

Снижение торсионных вибраций в приводах установок для выращивания кремния

Е.Д. Дуюнов^{1,2}, Д.А. Дуюнов², Я.О. Теплова³

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²ООО «АС и ПП», г. Москва, Россия

³ООО «АСпромт», г. Москва, Россия

yana.teplova@gmail.com

При выращивании кристаллов кремния существенное влияние на качество кристаллов оказывает стабильность параметров работы установки, включая уровень вибраций. Наибольшую амплитуду имеют торсионные вибрации, возникающие в результате пульсаций вращающего момента.

Предложен метод повышения качества кристаллов кремния с помощью применения в установках для выращивания кристаллов асинхронных двигателей с совмещенными обмотками и так называемого магнитного клина для снижения негативного влияния торсионных вибраций на процесс формирования кристаллов. Применение предложенных решений позволило снизить уровень торсионных вибраций на 56 % по сравнению со стандартным двигателем привода установки. Проведено компьютерное моделирование работы асинхронного двигателя методом конечных элементов.

Теоретические результаты подтверждены испытаниями опытных образцов асинхронных двигателей с совмещенными обмотками.

Ключевые слова: монокристаллический кремний; торсионные вибрации; электрический привод; асинхронный двигатель.

Для цитирования: Дуюнов Е.Д., Дуюнов Д.А., Теплова Я.О. Снижение торсионных вибраций в приводах установок для выращивания кремния // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 499–502. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-499-502

Reducing Torsional Vibrations in Silicon Growing Facilities Drives

E.D. Duyunov^{1,2}, D.A. Duyunov², Ya.O. Teplova³

¹*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

²*«ASiPP» Limited Liability Company, Moscow, Russia*

³*«ASpromt» Limited Liability Company, Moscow, Russia*

yana.teplova@gmail.com

While growing silicon crystals the quality of crystals is significantly affected by the stability of facility parameters, including the levels of vibrations. The torsional vibrations, arising as a result of the rotational moment pulsations, have the largest amplitude.

A method for improving the quality of silicon crystals by using the induction motors with combined windings and so called magnetic wedge to reduce the negative effect of the torsional vibrations on the crystallization process has been proposed. The application of the proposed solutions has allowed a 56% reduction of the torsional vibrations level. The computer simulation of the asynchronous motor by the finite element method has been performed.

The theoretical results have been confirmed by the tests on the samples of induction motors with combined windings.

Keywords: monocrystalline silicon; torsional vibrations; electric drive; induction motor.

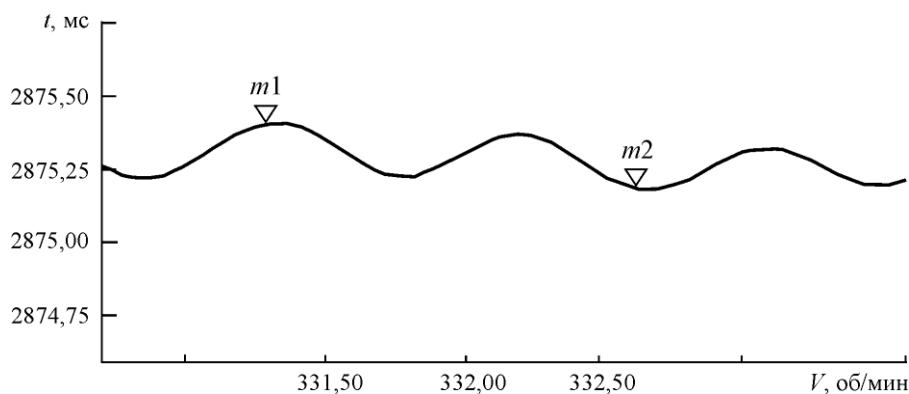
For citation: Duyunov E.D., Duyunov D.A., Teplova Ya.O. Reducing Torsional Vibrations in Silicon Growing Facilities Drives // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 499–502. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-499-502

При выращивании кристаллов (слитков) кремния методами Чохральского и бестигельной зонной плавки существенное влияние на качество кремния оказывает, в частности, стабильность параметров работы установок для выращивания монокристаллического кремния, включая уровни вибраций [1]. Наибольшую амплитуду имеют торсионные вибрации, возникающие в результате пульсаций вращающего момента и способные оказывать существенное воздействие на структуру и распределение примесей и включений. Для их уменьшения предложено использование в электрических приводах установок асинхронных электрических двигателей с так называемыми совмещенными обмотками, конструктивно отличающимися от обмоток стандартных асинхронных и шаговых двигателей [2 – 7].

Проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов [8 – 10] процесса работы асинхронного двигателя АДМ100L2 мощностью 5,5 кВт с синхронной частотой вращения 3000 об/мин и напряжением питания 220/380 В с классической и совмещенной обмоткой для устоявшегося режима работы привода установки начиная с частоты вращения 2940 об/мин с временным шагом 10^{-5} с.

Выполнен расчет момента инерции для слитка диаметром 300 мм и длиной 1000 мм. Момент инерции составляет $1,852 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, частота вращения – 150 об/мин, коэффициент редукции – 20 : 1. Суммарный момент инерции системы слиток – ротор принят равным $0,0987 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ для двумерной

постановки задачи. Частота вращения в установившемся режиме 2875 об/мин, что свидетельствует о работе двигателя в режиме повышенной нагрузки. Отмечены вибрации с амплитудой 0,22 об/мин и периодом 0,65 мс (точки $m1$ и $m2$ на рисунке). При применении стандартного двигателя возникают торсионные ускорения с амплитудой $0,31 \text{ м/с}^2$, превышающие допустимые предельные ускорения для земных условий выращивания слитков и на четыре порядка превосходящие предельные значения для условий микрогравитации. Для уменьшения амплитуды колебаний вращающего момента требуется снизить индукцию в магнитопроводе двигателя привода. Для этого в исследуемом двигателе количество витков в каждой катушке увеличено на 1,25, в результате чего число витков в катушках «звезды» становится равным 150, а в катушках «треугольника» – 260.



Временная зависимость частоты вращения слитка на коротком промежутке времени
The crystal rotation frequency dependence on time in a short time interval

Получены временные зависимости вращающего момента, частоты вращения вала двигателя и торсионных микроускорений для исследуемого двигателя АДМ100L2 с классическими и совмещенными обмотками. Установлено, что снижение уровня вибраций при замене обмоток на совмещенные составляет 27,8 %. Достичь таких результатов для стандартного двигателя не представляется возможным ввиду того, что при понижении индукции резко уменьшается пусковой момент и возрастает кратность пусковых токов, что может привести к невозможности запуска двигателя и выходу его из строя. В процессе работы возникают значительные искажения формы распределения магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре двигателя с совмещенными обмотками. Это обусловлено особенностями конструкции пакета статора. Для уменьшения искажений предложено применение так называемого магнитного клина из композитного материала с магнитной проницаемостью, близкой по сравнению с атмосферным воздухом к магнитной проницаемости электротехнической стали.

Таким образом, применение совмещенных обмоток и магнитного клина в двигателе АДМ100L2 позволило в совокупности снизить уровень торсионных вибраций на 56%, что обусловило снижение плотности дислокаций и повышение равномерности распределения примесей в кремнии. Эффективность использования совмещенных обмоток подтверждается результатами практических испытаний на специализированных стендах, а также опытно-промышленной эксплуатацией [2–4]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности повышения эффективности технологических процессов изготовления кремниевых пластин для нужд электронной промышленности путем повышения качества кристаллов и сокращения брака.

Литература

1. Критская Т.В., Скачков В.А. Влияние технологических факторов процесса выращивания по методу Чохральского на получение однородных монокристаллов кремния // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2009. – №3. – С.17–20.

