/S1068371214100095
10. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Shishkov A.N. [Electric Drive with a Field-Regulated Reluctance Machine]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84 (3), pp. 149–154. DOI: 10.3103/S1068371213030127
11. Grigoryev M.A. [A Control System for an Electric Drive with a Synchronous Reluctance Machine with Separate Excitation]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 84 (10), pp. 560–565. DOI: 10.3103/S1068371213100052

Received 8 April 2016

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Повышение надежности полупроводниковых преобразователей и электроприводов объектов кислородно-конверторного производства / Ю.С. Усынин, А.М. Журавлев, И.А. Белых, Е.С. Чупин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 66–71. DOI: 10.14529/power160209

#### FOR CITATION

Usynin Yu.S., Zhuravlev A.M., Belykh I.A., Chupin E.S. Improvement of Reliability of Semiconductor Converters and Electric Drives of Oxygen-Steelmaking Facilities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 66–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160209