2. **Дуюнов Д.А., Дуюнов Е.Д., Агриков Ю.М.** Обмотка асинхронного двигателя // Патент России № 111723. 2011. Бюл. № 35.
3. Малошумный энергоэффективный электропривод / **Ю.М. Агриков, Д.А. Дуюнов, Е.Д. Дуюнов и др.** // Патент России № 2568672. 2015. Бюл. № 32.
4. Малошумный асинхронный двигатель / **Ю.М. Агриков, Д.А. Дуюнов, В.Л. Блинов и др.** // Патент России № 1507824. 2015. Бюл. № 6.
5. **Дуюнов Д.А.** Асинхронный двигатель с совмещенными обмотками // Энергосовет. – 2013. – № 2 (27). – С. 19–24.
6. **Cistelean M.V., Ferreira F.J.T.E., Popescu M.** Adjustable flux three-phase AC machines with combined multiple-step star-delta connections // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 2010. – Vol. 25. – No. 2. – P. 348–355.
7. **Kasten H., Hofmann W.** Electrical machines with higher efficiency through combined star-delta windings // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – 2011. – P. 1374–1379.
8. **Сильвестр П., Феррари Р.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
9. **Ковалев О.Ф.** Расчет магнитных полей комбинированным методом конечных элементов и вторичных источников // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 4. – С. 14–16.
10. **Конonenко А.В.** Особенности расчета магнитного поля в асинхронных двигателях обращенной конструкции // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ – 2005: тез. Всерос. конференции. – Воронеж: ВГТУ, 2005. – С. 17–18.

Поступило 21.03.2017 г.; принято к публикации 13.06.2017 г.

Дуюнов Евгений Дмитриевич – студент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), младший научный сотрудник ООО «АС и ПП» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, д. 10), dyunov@yandex.ru

Дуюнов Дмитрий Александрович – руководитель проектов ООО «АС и ПП» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, д.10), dyunovda@rambler.ru

Теплова Яна Олеговна – кандидат технических наук, доцент, инженер ООО «АСпромт» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, д.10), yana.teplova@gmail.com

References

1. Kritskaya T.V., Skachkov V.A. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov processa vyrashchivaniya po metodu Czochralskogo na poluchenie odnorodnykh monokristallov kremniya [The influence of Czochralski growing process technological factors influence on homogeneous silicon single crystals formation]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Materialy ehlektronnoy tekhniki – The news of Higher Educational Institutions. Materials for electronic engineering*, 2009, no. 3, pp. 17–20. (in Russian).
2. Duyunov D.A., Duyunov E.D., Agrikov YU.M. *Obmotka asinhronnogo dvigatelya* [Induction Motor Winding]. Patent 111723 RF, no. МПК7 H 02 K 3/28, H 02 K 17/14, 2011. (in Russian).
3. Agrikov YU.M., Duyunov D.A., Duyunov E.D., Blinov V.L., Yakovlev I.N. *Maloshumnyj energoehffektivnyj elektroprivod* [Low-Noise Energy-Efficient Electric Drive]. Patent 2568672 RF, no. МПК7 H 02 K 17/12, H 02 K, 2015. (in Russian).
4. Agrikov Yu.M., Duyunov D.A., Blinov V.L., Yakovlev I.N. Duyunov E.D. *Maloshumnyj asinhronnyj dvigatel'* [Low-Noise Induction Motor]. Patent 1507824 RF, no. МПК7 B 60 K 17/00, 2015. (in Russian).
5. Duyunov D.A. *Asinhronnyj dvigatel' s sovmeshchennymi obmotkami* [Induction motor with combined windings]. *Energosovet – Energosovet*, 2013, no. 2 (27). (in Russian).
6. Cistelean M.V., Ferreira F. J. T. E., Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Connections. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 348–355.

Submitted 21.03.2017; accepted 13.06.2017.

Duyunov Eugeny D. – student of the Integrated Electronics Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), junior researcher, «AS & PP» Limited Liability Company (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Panfilovskiy pr., 10), dyunov@yandex.ru

Duyunov Dmitry A. – project manager, «AS & PP» Limited Liability Company (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Panfilovskiy pr., 10), dyunovda@rambler.ru

Teplova Yana O. – PhD of technical sciences, associate professor, engineer, «ASpromt» Limited Liability Company (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Panfilovskiy pr., 10), yana.teplova@gmail.com